



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C. ®**

***Simulación Numérica y Verificación
Experimental de los Procesos de
Esmerilado de Componentes Ópticas***

Tesis Presentada por:

Ing. Luis Carlos Álvarez Núñez

Como requisito para obtener el grado de

Maestro en Ciencias (Óptica)

León, Gto. México. Octubre 2003

DEDICATORIAS

*Deseo agradecer a mis padres **Prof. Jose Luis Alvarez** y **Maria Guadalupe Núñez** por el gran apoyo que me dieron para cumplir este sueño llamado maestría y por todas sus palabras de aliento en los momentos más difíciles y enseñarme que en la vida aun los retos más difíciles pueden ser vencidos.*

*A mis hermanos por comprender mi ausencia en la casa **Juan, Dora, Lisa SAN** y **Janid**.
Gracias.*

*Y una muy especial dedicatoria a mi novia la **Dra. Dora Dalina de la Torre Arellano** por comprender que los días que no estuve con ella hoy fueron para estar juntos mañana y querer compartir conmigo este gran sueño de estar juntos por siempre ($1+1=1 \leftrightarrow \infty$).*

GRACIAS

Ing. Luis Carlos Álvarez Núñez

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ricardo B. Flores Hernández por la supervisión de este trabajo de tesis así mismo por su valiosa ayuda y más que nada por su gran paciencia y por todos sus consejos y comentarios acertados a lo largo de este trabajo de tesis.

Así mismo deseo agradecer a los Doctores Dr. Daniel Malacara y Dr. Alejandro Cornejo por los comentarios sobre esta tesis y su valiosa colaboración como sinodales.

A los todos los investigadores que tuve el privilegio de conocer en las aulas en especial al Dr. Gonzalo Paez y la Dra. Cristina Solano.

Al Centro de Investigaciones en Óptica CIO, por todo lo recibido, conocimientos y enseñanzas y mostrarme que existe un océano de conocimientos y que lo aprendido hoy es solo una parte del mañana.

Al Departamento de Formación Académica DFA en especial a la Lic. Guillermina Muñiz y la Lic. Laura González.

A nuestros compañeros de taller óptico por toda su ayuda durante la etapa de experimentación.

Así mismo, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca crédito No. 166062 que me otorgo durante el tiempo que estuve realizando mis estudios de maestría sin la cual no hubiese sido posible este gran reto.

A mis amigos y compañeros

coco, maru, matias, lalo, jaime , angel y arturo

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Distribución de la tesis.....	2
1.1.1 Aplicaciones de las barras cilíndricas de caras plano-paralelas.....	4
1.2 Antecedentes.....	4
1.2.1 Generadoras de barras cilíndricas.....	4
1.2.2 Herramientas esmeriladoras-pulidoras.....	9
1.2.3 Ecuaciones de desgaste.....	14
1.2.4 Simulaciones numéricas.....	19
REFERENCIAS.....	24

CAPITULO 2

DISEÑO DE LAS MAQUINAS Y LAS HERRAMIENTAS

2.1 Diseño de una generadora de barras cilíndricas.....	26
2.1.1 Mecanismo de bancada corta (y).....	29
2.1.2 Mecanismo de bancada larga (x).....	31
2.1.3 Mecanismo de sujeción y giro de las barras.....	32
2.2 Diseño de la herramienta pulidora de caras plano-paralelas.....	34
2.2.1 Selección de la simetría.....	34
2.3 Distribución hexagonal de las piezas de vidrio.....	37
2.4 Distribución de fuerzas.....	39
2.5 Rectificación de la herramienta.....	41
2.6 Pulido de las herramientas esmeriladoras-pulidoras.....	43
REFERENCIAS.....	49

CAPITULO 3

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DESGASTE ABRASIVO

3.1 Ecuaciones de la simulación del proceso de desgaste abrasivo.....	50
3.1.1 Máquina generadora-pulidora universal, su descripción.....	51
3.1.2 Ecuaciones de las componentes de velocidades relativas.....	54
3.1.2.1 Calculo de la primer componente de velocidad relativa.....	55
3.1.2.2 Calculo de la segunda componente de velocidad relativa....	58
3.1.2.3 Calculo de la tercer componente de velocidad relativa.....	62
3.2 Condiciones a la frontera en el proceso de desgaste.....	63
3.3 Dinámica de la rotación del disco libre.....	64
3.4 Suma vectorial de las velocidades relativas.....	65
3.5 Área de contacto entre el disco superior y el disco inferior.....	66
3.6 Ecuación de desgaste.....	68
REFERENCIAS.....	69

CAPITULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO ABRASIVO.

4.1 Preparación de la herramienta.....	70
4.2 Proceso de esmerilado.....	73
4.3 Ajustes iniciales en la máquina esmeriladora.....	83
4.4 Sensor de velocidad.....	84
4.5 Resultados de la etapa experimental.....	90
Experimento 1 Condiciones del experimento, Q = 50 micras.....	93
Etapa 1.1 Q = 25 micras T = 15 min.....	94
Etapa 1.2 Q = 15 micras T = 50 min.....	97
Etapa 1.3 Q = 9 micras T = 60 min.....	101

Experimento 2	Condiciones del experimento, Q = 0.3 micras.....		105
Etapa 2.1	Q = 25 micras	T = 15 min.....	105
Etapa 2.2	Q = 15 micras	T = 50 min.....	109
Etapa 2.3	Q = 9 micras	T = 60 min.....	112
Experimento 3	Condiciones del experimento, Q = 15 micras		116
Etapa 3.1	Q = 25 micras	T = 15 min.....	116
Etapa 3.2	Q = 15 micras	T = 50 min.....	120
Etapa 3.3	Q = 9 micras	T = 60 min.....	123
4.6 Etapa de pulido.....			127
4.6.1 Herramienta de poliuretano.....			127
4.6.2 Preparación de la herramienta de chapopote.....			129
REFERENCIAS.....			133

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 Análisis de resultados en el proceso de esmerilado.....	134
5.2 Análisis de resultados en el proceso de pulido.....	138
5.3 Estimación de desgaste usando nuestras ecuaciones de simulación.....	139
REFERENCIAS.....	144

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

6.1 Conclusiones.....	145
6.2 Trabajos a futuro.....	149
REFERENCIAS.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Fig. 1.1 Torno mecánico.....	5
Fig. 1.2 Máquina generadora de barras cilíndricas.....	6
Fig. 1.3 Discos de abrasivo.....	6
Fig. 1.4 esmerilado de las orillas.....	7
Fig. 1.5 Desgaste manual.....	8
Fig. 1.6 Preformas para generar barras cilíndricas.....	8
Fig. 1.7 Anillo concéntrico.....	9
Fig. 1.8 Soportes alrededor de la barra de vidrio.....	10
Fig. 1.9 Barra de vidrio con ángulo de Brewster.....	10
Fig. 1.10 (a) barra de vidrio dentro del bloque metálico, (b) abrazadera de plástico.....	11
Fig. 1.11 Ajuste de la barra dentro del bloque metálico.....	12
Fig. 1.12 Carrusel de barras y la forma de ajustar los tornillos de ajuste de paralelismo.....	12
Fig. 1.13 Herramienta de precisión.....	13
Fig. 1.14 Pulido de una barra láser con herramienta de alta precisión.....	14
Fig. 1.15 Bloque para corrección de superficie.....	14
Fig. 1.16 Velocidad lineal.....	21
Fig. 1.17 Proceso físico de desgaste en obleas de silicio.....	22
Fig. 1.18 Modelo matemático de velocidades.....	22

Capítulo 2

Fig. 2.1 Máquina fresadora.....	26
Fig. 2.2 Esquema de la máquina generadora de cilindros de vidrio magnetoóptico.....	28
Fig. 2.3 Arquitectura interna de la caja de reducción (R3 en Fig. 2.2)	29
Fig. 2.4 Ensamble (el motor de pasos esta dentro de la caja de engranes)	30

Fig. 2.5 Arquitectura interna para la etapa de reducción bancada larga vaivén.....	32
Fig. 2.6 Mecanismo síncrono del giro de barras.....	32
Fig. 2.7 Etapa de reducción , giro de barras $\frac{1}{2}$ (para una parte)	33
Fig. 2.8 Vista superior de la herramienta esmeriladora-pulidora.....	34
Fig. 2.9 Vista inferior de la herramienta esmeriladora-pulidora.....	35
Fig. 2.10 Perforaciones de 3 mm y de 5 mm de diámetro.....	35
Fig. 2.11 perforaciones para las barras y posiciones de los dos tipos de vidrio de apoyo.....	36
Fig. 2.12 Soporte para las barras de vidrio.....	36
Fig. 2.13 Detalle de los dos tipos de apoyo.....	37
Fig. 2.14 Colocación de los vidrios de soporte.....	37
Fig. 2.15 Distribución hexagonal.....	38
Fig. 2.16 Distribución hexagonal sobrepuesta en la herramienta.....	38
Fig. 2.17 (a) Distribución trapezoidal.....	40
Fig. 2.17 (b) Sección transversal.....	40
Fig. 2.18 Esmerilado de la cara superior de la herramienta.....	42
Fig. 2.19 Superficie de la cara inferior ya esmerilada.....	42
Fig. 2.20 Franjas de interferencia de la superficie de la herramienta pulidora.....	43
Fig. 2.21 Posiciones de cada elemento en arreglo hexagonal.....	44
Fig. 2.22 Superficie final de la herramienta esmeriladora-pulidora.....	44
Fig. 2.23 Vista de la cara inferior de las dos herramientas esmeriladoras-pulidoras.....	45

Capítulo 3

Fig. 3.1 Maquina esmeriladora Strasbaugh modelo 6Y-1.....	51
Fig. 3.2 Vista superior de la maquina esmeriladora.....	52
Fig. 3.3 Coordenadas polares de la maquina esmeriladora.....	53
Fig. 3.4 Sistema de velocidades de la maquina esmeriladora.....	54
Fig. 3.5 Componentes de velocidad relativa V_o	55
Fig. 3.6 Componentes auxiliares de proyección.....	56
Fig. 3.7 Componentes de velocidad relativa V_1	58
Fig 3.8 Componentes de la velocidad relativa V_1	59
Fig 3.9 Componentes auxiliares de proyeccion.....	60

Fig. 3.10 Componentes relativas de velocidad V_2	62
Fig. 3.11 Condiciones a la frontera.....	63
Fig. 3.12 Relación entre el diámetro de la herramienta esmeriladora- pulidora y el plato inferior (herramienta).....	64
Fig. 3.13 Suma de componentes de velocidad relativa.	66
Fig. 3.14 Área de contacto entre dos círculos.....	66

Capítulo 4

Fig.4.1 Protección de las perforaciones.....	70
Fig. 4.2 Colocación de los vidrios.....	71
Fig. 4.3 Horno de fusión con cera blanda.....	71
Fig. 4.4 Rectificación de las piezas en la maquina Blanchard.....	72
Fig. 4.5 Relación de alturas entre los vidrios en función de la superficie inferior de la herramienta.....	72
Fig. 4.6 Piezas rectificadas respecto al un plano de referencia de la maquina Blanchard.....	73
Fig. 4.7 Planos de referencia en la herramienta esmeriladora-pulidora.....	73
Fig. 4.8 Forma de desgaste entre dos discos en contacto.....	74
Fig. 4.9 Vista lateral del ajuste de carrera normal.....	75
Fig. 4.10 Ajuste de carrera normal.....	76
Fig. 4.11 Trayectoria de un punto de la pieza de vidrio sobre el disco inferior.....	76
Fig. 4.12 Topografía de desgaste del disco superior a carrera normal.....	77
Fig. 4.13 Vista lateral ajuste a carrera corta.....	77
Fig. 4.14 Superficie final con ajuste a carrera corta.....	78
Fig. 4.15 Vista superior ajuste de carrera corta.....	78
Fig. 4.16 Trayectoria de un punto del disco superior sobre el disco inferior a carrera corta.....	79
Fig. 4.17 Topografía de desgaste del disco superior a carrera corta.....	79
Fig. 4.18 Vista lateral del ajuste a carrera larga.....	80
Fig. 4.19 Superficie final con ajuste a carrera larga.....	80
Fig. 4.20 Trazos de un punto del disco superior sobre el disco inferior con ajustes de carrera larga.....	80
Fig. 4.21 Topografía de desgaste del disco superior a carrera larga.....	81

Fig. 4.22 Trayectoria del vidrio cuando la frecuencia del brazo de oscilación es igual a la frecuencia de rotación del disco inferior.....	82
Fig. 4.23 Desgaste cuando la frecuencia del brazo de oscilación es el doble que el del disco inferior (superficie astigmática)	82
Fig. 4.24 Patrón de la trayectoria del vidrio cuando la velocidad del brazo de oscilación es el triple que la velocidad del disco inferior.....	83
Fig. 4.25 Sensor Óptico usando el mecanismo de un Mouse.....	85
Fig. 4.26 Sensor mediante un pequeño motor de DC.....	85
Fig. 4.27 Tarjeta de adquisición de datos.....	86
Fig. 4.28 Sistema de adquisición de datos.....	86
Fig. 4.29 Experimento. Velocidad angular del disco superior con 25 micras, Carrera normal.....	87
Fig. 4.30 Simulación numérica. Velocidad del disco superior con esmerila de 25 micras, carrera normal.	87

Experimento 1

Fig. 4.31 Experimento. Velocidad angular del disco superior con 15 micras, Carrera normal.....	88
Fig. 4.32 Simulación numérica. Velocidad angular del disco inferior con abrasivo de 15 micras, carrera normal.....	88
Fig. 4.33 Experimento. Velocidad angular del disco superior con 9 micras, Carrera normal.....	89
Fig. 4.34 Simulación numérica. Velocidad angular del disco superior con abrasivo de 9 micras, carrera normal.....	89
Fig. 4.35 Medición de desgaste relativo de cada vidrio.....	90
Fig. 4.36 Medición de desgaste relativo (entre vidrios contiguos).	90
Fig. 4.37 Medición de desgaste real de cada vidrio, respecto al plano de la herramienta.....	91
Fig. 4.38 Topografía de la superficie antes del proceso de esmerilado.....	92
Fig. 4.39 Desgaste abrasivo con grano de 25 micras.....	94
Fig. 4.40 Promedio de desgastes para grano abrasivo de 25 micras.....	95
Fig. 4.41 Relación de pendientes en el proceso de desgaste abrasivo.....	95

Fig. 4.42 Grafica de desgaste abrasivo con $Q = 25$ micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo fijo en la máquina generadora de planos Blanchard con $q = 50$ micras)	96
Fig. 4.43 Desgaste con abrasivo $Q = 15$ micras, $q = 25$ micras.....	98
Fig. 4.44 Valores promedio de desgaste, carrera normal abrasivo $Q = 15$ micras, anterior $q = 25$ micras.....	98
Fig. 4.45 Velocidades de desgaste en el proceso de desgaste abrasivo, Carrera normal, abrasivo $Q = 15$ micras, anterior $q = 25$ micras.....	99
Fig. 4.46 Grafica de desgaste abrasivo con 15 micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo de 25 micras)	100
Fig. 4.47 Desgaste con abrasivo $Q = 9$ micras, anterior $q = 15$ micras.....	101
Fig. 4.48 Valores promedio de desgaste, abrasivo $Q = 9$ micras, anterior $q = 15$ micras.....	102
Fig. 4.49 Velocidades del proceso de desgaste, abrasivo $Q = 9$ micras, anterior $q = 15$ micras.....	102
Fig. 4.50 Curva de desgaste real comparada con la curva de desgaste simulada. Abrasivo actual $Q = 9$ micras, anterior $q = 15$ micras.....	103
Fig. 4.51 Curva de desgaste abrasivo durante todo el Experimento 1.....	104
Fig. 4.52 Rapidez de desgaste en función del tamaño de grano y de las condiciones iniciales de cada etapa, durante el Experimento 1.....	104

Experimento 2

Fig. 4.53 Grafica de desgaste abrasivo usando una superficie anterior pulida Abrasivo $Q = 25$ micras, anterior $q = 0.3$ micras.....	105
Fig. 4.54 Valor promedio de desgaste, carrera normal. Abrasivo $Q = 25$ micras, anterior $q = 0.3$ micras.....	106
Fig. 4.55 Rapidez del proceso de desgaste abrasivo, carrera normal. Abrasivo $Q = 25$ micras, anterior $q = 0.3$ micras.....	107
Fig. 4.56 Curva de desgaste real comparada con la curva de desgaste simulada. Abrasivo $Q = 25$ micras, anterior $q = 0.3$ micras.....	108
Fig. 4.57 Desgaste abrasivo, carrera normal. Abrasivo $Q = 15$ micras, anterior $q = 25$ micras.....	109

Fig. 4.58 Valor promedio de desgaste, carrera normal.	
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras.....	110
Fig. 4.59 Rapidez del proceso de desgaste abrasivo, carrera normal.	
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras.....	110
Fig. 4.60 Grafica de desgaste abrasivo con 15 micras	
(superficie inicial fue tratada con abrasivo de 25 micras)	111
Fig. 4.61 Desgaste abrasivo con grano de 9 micras, carrera normal.	
Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.....	112
Fig. 4.62 Valor promedio de desgaste, carrera normal.	
Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.....	113
Fig. 4.63 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal.	
Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.	113
Fig. 4.64 Gráfica de desgaste abrasivo con 9 micras	
(superficie inicial fue tratada con abrasivo de 15 micras)	114
Fig. 4.65 Curva de desgaste abrasivo durante todo el Experimento 2.....	115
Fig. 4.66 Rapidez de desgaste de las etapas de esmerilado, Experimento 2.....	115

Experimento 3

Fig. 4.67 Desgaste abrasivo con grano de 25 micras	
(la etapa anterior fue esmerilada con grano de 15 micras)	116
Fig. 4.68 Valor promedio de desgaste, carrera normal.	
Abrasivo Q = 25 micras, anterior q = 15 micras.	117
Fig. 4.69 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal.	
Abrasivo Q = 25 micras, anterior q = 15 micras.	118
Fig. 4.70 Grafica de desgaste abrasivo con 25 micras	
(superficie inicial fue tratada con abrasivo de 15 micras)	119
Fig. 4.71 Desgaste abrasivo con grano de 15 micras	
(la etapa anterior se uso 25 micras)	120
Fig. 4.72 Valor promedio de desgaste, carrera normal.	
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras.	121
Fig. 4.73 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal.	
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras.....	121
Fig. 4.74 Grafica de desgaste abrasivo con 15 micras	

(superficie inicial fue tratada con abrasivo de 25 micras)	122
Fig. 4.75 Desgaste abrasivo con grano de 9 micras (la etapa anterior se uso 15 micras)	123
Fig. 4.76 Valor promedio de desgaste, carrera normal. Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.	123
Fig. 4.77 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal. Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.	124
Fig. 4.78 Grafica de desgaste abrasivo con 9 micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo de 15 micras)	125
Fig. 4.79 Curva de desgaste abrasivo durante todo el proceso del Experimento 3.....	126
Fig. 4.80 Rapidez de desgaste de las etapas de esmerilado del Experimento 3.....	126

Etapa de Pulido

Fig. 4.81 Herramienta de poliuretano.....	127
Fig. 4.82 Interferograma del pulido con herramienta de poliuretano.....	127
Fig. 4.83 Efecto de borde caído.....	128.
Fig. 4.84 herramienta de chapopote.....	129
Fig. 4.85. Herramienta sobre el plano de referencia.....	129
Fig. 4.86 Aplicación de fuerza a la herramienta.....	130
Fig. 4.87 Pulido de las piezas de vidrio con herramienta de chapopote.	131
Fig. 4.88 Interferograma de la superficie con herramienta de chapopote.....	131
Fig. 4.89 Relación de desgaste acumulado en función del grano de abrasivo usado anteriormente.	132

Capitulo 5

Fig. 5.1 Tabla de desgastes en función del tiempo de esmerilado.....	136
Fig. 5.2 Proceso abrasivo de una superficie óptica.....	139

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevos mecanismos para generar superficies ópticas siempre a estado en constante avance tecnológico. Se requiere que los procesos de manufactura de componentes ópticas estén siempre a la vanguardia tecnológica para un mercado cada vez más exigente.

Los procesos de automatización de componentes ópticas están a la orden del día, continuamente se requieren componentes más precisas con un mínimo de desperdicio y un costo muy bajo. Existen en el mercado infinidad de máquinas generadoras de superficies ópticas, de igual forma los procesos de esmerilado y pulido de superficies ópticas son muy variados.

Dentro de la manufactura de componentes ópticas, las barras de vidrio cilíndricas requieren de un tratamiento especial. Estas componentes ópticas son muy usadas en láseres de estado sólido y en otros instrumentos ópticos, como son los sacarímetros polarimétricos por efecto de Faraday. El proyecto Binacional México-Cuba apoyado por CONACYT, consistente en el desarrollo de este tipo de instrumentos, es el que motivó el desarrollo de la presente Tesis de Maestría en Óptica. El propósito fundamental de esta tesis, fue el desarrollar la tecnología necesaria para generar, esmerilar y pulir barras de vidrio cilíndricas con extremos plano-paralelos, para sistemas sacarímetros polarímetros.

El vidrio magneto-óptico usado en estos sistemas es muy costoso, por lo cual es imprescindible controlar el proceso de desgaste en el vidrio, buscando la máxima economía de estos materiales. Las ecuaciones de desgaste para procesos abrasivos son muy usadas para determinar el desgaste sufrido en la pieza de trabajo, por lo que en esta tesis se modeló matemáticamente el efecto de desgaste abrasivo que ocurre en las etapas de esmerilado con una máquina tradicional (marca Strasbaugh), ahora es posible predecir tanto el comportamiento de desgaste lineal como la topografía final de la superficie esmerilada en función de las variables de trabajo y los ajustes mecánicos de la máquina esmeriladora.

1.1 Distribución de la tesis

Este trabajo de tesis consta de los siguientes capítulos:

En el capítulo 1 se da una breve introducción a los principios de operación de las máquinas generadoras de barras cilíndricas y de las máquinas y técnicas de pulido de los extremos de esas barras de vidrio. Además se hace un análisis de las ecuaciones de simulación de los procesos de esmerilado de superficies ópticas propuestos por diversos autores.

En el capítulo 2 se explica el diseño de la máquina generadora de barras cilíndricas propuesta para este proyecto y sus características y ventajas respecto a otras del mismo tipo. Además se hace un análisis extenso del diseño de la herramienta esmeriladora-pulidora de barras de vidrio cilíndricas que se diseñó para este proyecto y cuyo empleo se investiga en esta tesis.

En el capítulo 3 se exponen las características de la máquina esmeriladora tradicional Strasbaugh y sus parámetros mecánicos. Además se presenta la teoría del modelo matemático de la velocidad relativa entre dos puntos de las herramientas en contacto, desarrollada en esta tesis y que nos permitió obtener la ecuación de desgaste abrasivo en función de los parámetros de velocidad, presión, tiempo, etc.

En el capítulo 4 se presentan los resultados experimentales del proceso de desgaste y se comparan con los resultados de nuestra simulación.

En el capítulo 5 se analizan los resultados experimentales del proceso de desgaste desde un punto de vista microscópico

Finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones de este trabajo de tesis y las recomendaciones para los trabajos a futuro.

Este trabajo de tesis no hubiese sido posible sin la valiosa colaboración de distintas personas que colaboraron en el diseño, construcción y pruebas de las herramientas, así como en las etapas de esmerilado y pulido ópticos.

Diseño mecánico: Armando Ruiz M.

Octavio Pompa C.

Taller mecánico: Marco A. Troncoso T.

Luis Martínez E.

Jesús Ortiz R.

Jorge Ruiz N.

Taller óptico José Luis Flores A.

José de la luz Hurtado O.

José de la Luz Martínez N.

Alfredo Hernández V.

1.1.1 Aplicaciones de las barras cilíndricas de caras plano-paralelas

Los nuevos avances en la tecnología de láseres han hecho que la tecnología para generar superficies ópticas haya tenido que cambiar al mismo ritmo que la necesidad de encontrar nuevos métodos para fabricar nuevas componentes ópticas para nuevos láseres.

La tecnología en láseres de estado sólido continuamente emplea nuevos materiales, de esta forma la tecnología que genera, esmerila y pule componentes ópticas con nuevas geometrías en estos nuevos materiales, ha debido cambiar constantemente.

Se requieren superficies ópticas más precisas, al mismo tiempo los nuevos materiales para fabricar láseres pueden ser muy duros como el rubí, o muy blandos como los fosfatados y/o sol-gel, esto hace que los procesos de manufactura de superficies ópticas de alta calidad sean muy variadas, dependiendo de las necesidades de cada caso.

Los procesos de manufactura de barras cilíndricas van enfocados generalmente a los láseres de estado sólido, mas no son los únicos instrumentos que las requieren, tal es el caso de las barras cilíndricas de materiales magneto-ópticos para polarimetría y sacarimetría, donde es imperativo que estas barras tengan una geometría cilíndrica bien definida y las dimensiones precisas para poder trabajar con la mayor eficiencia.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Generadoras de barras cilíndricas.

Por años, las máquinas generadoras de barras cilíndricas han usado el mismo sistema que un torno mecánico, donde la pieza se sujeta en un extremo y gira, mientras que una herramienta desgasta su superficie Fig. 1.1.

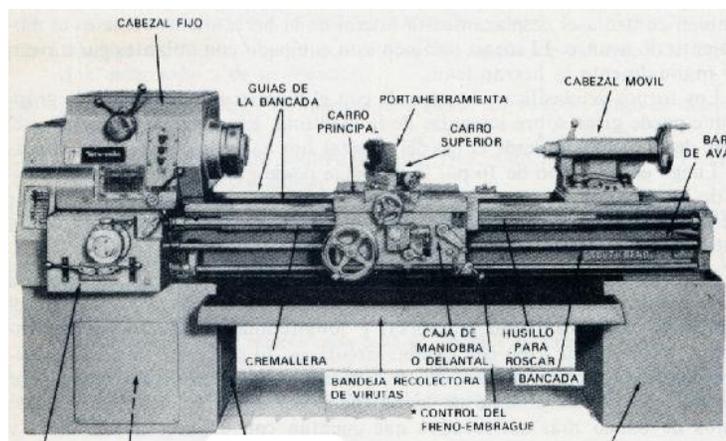


Fig. 1.1 Torno mecánico

Al igual que el procedimiento para trabajar metales en un torno mecánico, el procedimiento para generar barras cilíndricas en estas máquinas es muy parecido:

Primero se corta el vidrio o cristal en forma de barra rectangular, después se colocan extensiones para evitar que los esfuerzos mecánicos provoquen una fractura en las piezas de trabajo, estas extensiones se pegan en los extremos de las barras rectangulares de material óptico con una resina epóxica.

Un extremo de la pieza así preparada se coloca en el cabezal móvil de un torno (Fig. 1.2), y el otro extremo en el cabezal fijo y se hace girar mientras la herramienta abrasiva desgasta la superficie de la pieza, hasta que se genera una superficie cilíndrica al diámetro deseado.

Uno de los problemas principales en la generación de barras cilíndricas es el proceso de centrado de la pieza de trabajo en el eje mecánico de la máquina generadora, existen varios métodos para centrar la pieza mecánica, tales como, colocar bases metálicas en los extremos de la pieza de vidrio, otro método es hacer una pequeña perforación en las caras de la pieza donde se colocan unos soportes que harán que la pieza gire en un eje.

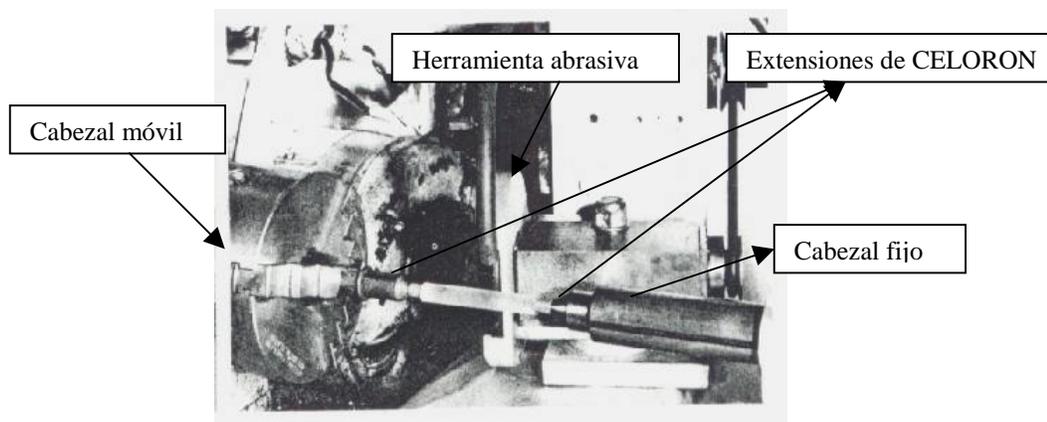


Fig. 1.2 Máquina generadora de barras cilíndricas.

El método más usado es utilizar unas extensiones de CELORON (Fig. 1.2) en los extremos de la pieza de trabajo, el CELORON se maquina a un diámetro menor que el diámetro de la pieza de vidrio que se fabricará (Fig. 1.2), estas extensiones se pegan en los extremos de la barra de vidrio y el conjunto así preparado se coloca en el cabezal del torno, como se explicó arriba. Estas extensiones absorben las vibraciones mecánicas producidas por la herramienta de diamante y proporcionan un buen aislamiento a esfuerzos longitudinales en todo el eje mecánico.

Para la herramienta abrasiva, se usan regularmente dos tipos de discos: de acero con diamantes electro-depositados para trabajar materiales duros como los cristales por ejemplo rubí, cuarzo, etc.

El segundo tipo de disco, usado para materiales menos duros, son los cilindros metálicos que tienen una hoja intercambiable de abrasivo más económico, como el carborundum. Esta hoja puede ser cambiada para efectuar el desgaste del material óptico con diferentes tamaños de grano abrasivo, estas herramientas se muestran en la Fig. 1.3.



Fig. 1.3 Discos de abrasivo

Un punto importante es que las orillas del cilindro de material óptico son partes débiles, propensas a fracturarse debido a las fuerzas de tensión que se provocarán por el proceso de generado de los planos de sus extremos.

Para proteger las orillas generalmente se esmerilan hasta eliminar el borde agudo de intersección de las superficies plana y cilíndrica, proceso conocido como “biselado” de la pieza, como se muestra en la Fig. 1. 4.

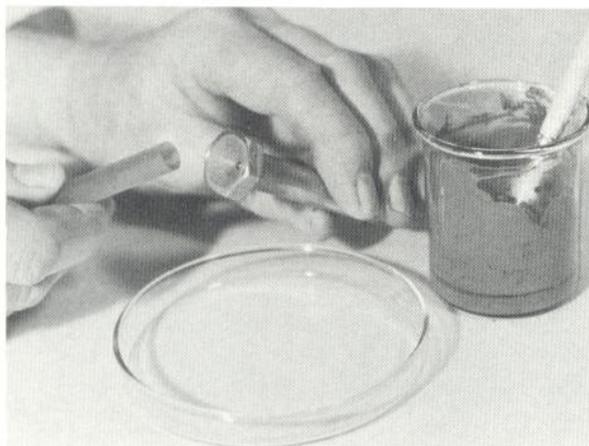


Fig. 1.4 Esmerilado de las orillas

La técnica de generado manual es probablemente el método más antiguo para generar barras cilíndricas. En un primer método, usado para generar barras cilíndricas tanto en materiales duros como el cuarzo como blandos como el Fluoruro de Litio, inicialmente se corta una pieza rectangular con una tolerancia de .5 mm arriba del valor deseado de radio del cilindro. Usualmente con una hoja de esmeril a baja velocidad se eliminan las aristas hasta formar una barra octagonal, después se desbastan estas nuevas aristas hasta obtener un cuerpo aproximadamente cilíndrico, que posteriormente se esmerila con un disco de carborundum grado 600 hasta obtener el radio deseado.

Otro método de generado en forma manual, es colocar la pieza de trabajo en la máquina mostrada en la Fig. 1.5, posteriormente se hace girar la pieza y sobre esta se coloca la herramienta de desgaste que puede ser un pequeño anillo ajustable de acero y haciendo presión con los dedos se desgasta la superficie.

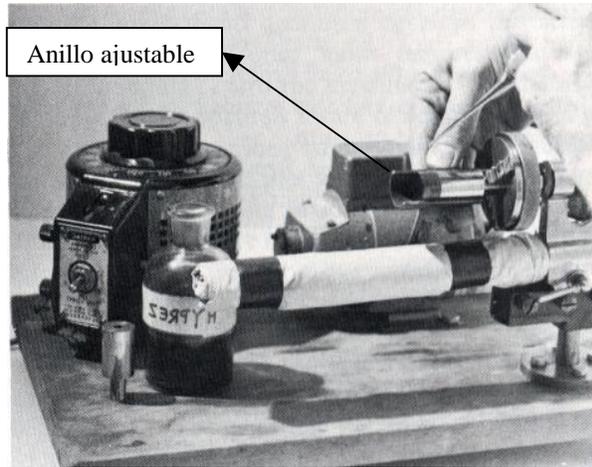
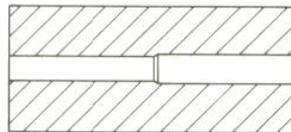


Fig. 1.5 Desgaste manual

Posiblemente el método más simple para producir barras cilíndricas es colocar la pieza de vidrio en una herramienta con una perforación del diámetro deseado. Aplicando una fuerza de empuje mientras se hace girar la pieza de vidrio, hasta que por desgaste de su extremo frontal va entrando en la perforación de la herramienta (Fig.1.6). Otra variante de este método consiste en emplear una perforación cónica, como se muestra en la Fig. 1.6.



Herramienta generadora
de superficies cilíndricas



Fig. 1.6 Preformas para generar barras cilíndricas

En general, las máquinas generadoras de barras cilíndricas varían muy poco unas de otras, las principales diferencias se encuentran en los procesos de bloqueo de la pieza de trabajo en el eje mecánico de la máquina empleada.

1.2.2 Herramientas esmeriladoras-pulidoras

Existen varios métodos para poder pulir las caras planas de los extremos de las barras cilíndricas. Uno de ellos consiste en colocar la barra de vidrio dentro de un orificio en un bloque de metal (a este dispositivo se le llama bloqueador). El tipo de metal usado depende principalmente de su densidad, para pequeños bloques en donde se desea pulir una pieza de vidrio se usa acero suave, cuando se desea pulir varias piezas generalmente se usa aluminio.

El orificio donde entra la barra de vidrio es maquinado con dimensiones muy cercanas al diámetro de la barra, aproximadamente de 2 a 5 micras de tolerancia mayor al diámetro de la barra de vidrio.

Dependiendo del tamaño de la barra (cuando su diámetro es muy pequeño en comparación con el diámetro de la herramienta) es conveniente colocar la barra dentro de un anillo de vidrio del mismo tipo que la barra, para que su desgaste sea el mismo, como se muestra en la Fig.1.7.

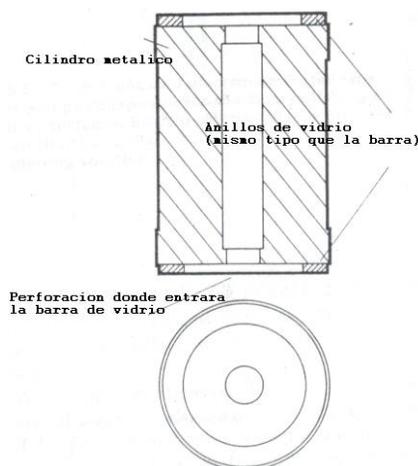


Fig. 1.7 Anillo concéntrico

Cuando la longitud de la barra es muy grande o se trabajaran varias piezas a la vez, se colocan soportes de vidrio alrededor de la barra como se muestra en la Fig. 1.8



Fig. 1.8 Soportes alrededor de la barra de vidrio

Existen otros métodos para pulir barras de vidrio por ejemplo P.Paul Head [1] colocó la barra de vidrio en un cilindro de aluminio, este cilindro se perforó en un determinado ángulo (Fig. 1.9), de esta forma pudo generar barras con caras plano-paralelas a un cierto ángulo respecto del eje del cilindro, típicamente el ángulo de Brewster.

Este tipo de barras son muy usadas en láseres de estado sólido de alta potencia (Fig. 1.9).

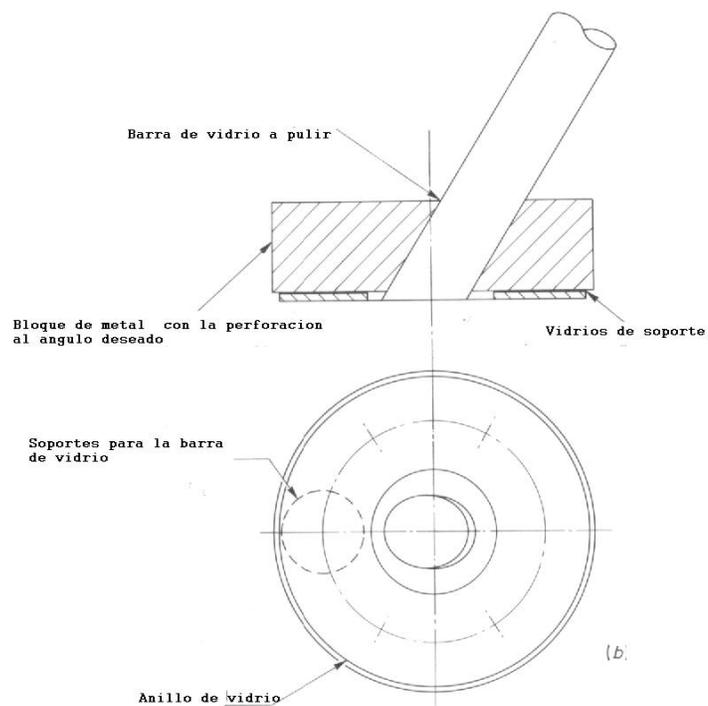


Fig. 1.9 Barra de vidrio con ángulo de Brewster

El autor[1] colocó la barra dentro de un cilindro de plástico (Fig. 1.10) cuyo objetivo es prevenir que se fracture la barra a causa de esfuerzos térmicos, ya que aísla térmicamente la pieza de vidrio de la herramienta de aluminio.

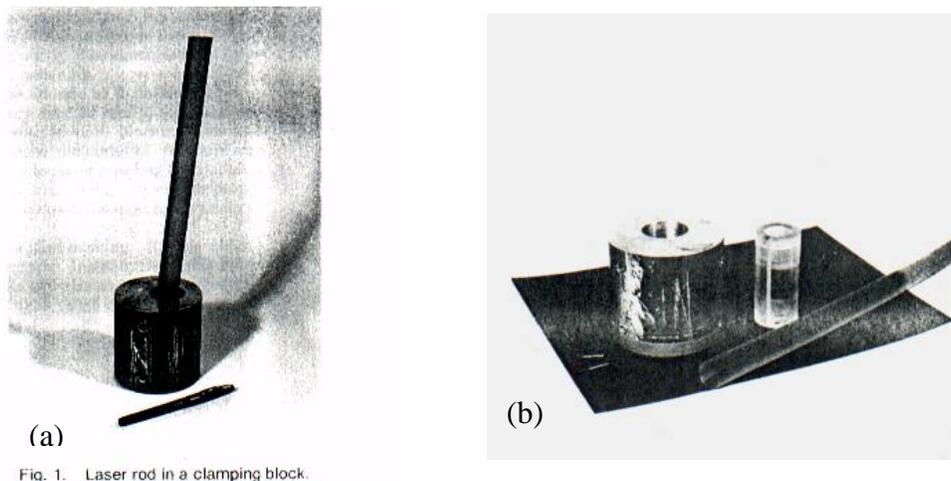


Fig. 1.10 (a) barra de vidrio dentro del bloque metálico, (b) abrazadera de plástico

Esta técnica requirió de un proceso lento de pulido para prevenir fracturas en materiales frágiles que tienen un alto coeficiente de expansión térmica, como los vidrios fosfatados. El autor [1] explica que los vidrios tienen un coeficiente de expansión térmica inducido por el calentamiento por fricción en el proceso de esmerilado-pulido, de acuerdo a esto decidió no bloquear las barras dentro de la perforación directamente contra el cilindro metálico, en lugar de eso usó una abrazadera de plástico para ajustar la barra Fig. 1.10 (b).

Esto elimina el tiempo de bloqueo y las posibles fracturas por dilatación térmica, explica el autor que la superficie final puede alcanzar fácilmente una calidad de $\lambda/10$.

Una técnica parecida a las anteriores fue propuesta por Jay B. Thomas y Robert J. Bodnar [2], ellos pulieron de forma individual barras de un cristal crecido artificialmente, usaron como herramienta un bloque cilíndrico de acero (Fig. 1.11). Para ajustar la profundidad de la barra colocaron un tornillo de ajuste en la parte superior, de esta forma podían colocar barras de cualquier tamaño menor a lo largo del bloque de acero. Para ajustar el paralelismo se

colocaron tornillos alrededor del bloque, de esta forma se puede corregir el ángulo de desviación con estos tornillos como se muestra en la Fig. 1.12.

Antes de esmerilar y pulir las caras de la barra, colocaron las barras cilíndricas en un bloque de policarbonato previamente perforado (Fig. 1.11). Estas barras de policarbonato son insertadas en el bloque metálico, el tornillo superior ajusta la longitud que sobresale la barra respecto del plano de la herramienta, mientras que los tornillos laterales ajustan el paralelismo de la cara del vidrio respecto al plano de la herramienta (Fig. 1.12).

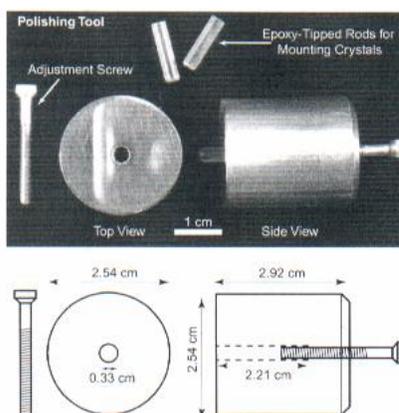


Fig. 1.11 Ajuste de la barra dentro del bloque metálico

En la Fig. 1.12 se muestra un carrusel de barras que se pulirán usando la técnica de colocar la barra del material óptico en bloques de policarbonato

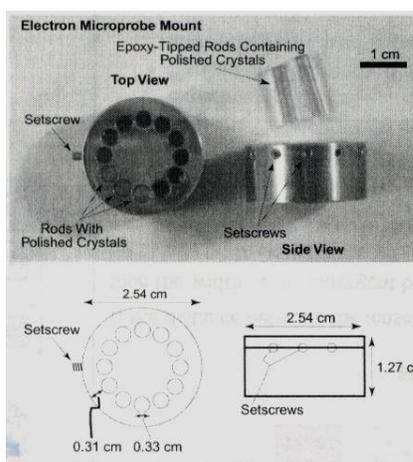


Fig. 1.12 Carrusel de barras y la forma de ajustar los tornillos de ajuste de paralelismo

El bloque de policarbonato al igual que el método anterior evita que la dilatación por fricción pueda provocar fracturas en el material óptico, de esta forma se le aísla térmicamente respecto del metal de la herramienta porta piezas.

Existen herramientas de precisión, en donde solo se coloca una barra de material óptico dentro de cada herramienta y su orientación es ajustada manualmente, estas herramientas son muy costosas y muy complejas para fabricarse

Las herramientas pulidoras de precisión, como la mostrada en la Fig. 1.13, a su vez requieren de máquinas especiales para fabricarlas, ajustarlas e incluso para emplearlas.

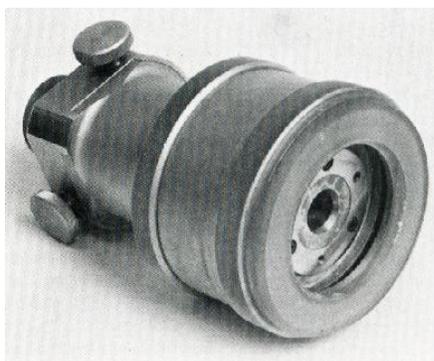


Fig. 1.13 Herramienta de precisión

Existen compañías que usan estas herramientas de precisión para la manufactura de barras de alta precisión para láseres de estado sólido, una de ellas KIGRE Inc., empresa americana dedicada a la fabricación de barras láseres de diferentes materiales, en la Fig. 1.14, se muestra la forma en que ellos pulen las caras de una barra láser.



Fig. 1.14 Pulido de una barra láser con herramienta de alta precisión

Existen ocasiones en que se debe hacer una leve corrección en la perpendicularidad de las caras de la barra, o se requiere que la superficie tenga un tratamiento previo a las etapas de esmerilado o de pulido, para realizar esta corrección a las superficies se emplea la herramienta mostrada en la Fig. 1.15

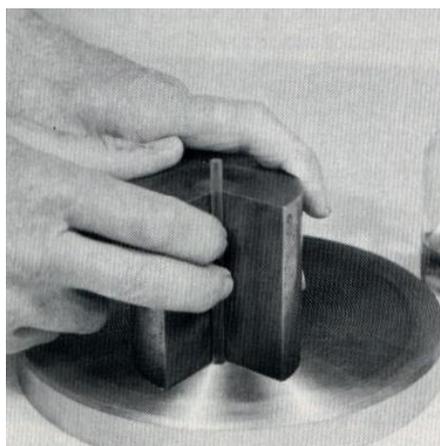


Fig. 1.15 Bloque para corrección de superficie

1.2.3 Ecuaciones de desgaste

En el curso de los años se han efectuado muchas investigaciones acerca de los procesos de esmerilado y pulido de vidrio, a fin de determinar la efectividad de su acción.

Los detalles de la interacción en los procesos de desgaste, entre la herramienta-esmeril-vidrio, también han sido investigados en repetidas ocasiones. La mayoría de estos modelos han sido tratados en una escala macroscópica. Las primeras investigaciones fueron publicadas en 1927 por F. W. Preston [3] quien desarrolla una ecuación llamada ecuación de desgaste o Ecuación de Preston, en su honor:

$$Desg = K_p \cdot V \cdot P \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde: P -Presión, V - Velocidad relativa herramienta-vidrio, K_p - Constante de Preston.

Es sencillo apreciar que la ecuación de Preston (Ec. 1.1) solo refleja la influencia de los efectos mecánicos en los procesos de esmerilado y pulido. Resultados experimentales posteriores muestran que existen otros factores que afectan al proceso de desgaste abrasivo[4] [5] [6]; por ejemplo, se encontró que la dureza de la herramienta afecta al proceso de desgaste, una herramienta dura remueve más material que una herramienta blanda, este fenómeno no puede ser explicado por la ecuación de Preston [3] en su forma original.

En cuanto a la acción de granos libres de abrasivo sobre vidrio, los experimentos realizados por Polyakov y Kachalov [7] confirmaron la teoría de Preston [3], es decir: durante la acción del abrasivo libre, los granos giran entre la pieza y la herramienta, lo que conduce a una serie de fracturas, debido a la forma irregular de los granos. Cuando estas fracturas se interceptan producen el desprendimiento de fragmentos de material de la pieza de trabajo. Esto puede ser entendido considerando el área real de contacto entre dos superficies, comparada con el área total de las herramientas, invariablemente es muy pequeña, prácticamente limitada únicamente al área de contacto entre los granos del abrasivo y las herramientas. La carga aplicada a la herramienta superior es transferida a esos puntos de contacto, lo que conduce a fracturas en el material.

Un vidrio tiene diferentes características como su dureza, fuerza, ductilidad etc., todos estos factores influyen en el proceso de desgaste entre dos superficies.

Basándose en la teoría de Kachalov[7], investigaciones de los procesos de desgaste abrasivo realizadas por Kumanin[8], condujeron a la siguiente fórmula empírica para representar los procesos de desgaste con abrasivos libres:

$$I_M = c.k.k_1.d_a.P.V * 981(g/seg) \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde I_M =Desgaste gravimétrico, c = Coeficiente de proporcionalidad, k =Coeficiente que representa las propiedades de la herramienta, k_1 = Coeficiente que representa las propiedades del vidrio, d_a = diámetro máximo de los granos de abrasivo, P = Presión actuando normalmente sobre la superficie, V = velocidad relativa de desplazamiento.

De esta forma Kumanin[8] desarrolló la ecuación 1.3, basada en las propiedades del vidrio y de la herramienta usados:

$$I_L = 1.5.10^{-6} \cdot \frac{k.d_a}{\delta.S} P V \quad \text{Ec. 1.3}$$

donde δ es la facilidad relativa de desgaste del vidrio (la unidad es el vidrio BK7), k es la propiedad de la herramienta, d_a es el diámetro de esmeril, S es el área sujeta a desgaste, I_L es el desgaste lineal del vidrio.

Existen otras investigaciones que modifican la ecuación de Preston y en donde se incluyen más factores debido a la discrepancia entre la ecuación de Preston (Ec. 1.1) y una relación de desgaste no-lineal, por ejemplo cuando la dependencia de la presión en el valor de desgaste con una herramienta blanda, satisface una relación no-lineal [9].

D.O. Ouma [10] agregó un valor para satisfacer la no-linealidad de la curva de desgaste (Ec. 1.4), a este valor le llamó desgaste inicial, sin embargo no hay evidencia física que explique la existencia de un desgaste inicial (como constante aditiva):

$$Desg = K_p.V.P + Desg_{inicial} \quad \text{Ec. 1.4}$$

En los últimos años se han encontrado otras discrepancias entre la ecuación de Preston[3] y los resultados prácticos por lo cual Zhang y Busnani [11] propusieron la siguiente ecuación

$$Desg = K_p \cdot \sqrt{V \cdot P} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Zhang y Busnani[11] consideraron la dureza de la herramienta y el contacto entre herramienta-vidrio, de esta forma la ecuación (Ec. 1.5) cumple con los resultados prácticos fundamentales del proceso de desgaste abrasivo.

En investigaciones realizadas por Zhao y Zhi [12] determinaron que la dependencia no-lineal del desgaste abrasivo respecto de la presión es debida a la variación del área real de contacto entre la herramienta y el vidrio. Ellos argumentan que la concentración de abrasivos, debido a la presión que se ejerce en el material, se incrementa con el área de contacto, de esta forma el desgaste es proporcional a la concentración de abrasivos, por lo tanto el valor de desgaste tendrá una relación no lineal dependiente de la presión por efecto de concentración de abrasivo. Ellos propusieron la siguiente ecuación Ec. 1.6

$$Desg = K_p \cdot P^{2/3} \cdot V \quad \text{Ec. 1.6}$$

Zhao y Shi[12] reconocieron la limitación de este modelo e introdujeron un valor de presión de umbral P_{th} , argumentando que el desgaste ocurre cuando la presión ejercida es más grande que el valor de umbral, de esta forma la ecuación de desgaste empleando abrasivos libres queda de la siguiente forma (Ec. 1.7):

$$Desg = K_p \cdot (P^{2/3} - P_{th}^{2/3}) \cdot V \quad \text{Ec. 1.7}$$

Basándose en investigaciones realizadas por Jianfeng Luo y David A. Dornfeld [13], se desarrolló un modelo matemático que determina la presión en función de la concentración de abrasivo, tomando como parámetro esta variación de concentración determinaron la siguiente ecuación:

$$VOL_{removido} = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\chi_{avg-\alpha}^2 E_p}{(b_1 H_w)^{3/2}} \sqrt{P_o} \cdot V \quad \text{Ec. 1.8}$$

donde $\chi_{avg-\alpha}$ es la concentración de granos abrasivos, H_w es la dureza de la herramienta, V la velocidad relativa entre la herramienta y el vidrio, P_o es la presión total aplicada al sistema, E_p el módulo de Young del vidrio y donde b_1 es una constante que representa el área real de contacto entre la herramienta y el vidrio.

De esta forma predijeron el desgaste en función de la masa que se desprende del vidrio:

$$Desg_{masa} = \rho_w \cdot N \cdot VOL_{removido} + Co \quad \text{Ec. 1.9}$$

donde ρ_w es la densidad del material de la herramienta, N es el número de partículas de abrasivo activas por cm^2 , $VOL_{removido}$ es el volumen removido por el abrasivo por unidad de tiempo y Co son los efectos químicos dentro del proceso de desgaste.

De esta forma ellos calcularon el valor de desgaste lineal, dado por la Ec. 1.10:

$$Desg_{lineal} = \frac{C_1 \left(1 - \Phi \left[3 - C_2 P_o^{\frac{1}{3}} \right] \right) P_o^{\frac{1}{2}} V}{\rho_w b_1 A_0} = C_3 \left(1 - \Phi \left[3 - C_2 P_o^{\frac{1}{3}} \right] \right) \sqrt{P_o} V \quad \text{Ec. 1.10}$$

donde C_3 y C_2 son dos constantes relacionadas con la dureza de la herramienta y el tamaño de abrasivo respectivamente, Φ es la densidad de grano activo por área de contacto

Mientras tanto otras investigaciones calculan la dependencia de la presión en el proceso de desgaste en función de la posición del disco superior sobre el disco inferior, Leonard Borucki [14] propuso el siguiente modelo teórico para un disco:

$$L_{total} = L_{orilla} + L_{centro} \quad \text{Ec. 1.11}$$

$$P_{total} * A_{total} = P_{orilla} * A_{orilla} + P_{centro} * A_{centro} \quad \text{Ec. 1.12}$$

Donde: L - Torque total del sistema, P - Presión, A - Área de contacto entre los dos discos.

Dividiendo por el área, podemos encontrar la ecuación de presión que se aplica en el sistema:

$$P_{total} = \alpha * P_{orilla} + (1-\alpha)P_{centro} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde α es la fracción del área A_{orilla} / A_{total} .

De esta forma se calcula la presión en función de la posición del disco superior respecto del eje central del disco inferior, dada por la Ec. 1.14:

$$P_{total} = C \left(\alpha \int_{d+h}^{\infty} (z-d-h)^{3/2} \phi(z) dz + (1-\alpha) \int_d^{\infty} (z-d)^{3/2} \phi(z) dz \right) \quad \text{Ec.1.14}$$

Donde: $\phi(z)$ es la densidad por área de grano de abrasivo activo entre la herramienta y el vidrio, α es la fracción del área, $z-d-h$ es la separación entre la herramienta, el abrasivo y el vidrio; donde el valor $z-h$ es la separación entre la herramienta y el vidrio y que puede ser controlada por medios mecánicos y d es la separación debida exclusivamente al diámetro del abrasivo libre, C es una constante de datos experimentales.

1.2.4 Simulaciones numéricas

De acuerdo a la ecuación de Preston (Ec. 1.1), la presión y la velocidad son los parámetros más importantes en el proceso de desgaste abrasivo.

En la sección anterior se analizaron modelos propuestos por diversos autores que predicen los efectos mecánicos en la ecuación de desgaste como función de diversos parámetros como son la presión, tamaño de grano, densidad

de abrasivo en función del área de trabajo etc.; en esta sección se analizan las simulaciones numéricas realizadas por diversos autores para calcular la velocidad relativa entre un punto de la herramienta esmeriladora y otro punto de la pieza que se esmerila, ambos en contacto a través de los granos del abrasivo libre empleado. La velocidad relativa entre los dos discos puede ser separado en dos partes, rotación y traslación.

El cálculo de velocidad relativa en cualquier lugar de los discos ha sido discutido en detalle por Hansen[15] quien mostró que la distribución de velocidades es función de los parámetros geométricos tanto de la herramienta como de la pieza de trabajo.

La distribución de la presión sobre las superficies en contacto es función de la deformación elástica tanto de la herramienta como de la pieza de trabajo.

Se han investigado estos fenómenos usando métodos de elemento finito y métodos de condición de frontera, Wang[16], para predecir el estrés y la distribución de presiones en la interfase herramienta-vidrio. Una vez que las distribuciones de velocidad y presión son conocidas, el modelo de desgaste puede ser determinado.

Como indica la ecuación de Preston (Ec. 1.1), el valor de desgaste es directamente dependiente de la velocidad relativa que existe entre la herramienta y la pieza de trabajo (disco superior y disco inferior).

V.H. Nguyen[17] propuso el siguiente modelo de velocidades relativas entre dos discos. En la Fig. 1.16 se ilustra un diagrama esquemático para el cálculo de velocidad lineal entre parejas de puntos de dos discos cuyas velocidades angulares son constantes.

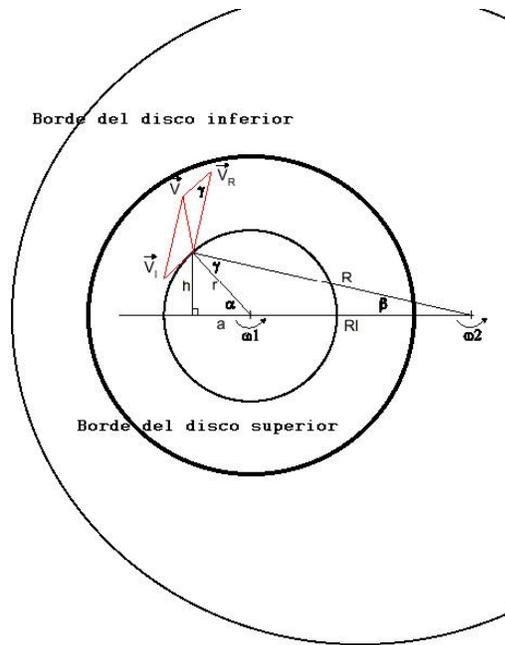


Fig. 1.16 Velocidad lineal

En esta configuración la velocidad relativa integrada a lo largo de una trayectoria circular de radio r entre las superficies de contacto esta dada por la ecuación:

$$v = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_0^{2\pi} \sqrt{v_r^2 + v_R^2 - 2v_r v_R \cos(\gamma)} d\alpha \quad \text{Ec. 1.15}$$

donde

$$v_r = 2 * \pi * r * \omega_1 \quad \text{Ec. 1.16}$$

y

$$v_R = 2 * \pi * R * \omega_2 \quad \text{Ec. 1.17}$$

Por lo tanto la velocidad relativa integrada sobre un anillo de radio r esta dada por:

$$v = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_0^{2\pi} \sqrt{v_r^2 + v_R^2 - 2 \cdot v_r \cdot v_R \cdot \cos \left\{ \alpha - \arctan \left[\frac{r \sin(\alpha)}{(Rl + r \cos(\alpha))} \right] \right\}} d\alpha \quad \text{Ec. 1.18}$$

Note que en este modelo ambos discos (inferior y superior) están motorizados, además de esto, la posición central del disco superior respecto del disco inferior se mantiene constante (no hay excentricidad debido a una oscilación respecto a un punto exterior en este modelo matemático). Este modelo

se emplea en sistemas para pulir obleas de silicio como el mostrado en la Fig. 1.17

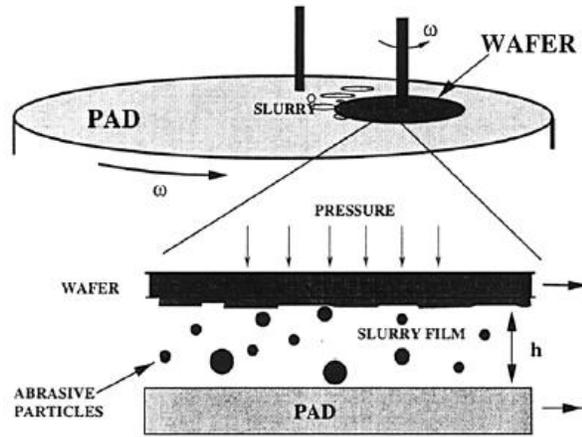


Fig. 1.17 Proceso físico de desgaste en obleas de silicio

En investigaciones realizadas por Kyungyoon Noh [18] se determinó la velocidad relativa de un sistema similar al de la Fig. 1.17, desarrollando al igual que V.H. Nguyen[17] un modelo geométrico para determinar las velocidades relativas de dos puntos, este modelo se muestra en la Fig. 1.18

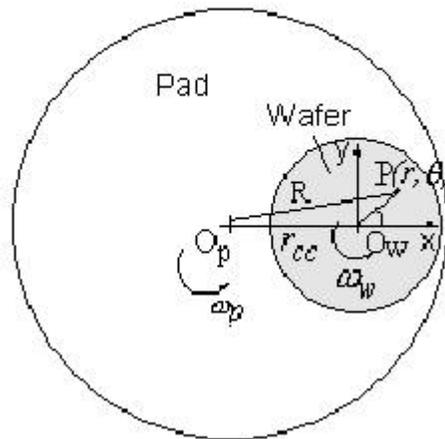


Fig. 1.18 Modelo matemático de velocidades

Encontró los siguientes parámetros de velocidad dados por las ecuaciones polares:

$$v_{r,R} = -\omega_p r_{cc} \sin \theta$$

$$v_{\theta,R} = \omega_w r - \omega_p (r + r_c \cos \theta) \quad \text{Ec. 1.19}$$

Donde $v_{r,R}$ es la velocidad del centro del disco superior, por la acción de rotación del disco inferior, y $v_{\theta,R}$ es la velocidad relativa de un punto arbitrario, por la rotación de ambos discos.

Calculando la magnitud de la velocidad resultante:

$$v_R = \left\{ [(\omega_w - \omega_p)y]^2 + [(\omega_w - \omega_p)x - \omega_p r_{cc}]^2 \right\}^{1/2}$$

$$v_{x,R} = -(\omega_w - \omega_p)y; v_{y,R} = (\omega_w - \omega_p)x - \omega_p r_{cc} \quad \text{Ec. 1.20}$$

Cuando las velocidades angulares de los dos discos son iguales ($\omega_w = \omega_p$) la ecuación 1.20 puede ser simplificada como:

$$v_{x,R} = 0 \quad ; \quad v_{y,R} = \omega_p r_{cc} \quad \text{Ec. 1.21}$$

De acuerdo a la ecuación 1.21, la velocidad relativa de los dos discos sólo existe en la dirección del eje (y), y es idéntica en todos los puntos del área de contacto entre ambos discos. Una velocidad relativa uniforme de los dos discos ayuda a simplificar el análisis y reduce las variaciones de desgaste en el material como lo indica la ecuación de Preston, esto es debido a que la velocidad relativa en cada punto se mantiene constante en todo el proceso por lo tanto el desgaste es lineal en toda su superficie.

REFERENCIAS

- [1] Jay B. Thomas and Robert J. Bodnar, "A technique for mounting and polishing melt inclusion in small (< 1mm) crystals", *American Mineralogist*, Volume 87, pages 1505-1508, 2002
- [2] P. Paul Head, "Laser rod holder during grinding and polishing", *Applied optics* Volume 21 No. 9, pages 308-309, 1982
- [3] Preston, F. (1927). "The theory and design of plate glass polishing machines" *Journal of the Society of Glass Technology*, Vol. 11, pp. 214-256.
- [4] R. Xu, G. Smart, and M. Zhang, "Particle characteristics and removal rate in CMP process" in *Proc. Fourth Int. Chemical-Mechanical Planarization for ULSI Multilevel Interconnection Conf.*, Santa Clara, CA, Feb. 11-12, 1999, pp. 253-255.
- [5] Y. Moon, "Mechanical aspects of the material removal mechanism in chemical mechanical polishing (CMP)", Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA, 1999.
- [6] Y. Moon, I. Park, and D. A. Dornfeld, "Mechanical properties and relationship to process performance of the polishing pad in chemical mechanical polishing (CMP) of silicon" in *Proc. ASPE Spring Topical Meeting on Silicon Machining*, Apr. 1998, pp. 83-87.
- [7] Kachalov, N. N , Polyakov "Technology of grinding and polishing of sheet glass", Academy of Science, USSR, 1953. *Conf.*, Santa Clara, CA, Feb. 22-23, 1996, pp. 285-290.
- [8] Kumanin K. G "Generation of optical surfaces" London: The focal library, 67-104, 1967.
- [9] S. R. Runnels and L. M. Eyman, "Physical modeling of CMP fluid flow analysis", Sematech Rep., 1993.

in chemical mechanical polishing and post-CMP cleaning,” J. Electrochem. Soc., vol. 146, pp. 2665–2669, 1999.

[10] D. O. Ouma, “*Modeling of chemical mechanical polishing for dielectric planarization*”, Ph.D. dissertation, Dept. of Electrical Engineering, MIT, MA, 1999. “Chemical-mechanical polishing of copper for interconnect formation,” *Microelectron. Eng.*, vol. 33, pp. 249–257, 1997.

[11] F. Zhang, A. A. Busnaina, J. Feng, and M. A. Fury, “*Particle adhesion force in CMP and subsequent cleaning processes*”, in *Proc. Fourth Int. Chemical-Mechanical Planarization for ULSI Multilevel Interconnection Conf.*, Santa Clara, CA, Feb. 11–12, 1999, pp. 61–64.

[12] B. Zhao and F. G. Shi, “*Chemical mechanical polishing in IC processes: New fundamental insights*”, in *Proc. Fourth Int. Chemical-Mechanical Planarization for ULSI Multilevel Interconnection Conf.*, Santa Clara, CA, Feb. 11–12, 1999, pp. 13–22.

[13] Jianfeng Luo and David A. Dornfeld , “*Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling*”, IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, Volume 14, No. 2, 2001

[14] Leonard Borucki, “*Modeling planarization in chemical-mechanical polishing*”, 2002

[15] Hansen, D. A., Barr, M., King, J. Kerba, E. And Mogi, K. (1996). “*Characterization of a multiple-head chemical mechanical polisher for manufacturing applications*”, CMP-MIC Conference, Santa Clara, CA, U.S.A.

[16] Wang, D., Lee, J., Holland, K., Bibby, T., Beaudoin, S. and Cale, T. (1997). “*Von mises stress in chemical-mechanical polishing processes*”, *Journal of Electrochem. Soc.*, Vol. 144, pp. 1121-1127.

[17] V.H. Nguyen, “*Impacts of Process Conditions on the Uniformity of Material Removal Rate in Chemical Mechanical Polishing Process*”, Proceedings of the SAFE/IEEE workshop, November 29 -30, 2000

[18] Optical Production technology, D.F Horne, Ed. Adam Hilger Ltd. 1972

CAPITULO II

DISEÑO DE LAS MAQUINAS Y LAS HERRAMIENTAS

2.1 Diseño de una generadora de barras cilíndricas.

En el Capítulo I se analizó en forma breve el funcionamiento de las máquinas generadoras de barras cilíndricas

En nuestro taller mecánico se encontraba abandonada una fresadora mecánica obsoleta, dado que sus ejes de desplazamiento se encontraban en buen estado se decidió adaptarla, con el fin de convertirla en una generadora de barras cilíndricas de vidrio de alta precisión.

Los mecanismos de desplazamientos X, Y y Z de la bancada de esta fresadora se muestran en la Fig. 2.1.



Fig. 2.1 Máquina fresadora

Sobre estos mecanismos se desea adaptar etapas de control con motores de pasos y de DC para maquinar las barras de vidrio, como sigue:

1.- Sobre la bancada larga se colocara un motor DC acoplado a una caja reductora de engranes piñón-corona con unión anti-backlash (sin holgura o juego entre engranes) que proporcionen una etapa adicional de reducción de RPM's a los dos puntos de apoyo que sostendrán a la barra de vidrio que se maquine. La barra de vidrio debe estar girando a RPM constantes durante todo el proceso de maquinado.

Es extremadamente importante que los dos puntos de apoyo que soportan a la barra de vidrio giren sincrónicamente, para asegurar dos cosas: A) que el adhesivo que sujeta la pieza de vidrio a los apoyos metálicos no se desprege y B) para que la barra de vidrio no sufra torsión, aunque el pegamento aguante, porque el vidrio magnetoóptico que vamos a trabajar es muy frágil.

2.- El desplazamiento de esa misma bancada larga (horizontal, en dirección X) será de vaivén, con una carrera desde 50mm hasta 200mm, según el tamaño de barra de vidrio de que se trate. Para lograr el vaivén, se empleara un motor DC con dos etapas reductoras ya que invirtiendo la polaridad aplicada al motor se invierte la dirección de rotación del motor y por lo tanto se invertirá la dirección de desplazamiento de la bancada con la barra de vidrio, respecto de la herramienta de corte, logrando así el movimiento de vaivén de una manera muy sencilla.

3.- En el segundo desplazamiento horizontal (dirección Y), de la bancada corta, se usará un motor de pasos unido a la primera etapa reductora de un total de cuatro engranes, de esta forma el avance de la bancada larga (que esta sobre la bancada corta) se podrá desplazar contra la herramienta de corte a la velocidad de 3 micras por viaje completo de ida y vuelta de la bancada larga.

4.- El desplazamiento vertical de las dos bancadas anteriores quedará en forma totalmente manual porque solo habrá que ajustarlo una vez, para igualar la altura de la herramienta de corte respecto del eje del cilindro de vidrio que deseemos maquinar en cada caso.

La herramienta de corte es una rueda de diamante sinterizado en bronce, de 100 mm de diámetro y 5mm de ancho. Los diamantes son de 9 micras

tamaño promedio y su sección expuesta, que es la que efectúa el corte en el vidrio, será de 3 micras como máximo.

Al final del maquinado, en la etapa de "afinación" del trabajo, el avance del vidrio contra la herramienta de diamante será de 1 micra por dos o más vaivenes completos de la bancada larga.

5.- El motor que impulsa a la herramienta de diamante estará montado en lo que queda del cabezal de la fresadora y deberá permanecer inmóvil y estable mientras gira el disco de diamante. Un factor importante es que la herramienta de diamante NO oscile, ni vibre, ya que cualquiera de esos efectos puede "encajar" en algún momento la herramienta contra la delgada y frágil barrita de vidrio y así romperla o desprenderla de sus puntos de apoyo.

6.- El motor que impulsa la herramienta de diamante estará montado sobre un eje largo con dos puntos de apoyo de baleros de rodamiento muy suave y capacidad para trabajar a 1000 o más RPM.

En la caja de engranes R1 (Fig. 2.2) cada piñón anti-backlash transmitirá torque al engrane mayor (sujeto a los ejes de trabajo de cada cabezal), con lo que se garantizará que los ejes de los dos puntos de apoyo de la barra de vidrio giren sincrónicamente, sin inducir torsión ni vibración a la barra y/o a sus puntos de apoyo.

En la Fig. 2.2 se muestra un dibujo a mano alzada de la máquina generadora de barras cilíndricas

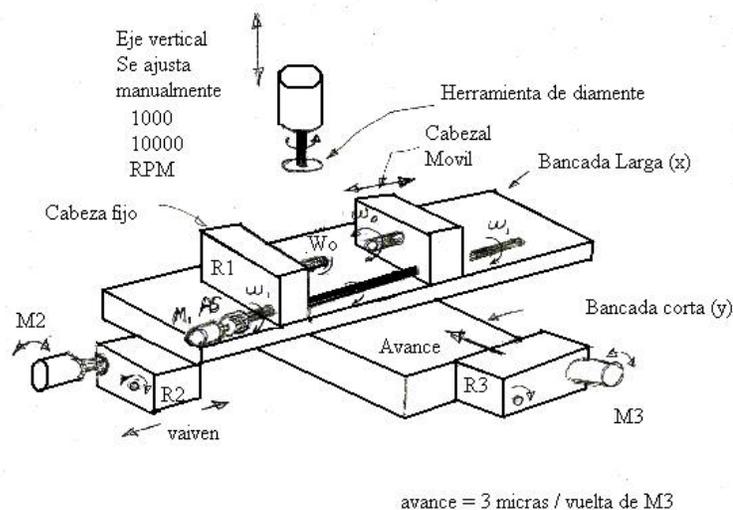


Fig. 2.2 Esquema de la máquina generadora de cilindros de vidrio magnetoóptico.

La maquina generadora de barras cilíndricas se compone de 4 mecanismos principales, que ahora se describirán en detalle.

2.1.1 Mecanismo de bancada corta (y)

Bancada corta (y) .- Esta etapa controla el avance de 3 micras de la pieza de trabajo contra la herramienta de diamante. El avance se realiza mediante un motor de pasos conectado a un juego de engranes y piñones reductores (R3 en Fig. 2.1).

Desarrollando los cálculos para los engranes y piñones, obtenemos los siguientes datos

Etapas reductoras: 4 No. Engranes: 8, cada pareja de engranes es del tipo anti-backlash. No. Piñones: 4 No. Bujes: 10

En la Fig. 2.3 se muestra la arquitectura de esta caja de engranes¹.

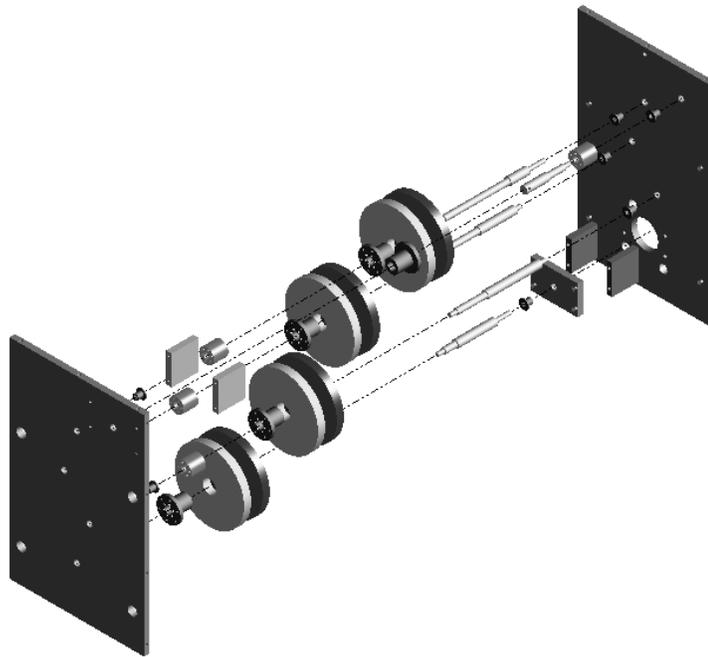


Fig. 2.3 Arquitectura interna de la caja de reducción (R3 en Fig. 2.2)

Esta etapa es controlada por un motor de pasos para el avance de la barra de vidrio contra la herramienta de diamante. En la Fig. 2.4 se muestra el ensamble de las piezas y la forma en que se montará en la fresadora.

¹ Se agradece cumplidamente al Ing. Armando Ruiz, diseñador mecánico del CIO por el gran apoyo que nos proporcionó en todo este trabajo de diseño mecánico

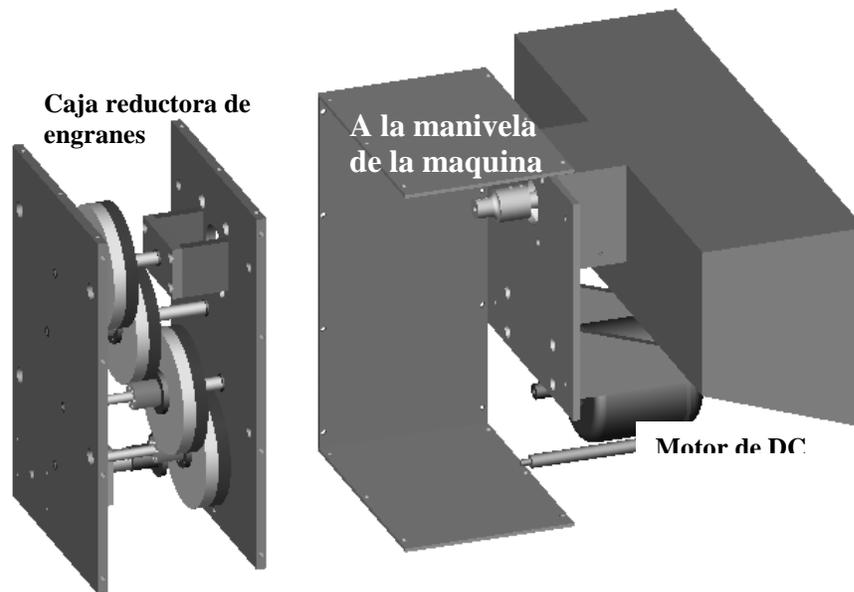


Fig. 2.4 Ensamble (el motor de pasos esta dentro de la caja de engranes)

El motor de DC se acopla al eje de la segunda etapa reductora (Fig. 2.4)

Cálculo de piñones

Las características de los piñones se presentan en la Tabla 2.1

Tabla 2.1

No. De dientes	16	Paso diametral	16 dientes/pulg.
Diámetro primitivo	1 pulg.	Eje axial	5/16 pulg.
Material	2 Bronce + 2 Celoron	Ancho del piñón	1 pulg.
Colocados en	6 bujes de bronce grafitado	RPM de entrada	1

Cálculo de engranes

Los engranes tienen las características mostradas en la Tabla 2.2

Tabla 2.2

No. De dientes	75	Paso diametral	16 dientes/pulg.
Diámetro primitivo	4.6875 pulg.	Eje axial	5/16 p ermite colocar un piñón encima del engrane
Material	2 Bronce + 2 celoron.	Dado que se necesitan 2 engranes para formar un engrane anti backlash se multiplica el numero por 2	
Total	4 Bronce + 4 Celoron		

2.1.2 Mecanismo de bancada larga (x)

Bancada larga (x), movimiento de vaivén .- Esta etapa controla el avance longitudinal de la barra de vidrio respecto de la herramienta de diamante. El ciclo de ida y vuelta, está controlado por un motor de CD el cual se invierte el giro una vez terminada una carrera, para recorrer en toda longitud de la pieza frente a la herramienta de diamante.

Esta etapa esta diseñada para tener un avance de 1 mm/seg en la bancada de la fresadora, por medio de una serie de engranes y piñones reductores cuando la velocidad (RPM's) del motor tiene un optimo desempeño. Esta etapa reductora consta de 2 partes Ver Fig. 2.5.

Características del mecanismo de control de la bancada larga.

Tabla 2.3

No. De etapas reductoras 2	No. De piñones 2
No. De engranes 4 2 Celoron + 2 Bronce cada engrane consta de 2 en paralelo anti backlash, haciendo un total de 4 y 4 respectivamente	No de bujes 6 de Bronce grafitado 1 pulg. de diámetro por 15 mm de ancho

Cálculo de piñones

Los piñones tienen las siguientes características (Tabla 2.4).

Tabla 2.4

No. De dientes 16	Paso diametral 16 dientes/pulg.
Diámetro primitivo 1pulg	Eje axial 5/16 pulg.
Material 1 Bronce + 1 Celoron	Ancho del piñón 1 pulg.

Cálculo de engranes

Los engranes tienen las características descritas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5

No. De dientes 75	Paso diametral 16 dientes/pulg.
Diámetro primitivo 4.6875 pulg.	Eje axial 5/16 p ermite colocar un piñón encima del engrane (piñón-engrane)
Material 1 Bronce + 1 celoron.	Dado que se necesitan 2 engranes para formar un engrane anti backlash se multiplica el numero por 2
Total 2 Bronce + 2 Celoron	

En la Fig. 2.5 se muestra la configuración interna de la etapa de reducción para la bancada larga (movimiento de vaivén).

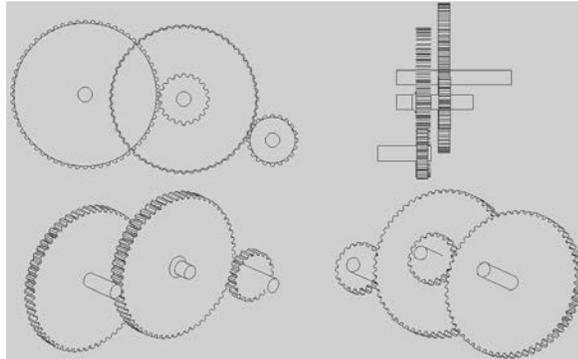


Fig. 2.5 Arquitectura interna para la etapa de reducción bancada larga vaivén

2.1.3 Mecanismo de sujeción y giro de las barras

Cabezal fijo de giro de las barras.- Esta etapa controla el giro de la pieza de trabajo, consta de 2 etapas simétricas en donde se coloca la pieza de vidrio, esta pieza gira sobre un eje mecánico a 0.5 RPS (30 RPM), esta pieza de vidrio deberá tener un movimiento sincrónico en cada cabezal, para evitar que la pieza de cristal sufra torsiones en diferentes puntos y se pueda romper. Este mecanismo consta de dos ejes perfectamente alineados uno con otro y con giro sincrónico, como se muestra en la Fig. 2.6

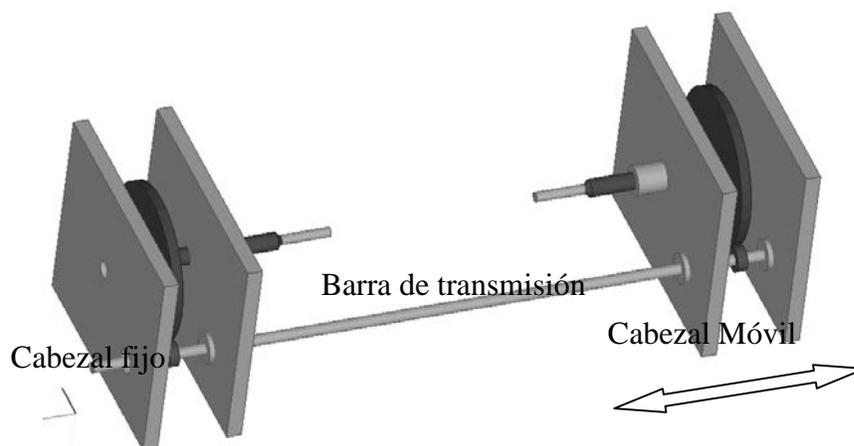


Fig. 2.6 Mecanismo sincrónico del giro de barras

Este mecanismo tiene el primer cabezal fijo y el segundo se moverá a lo largo de la bancada para ajustarlo a diferentes longitudes de barras a trabajar.

Para esto necesitamos que el segundo piñón pueda ser ajustado en diferentes posiciones de la barra de transmisión en función del largo de la pieza de vidrio.

Cada barra de apoyo (donde se montara el vidrio), tiene dos rodamientos auto ajustables, con los que aseguramos que la pieza girará sobre un mismo eje mecánico a una velocidad controlada, en donde no habrá fuerzas de torsión.

El giro de la pieza es controlado por un motor de DC a 200 RPM, para tener un giro de 0.5 RPS (30 RPM) se usa una etapa reductora piñón-engrane (Tabla 2.6)

Cálculo de piñones

Tabla 2.6

	No. De dientes	16
Paso diametral	16 dientes/pulg.	Diámetro primitivo 1 pulg
Eje axial	5/16 pulg.	Material 4 Celoron 2 por etapa
Ancho del piñón	1 pulg.	Total de Piñones 2
Colocados en 4 bujes de bronce grafitado 2 por etapa		RPM de entrada 200 rpm

Cálculo de engranes

Los engranes tienen las siguientes características (Tabla 2.7)

Tabla 2.7

No. De dientes	75	Paso diametral	16 dientes/pulg.
Diámetro primitivo	4.6875 pulg.	Eje axial	5/16 p ermite colocar un piñón encima del engrane (piñón-engrane)
Material	2 celoron.	Dado que se necesitan 2 engranes para formar un engrane anti backlash se multiplica el numero por 2	
Total 4 Celoron			

En la Fig. 2.7 se muestra la etapa de reducción para los ejes de giro, esta etapa es la misma para el de la etapa móvil con la diferencia que el piñón será ajustable en la barra de transmisión (ver Fig. 2.6).

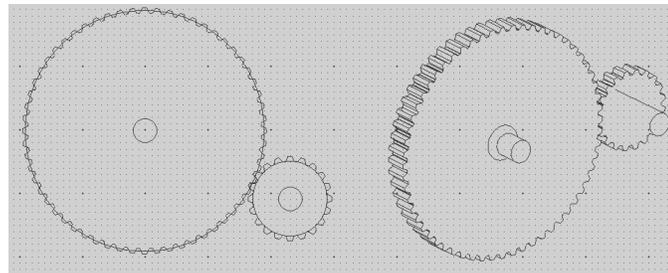


Fig. 2.7 Etapa de reducción , giro de barras 1/2(para una parte)

2.2 Diseño de la herramienta pulidora de caras plano-paralelas

En este trabajo de tesis se diseñó y construyó una herramienta esmeriladora-pulidora utilizando simultáneamente las dos técnicas expuestas en el capítulo 1.

Se construyeron dos herramientas pulidoras de las mismas características, de esta forma podemos obtener resultados similares cuando se estén trabajando barras de dos tipos de vidrio diferentes. En cada herramienta se pueden pulir hasta 18 barras simultáneamente.

2.2.1 Selección de la simetría.

La herramienta se compone de un disco de aluminio de 5 cm de alto, 27 cm de diámetro y un peso de 4.2 Kg (como se muestra en la Fig. 2.8) donde se colocarán las barras de vidrio provenientes de la etapa de generado de barras cilíndricas.



Fig. 2.8 Vista superior de la herramienta esmeriladora-pulidora

Las barras de vidrio se colocarán en las perforaciones de la herramienta, se bloquearán con cera de baja temperatura de fusión, mientras que en la parte inferior los vidrios de apoyo se bloquearán con cera de alta temperatura de fusión.

La cera de baja temperatura de fusión es suave por lo que absorberá las diferencias de dilatación del vidrio y del aluminio.

Esto nos garantiza que las piezas tendrán una sujeción fuerte cuando las estemos trabajando, evitando así que se desprendan pues estarán sujetas a lo largo de toda su longitud.

Por otro lado, cuando se termine de esmerilar y pulir un extremo de las barras de vidrio, podremos desmontarlas calentando todo el conjunto a la temperatura de fusión de la cera de baja temperatura, mientras que los vidrios de apoyo fijos con bloqueador de alta temperatura no se moverán, conservando su planaridad y orientación común respecto al eje de la herramienta. Esto se logra usando los dos tipos de cera mencionadas, el punto de fusión de la cera de baja temperatura es mucho más bajo que el de la cera de alta temperatura, de esta forma calentando la superficie podemos extraer con facilidad las barras de vidrio sin mover los soportes.

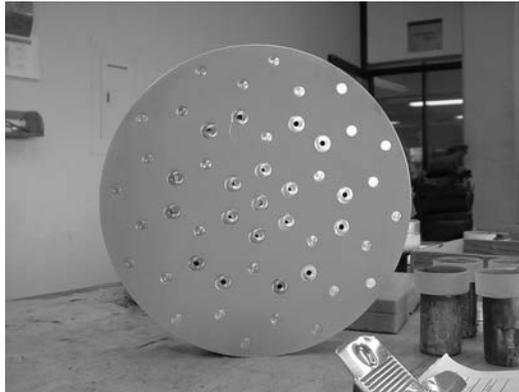


Fig. 2.9 Vista inferior de la herramienta esmeriladora-pulidora

La herramienta tiene 6 perforaciones en la zona central con un diámetro de 3 mm y en la zona media tenemos 12 perforaciones con un diámetro de 5 mm, es ahí donde se colocarán las barras de vidrio provenientes de la etapa generadora.

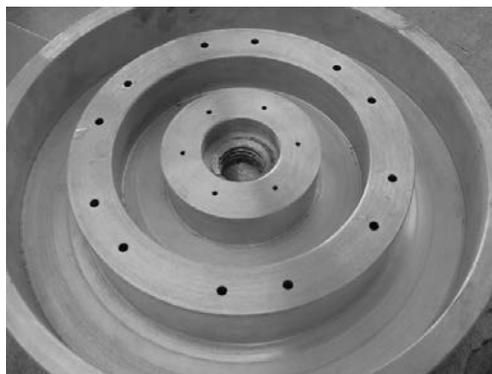


Fig. 2.10 Perforaciones de 3 mm y de 5 mm de diámetro

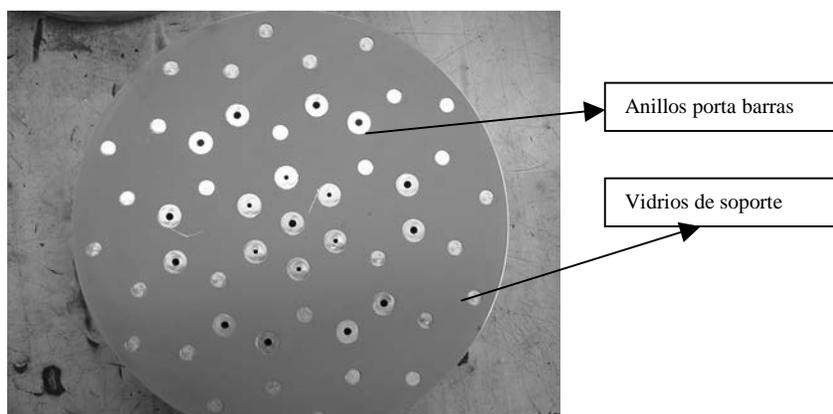


Fig. 2.11 perforaciones para las barras y posiciones de los dos tipos de vidrio de apoyo

Dado que el área de la herramienta es mucho mayor que el área de las barras de vidrio, es necesario emplear unos soportes en la parte inferior de la herramienta; para esto, se colocaron pequeños trozos de vidrio en forma cilíndrica (del mismo material que la barra). Usamos dos tipos de vidrio de soporte, soportes individuales y soportes de las barras de vidrio, que se colocan uniformemente distribuidos sobre toda la superficie de la herramienta para distribuir su peso de manera uniforme.

Los soportes de las barras de vidrio son pequeños anillos de vidrio en donde entra la barra que se va a pulir, además de soportar la herramienta, como se muestra en la Fig. 2.12.

Su función es doble: proveer un apoyo local a cada barra de vidrio e impedir el acceso a cualquier grano particularmente grande de abrasivo o conglomeración de granos pequeños, dentro del área de la barra de vidrio, que puedan provocar ralladuras.

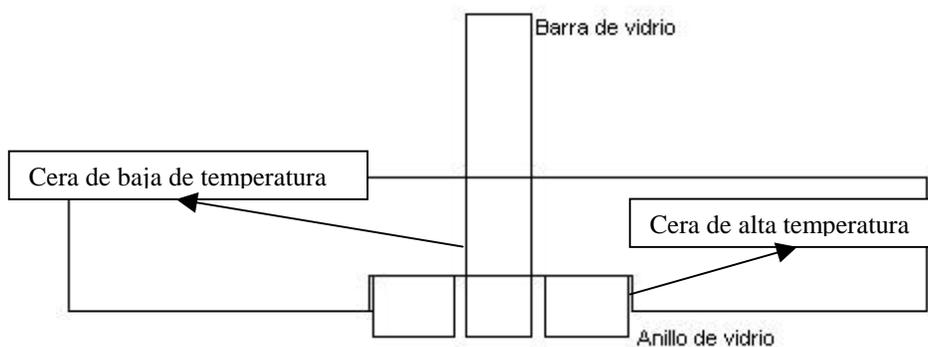


Fig. 2.12 Soporte para las barras de vidrio

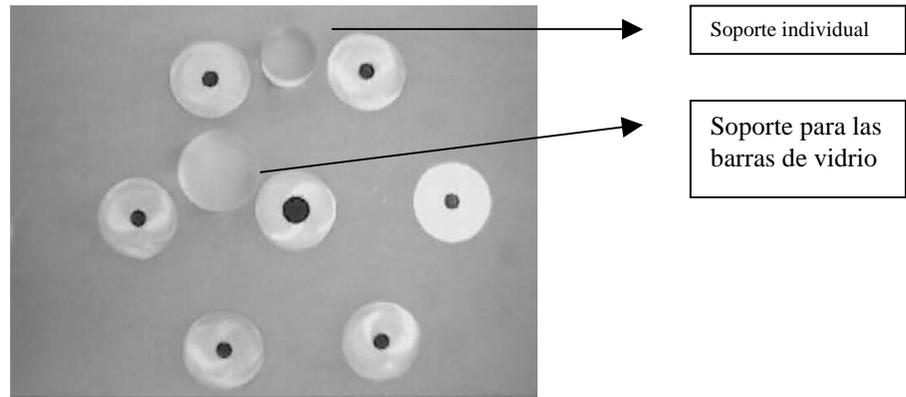


Fig. 2.13 Detalle de los dos tipos de apoyo

Para evitar que estas bases se muevan al momento del bloquearlas, además de asegurar que la distribución de piezas sea uniforme, la herramienta cuenta con pequeñas cavidades donde entran estas piezas, la superficie de las bases es paralela a la superficie de la herramienta.

El diámetro de los soportes individuales es de 10 mm y de los anillos de vidrio es de 15 mm de diámetro. Para ambos tamaños, la profundidad de la cavidad donde se colocan es de 0.3 mm.

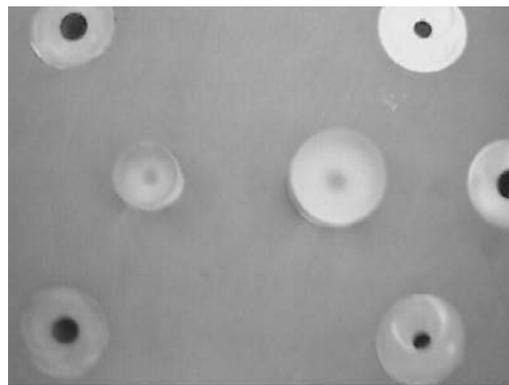


Fig. 2.14 Colocación de los vidrios de soporte

2.3 Distribución hexagonal de las piezas de vidrio.

Como vimos en el capítulo I, la mejor forma de bloquear una barra de vidrio es colocar la barra en un cilindro de vidrio del mismo tipo que el que se

esta trabajando (Cap. I Fig. 1.7). Otra forma de bloquear la pieza de vidrio (Cap. I Fig. 1.8) es colocarle alrededor varios vidrios de soporte lo más junto posible. Estos dos procedimientos son muy empleados pero tienen el inconveniente de usar mucho material de apoyo para este propósito.

El material que se emplearemos es un vidrio magneto-óptico muy costoso por lo que no podemos usar grandes secciones de material. Para elevar la eficiencia diseñamos esta herramienta en la que el número de las barras que se puyen puede llegar a ser casi igual al de los vidrios de apoyo, excepto el anillo más externo de piezas (Fig.2.15 y 2.16).

El modelo a seguir para bloquear la herramienta posee una distribución hexagonal, como se muestra en la Fig. 2.15.

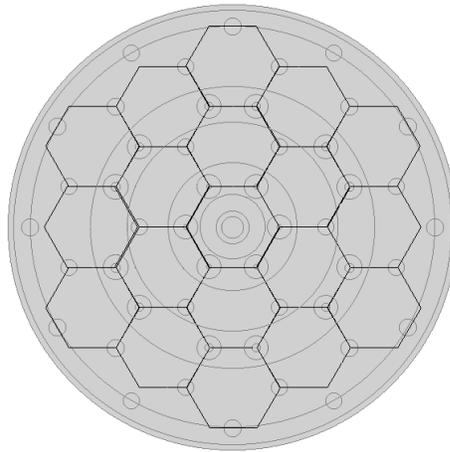


Fig. 2.15 Distribución hexagonal

En la Fig. 2.16 se muestra esta distribución hexagonal sobrepuesta a la superficie de la herramienta real

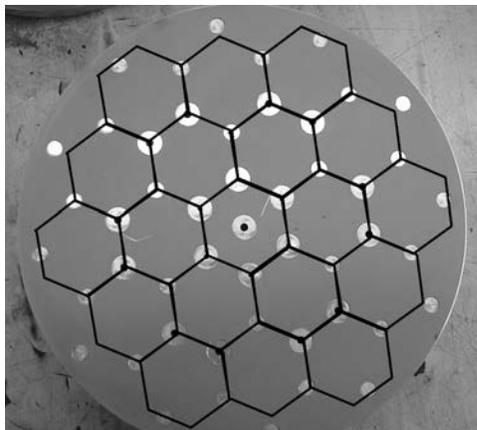


Fig. 2.16 Distribución hexagonal sobrepuesta en la herramienta

Este modelo hexagonal tiene la ventaja que las distancias entre puntos adyacentes son iguales, de esta forma la distribución de fuerzas es uniforme en toda el área de la herramienta, así la herramienta esta soportada por 49 elementos (vidrios de apoyo) los cuales están distribuidos uniformemente en la superficie y siguen el modelo hexagonal, de ellos 18 elementos son pequeños anillos de vidrio que soportaran las barras hechas del mismo material.

Con esta distribución hexagonal además podemos usar un esferómetro de tres puntos de apoyo en todas las mediciones de planaridad, que se construyó específicamente para este propósito.

2.4 Distribución de fuerzas

Nuestro diseño actual de la herramienta permite pulir simultáneamente 6 barras de 3 mm de diámetro y 12 barras de 5 mm de diámetro, las cuales se colocan dentro de las perforaciones en el metal. Las barras de vidrio deberán generarse de diámetro ligeramente menor que el diámetro de la perforación de la herramienta, posteriormente la barra se colocará dentro de la perforación y se bloqueará con cera de baja temperatura para poder extraerla después del proceso.

Al usar este tipo de bloque (vidrio-metal), debemos tener en cuenta los siguientes efectos que pueden provocar que nuestra barra de vidrio se fracture:

1.- Dilatación térmica. Cuando se esmerila la superficie de la herramienta (en este caso las barras de vidrio con sus respectivos soportes), la herramienta tiende a calentarse por efecto de fricción entre la interfaz herramienta-abrasivo-vidrio. El calor generado tenderá a dilatar al metal, de esta forma, se modifica el diámetro de las perforaciones de las barras.

Para prevenir que la dilatación provoque que nuestra barra de vidrio se fracture, la herramienta pulidora esta diseñada con secciones anulares Fig. 2.17, las cuales disipan el calor generado por el proceso abrasivo, a la vez que se reduce la masa total de la herramienta.

2.- Esfuerzos mecánicos. Si consideramos una herramienta sólida, (como es el caso de la mayoría de las herramientas(capítulo 1)), un golpe o un esfuerzo mecánico por torsión (si las paredes son muy delgadas) provocará que la herramienta se deforme causando que la pieza de vidrio se fracture.

Nuestra herramienta tiene un diseño trapezoidal dentro de los anillos, de esta forma la presión se distribuye en la parte inferior, mientras que en la parte superior (donde existe el pivote del pistón) es menor (Fig. 2.17).

De esta forma la distribución de fuerzas provocada por los procesos mecánicos a la que está sometida (brazo de oscilación de la maquina esmeriladora, fuerza de fricción provocada por el desgaste entre la herramienta y los vidrios) se distribuye uniformemente.

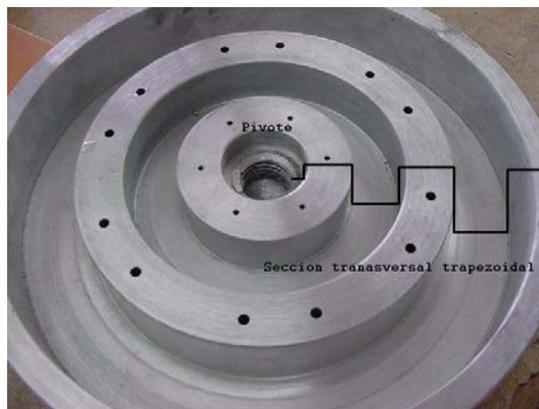


Fig. 2.17 (a) Distribución trapezoidal

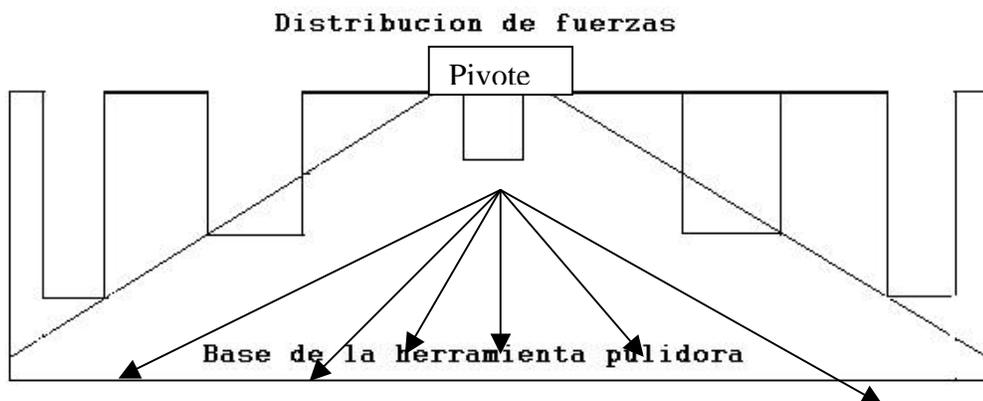


Fig. 2.17 (b) Sección transversal

2.5 Rectificación de la herramienta.

Después de su fabricación la herramienta presenta una superficie rugosa provocada por la maquina CNC y el torno, debido a la acción de las herramientas de corte, con claros trazos circulares sobre la superficie.

Esto nos provocaría incertidumbre en las mediciones con esferómetro ya que el punto de referencia respecto al plano de la herramienta tendría variaciones debido a la superficie irregular.

Para evitar este problema se esmeriló la herramienta esmeriladora-pulidora con una herramienta de hierro fundido y abrasivo de carburo de tungsteno lo que produjo micro-irregularidades mucho menores, distribuidas en forma completamente aleatoria.

Otro problema que se nos presentó al momento de colocar los vidrios de soporte fue que en las orillas de las secciones donde se deben colocar las piezas existían residuos de aluminio (rebabas) provocadas por la etapa de rectificación de la herramienta, esto fue un problema fuerte ya que las piezas de soporte no entraban en las secciones correspondientes.

Para eliminar estos residuos empleamos una pequeña navaja para cortarlos y así limpiar las orillas de las cavidades que alojarían los vidrios de soporte, procurando no tocar la parte central de estas secciones.

Para tener una planaridad confiable en la superficie de fijación de los vidrios de soporte y obtener gran precisión en el proceso de esmerilado y pulido de barras de vidrio, se esmerilaron las dos caras de las herramientas pulidoras con diferentes granos de esmeril, una hora con esmeril de 25 micras después con el esmeril de 15 micras a una hora y por ultimo con esmeril de 9 micras a una hora hasta eliminar todo rastro de la acción de la maquina CNC y el torno mecánico.

La maquina esmeriladora se ajustó a una carrera normal con una herramienta de hierro fundido. El brazo de oscilación se ajustó a 33.5 cm para obtener la máxima distribución de desgaste en la herramienta y una velocidad de 44 RPM con una presión de 30 Lb/plg² en el émbolo neumático para la cara inferior.

En la Fig. 2.18 se muestra la forma en que se colocó la herramienta para esmerilar su cara superior.

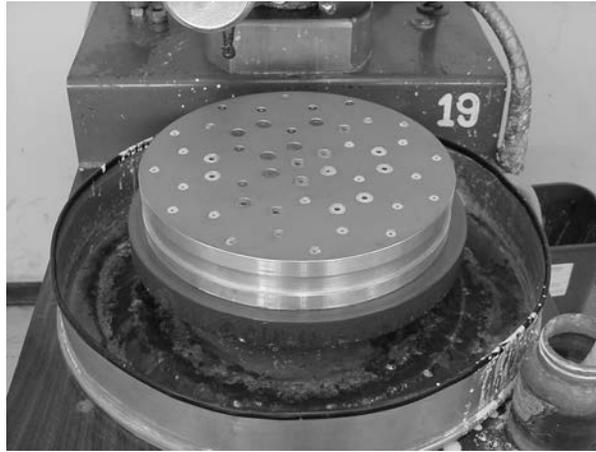


Fig. 2.18 Esmerilado de la cara superior de la herramienta

Después de trabajarlo con los diferentes tipos de abrasivo como se describe arriba, se obtuvo la calidad de superficie esmerilada que se muestra en la Fig. 2.19. Como podemos observar la superficie ya no presenta rugosidades producidas por las etapas anteriores, de esta forma se eliminaron residuos metálicos en la superficie y se obtuvo un plano de referencia confiable para medir desgastes en cualquiera de las piezas de vidrio.

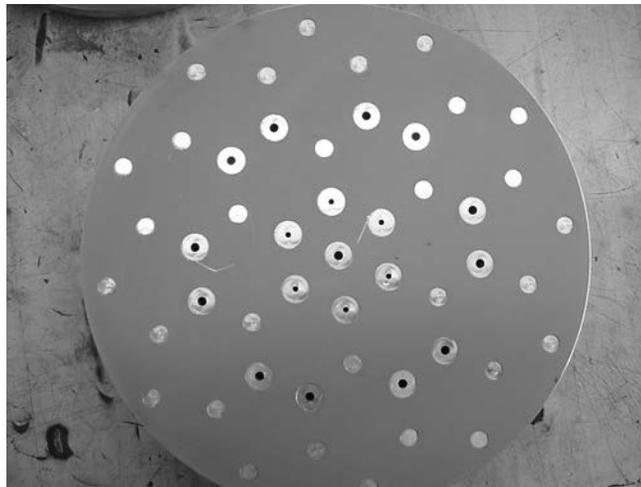


Fig. 2.19 Superficie de la cara inferior ya esmerilada.

Posteriormente se midió la planaridad de la superficie inferior de la herramienta pulidora con un esferómetro mecánico, dando como resultado una

superficie regular esférica a 5 micras cóncava en todo el diámetro de la herramienta.

Una vez esmeriladas ambas superficies, se anodizó la herramienta para contar con una superficie dura que fuera más resistente al proceso de esmerilado y pulido de los vidrios, capaz de soportar un gran número de mediciones con el esferómetro de tres patas.

2.6 Pulido de las herramientas esmeriladoras-pulidoras

De acuerdo a los resultados que obtuvimos en el proceso de esmerilado, se decidió pulir la herramienta esperando ver franjas de interferencia, para corroborar nuestras mediciones. La herramienta se pulió con grano de 0.3 micras de Oxido de Cerio a carrera normal en una herramienta de poliuretano sin fuerza adicional aplicada.

Después de 30 minutos de pulido se observaron franjas de interferencia como se muestra en la Fig. 2.20

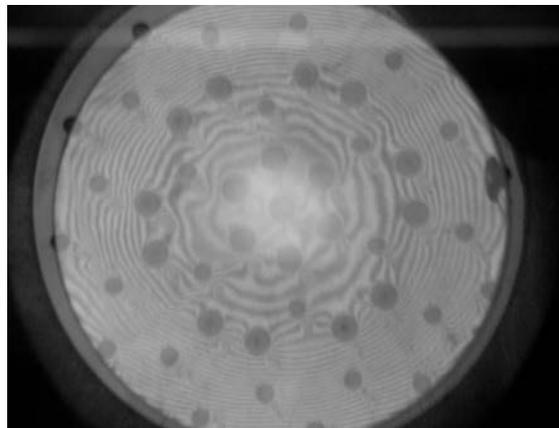


Fig. 2.20 Franjas de interferencia de la superficie de la herramienta pulidora

Contando el número de franjas que aparecen en la superficie podemos determinar el grado de planaridad, de acuerdo a la relación $2 \text{ franjas} = 0.5 \text{ micras}$ (en la longitud de onda del color verde), de esta forma obtuvimos una planaridad de 6 micras cóncava.

Una vez que corroboramos la calidad de la superficie, se grabaron las claves de las posiciones de cada elemento de la geometría hexagonal con un

punzón eléctrico, cuidando no dañar la superficie recién pulida como se muestra en la Figura 2.21.

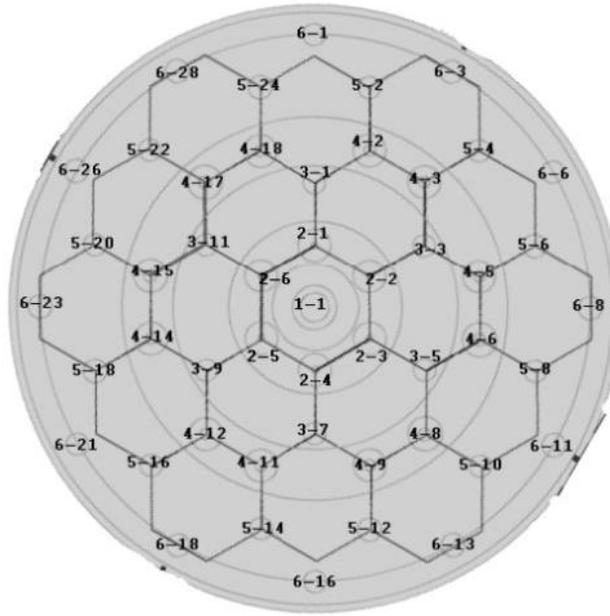


Fig. 2.21 Posiciones de cada elemento en arreglo hexagonal

Después de marcar cada posición de los elementos se volvió a pulir la superficie para eliminar las marcas generadas por el punzón eléctrico, de esta forma obtuvimos la superficie final de nuestra herramienta esmeriladora-pulidora mostrada en la Fig. 2.22

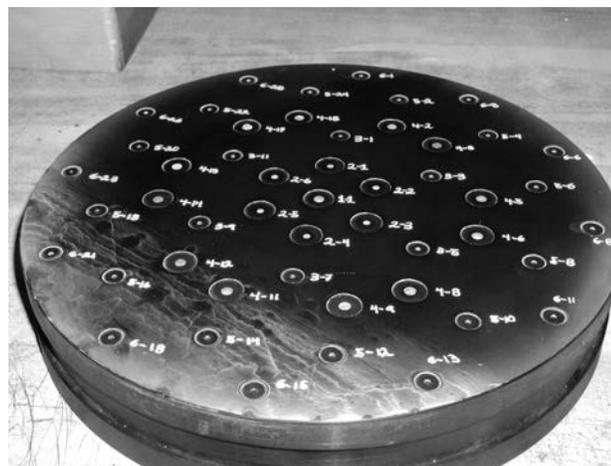


Fig. 2.22 Superficie final de la herramienta esmeriladora-pulidora

El propósito de identificar cada vidrio es determinar su desgaste individualmente y de esta forma comparar los resultados con nuestra simulación numérica que predice el comportamiento del proceso de desgaste abrasivo.

Después del proceso de pulido de la herramienta se colocaron los vidrios de soporte, estos cilindros de vidrio se cortaron a una longitud de 1 cm.

La herramienta, lista para iniciar las pruebas se muestra en la Fig. 2.23.



Fig. 2.23 Vista de la cara inferior de las dos herramientas esmeriladoras-pulidoras

Dado que la construcción de la maquina generadora de barras cilíndricas no se ha concluido, optamos por buscar barras de vidrio que pudiéramos usar para el experimento.

El vidrio que empleamos en el experimento fue Pyrex de baja temperatura de fusión, en forma de barras de 9 mm y de 15 mm de diámetro, este tipo de vidrio se usa para fabricar material de laboratorio químico, como agitadores, espátulas, etc..

La barra de vidrio usada esta compuesto principalmente de silicatos de sodio-calcio y se ablandan entre 400 y 600° C. En la tabla 2.8 se muestran sus características principales.

Este vidrio es manufacturado en forma de barras cilíndricas de diversos diámetros, dos de ellos coinciden perfectamente con las medidas de nuestras cavidades, por lo que no tuvimos problemas en el montaje de las piezas de soporte para la herramienta.

Tabla 2.8 Propiedades del vidrio pyrex

Coefficiente de expansión lineal $\alpha_{200/300}$	$3.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Temperatura de transformación Tg	525 °C
Temperatura de viscosidad	560
Densidad	$2.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Conductividad térmica	$1.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Temperatura para resistencia eléctrica específica	250°C
Modulo de elasticidad de Young	$64 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$
Factor de perdida dieléctrica	37×10^{-4}
Indice de refracción(a $\lambda=587.6 \text{ nm}$)	1.473
Constante de estrés óptico	$4.0 \times 10^{-6} \text{ mm}^2\cdot\text{N}^{-1}$
Factor de desgaste abrasivo	93

El vidrio usado tiene un coeficiente de fricción bajo en comparación con un vidrio estándar (BK7), en trabajos futuros se investigarán los procesos de desgaste con vidrios BK7 y F2 previamente generados en piezas de 9 y 15 mm de diámetro, de esta forma conoceremos el comportamiento de los procesos de esmerilado y pulido de un espectro de materiales duros y blandos.

Finalmente se presentan dos páginas del catálogo de vidrios ópticos de la compañía japonesa Sumita, correspondientes a los vidrios BK7 y F2. Esta compañía ha realizado investigaciones de desgaste abrasivo en sus productos, es la única que hemos encontrado que proporciona estos importantes valores. Como es usual, la referencia de desgaste abrasivo es el BK7, con el valor $H_a=100$.

Los valores de los demás vidrios se calculan en base a un sencillo experimento: en una herramienta se colocan discos muestra, del mismo grueso, de los vidrios a caracterizar, junto con un disco de BK7 de las mismas dimensiones. Esta herramienta tiene un sistema hidráulico que garantiza que todas las muestras reciben siempre la misma presión. El sistema es sometido a desgaste abrasivo contra una herramienta de fierro fundido con grano de 20 micras, durante un tiempo determinado, después del cual se miden sus grosores finales. El desgaste sufrido por el BK7 constituye el 100% del experimento, los otros vidrios habrán experimentado un porcentaje menor o mayor, según tengan más o menos resistencia al desgaste abrasivo.

Schott Type SF2	nd 1.64769	Vd 33.9	nF-nC 0.01912
	ne 1.65222	Ve 33.6	nF'-nC' 0.01939

Índice de refracción			Dispersión parcial y dispersión parcial relativa				Transmitancia interna		
nt	1014.	1.62863	nC-nt	nC-nA'	nd-nC	ne-nC	A nm	10mm	25mm
nA	768.2	1.63604	0.01347	0.00606	0.00559	0.01012	270		
nr	706.5	1.63903	ec.t	OCA'	Od,C	@e,C	280		
nC	656.3	1.64210	0.704	0.317	0.292	0.529	290		
nC	643.9	1.64298	ng-nd	ng-nF	nh-ng	ni-ng	300		
nD	589.3	1.64753	0.02478	0.01125	0.00983	0.02779	310		
nd	587.6	1.64769	6g,d	Og,F	Oh,g	Oi,g	320		
ne	546.1	1.65222	1.296	0.588	0.514	1.453	330	0.04 2	
nF	486.1	1.66122	nC'-nt	ne-nC'	nF'-ne	ni-nF'	340	0.37 e	0.08
nF	480.0	1.66237	0.01435	0.00924	0.01015	0.03789	350	0.70 i	0.41
nσ	435.8	1.67247	θ' C' ,t	θ' e,C'	θ' F' ,e	θ' í,F'	360	0.86 o	0.68
nG	434.1		0.740	0.477	0.523	1.954	370	0.93 2	0.83
nh	404.7	1.68230					380	0.95 4	0.89
ni	365.0	1.70026					390	0.97 s	0.94
Constante de formula de dispersión			Propiedades mecánicas		Propiedades térmicas		400	0.98 2	0.95
			Hk Dureza Knoop 369		Tg (°C) Punto de transformacion		420	0.99 o	0.97
AO 2.6357555			Hv Indentación 380		(°C) Punto de blancedimiento 488		440	0.99 i	0.97
A1 -8.8369978 x 10 -3			Ha Abrasión 170		αx10 ⁻⁷ Expansión térmica (100-300 C) 96		460	0.99 2	0.98
A2 2.5530657 x 10-2			E(10 ⁸ N/m ²) Modulo de Young 535		Notas		480	0.99 4	0.98
A3 1.0085256 X 10 -3			G(10 ⁸ N/m ²) Modulo de rigidez 21 7				500	0.99 4	0.98
A4 -2.7211205 X10 -5			Valor de Poisson 0.232		Otras propiedades		550	0.99 s	0.98
A5 6.1064321 X 10- 6			Propiedades químicas		Burbujas		600	0.99 s	0.98
Dispersión parcial relativa			Resistencia al agua 1		Grado de color 37/33		650	0.99 s	0.98
A θ c,t		0.0003	Resistencia al ácido 1		S .g Gravedad especifica 3.84		700	0.99 y	0.99
A θ C.A'		-0.0014	Resistencia al agua 1		Estrias		800	0.99 e	0.99
A θ g,d		0.0015					1060	0.99 s	0.98
A θ σ F		0.0021					1500	0.98 8	0.97
A θ i,g		0.0258					2000	0.94 o	0.85

Schott Type K-BK7	nd 1.51633	i/d	64.1	nF-nC 0.00806
	ne 1.51825	Ve	63.8	nF-nC' 0.00812

Índice de refracción			Dispersión parcial y dispersión parcial relativa				Transmitancia interna		
nt	1014.0	1.50686	nC-nt	nC-nA'	nd-nC	ne-nC	X nm	10mm	25mm
nA'	768.2	1.51097	0.00699	0.00288	0.00248	0.00440	270		
nr	706.5	1.51242	ec,t	0C,A'	0d,C	0e,C	280		
nC	656.3	1.51385	0.867	0.357	0.308	0.546	290	0.024	
nC'	643.9	1.51425	ng-nd	ng-nF	nh-ng	ni-ng	300	0.15 s	
nD	589.3	1.51626	0.00989	0.00431	0.00356	0.00962	310	0.41 4	0.11 o
nd	587.6	1.51633	6g,d	0g,F	6h,g	QI-g	320	0.65 o	0.34 i
ne	546.1	1.51825	1.227	0.535	0.442	1.194	330	0.80e	0.58 3
nF	486.1	1.52191	nC'-nt	ne-nC'	nF'-ne	ni-nF'	340	0.89 4	0.75 6
nF	480.0	1.52237	0.00739	0.00400	0.00412	0.01347	350	0.94o	0.85 7
ng	435.8	1.52622	6' C' ,t	0e,C'	Q IF' .e	e' F'	360	0.96 4	0.91 3
nG	434.1		0.910	0.493	0.507	1.659	370	0.97 i	0.93 o
nh	404.7	1.52978					380	0.97 4	0.93 7
ni	365.0	1.53584							
Formula de dispersión			Propiedades mecánicas		Propiedades térmicas				
			Hk Dureza Knoop 589	Tg (°C) Punto de transformacion 553		420	0.98g	0.97 i	
			Hv Indentación 587	En (°C) Punto de blancedimiento 614		440	0.98 a	0.97 i	
			Ha Abrasión 100			αx10 ⁻⁷ Expansión térmica (100-300 C) 90		460	0.99 o
E(10 ⁸ N/m ²) Modulo de Young 799								Notas	
			G(10 ⁸ N/m ²) Modulo de rigidez 330						
Valor de Poisson 0.209								Otras propiedades	
			Propiedades químicas			Burbujas			
Resistencia al agua 2								Grado de color 34 /29	
			Resistencia al ácido 1			S .g Gravedad epecifica 2.52			
A @C.t 0.0222	Weather Resistance 1							Estrias	
A e c,A' 0.0041							1060		
A Og,d -0.0073									1500
A Og,F -0.0067									

REFERENCIAS

- Sumita optical glass catalog.
- G W Fynn and W J A Powel, "The cutting and polishing of electro-optic materials", Halsted, 1979
- Joseph Edwards Shingley and Charles R. Mishke "Diseño en ingeniería mecánica", Mc.Graw Hill 5ª Edición, 1990
- Hank H. Karow, "Fabrication Methods for precision optics", Wiley Interscience, 1993
- W. Zhammler, G.K. Sachder, J. Maxwell, "Precision Optical glassworking", SPIE, 1984
- Arthur S. Dany, "Master Optical techniques", Wiley Interscience, 1981

CAPITULO III

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DESGASTE ABRASIVO

3.1 Ecuaciones de la simulación del proceso de desgaste abrasivo.

En esta sección se desarrolla un modelo matemático para determinar el proceso de desgaste abrasivo, este modelo considera los efectos de desgaste producido por diferentes tamaños de grano de abrasivo buscando predecir la magnitud del desgaste y la topografía final de la superficie, en función de los parámetros de excentricidad y velocidad de una máquina esmeriladora tradicional Strasbaugh.

El desgaste que sufren las piezas durante el proceso de esmerilado (o pulido) con abrasivo libre, es función de la velocidad relativa con que se desplazan dos puntos cualesquiera de ellas, que entran en contacto mediante las partículas abrasivas.

El desgaste es también proporcional a la presión de contacto entre ambas piezas, a la viscosidad y pH del líquido en que se encuentran suspendidas las partículas abrasivas, a la concentración de esta suspensión y a las propiedades físicas de los materiales que participan en el proceso abrasivo.

La variable que afecta de manera fundamental al proceso abrasivo, es sin duda la velocidad relativa con que se desplazan las parejas de puntos (de la herramienta y de la pieza que se trabaja), dentro del área instantánea de contacto entre ambos platos.

Por lo general las dos piezas que interactúan son circulares, donde la herramienta es la pieza superior y la componente óptica que se fabrica es la pieza inferior. En algunos casos este orden se invierte, especialmente cuando se trabajan componentes ópticas grandes (por ejemplo espejos de telescopio). Debido a esta circunstancia, en este desarrollo nos referiremos a “la pieza inferior (o superior)” o bien a “el plato inferior (o superior)”, evitando particularizar.

3.1.1 Máquina generadora-pulidora universal, su descripción.

En las máquinas de configuración tradicional, solo la pieza inferior está motorizada, la que efectúa una rotación a velocidad angular constante.

La pieza superior efectúa un movimiento oscilatorio sobre la pieza inferior, guiada por un brazo accionado por un pivote excéntrico. La pieza superior además gira libremente sobre su pivote central, impulsada por la resultante de las fuerzas de fricción del proceso abrasivo que tiene lugar entre las áreas de contacto de ambas piezas.

La maquina esmeriladora Strassbaugh que se muestra en la Fig. 3.1 tiene esta configuración, en donde podemos ajustar la presión del brazo de trabajo, la velocidad del disco inferior, la frecuencia y amplitud de oscilación del brazo que guía al plato superior así como la posición del centro de oscilación del plato superior, respecto del centro del plato inferior.



Fig. 3.1 Máquina esmeriladora Strasbaugh modelo 6Y-1

Para determinar las ecuaciones de velocidad primero analizaremos cada una de las componentes de la máquina esmeriladora de la Fig 3.1.

Definamos cada una de las variables del sistema usando como referencias las Figuras 3.2 y 3.3:

R_{ad} , es el radio del disco inferior motorizado (a-e) Fig. 3.3.

R_1 es un vector que va desde el centro del plato inferior (motorizado) ((a) Fig. 3.3) hasta el centro del plato superior ((b) Fig. 3.3).

R_0 es la longitud del brazo de oscilación, que va desde el centro de pivoteo ((d) Fig 3.3) hasta el centro del disco superior ((b) Fig. 3.3)

L_0 es el vector de posición de coordenadas universales que va desde el centro de pivoteo ((d) Fig. 3.3) hasta el punto de contacto entre los dos discos ((c) Fig. 3.3)

R_2 es la distancia entre el centro del disco superior (libre) ((b) Fig. 3.3) al punto de contacto entre los dos disco ((c) Fig. 3.3)

L_1 es el vector de posición que va desde el centro del disco inferior ((a) Fig. 3.3) hasta el punto de contacto entre los dos discos ((c) Fig. 3.3)

R es la distancia entre el centro de pivoteo del brazo de oscilación ((d) Fig. 3.3) y el centro del disco inferior ((a) Fig. 3.3)

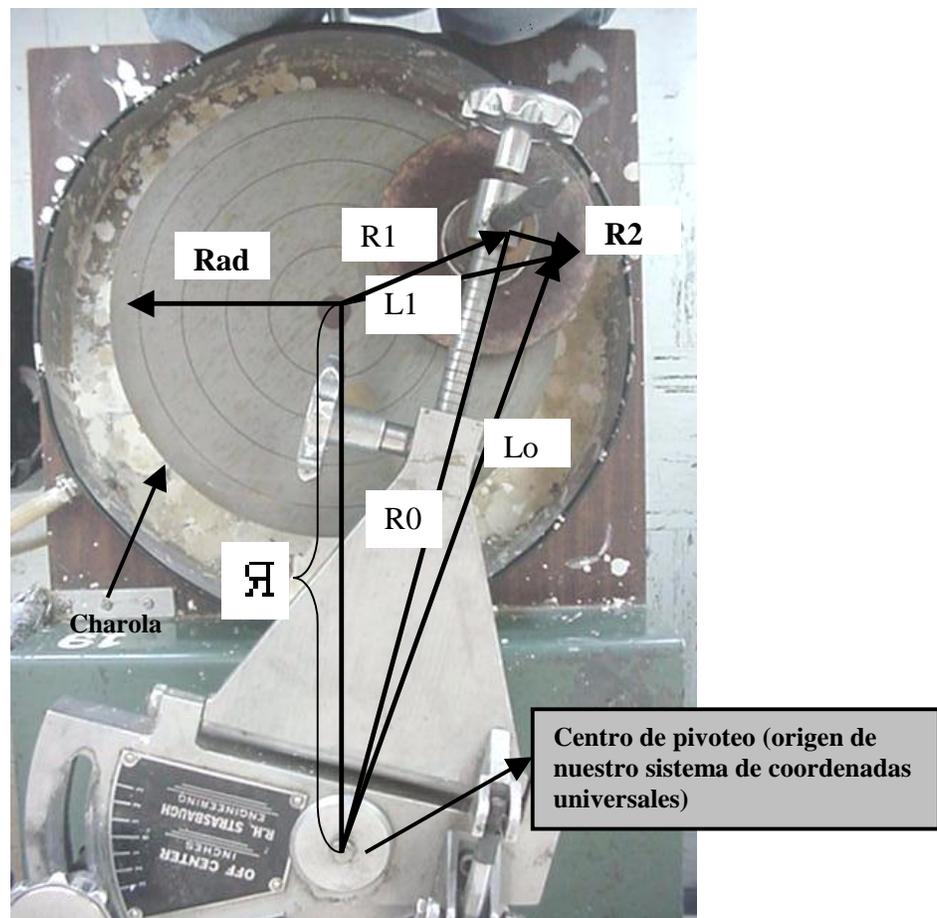


Fig. 3.2 Vista superior de la maquina esmeriladora

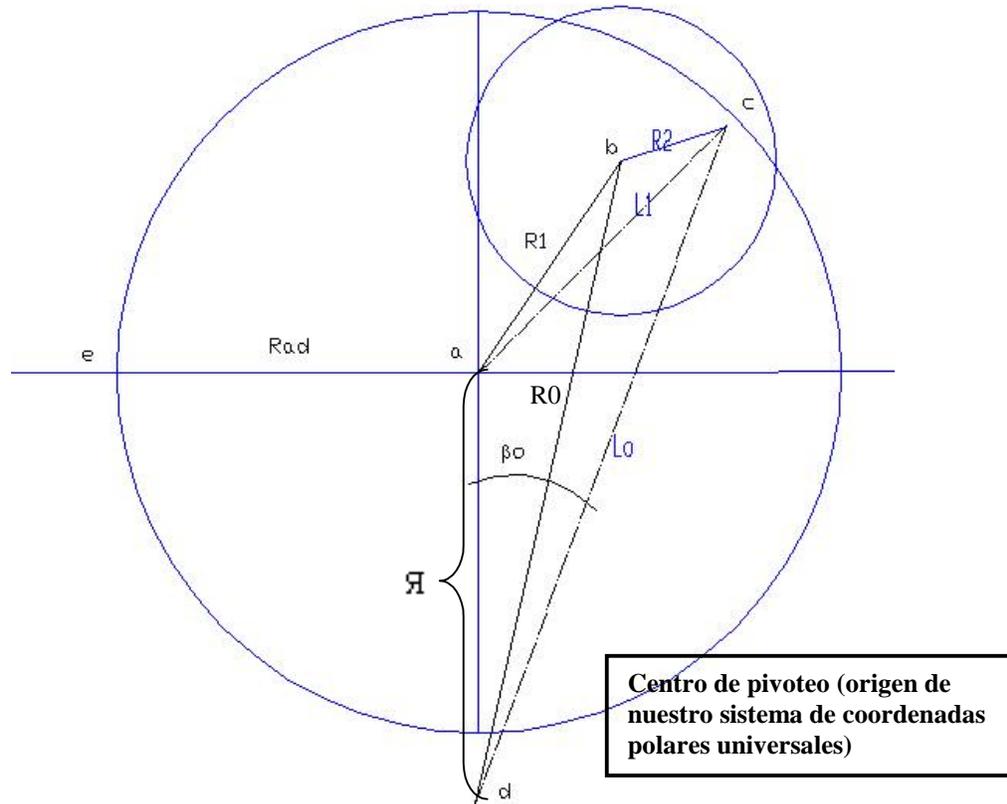


Fig. 3.3 Coordenadas polares de la maquina esmeriladora

Cada plato tiene su propio sistema de coordenadas polares: (R_1 , β_1) , (R_2 , β_2) . Los cálculos se realizan respecto a un sistema universal de coordenadas polares, cuyo eje está definido por la recta que une los ejes fijos de la máquina (el eje del plato inferior (a) fig 3.3 y el eje de pivoteo de brazo (d) Fig. 3.3 que impulsa el desplazamiento del plato superior). Una pareja arbitraria de puntos en contacto, se designa por las coordenadas polares (L_0 , β_0) .

3.1.2 Ecuaciones de las componentes de velocidades relativas

Son tres los vectores velocidad que se originan debido al proceso mecanico: V_0 debido al movimiento oscilatorio del brazo que guía la oscilación del plato superior, V_1 debido a la rotación motorizada Ω^*t del plato inferior y V_2 debido a la rotación del plato superior, que gira bajo el efecto de las fuerzas de fricción del proceso abrasivo Fig. 3.4.

Definamos la oscilacion del brazo por la siguiente ecuacion:

$$\alpha(t) = A_0 + A * \text{sen}\left(2\pi \frac{t}{T_0}\right) \tag{Ec.3.1}$$

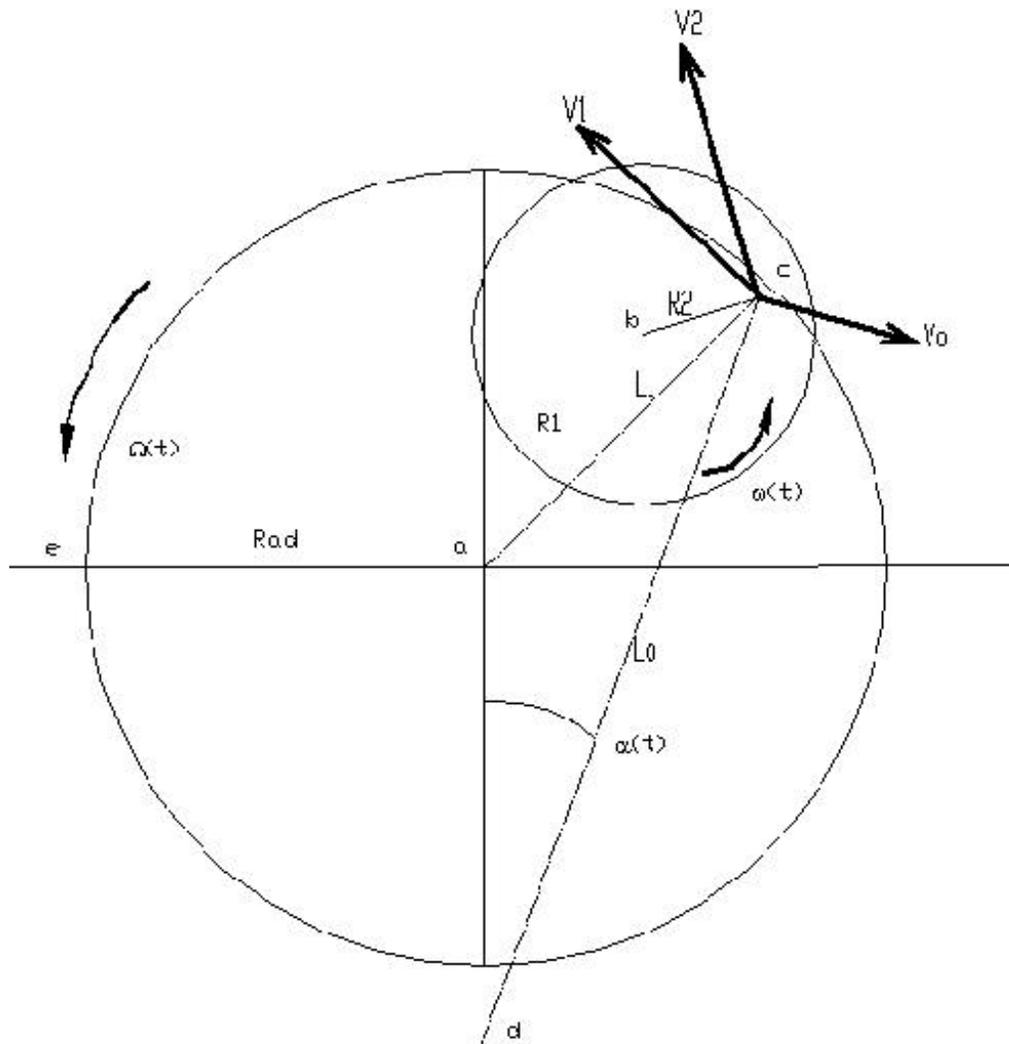


Fig. 3.4 Sistema de velocidades de la maquina esmeriladora

3.1.2.1 Cálculo de la primera componente de velocidad relativa

La primera componente de velocidades relativas es debida al movimiento oscilatorio $\alpha \cdot t$ del brazo guía (Ec. 3.1) donde α es la velocidad angular de oscilación del brazo, A_0 es la posición media angular (central) del pivote ((b) Fig 3.4) respecto al plano de referencia (a,d) y A es la máxima amplitud (en grados) de oscilación del brazo (a ambos lados de A_0), que impulsa a la pieza superior apoyando una barra en el pivote central de la pieza superior Fig. 3.4

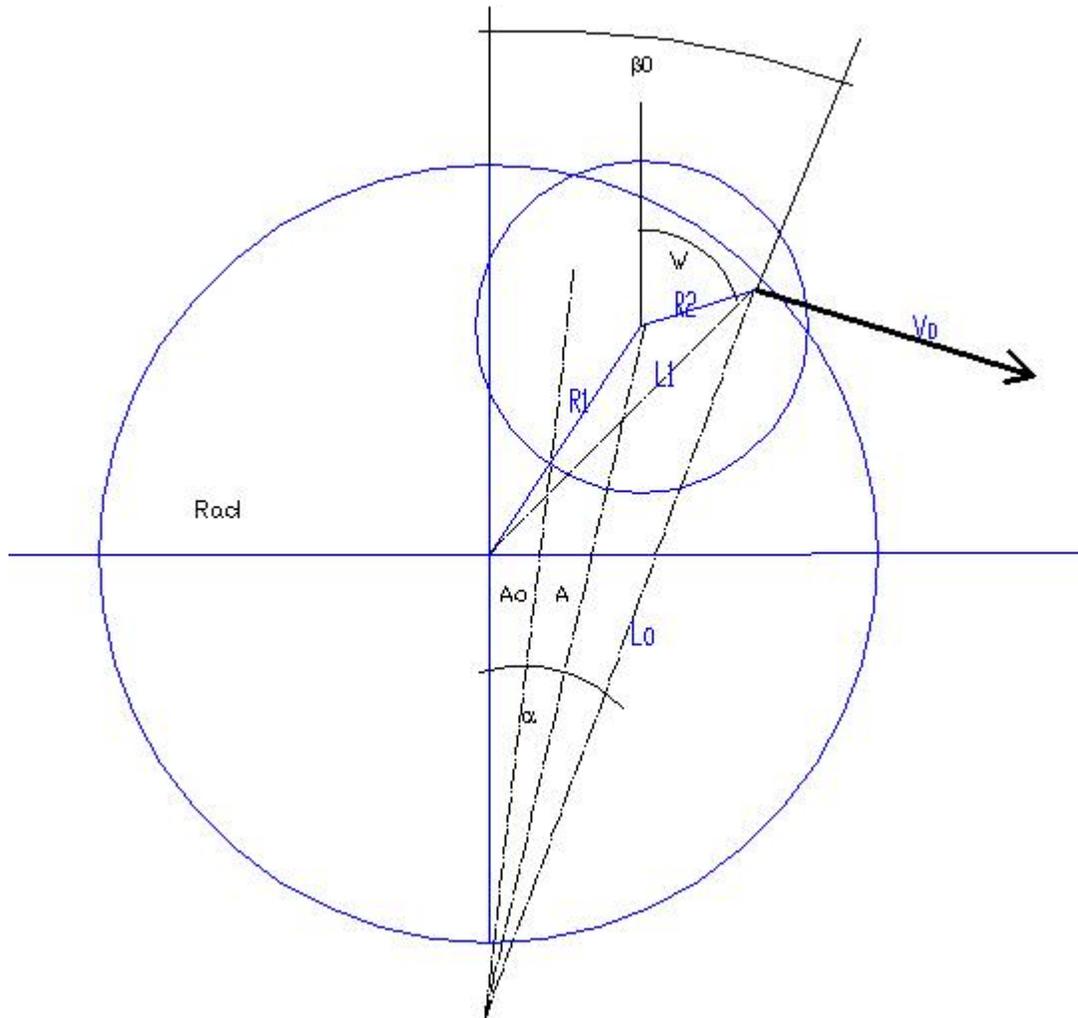


Fig. 3.5 Componentes de velocidad relativa V_0

En un instante (t), W es el valor del ángulo de un punto en el disco superior respecto a la recta de referencia en función de la velocidad del disco superior $\omega(t)$ (Fig. 3.5).

Entonces:

$$L_0 = (R_0^2 + 2 * R_0 R_2 \cos(\theta_2 + W) + R_2^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 3.7}$$

L_0 es un vector (componente radial) que va desde el origen de nuestro sistema de referencia (eje de pivoteo (d) Fig. 3.4), al punto de contacto entre ambos discos que estamos considerando (punto (c) Fig. 3.4).

La componente angular de las coordenadas polares de la pareja de puntos (en referencia al sistema de coordenadas universales en contacto) esta dado por:

$$\beta_0 = A_0 + A + \arctan\left(\frac{\overline{R_0}}{\hat{R}_0 + R_0}\right) \quad \text{Ec. 3.8}$$

en donde R_0 es la longitud del brazo que hace oscilar al plato superior sobre el plato inferior.

Usando el producto vectorial, la primer velocidad, que va a contribuir a la velocidad relativa entre estos dos puntos en contacto durante el proceso de abrasion:

$$V_0 = \alpha \otimes L_0 \quad \text{Ec. 3.9}$$

α es el vector velocidad angular que es paralelo al eje z con vector unitario \hat{k} , y perpendicular a todas las figuras, de la ecuacion 3.1 tenemos:

$$\alpha = \hat{k} \alpha = \hat{k} \left(A_0 + A \sin\left(2\pi \frac{t}{T_0}\right) \right) \quad \text{Ec. 3.10}$$

donde T_0 es el período de oscilación del brazo.

El vector de posición radial L_0 esta siempre en el plano x,y.

$$L_0 = \hat{i} L_{0x} + \hat{j} L_{0y} = L_0 (\hat{i} \cos \beta_0 + \hat{j} \sin \beta_0) \quad \text{Ec. 3.11}$$

Por lo tanto la primera velocidad relativa esta dada por el producto cruz entre el vector de velocidad del la oscilacion del brazo y el vector posicion de dos puntos respecto a nuestro sistema universal de coordenadas polares:

$$V_0 = \alpha \otimes L_0 = \begin{pmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & \alpha \\ L_{0x} & L_{0y} & 0 \end{pmatrix} = \hat{i}(-\alpha L_0 \cos \beta_0) + \hat{j}(\alpha L_0 \sin \beta_0) \quad \text{Ec. 3.12}$$

3.1.2.2 Cálculo de la segunda componente de velocidad relativa

La segunda componente vectorial de velocidad es producida por la rotación del plato inferior (motorizado) que gira a una velocidad angular $\Omega = \text{Constante}$ (Fig. 3.7).

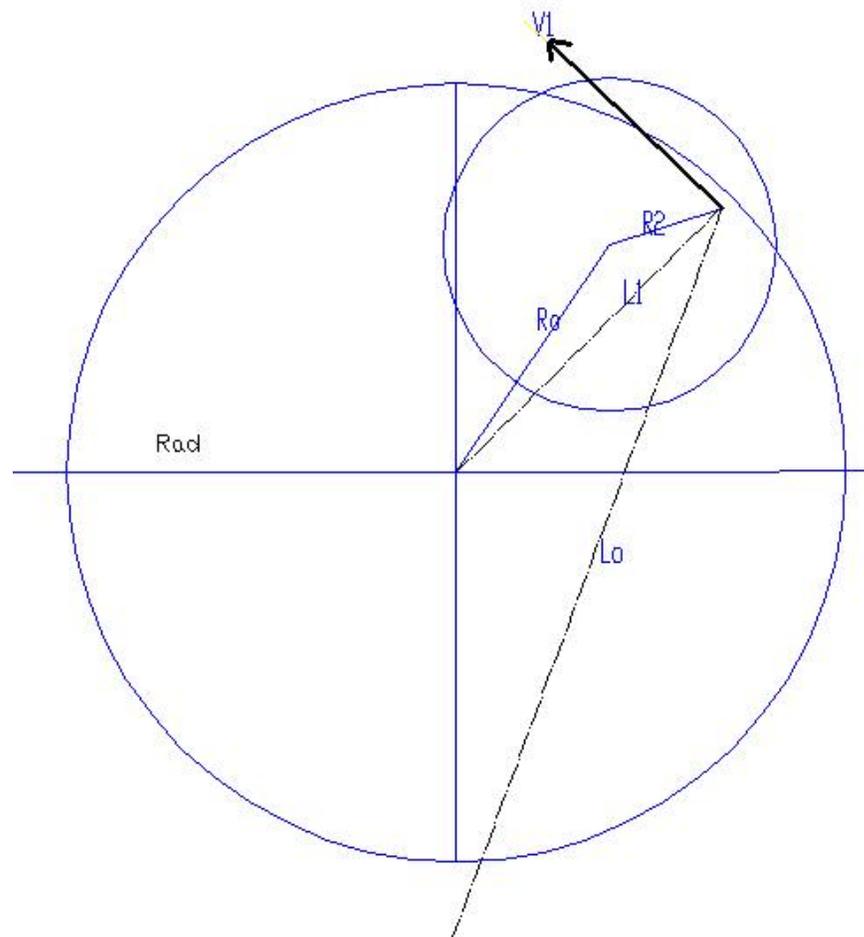


Fig. 3.7 Componentes de velocidad relativa V_1

Las coordenadas polares de la pareja de puntos en contacto, ahora con origen en el eje del plato inferior, son (Fig. 3.8):

$$\overline{R}_1 = R_2 * \sin(\theta_2 + W) \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$\hat{R}_1 = R_2 * \cos(\theta_2 + W) \quad \text{Ec. 3.14}$$

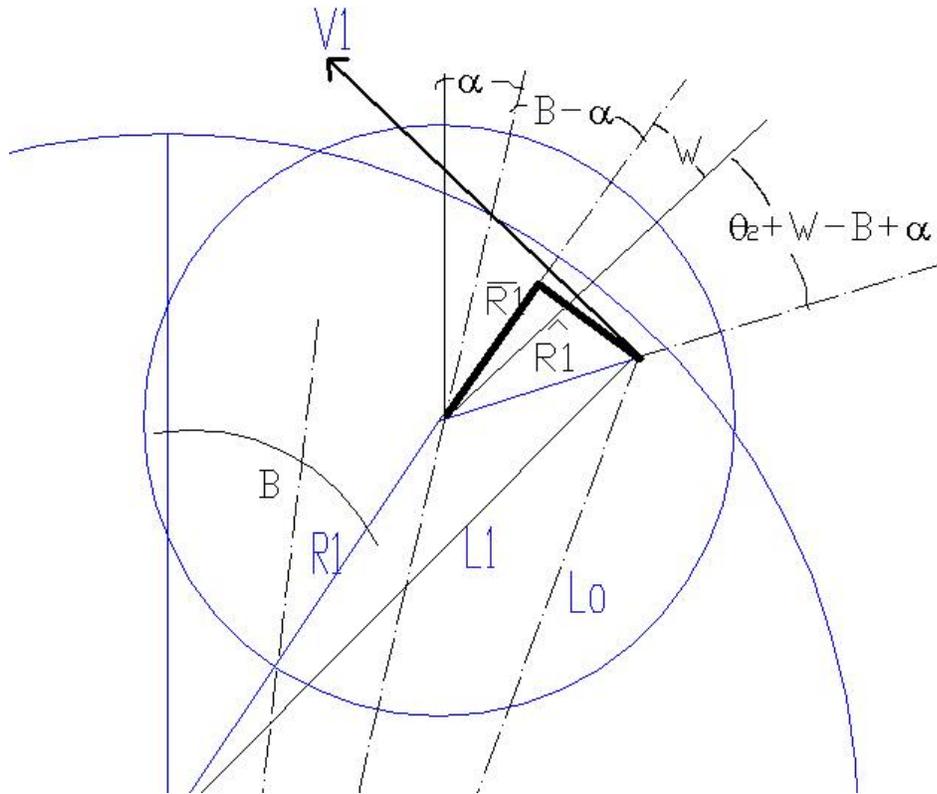


Fig 3.8 Componentes de la velocidad relativa V_1

Donde L_1 (posición radial respecto al sistema de coordenadas centrado en el eje de rotación del plato inferior ((a) fig. 3.3)) ahora es:

$$L_1 = ((R_1 + \hat{R}_1)^2 + \overline{R}_1^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 3.15}$$

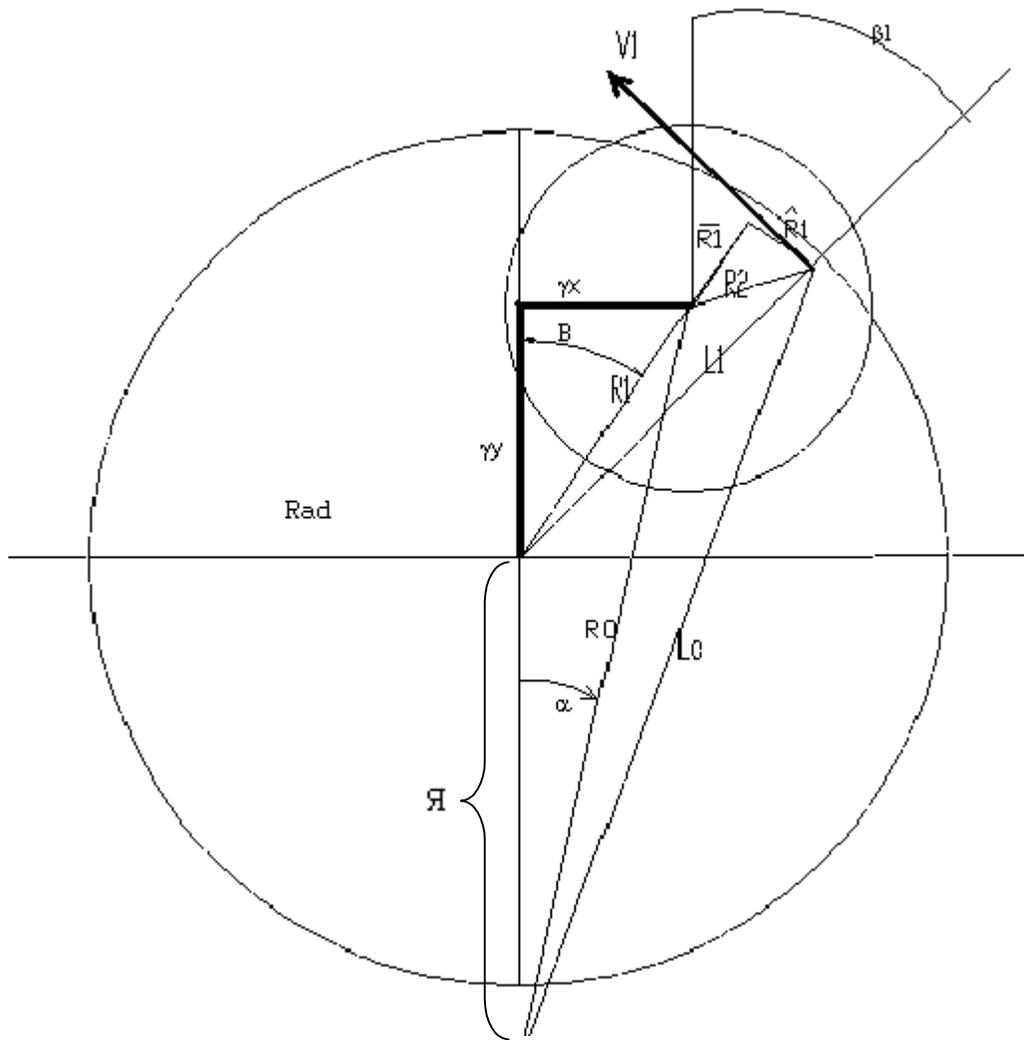


Fig 3.9 Componentes auxiliares de proyeccion

la distancia R_1 que separa los centros de las dos piezas que interactúan (Fig. 3.9) está dada por:

$$R_1 = (\gamma_x^2 + \gamma_y^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 3.18}$$

donde

$$\gamma_x = R_0 \text{sen}(\alpha) \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$\gamma_y = R_0 \text{cos}(\alpha) - \mathfrak{R} \quad \text{Ec. 3.17}$$

donde ϖ es la distancia que une al eje del plato motorizado, con el centro de oscilación del brazo que guía al plato superior (puntos (a) y (d), Fig. 3.3).

La magnitud de la componente radial de las coordenadas polares de los dos puntos en contacto, respecto del eje de rotación del plato inferior esta dada por:

$$L_1 = (R1^2 + 2 * R1 * R2 * \cos(W + \theta + \alpha - B)) \quad \text{Ec. 3.19}$$

la componente angular es igual a:

$$\beta_1 = B + \arctan\left(\frac{\overline{R}_1}{R_1 + R_1}\right) \quad \text{Ec. 3.20}$$

el ángulo B , que forma la recta que une los centros de la herramienta y la pieza es igual a:

$$B = \arctan\left(\frac{\gamma_x}{\gamma_y}\right) \quad \text{Ec. 3.21}$$

La expresión que designa a esta segunda componente vectorial de velocidad es:

$$V_1 = \Omega \otimes L_1 \quad \text{Ec. 3.22}$$

donde la velocidad angular del disco inferior motorizado es paralela al eje z

$$\Omega = \hat{k} \Omega \quad \text{Ec. 3.23}$$

y la componente radial se encuentra en el plano x, y

$$L_1 = \hat{i} L_{1x} + \hat{j} L_{1y} = L_1 (\hat{i} \cos \beta_1 + \hat{j} \text{sen} \beta_1) \quad \text{Ec. 3.24}$$

es decir que la segunda velocidad relativa vectorial esta dada por la Ec. 3.25:

$$V_1 = \Omega \otimes L_1 = \begin{pmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & \Omega \\ L_{1x} & L_{1y} & 0 \end{pmatrix} = \hat{i}(-\Omega L_1 \cos \beta_1) + \hat{j}(\Omega L_1 \text{sen} \beta_1) \quad \text{Ec. 3.25}$$

3.1.2.3 Cálculo de la tercer componente de velocidad relativa

La tercer componente vectorial de velocidad que contribuye a formar la velocidad relativa entre los dos puntos interactuantes, es la producida por la rotación del plato (pieza) superior que gira libremente, impulsado solamente por la fuerza de fricción resultante del proceso abrasivo.

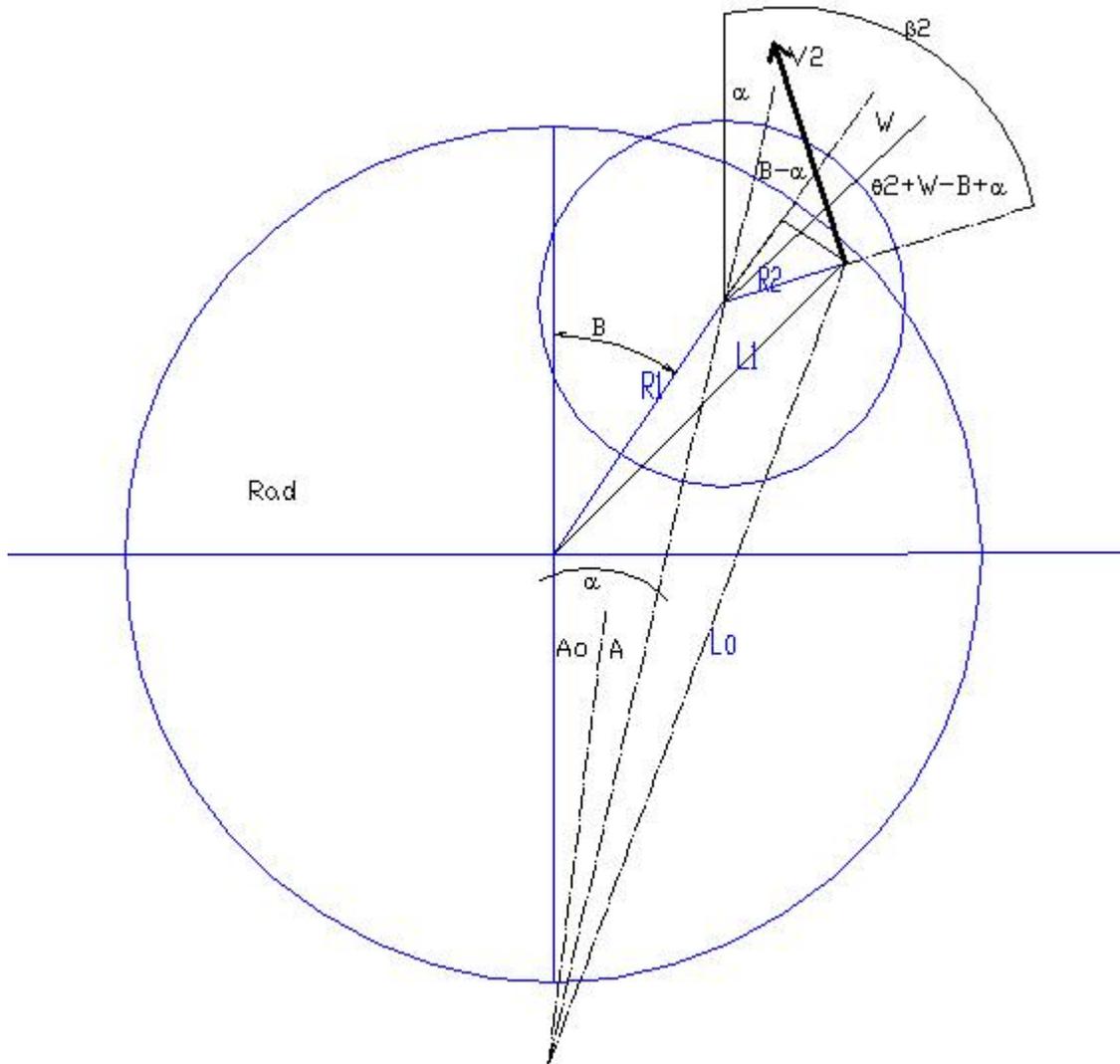


Fig. 3.10 Componentes relativas de velocidad V_2

Las componentes del vector de posición, respecto del eje del plato superior, en coordenadas polares son:

$$\beta_2 = \theta_2 + W + B \quad \text{Ec. 3.26}$$

$$R_2 = \hat{i} R_{2x} + \hat{j} R_{2y} = R_2 (\hat{i} \text{sen} \beta_2 + \hat{j} \cos \beta_2) \quad \text{Ec. 3.27}$$

Por la construcción de la maquina y la disposición de los platos ($\omega(t) = \hat{k} \omega$)

$$V_2 = \omega \otimes R_2 = \begin{pmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & 0 & \omega \\ R_{2x} & R_{2y} & 0 \end{pmatrix} = \hat{i}(-\omega L_1 \cos \beta_2) + \hat{j}(\omega R_2 \text{sen} \beta_2) \quad \text{Ec. 3.28}$$

3.2 Condiciones a la frontera en el proceso de desgaste

Dependiendo de las dimensiones de los dos platos, de la amplitud de A_1 y la posición central de la oscilación del brazo A_0 , puede haber momentos en los que una sección del plato superior sobresalga por encima del borde del plato inferior, en esos momentos los elementos de área del plato superior NO sufrirán el efecto del proceso abrasivo.

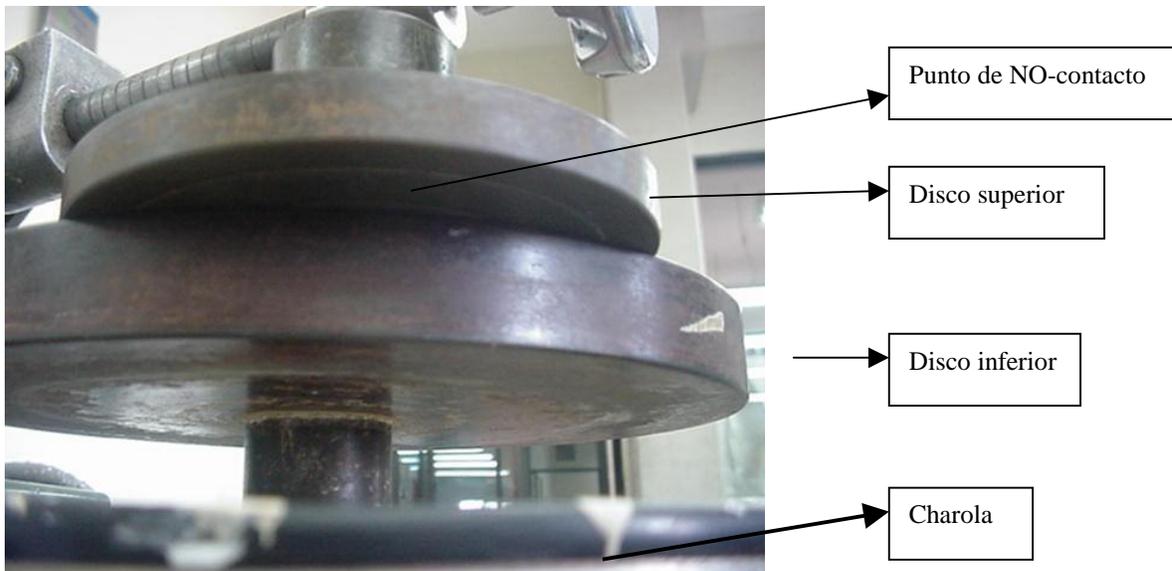


Fig. 3.11 Condiciones a la frontera

La condición para desgaste cero entonces es aquel que el vector de posición de un punto del plato superior sea mayor que el radio del plato inferior $L_1 > \text{Rad}$ (Fig. 3.12):

$$L_1 = \left[(R_1 + R_2 \cos(\theta_2 + W))^2 + (R_2 \text{sen}(\theta_2 + W))^2 \right]^{1/2} > \text{Rad} \quad \text{Ec. 3.29}$$

3.3 Dinámica de la rotación del disco libre.

La rotación del disco superior esta sujeto al efecto de fuerza friccional entre los dos platos

De acuerdo al análisis de velocidad entre los dos platos determinamos la siguiente función de rotación en el plato superior

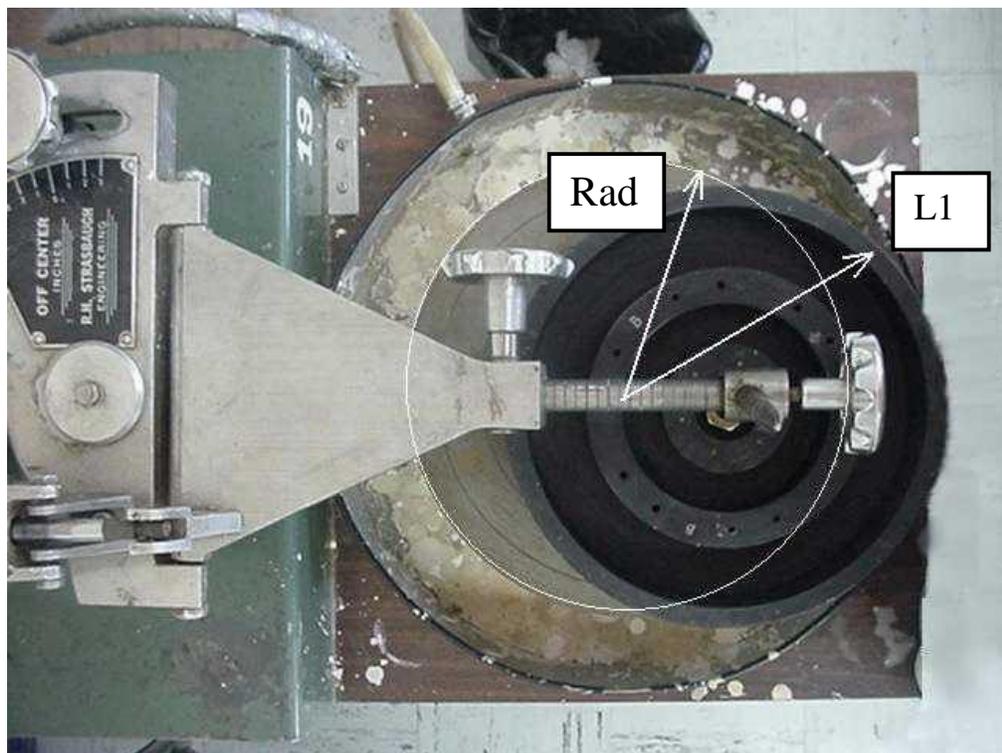


Fig. 3.12 Relación entre el diámetro de la herramienta esmeriladora- pulidora y el plato inferior (herramienta)

El disco superior tiene una rotación como función de la resultante de las fuerzas tangenciales producidas por la fricción. De acuerdo a esto se desarrolló una ecuación de velocidad angular en función de la posición del disco superior respecto del disco inferior:

$$\omega(t) = \Omega \left(1 - \frac{R1}{Ro} - \frac{R1}{Rad} \right) \quad \text{Ec. 3.30}$$

El comportamiento del disco superior obedece a las leyes de fricción y momento angular, de resultados prácticos, se determinó que la velocidad angular del disco superior, cuando el centro del plato superior esta en el centro del plato inferior es la misma ($\Omega = \omega$), mientras que en la orilla, la velocidad del disco superior es la mitad de la velocidad del disco inferior ($\omega = 1/2 \Omega$).

3.4 Suma vectorial de las velocidades relativas

La velocidad relativa entre dos puntos esta dada por la suma vectorial de componentes de cada una de las velocidades V_0 , V_1 , y V_2 Fig. 3.13

La componente de velocidad relativa final en el eje (x) esta dada por:

$$V_{Tx} = V_{0x} - V_{1x} + V_{2x} \quad \text{Ec. 3.31}$$

y la componente de velocidad relativa final en el eje (y) esta dada por:

$$V_{Ty} = V_{0y} - V_{1y} + V_{2y} \quad \text{Ec. 3.32}$$

El signo negativo indica un cambio en dirección de las componentes de velocidad relativa V_{1x} y V_{1y} para obtener las velocidades relativas entre dos puntos.

Por lo tanto la magnitud de la velocidad relativa entre dos puntos esta dada por:

$$V_T = \sqrt{(V_{Tx})^2 + (V_{Ty})^2} \quad (\text{cm/s}) \quad \text{Ec. 3.33}$$

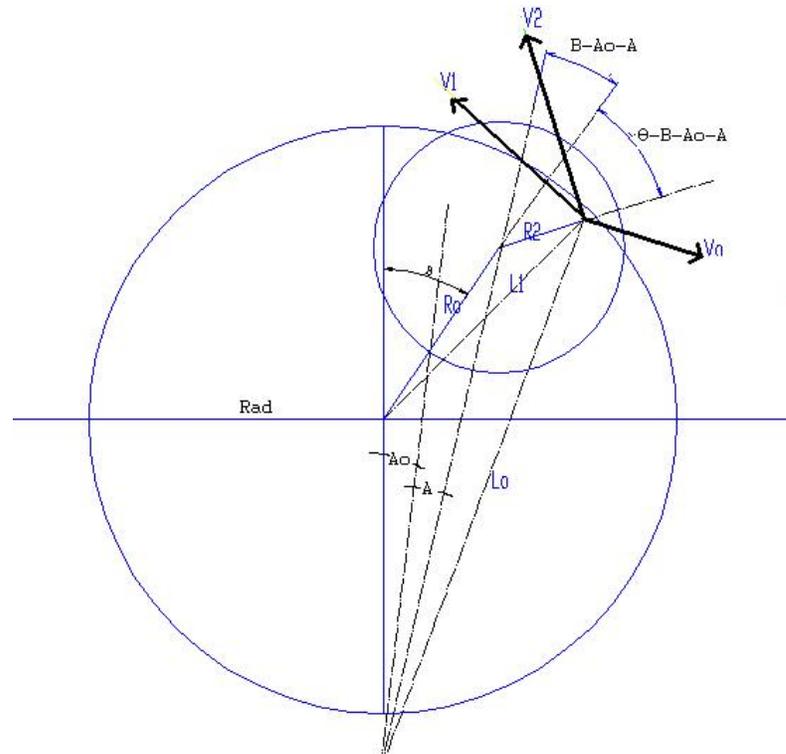


Fig. 3.13 Suma de componentes de velocidad relativa.

3.5 Área de contacto entre el disco superior y el disco inferior

El área real de contacto entre los dos discos no es constante, depende de la posición del brazo de oscilación y la longitud de este, por lo tanto, su área depende de la amplitud de oscilación del brazo de oscilación, como se muestra en la Fig. 3.14

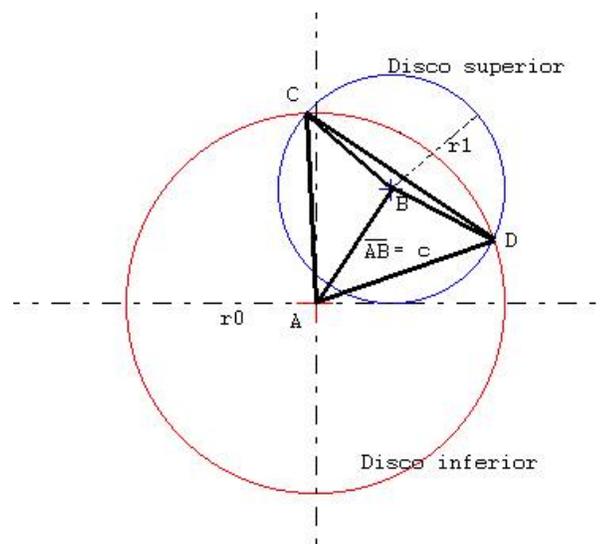


Fig. 3.14 Área de contacto entre dos círculos

El área de contacto entre dos discos en contacto esta definido por los siguientes parámetros.

Definimos las coordenadas del disco inferior con centro en A:

$$x_0 = 0$$

$$y_0 = 0$$

$r_0 = \text{Rad}$ - Radio del disco inferior

De igual forma se definen las coordenadas del disco superior (respecto al centro del disco inferior) con centro en B:

$$x_1 = \gamma_x \quad (\text{de la Ec. 3.16})$$

$$y_1 = \gamma_y \quad (\text{de la Ec. 3.17})$$

$r_1 = \text{Radio del disco superior};$

Calculando la distancia entre centros dado por el segmento $\overline{AB} = c$:

$$c = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad \text{Ec. 3.34}$$

C y D son los puntos de intersección entre los dos círculos, ahora calculamos los ángulos CBA y CBD usando la formula del coseno obteniendo:

$$CBA = \cos^{-1} \left(\frac{r_1^2 + c^2 - r_0^2}{2 * r_1 * c} \right) \quad \text{Ec. 3.35}$$

$$CBD = 2 * CBA \quad \text{Ec. 3.36}$$

Similarmente encontramos los ángulos CAB y CAD dados por:

$$CAB = \cos^{-1} \left(\frac{r_0^2 + c^2 - r_1^2}{2 * r_0 * c} \right) \quad \text{Ec. 3.37}$$

$$CAD = 2 * CAB \quad \text{Ec. 3.38}$$

Donde CBD y CAD se expresan en radianes.

De esta forma encontramos los segmentos de cada círculo que son cortados por la cuerda CD, tomando el área del sector de círculo BCD y restando

el área del triángulo BCD. Similarmente encontramos el área del sector ACD y le restamos el área del triángulo ACD, obtenemos el área real de contacto entre dos círculos dado por la siguiente ecuación

$$Area = \frac{1}{2} * CBD * r1^2 - \frac{1}{2} * r1^2 * sen(CDB) + \frac{1}{2} * CAD * r0^2 - \frac{1}{2} * r0^2 * sen(CAD) \quad Ec. 3.39$$

3.6 Ecuación de desgaste

La teoría general de Preston[1] (Ec. 1.1), predice que el desgaste abrasivo esta relacionado con su velocidad relativa y la presión aplicada, de esta forma si conocemos la presión aplicada al sistema (sistema neumático para el pivote de oscilación) y la Ec. 3.33, podemos determinar el desgaste abrasivo en cada punto de los dos discos.

La ecuación de Preston[1] (Ec. 1.1) solo modela los efectos mecánicos de desgaste, algunos resultados experimentales publicados [2][3][4] demuestran que existen más parámetros que influyen directamente con el desgaste abrasivo, como es el tipo de grano, área de trabajo, dureza de la herramienta y el vidrio, etc.

Otros resultados experimentales [5] demuestran que el factor de desgaste varía en función del tipo de grano usado en el proceso anterior.

Este comportamiento no esta determinado por la ecuación de Preston[1] (Ec. 1.1) ni por la ecuación de Kumanin[6] de desgaste abrasivo (Ec. 1.2).

De esta forma modelamos la ecuación de desgaste en base a los resultados experimentales usando como ecuación principal la ecuación de Kumanin[6] (Ec. 1.3), la cual predice un comportamiento lineal de desgaste, para diferentes tipos de grano de abrasivo.

REFERENCIAS

[1] Preston, F. (1927). "The theory and design of plate glass polishing machines," *Journal of the Society of Glass Technology*, Vol. 11, pp. 214-256.

[2] R. Xu, G. Smart, and M. Zhang, "Particle characteristics and removal rate in CMP process" in *Proc. Fourth Int. Chemical-Mechanical Planarization for ULSI Multilevel Interconnection Conf.*, Santa Clara, CA, Feb. 11-12, 1999, pp. 253-255.

[3] Y. Moon, "Mechanical aspects of the material removal mechanism in chemical mechanical polishing (CMP)", Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA, 1999.

[4] Y. Moon, I. Park, and D. A. Dornfeld, "Mechanical properties and relationship to process performance of the polishing pad in chemical mechanical polishing (CMP) of silicon" in *Proc. ASPE Spring Topical Meeting on Silicon Machining*, Apr. 1998, pp. 83-87.

[5] T.S. Izumitani, "Optical glass", Hoya corporation, American institute of physics, 1983

[6] Kumanin K. G "Generation of optical surface" London: The focal library, 67-104, 1967

Grant R. Fowles, "Analytical Mechanics", Holt sanders 3rd edition, 1977

<http://mathforum.org>

CAPITULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO ABRASIVO.

En este capítulo se exponen los resultados de los experimentos realizados en la etapa de esmerilado y de pulido con abrasivos libres.

Posteriormente se comparan con los datos de la simulación numérica del proceso de desgaste abrasivo.

4.1 Preparación de la herramienta

Se preparó la herramienta esmeriladora-pulidora con pequeñas secciones cilíndricas de vidrio PYREX, este vidrio ya viene manufacturado en forma de barra de 120 cm de largo al diámetro que se requiere para las secciones de la herramienta. Se cortaron varias secciones de vidrio PYREX todas a una misma longitud de 1 cm,

El primer paso fue colocar unos tapones de corcho dentro de las perforaciones donde se colocarán las barras (Fig. 4.1), esto evita primero, que entre abrasivo en la perforación y segundo que al cambiar de tamaño de grano no quede residuo del anterior tamaño ya que esto provocaría que el nuevo proceso tenga abrasivo contaminado provocándonos ralladuras en la superficie Fig. 4.1.



Fig.4.1 Protección de las perforaciones

Posteriormente se colocan las piezas de vidrio en cada una de las secciones de la herramienta (vidrios de apoyo y vidrios para soporte de las barras). Procurando que cada vidrio asiente bien en cada posición (Fig. 4.2).



Fig. 4.2 Colocación de los vidrios

Para bloquear los vidrios en estos experimentos se colocan pequeños pedazos de cera de baja temperatura de fusión dentro de cada sección de la herramienta y sobre ellos la pieza de vidrio correspondiente; de esta forma, cuando la cera se empieza a derretir, el mismo peso del vidrio provocará la formación de una capa uniforme entre las superficies.

Para calentar la herramienta se le coloca en un horno como se muestra en la Fig. 4.3 durante aproximadamente 10 minutos.



Fig. 4.3 Horno de fusión con cera blanda

Una vez que se bloquearon todas las piezas, se coloca la herramienta en la máquina generadora de planos Blanchard, para rectificar todas las piezas de

vidrio y dejarlas a la misma altura con respecto al plano posterior de la herramienta Fig. 4.4 y 4.5



Fig. 4.4 Rectificación de las piezas en la máquina Blanchard

La máquina Blanchard se emplea para rectificar planos respecto a su plano de referencia, dado por el disco inferior (Fig. 4.4). En nuestra herramienta esmeriladora-pulidora las caras planas no están perfectamente paralelas entre sí, tienen una desviación de aproximadamente 40 micras, de esta forma si medimos la distancia perpendicular entre cada vidrio y la superficie sobre la que están montados. La topografía de la herramienta respecto al plano de referencia (la cara inferior de la herramienta esmeriladora-pulidora) se muestra en la Fig. 4.5.

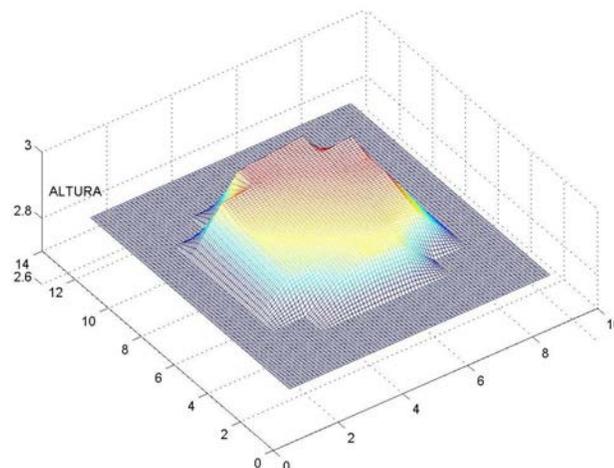


Fig. 4.5 Relación de alturas entre los vidrios en función de la superficie inferior de la herramienta

Esta inclinación será corregida en trabajos futuros, para este trabajo de tesis se decidió usar esta superficie para presentar en las gráficas de desgaste el comportamiento individual del proceso de desgaste en cada uno de los vidrios.

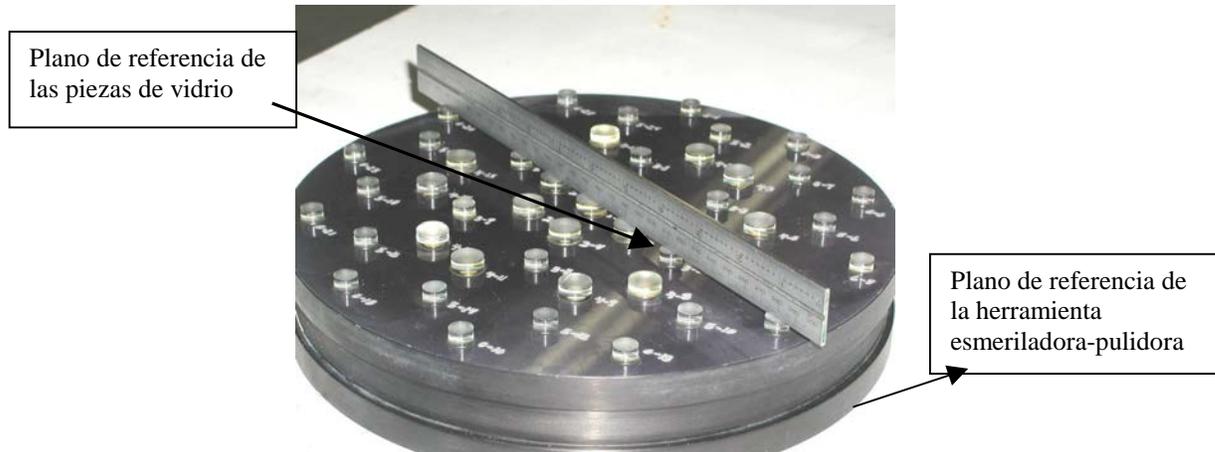


Fig. 4.6 Piezas rectificadas respecto a un plano de referencia de la máquina Blanchard

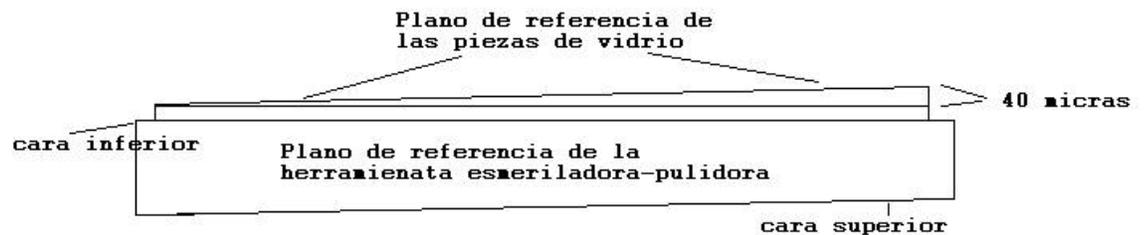


Fig. 4.7 Planos de referencia en la herramienta esmeriladora-pulidora

Una vez que se tiene la herramienta rectificada se procedió a una limpieza exhaustiva de cada una de las superficies y piezas, con esto nos aseguramos que no quede algún grano de abrasivo que se haya desprendido en la etapa de rectificación o residuos de metal provocados por la etapa de rectificación de la herramienta.

4.2 Proceso de esmerilado.

En el proceso de esmerilado de superficies planas, es extremadamente importante que la superficie de la herramienta esmeriladora de hierro se mantenga plana durante todo el proceso de esmerilado, en caso contrario, una

curvatura en la herramienta producirá una curvatura de signo contrario en la pieza de trabajo.

Una pequeña desviación en la herramienta esmeriladora o en la pieza de trabajo puede ser corregida ajustando la carrera de la máquina.

Cuando la superficie no puede ser corregida por medio de los ajustes de carrera, es necesario corregir la herramienta. Para corregir la herramienta se emplean dos herramientas del mismo material y se trabaja con abrasivo de 25 micras, con los ajustes correspondientes podemos corregir la herramienta de trabajo.

Cuando se colocan dos discos uno encima del otro, y entre ellos un abrasivo, el desgaste que ocurre en las superficies es el resultado de la interacción de velocidades y presiones entre los dos discos, la tendencia principal es que el disco superior tiende a hacerse cóncavo y el disco inferior convexo Fig.4.8.

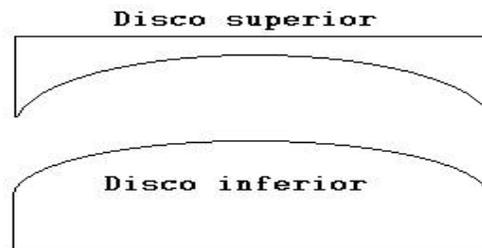


Fig. 4.8 Forma de desgaste entre dos discos en contacto

Antes de comenzar a esmerilar las piezas de vidrio debemos de ajustar los parámetros de la máquina esmeriladora, como son presión, velocidad angular del plato motorizado, longitud y excentricidad de la oscilación.

En este punto nos ayudaremos de la simulación numérica expuesta en el Capítulo III.

En el proceso, los ajustes posibles de la máquina esmeriladora que empleamos son:.

- 1.- Ajuste a carrera Normal
- 2.- Ajuste a carrera Corta
- 3.- Ajuste a carrera Larga

En los que las variables bajo control del operador son: velocidad del brazo de oscilación, velocidad del disco inferior (motorizado) y la posición (radial) y angular del pivote del plato superior.

Cada uno de estos ajustes es afectado por el diámetro del disco inferior, la posición del brazo de oscilación respecto al plano de referencia A_0 (Fig. 3.3 (a)-(d)) y la amplitud de la oscilación del brazo en relación con el punto central A .

En esta configuración de ajustes de carrera, generalmente el plato inferior (herramienta) es más grande que el plato superior (vidrio en nuestro experimento).

1.- Se dice que se tiene carrera normal en la oscilación, cuando en el extremo de la oscilación, el disco superior sobresale $1/3$ de su diámetro respecto al disco inferior (Fig. 4.9 y 4.10).

Esto provoca que toda la superficie del disco superior tenga contacto con toda la superficie del disco inferior, esto hace que el desgaste sea uniforme en el disco superior, de esta forma, el disco superior (vidrio) mantiene su planaridad en todo el proceso de desgaste abrasivo.

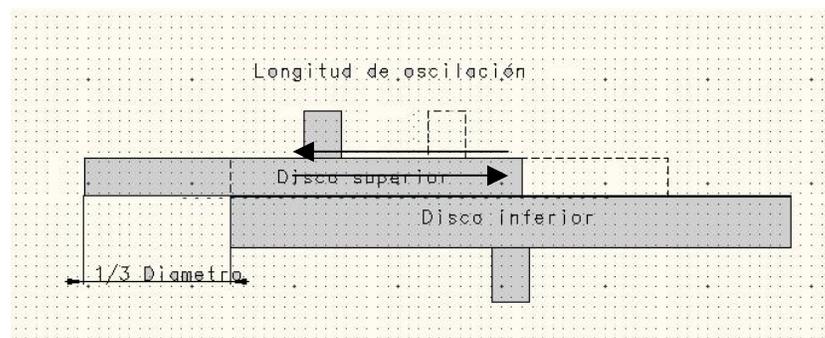


Fig. 4.9 Vista lateral del ajuste de carrera normal

Usando las ecuaciones de velocidad del capítulo III en coordenadas polares, podemos simular la trayectoria de cada punto del disco superior sobre el disco inferior, de esta forma podemos predecir el comportamiento de desgaste y la topografía que se obtendrá en el disco superior y en el disco inferior. Fig. 4.11

Simulando el proceso de desgaste del disco superior, podemos encontrar la topografía final.

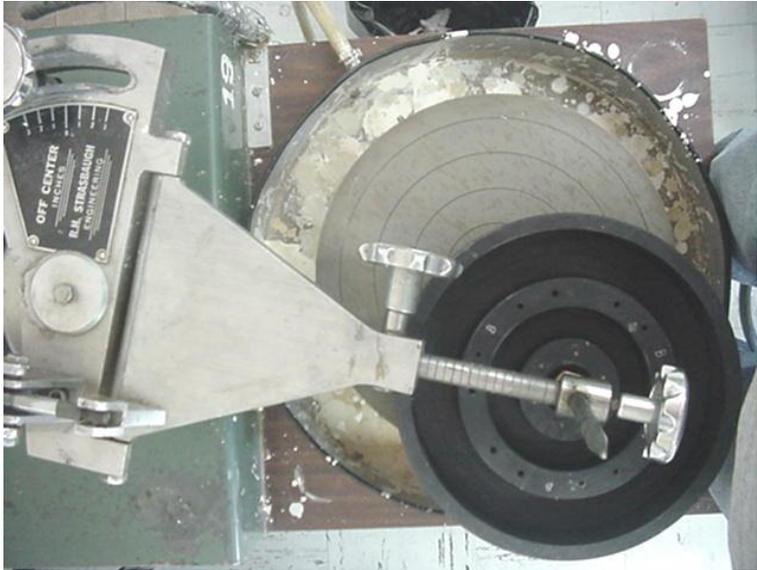


Fig. 4.10 Ajuste de carrera normal

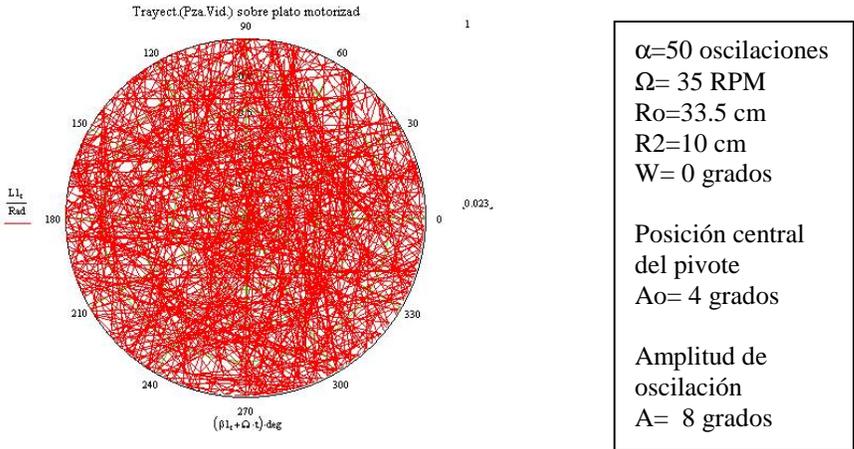


Fig. 4.11 Trayectoria de un punto de la pieza de vidrio sobre el disco inferior

En la Fig. 4.12 se muestra la topografía final de desgaste del disco superior cuando tenemos los ajustes a carrera normal. Puede notarse que no es perfectamente plana sino que es ligeramente cóncava (en la simulación tenemos aproximadamente 0.5-1 micras), esto es debido a muchos factores como son las diferencias de presión y velocidad que existen en la orilla y en el centro del disco superior.

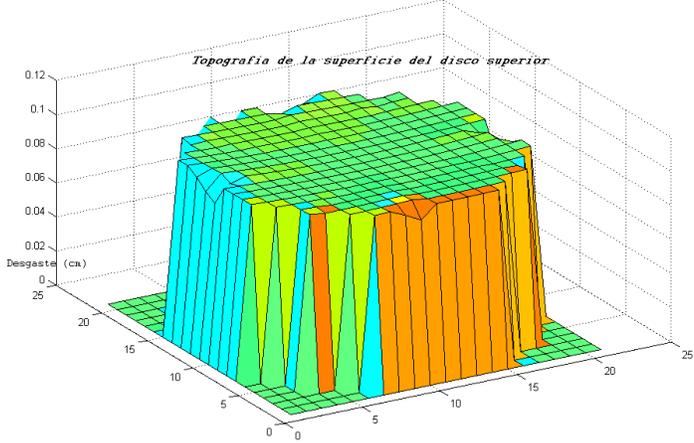


Fig. 4.12 Topografía de desgaste del disco superior a carrera normal

2.- Se define carrera corta, cuando el borde del disco superior no sobresale por fuera del borde del disco inferior o sobresale menos que en el caso de la carrera normal, de esta forma la longitud de oscilación permite al disco superior recorrer toda la superficie del disco inferior (Fig. 4.13 y 4.15).

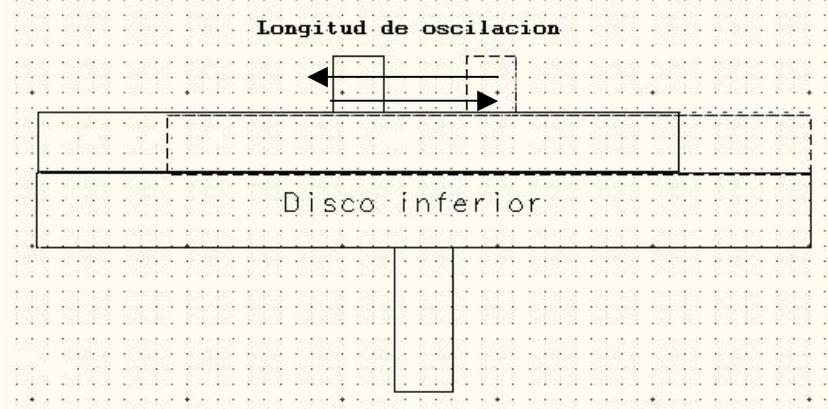


Fig. 4.13 Vista lateral ajuste a carrera corta

Este ajuste da como resultado que el centro del disco inferior se trabaje más y los bordes del disco superior tocan el borde del disco inferior durante muy poco tiempo, por lo tanto la deformación de la herramienta (disco inferior) tiende a ser una superficie cóncava, mientras que el desgaste del disco superior (vidrio) se hace convexa. Fig. 4.14

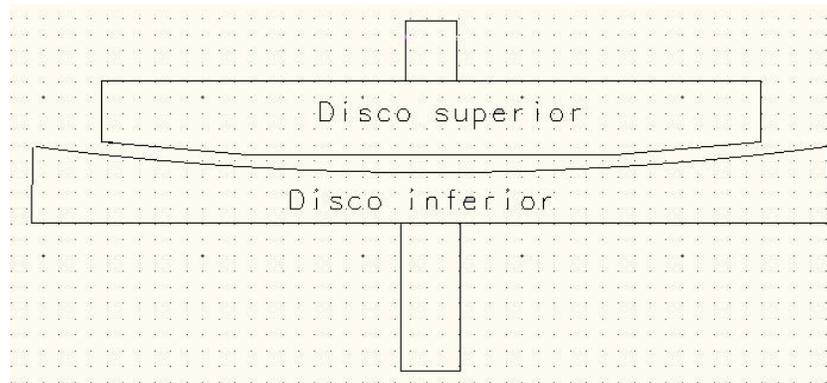


Fig. 4.14 Superficie final con ajuste a carrera corta

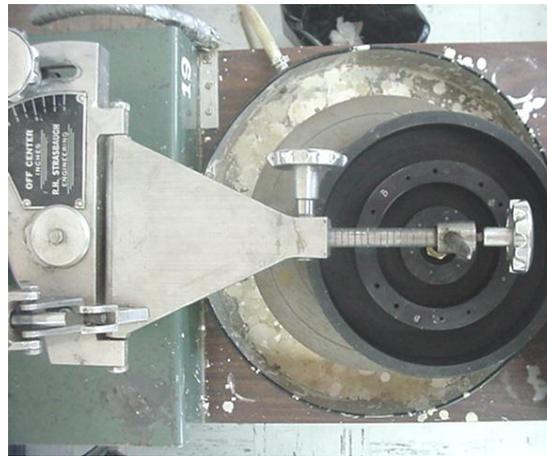


Fig. 4.15 Vista superior ajuste de carrera corta

Simulando la trayectoria del disco superior sobre el disco inferior obtenemos el comportamiento de desgaste del disco inferior (Fig. 4.16), de esta forma podemos predecir como será el desgaste en el disco superior (signo contrario).

Como podemos observar en la Fig. 4.16 el desgaste se concentra más en el centro de la herramienta, visualizado por la densidad de trazos del disco superior.

Observando la Fig. 4.17 tenemos una superficie convexa en el disco superior, esto es debido a que el centro de la herramienta se trabaja más, esto provoca que la herramienta tenga una superficie cóncava (mayor desgaste en el centro) y el disco superior convexa (mayor desgaste en las orillas).

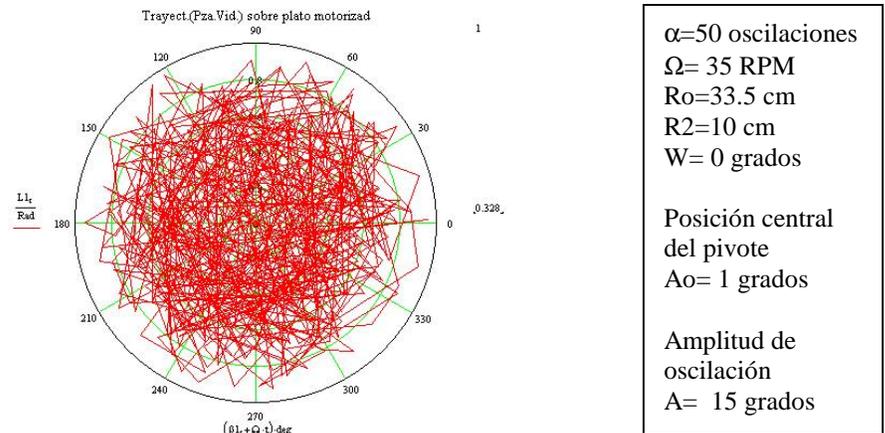


Fig. 4.16 Trayectoria de un punto del disco superior sobre el disco inferior a carrera corta

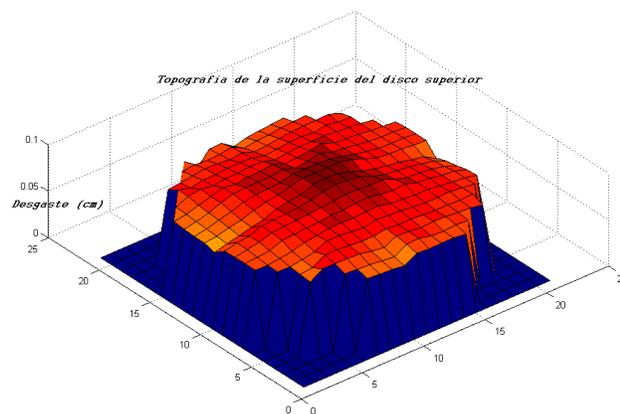


Fig. 4.17 Topografía de desgaste del disco superior a carrera corta

3.- Se define carrera larga, cuando el disco superior sobresale más de 1/3 de su diámetro respecto al disco inferior. Fig. 4.18

De esta forma la amplitud de oscilación del brazo hace que el disco superior trabaje más la orilla del disco inferior, lo que provoca que el disco inferior tenga una superficie convexa, mientras que el disco superior tiene un desgaste en forma cóncava Fig. 4.19

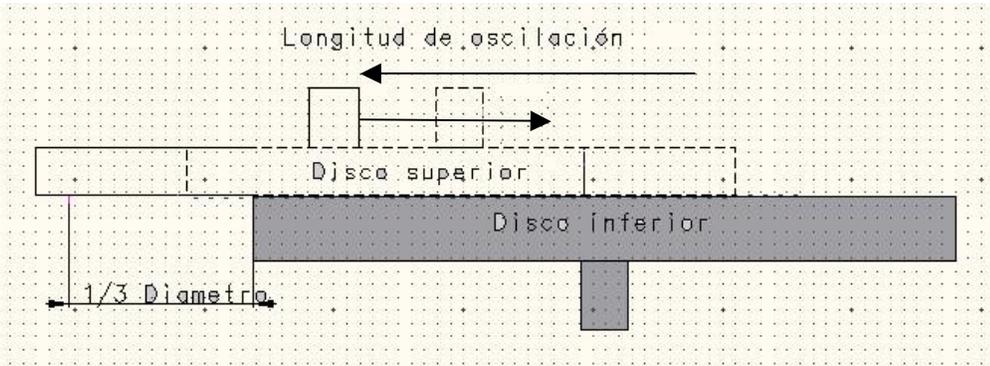


Fig. 4.18 Vista lateral del ajuste a carrera larga

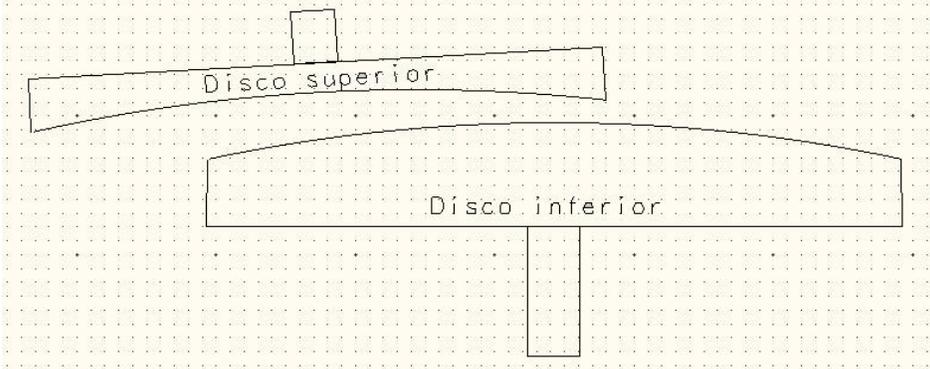


Fig. 4.19 Superficie final con ajuste a carrera larga

De igual forma simulando el trazo de un punto del disco superior sobre el disco inferior con ajustes de carrera larga, tendremos un mayor desgaste (visualizado por la densidad de trazos) en las orillas que en el centro, como se muestra en la Fig. 4.20.

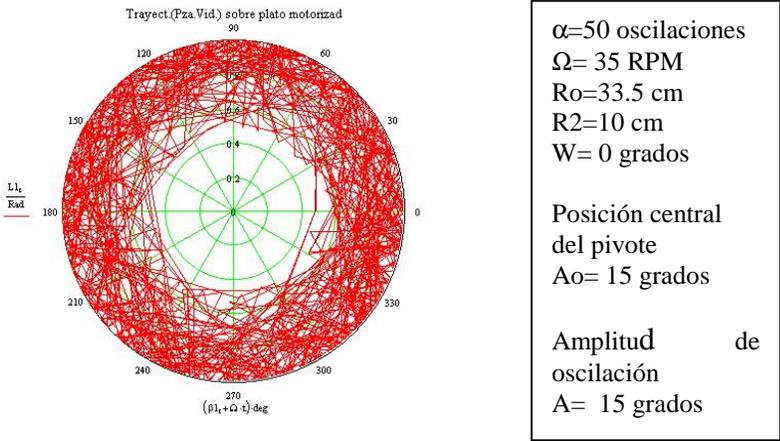


Fig. 4.20 Trazos de un punto del disco superior sobre el disco inferior con ajustes de carrera larga

Como podemos observar en la Fig. 4.20 el desgaste se concentra más en las orillas de la herramienta producto de la densidad de trazos del disco superior.

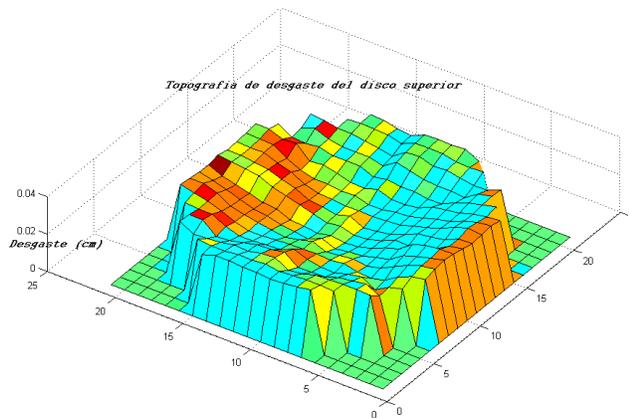


Fig. 4.21 Topografía de desgaste del disco superior a carrera larga

La Fig. 4.21 muestra la topografía final de desgaste del disco superior a carrera larga, esto nos muestra que el desgaste sufrido en el disco superior se concentra más en el centro (superficie cóncava).

Otra combinación de valores de parámetros muy importante es la relación entre la frecuencia de rotación del excéntrico que produce la oscilación del brazo y la frecuencia de rotación del disco inferior (motorizado),

Cuando la frecuencia de oscilación del brazo de oscilación y la velocidad angular del disco inferior (motorizado) son iguales o son múltiplos una de la otra, tendremos desgaste solo en ciertas secciones del disco superior y del disco inferior, lo que tiende a deformar a ambas piezas.

Cuando la frecuencia de oscilación del excéntrico es igual a la velocidad angular del disco inferior, el desgaste es mayor en una zona alargada que con el tiempo tomará la forma de un cilindro, haciendo astigmáticas a ambas superficies. En la Fig. 4.22 se muestra la trayectoria de un punto del disco superior sobre el disco inferior. Note que hay una región del disco inferior que nunca es tocada por el plato superior.

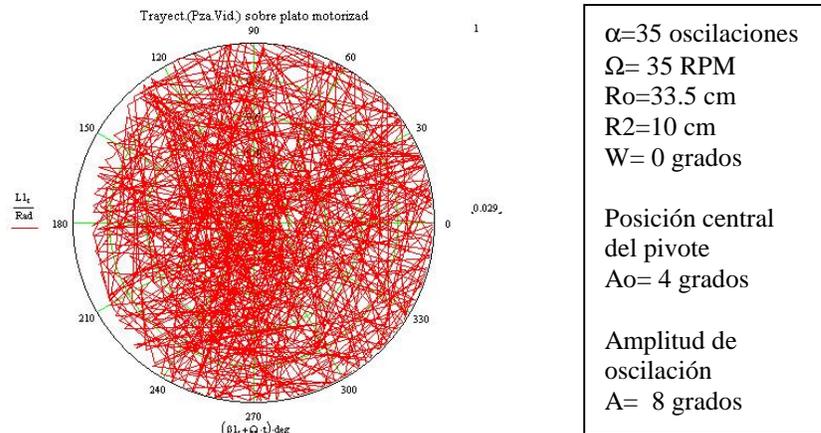


Fig. 4.22 Trayectoria del vidrio cuando la frecuencia del brazo de oscilación es igual a la frecuencia de rotación del disco inferior

Cuando la frecuencia de oscilación del brazo es el doble que la velocidad angular del plato inferior obtenemos el siguiente patrón de desgaste (Fig. 4.23), el efecto cilindro es más evidente. Ahora son dos las regiones del disco inferior que no son tocadas por el disco superior.

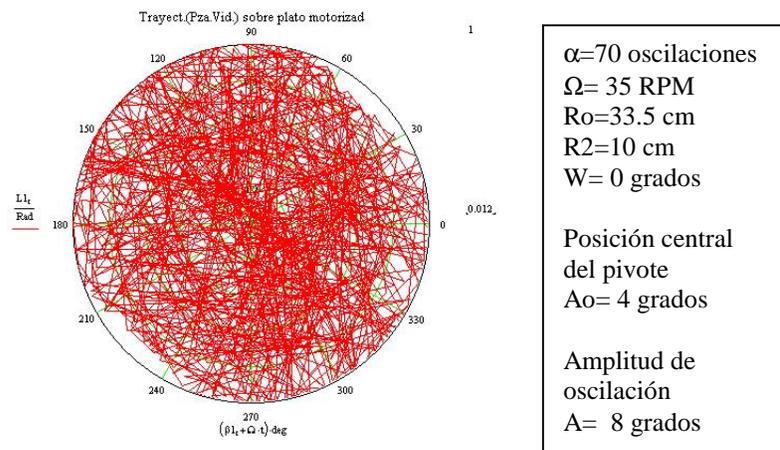


Fig. 4.23 Desgaste cuando la frecuencia del brazo de oscilación es el doble que el del disco inferior (superficie astigmática)

Podemos observar de la Fig. 4.23 que la superficie se deformará hacia una superficie astigmática ya que el desgaste solo ocurre en una sola dirección.

Cuando la frecuencia de oscilación del brazo es el triple de la frecuencia de rotación del disco inferior obtenemos el siguiente patrón de desgaste (Fig. 4.24).

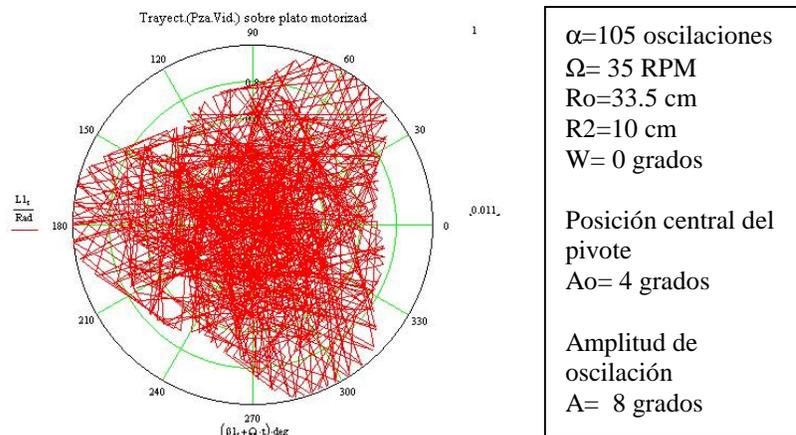


Fig. 4.24 Patrón de la trayectoria del vidrio cuando la velocidad del brazo de oscilación es el triple que la velocidad del disco inferior

Todos estos ajustes de carrera se aplican cuando la herramienta de hierro se encuentra en la parte inferior y el vidrio en la parte superior. Cuando se invierten las posiciones de la herramienta y del vidrio, las superficies son en forma opuesta (cóncava-convexa, convexa-cóncava).

4.3 Ajustes iniciales en la máquina esmeriladora.

De la experiencia del personal de taller óptico, en el caso de superficies planas generalmente se envían a la etapa de pulido como superficies cóncavas de aproximadamente 1 – 2 micras.

Para lograr esto con ajuste de carrera normal, la herramienta de hierro (por lo general colocada como el disco inferior) debe tener una superficie de 1-2 micras de convexidad.

El propósito de mandar a pulido las superficies que se desean planas con forma levemente cóncava se debe a que en la etapa de pulido de forma natural se hace más trabajo de desgaste abrasivo en los bordes porque emplean herramientas blandas y siempre se aplica una etapa final denominada “figurado”, en la que se perfecciona la superficie deseada, de esta forma se obtienen superficies planas más rápidamente.

De acuerdo a la ecuación de desgaste de Preston (Ec. 1.1), el desgaste es directamente proporcional a la velocidad relativa entre los dos discos y a la presión.

La velocidad relativa depende de la frecuencia de rotación del disco inferior de la máquina esmeriladora Strasbaugh, que puede variar desde 10 RPM hasta 140 RPM. De la experiencia del personal de taller óptico, la velocidad óptima de desgaste bajo buen control del operador oscila entre 20 – 30 RPM.

De igual forma la presión puede ser ajustada desde 0 lb/pulg² hasta 100 lb/pulg², la experiencia de nuestros colegas indica que la presión óptima oscila entre 30 y 40 lbs/pulg².

Si aumentamos la presión entre los dos discos, tendremos efectivamente un aumento en el desgaste, pero esto provocará micro fracturas de tamaño mayor que el usual para el tamaño de grano que estemos empleando, lo que complicará el trabajo de la etapa subsiguiente.

Lo mismo ocurre con la velocidad. A mayor velocidad tendremos mayor desgaste, con microfracturas más grandes y con un problema adicional: por acción de la fuerza centrífuga de los discos, la mezcla abrasiva (slurry) tenderá a desplazarse hacia las orillas, de esta forma debemos de aumentar la cantidad y la frecuencia del suministro abrasivo.

4.4 Sensor de velocidad

De acuerdo a la ecuación de desgaste de Preston (Ec. 1.1), uno de los parámetros fundamentales dentro del proceso de desgaste abrasivo es la velocidad relativa de las parejas de puntos entre dos discos en contacto.

La máquina esmeriladora que usamos para el experimento fue una Strasbaugh modelo 6Y-1, en la que el disco inferior está motorizado y el disco superior tiene un movimiento libre de rotación debido a la fuerza de fricción entre los discos y al movimiento del brazo oscilatorio.

Para medir la velocidad del disco superior $\omega(t)$ se construyó un sensor de velocidad. Como primer intento se empleó un chopper óptico, tomado del mecanismo de un Mouse de computadora.

Este método solo funcionó para velocidades muy bajas, ya que debido al movimiento del brazo oscilatorio las variaciones de velocidad del disco superior son muy rápidas. Nuestro primer sensor (basado en un chopper) no las pudo medir, debido a los valores discretos de frecuencias de reloj y de muestreo de nuestra tarjeta de adquisición de datos vía puerto serial. El mecanismo se muestra en la Fig. 4.25.



Fig. 4.25 Sensor Óptico usando el mecanismo de un Mouse

Ante esta grave dificultad se construyó un segundo sensor de velocidad basado en un motor de CD sin escobillas (Fig. 4.26), este motor genera un voltaje proporcional a la velocidad angular del rotor; es decir que la velocidad angular del rotor del motor tiene una relación lineal con el voltaje generado (el motor actúa como generador de CD). Se construyó una tarjeta de adquisición de datos vía puerto paralelo, para hacer un muestreo de la señal obtenida con este nuevo sensor Fig. 4.26.



Fig. 4.26 Sensor mediante un pequeño motor de DC

Usando el paquete de programación LABVIEW, fue posible adquirir información confiable de la velocidad del disco superior.

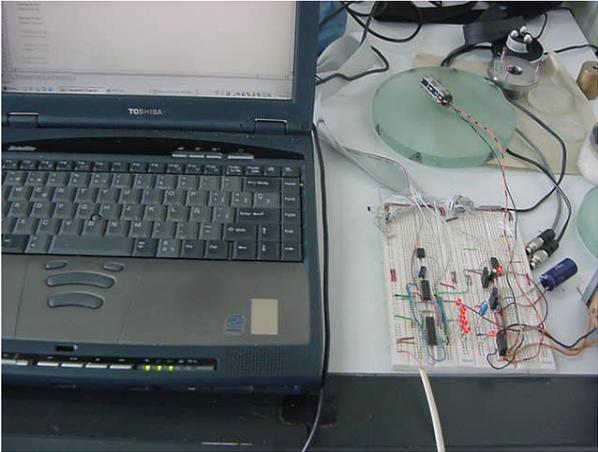


Fig. 4.27 Tarjeta de adquisición de datos

El arreglo experimental para medir la velocidad del disco superior se muestra en el diagrama a bloques del arreglo experimental (Fig. 4.28).

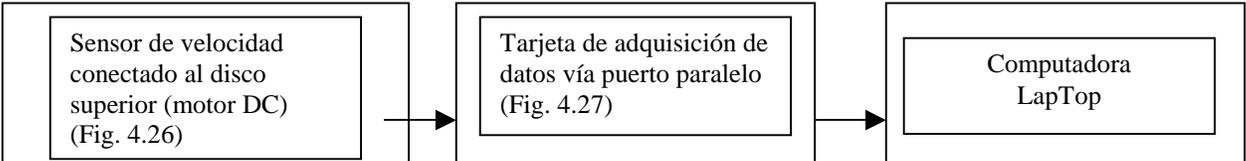


Fig. 4.28 Sistema de adquisición de datos

De esta forma fue posible graficar el comportamiento de la velocidad angular del disco superior $\omega(t)$ en función del tiempo y en función de tipo de grano usado.

En la Fig. 4.29 se muestra la velocidad del disco superior con grano de 25 micras con un ajuste de carrera normal.

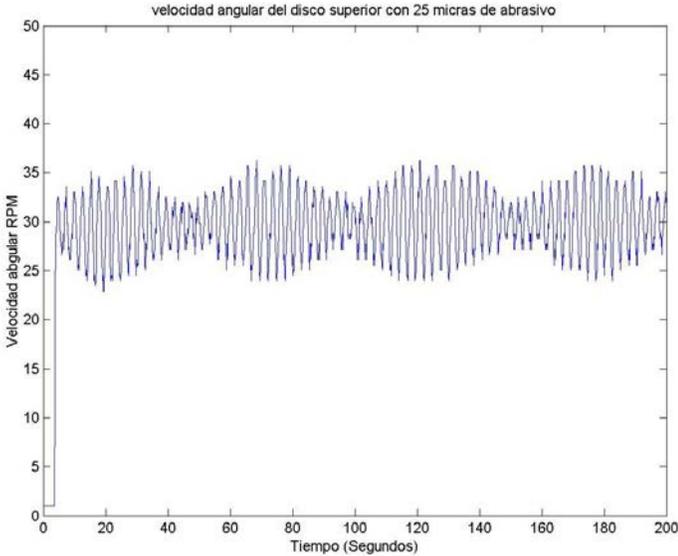


Fig. 4.29 Experimento. Velocidad angular del disco superior con 25 micras, Carrera normal

Aplicando los datos de velocidad angular del disco inferior (40 RPM) y la velocidad de oscilación del brazo de pivoteo (50 Oscilaciones por minuto) se obtuvo la simulación de la velocidad angular del disco superior que se muestra en la Fig. 4.30

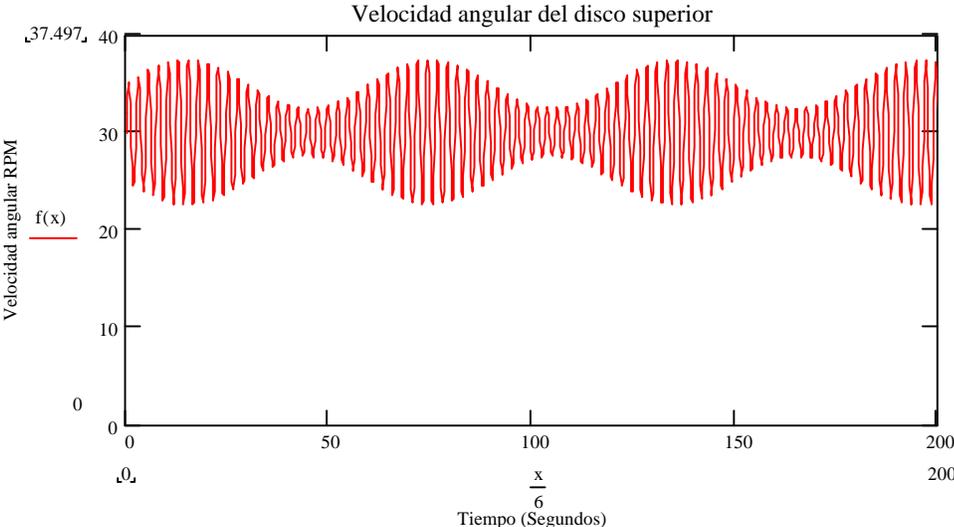


Fig. 4.30 Simulación numérica. Velocidad del disco superior con esmerila de 25 micras, Carreta normal.

En la Fig. 4.31 se presenta la velocidad angular del disco superior usando abrasivo de 15 micras.

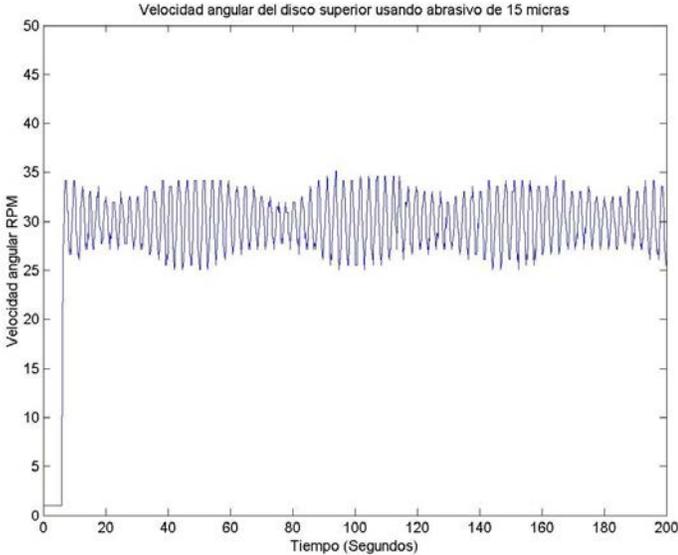


Fig. 4.31 Experimento. Velocidad angular del disco superior con 15 micras, Carrera normal.

Simulando la velocidad del disco superior para abrasivo de 15 micras se obtuvo el resultado mostrado en la Fig. 4.32.

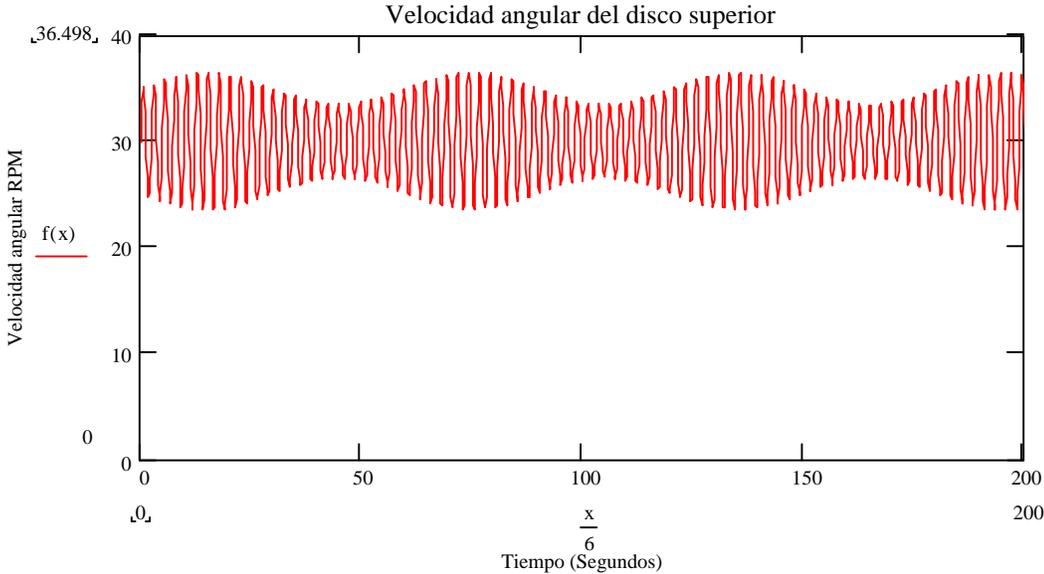


Fig. 4.32 Simulación numérica. Velocidad angular del disco inferior con abrasivo de 15 micras, Carrera normal.

En la Fig. 4.33 se muestra la velocidad angular experimental para abrasivo de 9 micras

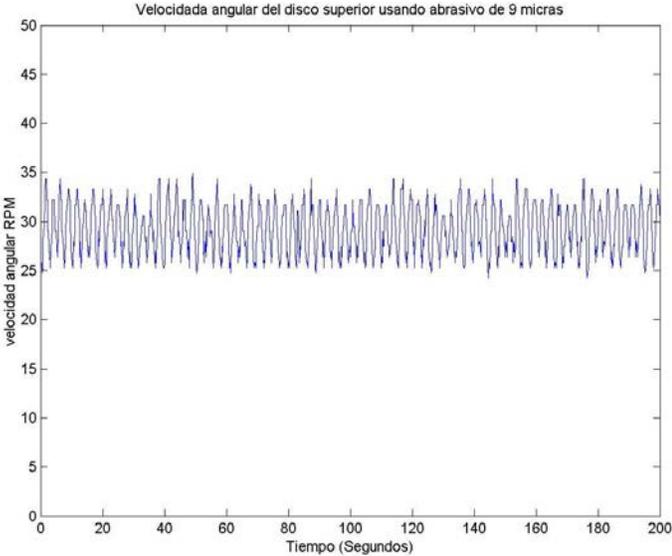


Fig. 4.33 Experimento. Velocidad angular del disco superior con 9 micras, Carrera normal.

El resultado de la simulación de la velocidad angular del disco superior para este caso se muestra en la Fig. 4.34.

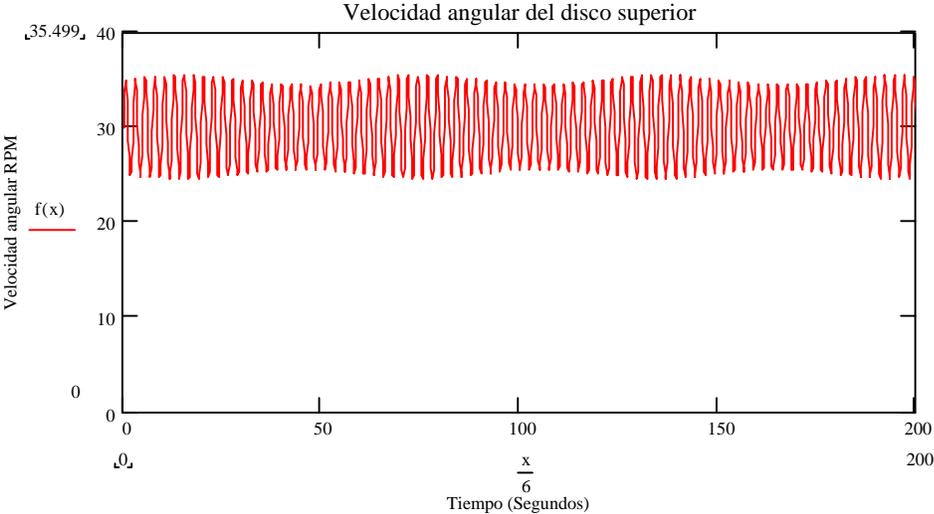


Fig. 4.34 Simulación numérica. Velocidad angular del disco superior con abrasivo de 9 micras, Carrera normal.

4.5 Resultados de la etapa experimental

Como primer paso se midió la altura de cada pieza de vidrio respecto al plano superior de la herramienta, después de la etapa de rectificación de planos en la máquina Blanchard. Usamos un medidor digital marca MITUTOYO, al cual le adaptamos un anillo (Fig. 4.35) con tres puntos en contacto (la separación entre los tres puntos es la misma que la separación entre las piezas de vidrio).



Fig. 4.35 Medición de desgaste relativo de cada vidrio. (Ver también Fig. 4.36)



Fig. 4.36 Medición de desgaste relativo (entre vidrios contiguos).



Fig. 4.37 Medición de desgaste real de cada vidrio, respecto al plano de la herramienta

En la siguiente tabla se muestran las alturas iniciales respecto al plano de la herramienta.

Elemento	Desgaste Inicial, mm		
1-1.	2.920	3-9.	2.920
2-1.	2.910	3-11.	2.900
2-2.	2.920	4-2.	2.900
2-3.	2.930	4-3.	2.910
2-4.	2.930	4-5.	2.920
2-5.	2.920	4-6.	2.940
2-6.	2.910	4-8.	2.950
3-1.	2.900	4-9.	2.960
3-3.	2.920	4-11.	2.950
3-5.	2.940	4-12.	2.940
3-7.	2.940	4-14.	2.920
		4.15.	2.900
		4.17.	2.890
		4.18.	2.890
		5-2.	2.880
		5-4.	2.900
		5-6.	2.920
		5-8.	2.940
		5-10.	2.960
		5-12.	2.960
		5-14.	2.950
		5-16.	2.930
		5-18.	2.910
		5-20.	2.890
		5-22.	2.870
		5-24.	2.870
		Promedio.	2.919

El instrumento empleado en estas mediciones se muestra en la Fig. 4.35 y tiene una incertidumbre de +/- 10 micras. Interpolando los datos de la tabla

anterior, obtenemos la topografía de la superficie (Fig. 4.38) antes de iniciar el proceso de esmerilado de la superficie. Note el plano inclinado, debido a la cuña que existe entre los planos superior e inferior de la herramienta, que se describe adelante.

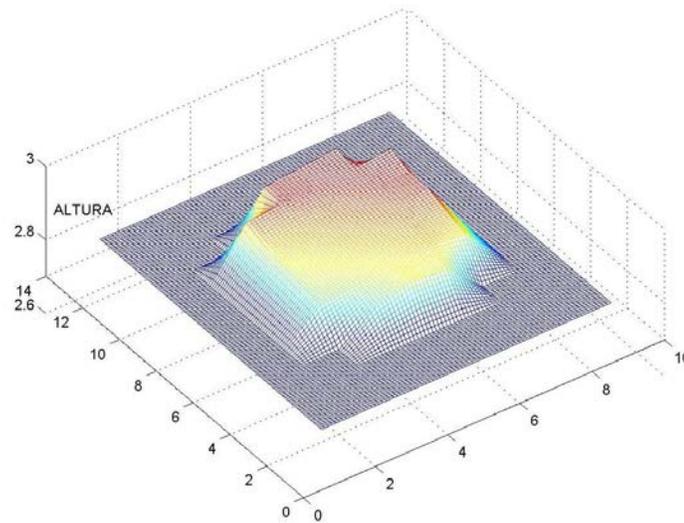


Fig. 4.38 Topografía de la superficie antes del proceso de esmerilado

Las constantes mecánicas del vidrio y la herramienta de las ecuaciones 3.40 y 3.41 están dadas por:

$$\begin{array}{lll}
 K = 1.2 & \text{Dureza de la herramienta} & \text{Kumanin[2]} \\
 \delta = 92 & \text{Resistencia relativa al desgaste.} & \text{Kumanin[2]} \\
 S = 1.76 & \text{Area de cada pieza de vidrio [cm}^2\text{]} &
 \end{array}$$

(el valor 92 arriba, está en la escala de 100).

Experimento 1

Desgaste abrasivo cuando la etapa anterior fue realizada con abrasivo fijo (rectificación del plano de los vidrios en la máquina Blanchard) usando abrasivo libre de 25 micras de diametro.

Ajustes de la máquina Strasbaugh:

Ajuste de carrera: Normal

Datos de excentricidad y posición del pivote del centro de oscilación

Posición central del brazo de oscilación	Ao - 4 grados
Amplitud angular de oscilación	A - 8 grados
No. de oscilaciones del brazo de pivoteo	50 RPM
Presión del pivote del brazo de oscilación	30 lb/(área de contacto Ec 3.39)
Velocidad del disco inferior (motorizado)	35 RPM

Abrasivo: Alúmina (Oxido de aluminio)

Concentración abrasivo en suspensión 20 %/Vol.

(Abrasivo 20% + 80% volumen de agua en el recipiente.)

Configuración Herramienta de hierro(disco inferior),

Herramienta porta piezas (disco superior)

El área de contacto entre discos superior e inferior, de acuerdo a la ecuación 3.39, debe multiplicarse por un factor de proporcionalidad, ya que en nuestros experimentos el contacto ocurre entre las piezas de vidrio de la herramienta pulidora-esmeriladora, con el disco de fierro fundido que constituye el disco inferior motorizado.

El área total de las piezas de vidrio es $a = 86.24 \text{ cm}^2$ y el área de la herramienta esmeriladora-pulidora es $A = 589.6 \text{ cm}^2$, por lo que el factor es $A / a = 6.8$

Cada uno de los experimentos se dividió en tres partes, en cada una de ellas se mide el desgaste (respecto al plano de la herramienta) en función del tamaño de grano usado y de las condiciones iniciales de la superficie.

Etapa 1.1

Procedimiento:

Se esmeriló la superficie con grano abrasivo de 25 micras durante 15 minutos. Se tomaron mediciones cada 5 minutos con el procedimiento siguiente: se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste de cada vidrio (altura de los vidrios respecto al plano de la herramienta), obteniéndose los resultados mostrados en la gráfica de la Fig. 4.39.

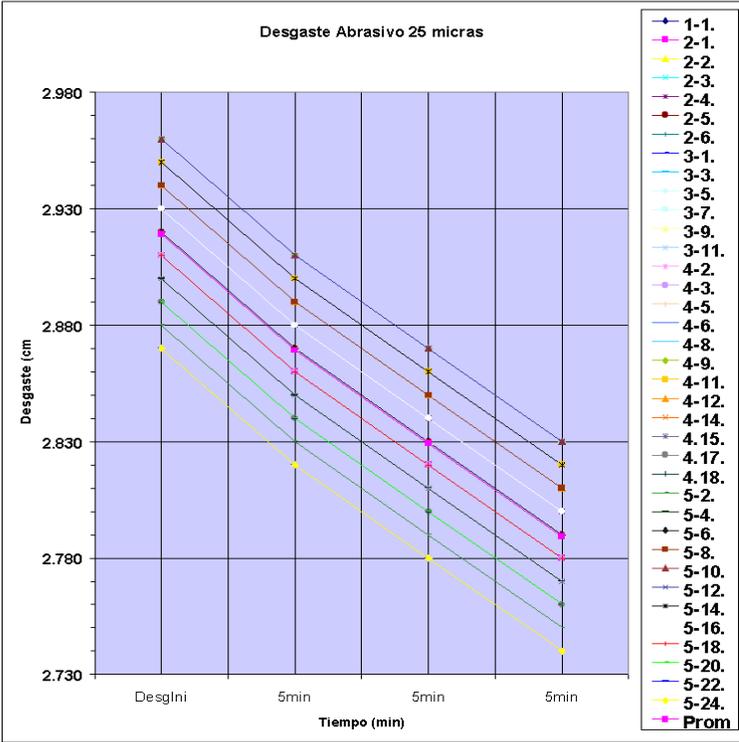


Fig. 4.39 Desgaste abrasivo con grano de 25 micras

Como podemos observar en la Fig. 4.39, los valores iniciales de altura de los vidrios respecto al plano de referencia de la herramienta no son iguales. Si las superficies de los vidrios (generada por la Blanchard) y la superficie de referencia de la herramienta fueran paralelos, los valores iniciales serían iguales, pero, como se explicó en la sección anterior, nuestra herramienta no tiene caras paralelas, esto dio como resultado que la etapa de generación del plano de los vidrios en la máquina Blanchard produjo una cuña en alturas entre el plano de los vidrios y el plano sobre el que están montados en la herramienta (ver Fig. 4.38).

Analizando la Fig. 4.39 también podemos observar que todos vidrios tienen la misma pendiente de desgaste, siguiendo un comportamiento muy similar, por lo que podemos considerar que sobre toda la superficie el desgaste fue uniforme y el promedio de los desgastes individuales de los vidrios constituye una representación confiable del proceso de desgaste experimentado por la herramienta.

El promedio de desgaste de los vidrios, se muestra en la Fig. 4.40

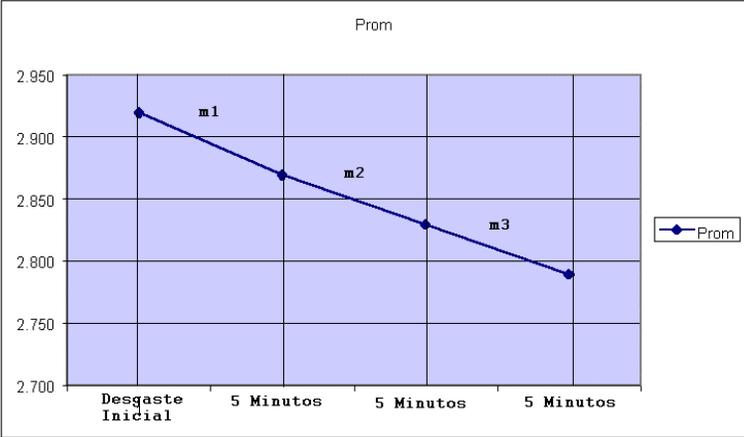


Fig. 4.40 Promedio de desgastes para grano abrasivo de 25 micras

En el intervalo m1 tenemos un desgaste de 50 micras en 5 minutos, posteriormente el desgaste en los intervalos m2 y m3 se estabiliza a un valor de 40 micras cada 5 minutos.

Las pendientes de la gráfica en la Fig. 4.41 determinan la rapidez de los procesos de desgaste en esta etapa.

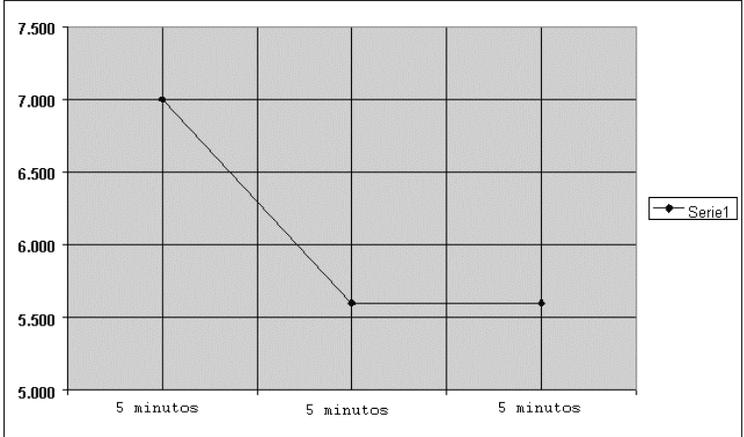


Fig. 4.41 Relación de pendientes en el proceso de desgaste abrasivo

En los primeros instantes, el proceso de desgaste es más pronunciado, esto se debe a que las facturas producidas por el abrasivo de alúmina de 25micras ocurren en una superficie que ha sido tratada anteriormente con un abrasivo de mayor tamaño.

En los primeros instantes el desgaste es mayor porque el abrasivo actúa sobre una capa debilitada por el proceso anterior. Al avanzar el proceso, la rapidez de desgaste decae hasta un valor constante, debido a que las fracturas producidas por la etapa anterior desaparecen y son reemplazadas por microfracturas de un valor similar al diámetro del grano de abrasivo, lo que estabiliza el proceso de desgaste con este tamaño de grano.

Graficando el valor promedio de desgaste de los vidrios contra los datos obtenidos de la simulación, obtenemos la siguiente grafica de desgaste abrasivo para 25 micras.(Fig. 4.42)

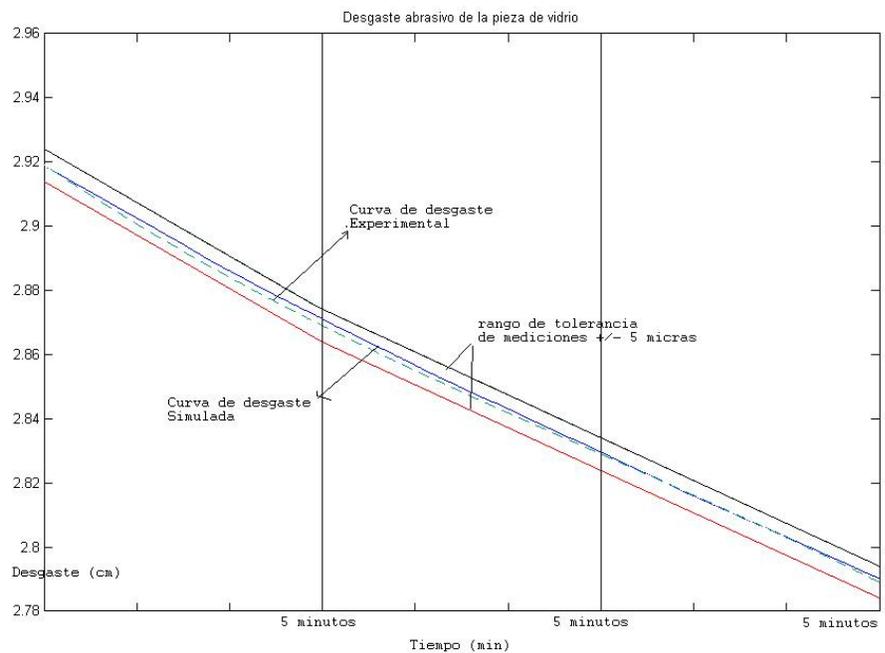


Fig. 4.42 Grafica de desgaste abrasivo con $Q = 25$ micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo fijo en la máquina generadora de planos Blanchard con $q = 50$ micras)

Empíricamente encontramos los coeficientes K_K , α , β de la Ec. 3.40. Donde K_K es la Constante de Kumanin y α , β son constantes del sistema.

El diámetro anterior de esmeril esta dado por el diámetro de abrasivo fijo en la generadora de planos Blanchard (Aprox. 50 micras).

Donde:

$$\begin{aligned}
 K_K &= 0.56 \times 10^{-5} & P &= \text{Presión relativa} & v &= \text{Velocidad relativa.} \\
 \alpha &= 0.9 & Q &= 25 \text{ micras} & & \text{Tamaño actual del grano} \\
 & & & & & \text{abrasivo.} \\
 \beta &= 0.00025 & q &= 50 \text{ micras} & & \text{Tamaño anterior de grano} \\
 & & & & & \text{abrasivo.}
 \end{aligned}$$

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P * v * \left(\left(1 + \frac{Q}{q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \quad \text{Ec. 4.1}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos de tiempo.

Etapa 1.2

Al día siguiente se esmeriló la superficie con grano de 15 micras a carrera normal por 50 minutos, cada 10 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste de cada vidrio (respecto al plano de la herramienta).

Medimos el desgaste de cada pieza obteniendo los resultados mostrados en la gráfica de la Fig. 4.43.

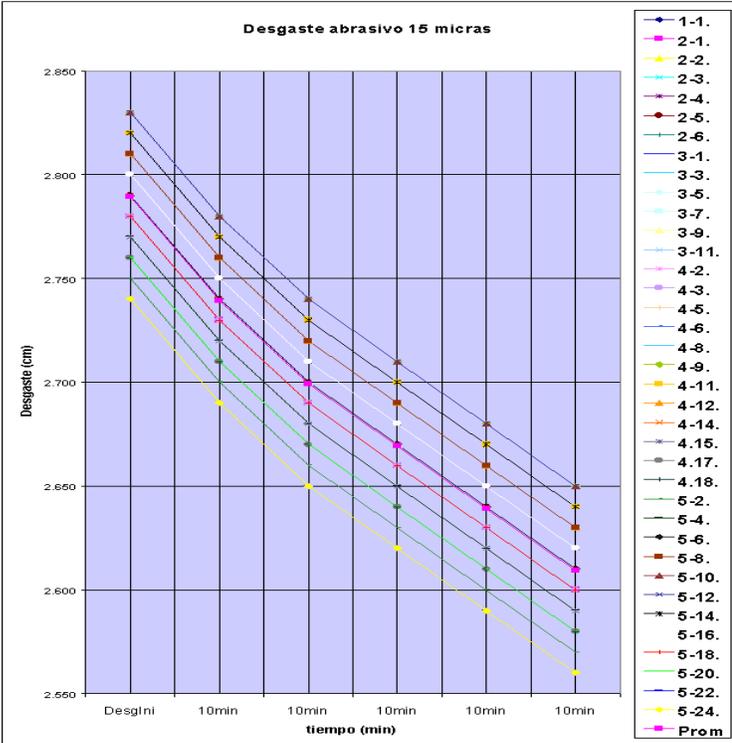


Fig. 4.43 Desgaste con abrasivo Q = 15 micras, q = 25 micras

Graficando el promedio de esos datos del proceso de desgaste, se obtiene la gráfica de desgaste abrasivo del sistema con abrasivo de 15 micras, mostrada en la Fig. 4.44

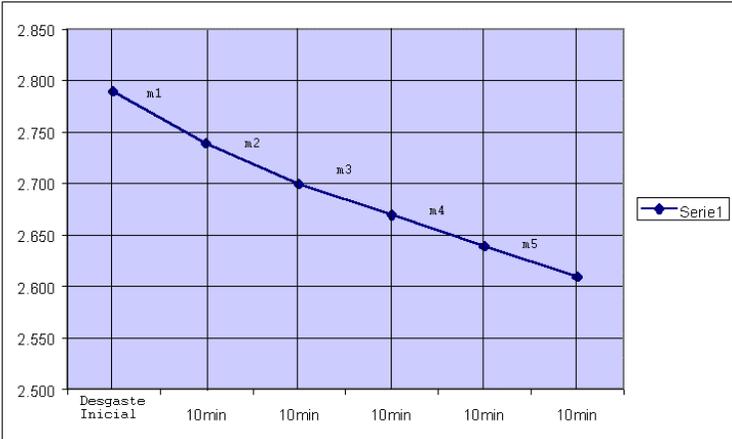


Fig. 4.44 Valores promedio de desgaste, carrera normal, abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras.

Si observamos detenidamente la grafica anterior, nuevamente el proceso de desgaste no es lineal, inicialmente en el intervalo m1 el desgaste es mayor (aprox. 50 micras en 10 minutos), producido por la acción de un grano menor en las

micro-fracturas producidas por el grano abrasivo de mayor tamaño empleado en la etapa anterior. Posteriormente en el intervalo m2 el desgaste disminuye a un valor de 40 micras aproximadamente, y finalmente en los intervalos m3, m4, m5 el desgaste se mantiene constante en 30 micras cada 10 minutos.. Analizando la pendiente de desgaste se puede observar mejor los cambios en el proceso de desgaste, expresado como Velocidad del proceso.

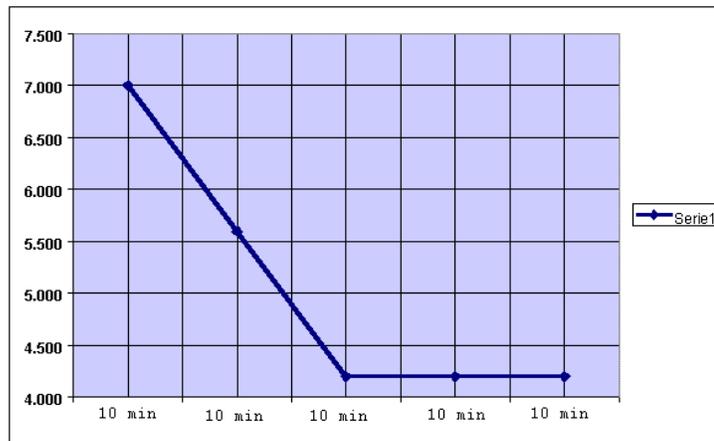


Fig. 4.45 Velocidades de desgaste en el proceso de desgaste abrasivo, Carrera normal, abrasivo $Q = 15$ micras, anterior $q = 25$ micras

Como podemos ver en la grafica anterior (Fig. 4.45), el desgaste en los primeros intervalos es mayor, volviéndose después constante.

Graficando el valor promedio de desgaste en relación con los datos de la simulación, obtenemos la gráfica (Fig. 4.46) de desgaste abrasivo para 15 micras.

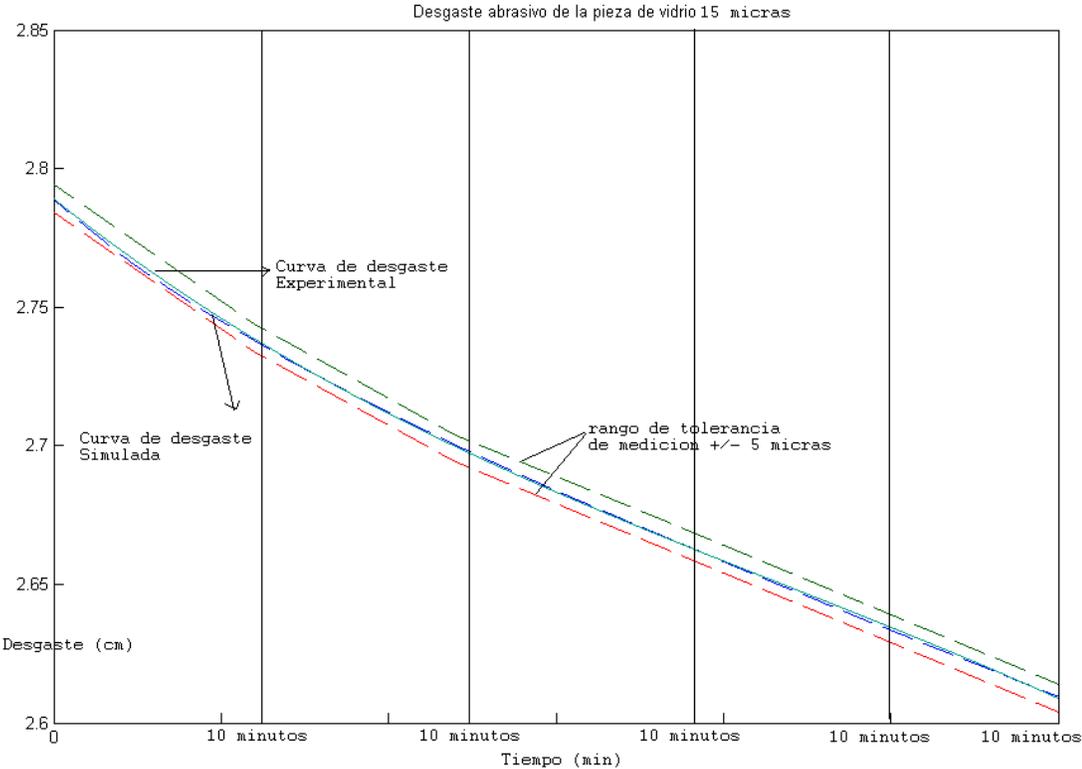


Fig. 4.46 Grafica de desgaste abrasivo con 15 micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo de 25 micras)

Empíricamente encontramos los coeficientes K_K , α , β de la Ec. 3.40.

Donde K_K es la Constante de Kumanin y α , β son constantes del sistema.

El diámetro anterior de esmeril esta dado por el diámetro de abrasivo de la etapa anterior de esmerilado (25 micras).

Donde:

$$\begin{aligned}
 K_{kumanin} &= 0.46 \times 10^{-5} & Q &= 15 \text{ micras (Abrasivo actual)} \\
 \alpha &= 2.0 & q &= 25 \text{ micras (Abrasivo anterior)} \\
 \beta &= 0.00025
 \end{aligned}$$

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P * v * \left(\left(1 + \frac{Q}{q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \tag{Ec. 4.2}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos del proceso.

Etapa 1.3

Posteriormente se esmeriló la superficie en intervalos de 10 minutos con grano de 9 micras a carrera normal por 60 minutos, cada 10 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste de cada elemento (en relación con el plano de la herramienta), mostrada en la Fig. 4.47.

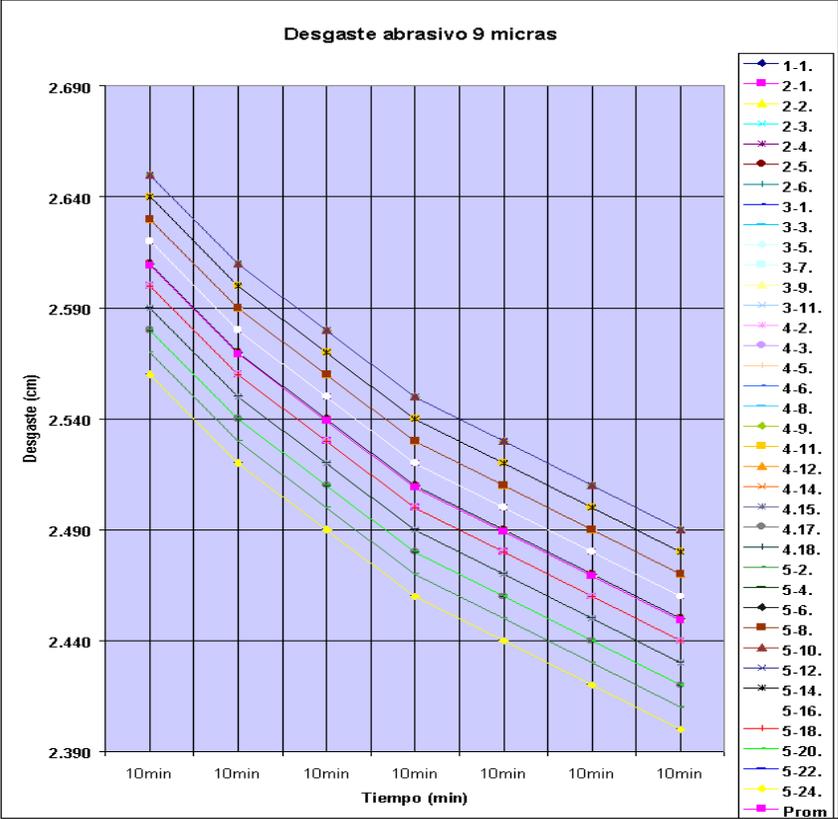


Fig. 4.47 Desgaste con abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.

Graficando el promedio de datos del proceso de desgaste de los vidrios individuales, obtenemos la grafica mostrada en la Fig. 4.48

Como podemos ver en la gráfica de la Fig. 4.48, al emplear un abrasivo de menor diámetro, el intervalo en donde el proceso de desgaste se hace constante requiere de mayor tiempo (aproximadamente 30 minutos). De igual forma que en los procesos anteriores, el desgaste en los primeros intervalos de tiempo es mayor, en m1 tenemos un desgaste de aproximadamente 40 micras, posteriormente en m2 y m3 de 30 micras y finalmente en los intervalos m4, m5 y m6 el desgaste se hace constante a aproximadamente 20 micras cada 10 minutos.

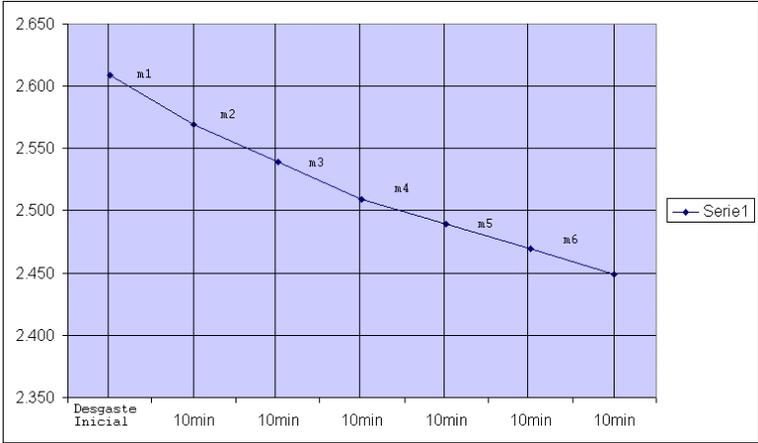


Fig. 4.48 Valores promedio de desgaste, abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras

Graficando la pendiente del proceso de desgaste se puede tener una idea más clara, de la rapidez con que ocurre el proceso de desgaste.

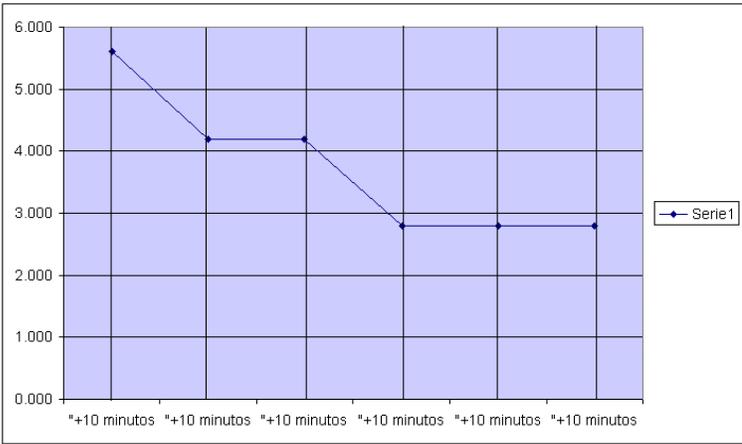


Fig. 4.49 Velocidades del proceso de desgaste, abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras

Graficando el valor promedio de desgaste en relación con los datos de la simulación, obtenemos la siguiente grafica de desgaste abrasivo para 9 micras.

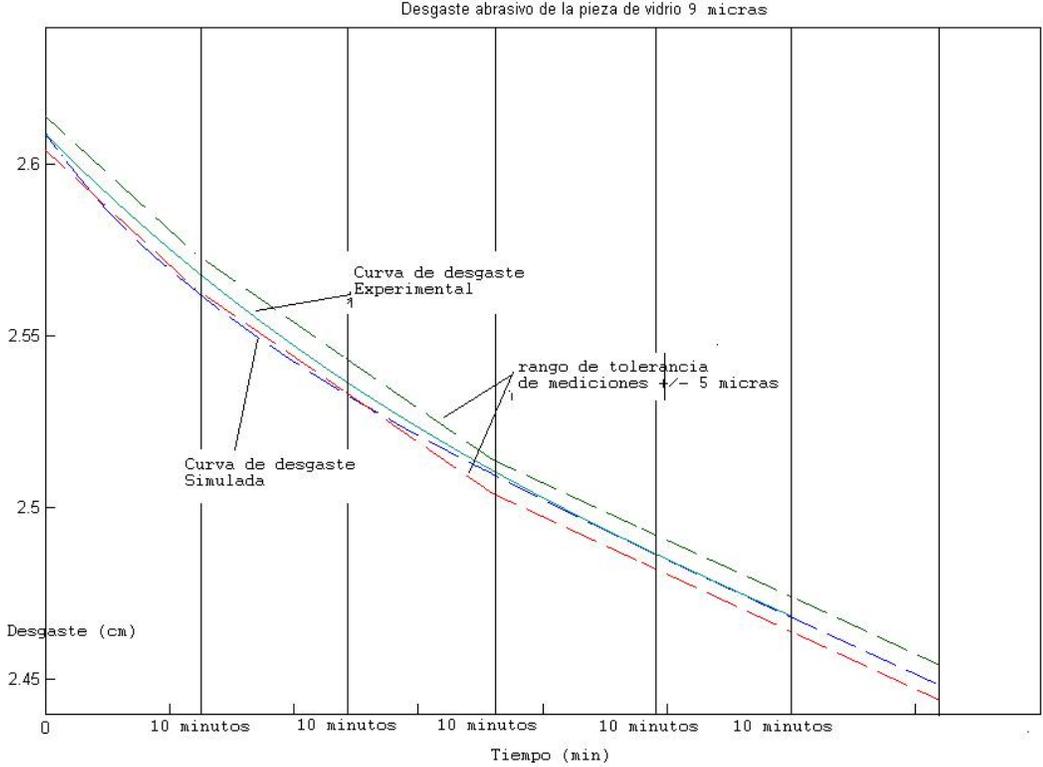


Fig. 4.50 Curva de desgaste real comparada con la curva de desgaste simulada.
 Abrasivo actual Q = 9 micras, anterior q = 15 micras

Empíricamente encontramos los coeficientes K_K , α , β de la Ec. 3.40.

Donde K_K es la Constante de Kumanin y α , β son constantes del sistema .

El diámetro anterior de esmeril esta dado por el diámetro de abrasivo de la etapa anterior de esmerilado (15 micras).

Donde:

$$\begin{aligned}
 K_{kumanin} &= 0.51 \times 10^{-5} && Q = 9 \text{ micras (Abrasivo empleado)} \\
 \alpha &= 3.3 && q = 15 \text{ micras (Abrasivo de la etapa anterior)} \\
 \beta &= 0.00025
 \end{aligned}$$

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P * v * \left(\left(1 + \frac{Q}{q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \tag{Ec. 4.3}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos del proceso.

Graficando todos los procesos de desgaste en función del tiempo y del tamaño de grano abrasivo empleado se obtiene la gráfica mostrada en la Fig. 4.51.

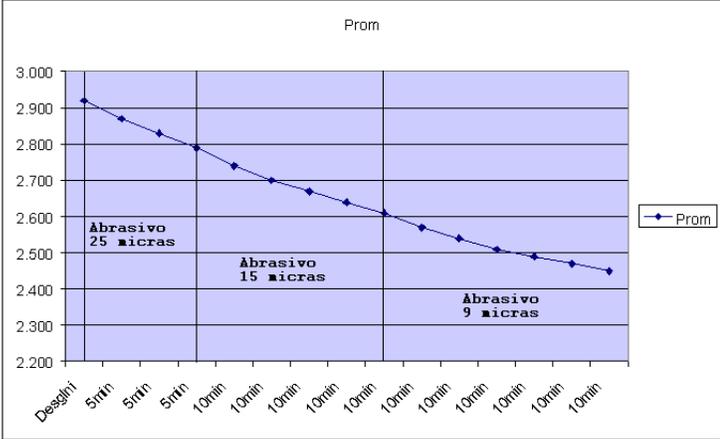


Fig. 4.51 Curva de desgaste abrasivo durante todo el Experimento 1

Graficando la velocidad (rapidez) de desgaste de las tres etapas de esmerilado del Experimento 1, obtenemos la gráfica de la Fig. 4.52.

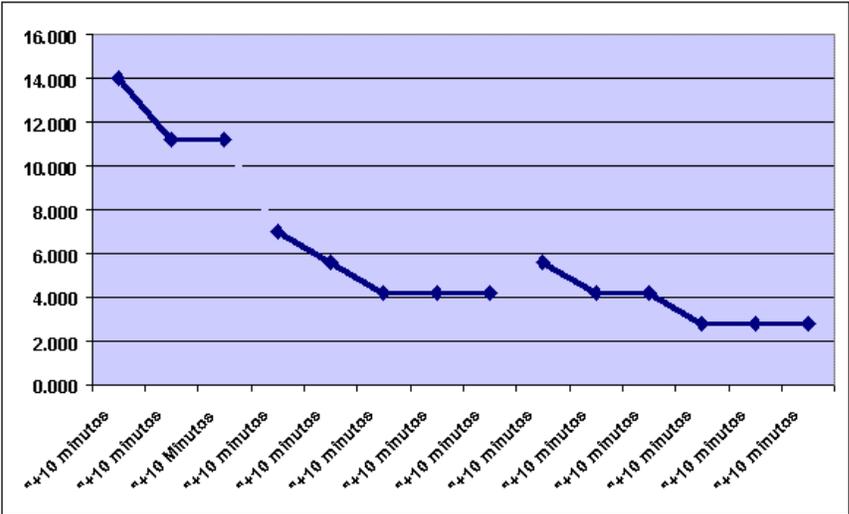


Fig. 4.52 Rapidez de desgaste en función del tamaño de grano y de las condiciones iniciales de cada etapa, durante el Experimento 1

Experimento 2

Desgaste abrasivo cuando la superficie inicial ha sido pulida
(con abrasivo de Oxido de Cerio 0.3 micras.)

Etapa 2.1

Los ajustes a la máquina Strasbaugh son iguales a los del experimento No. 1
Procedimiento:

Se esmeriló la superficie con grano abrasivo de 25 micras durante 15 minutos, (la superficie inicial está pulida), cada 5 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste de cada vidrio (altura de los vidrios respecto al plano de la herramienta), obteniendo los resultados mostrados en la gráfica de la Fig. 4.53.

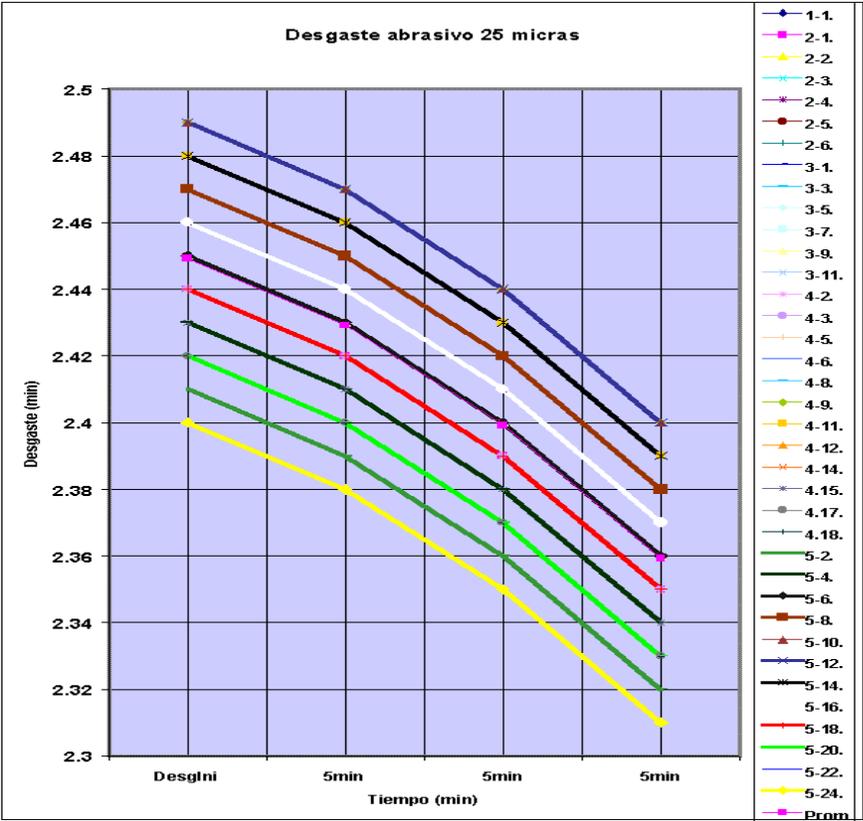


Fig. 4.53 Grafica de desgaste abrasivo usando una superficie anterior pulida
Abrasivo Q = 25 micras, anterior q = 0.3 micras

Comparemos ahora las gráficas de la Fig. 4.39 y de la Fig. 4.53. La primera es el proceso de desgaste abrasivo cuya superficie ha sido tratada anteriormente con abrasivo de mayor diámetro (abrasivo fijo), mientras que la segunda (Fig. 4.53) cuando la superficie anterior fue una superficie pulida. Claramente podemos observar que la superficie que ha sido tratada inicialmente con grano abrasivo mayor tiene un desgaste muy rápido en los primeros intervalos de tiempo, después se estabiliza el desgaste. Mientras que cuando la superficie que ha sido pulida la curva tiene una forma inversa, inicialmente tenemos muy poco desgaste, posteriormente conforme el tiempo de esmerilado avanza, el desgaste aumenta hasta llegar a un comportamiento lineal.

Graficando el promedio de datos del proceso de desgaste, obtenemos la grafica mostrada en la Fig. 4.54

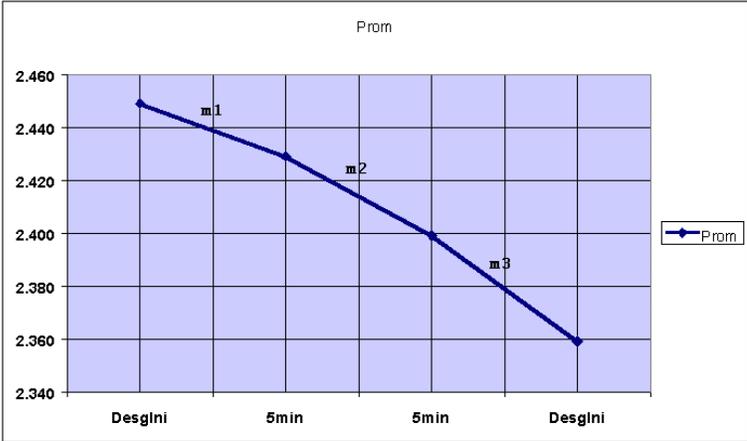


Fig. 4.54 Valor promedio de desgaste, carrera normal.
Abrasive Q = 25 micras, anterior q = 0.3 micras

Graficando la pendiente de la curva de desgaste se puede tener una idea más clara, de la rapidez con que ocurre el proceso de desgaste.

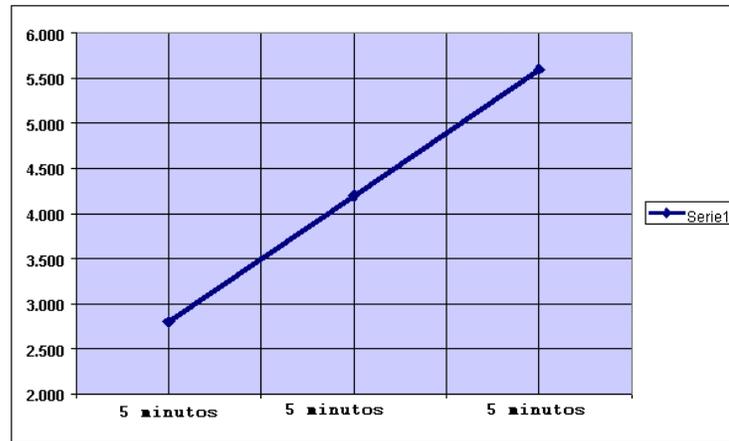


Fig. 4.55 Rapidez del proceso de desgaste abrasivo, carrera normal.

Abrasivo $Q = 25$ micras, anterior $q = 0.3$ micras

En la Fig. 4.55 se muestra la relación de pendientes en el proceso abrasivo, a diferencia del experimento 1, el desgaste aumenta hasta un valor lineal de desgaste abrasivo. Esto es debido a que inicialmente los granos de abrasivo nuevo son mucho más grandes que las micro-fracturas residuales dejadas por la etapa de pulido. Esto hará que los granos de abrasivo primero rueden en la superficie, causando rayaduras y posteriormente fracturas por impacto y por rodamiento.

El proceso de desgaste inicial (muy poco) debido a este efecto está limitado solamente al desprendimiento de material primeramente por la rayaduras del grano de abrasivo sobre la superficie pulida, conforme aumenta el tiempo de esmerilado se incrementa el desprendimiento de material esto es debido a que ahora el grano fractura la superficie del vidrio, estas fracturas al momento de interceptarse una con otras provocarán un aumento en el material removido.

En la Fig. 4.56 se muestra el valor promedio de desgaste y el resultado de la simulación numérica, de desgaste abrasivo para 25 micras de abrasivo usado sobre una superficie pulida.

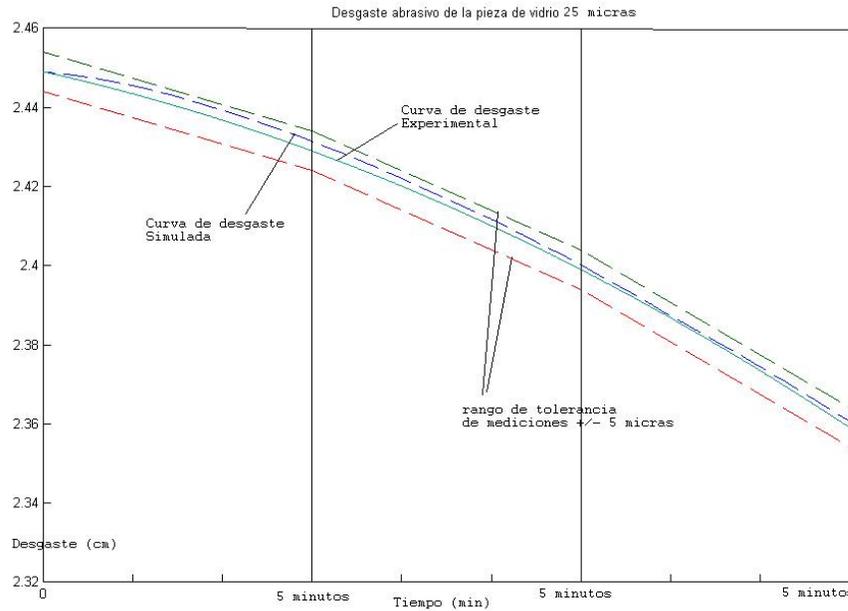


Fig. 4.56 Curva de desgaste real comparada con la curva de desgaste simulada.
 Abrasivo Q = 25 micras, anterior q = 0.3 micras

Existe una diferencia básica de la ecuación Ec. 3.40 (capítulo 3) que modela el proceso de desgaste abrasivo, es sin duda trabajar con una superficie en donde las micro-fracturas producidas por el grano abrasivo son más pequeñas que el diámetro de grano nuevo.

De acuerdo a esto, usamos una segunda ecuación (Ec. 3.41) en donde los parámetros de grano abrasivo de la etapa de pulido son considerados.

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P * v * \left((1.6 + \frac{q}{Q}) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \quad . 4.4$$

Empíricamente encontramos los coeficientes K_K , α , β , de la Ec. 4.4.

El diámetro anterior de esmeril esta dado por el diámetro de abrasivo de la etapa anterior de esmerilado (Etapa de pulido Aprox. q = 0.3 micras).

Donde:

$$\begin{aligned} K_K &= 0.83 \times 10^{-5} & Q &= 25 \text{ micras (Abrasivo actual)} \\ \alpha &= -1.4 & q &= 0.3 \text{ micras (Abrasivo anterior)} \\ \beta &= 0.00036 \end{aligned}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos de tiempo.

Etapa 2.2

Se esmeriló la superficie con grano de 15 micras a carrera normal por 50 minutos, cada 10 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste lineal de cada vidrio (respecto al plano de la herramienta), los resultados se muestran en la Fig. 4.57

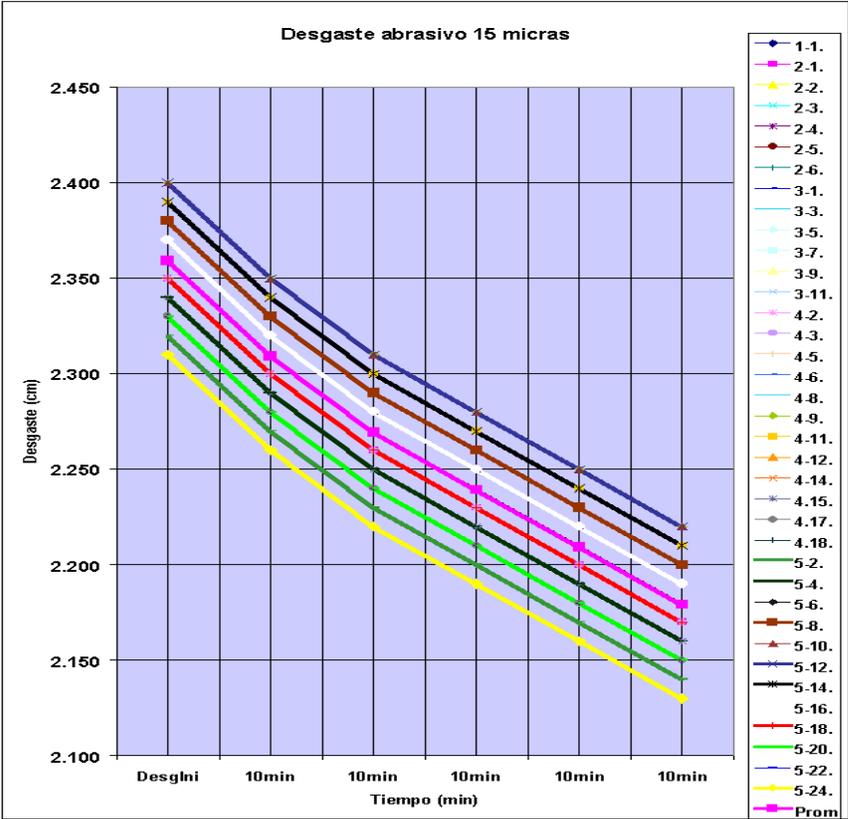


Fig. 4.57 Desgaste abrasivo, carrera normal.

Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras

Graficando el promedio de esos datos del proceso de desgaste, se obtiene la gráfica de desgaste abrasivo del sistema con abrasivo de 15 micras, mostrada en la Fig. 4.58

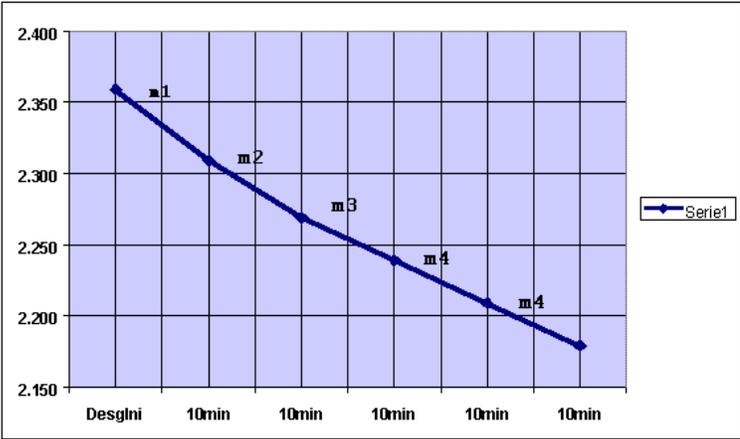


Fig. 4.58 Valor promedio de desgaste, carrera normal.
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras

Si observamos detenidamente la grafica anterior, nuevamente el proceso de desgaste no es lineal, inicialmente en el intervalo m1 el desgaste es mayor (aprox. 50 micras en 10 minutos), producido por la acción de un grano menor en las micro-fracturas producidas por el grano abrasivo de mayor tamaño empleado en la etapa anterior. Posteriormente en el intervalo m2 el desgaste disminuye a un valor de 40 micras aproximadamente, y finalmente en los intervalos m3, m4, m5 el desgaste se mantiene constante en 30 micras cada 10 minutos.

Analizando la pendiente de desgaste se puede observar mejor los cambios en el proceso de desgaste, expresado como Velocidad del proceso.

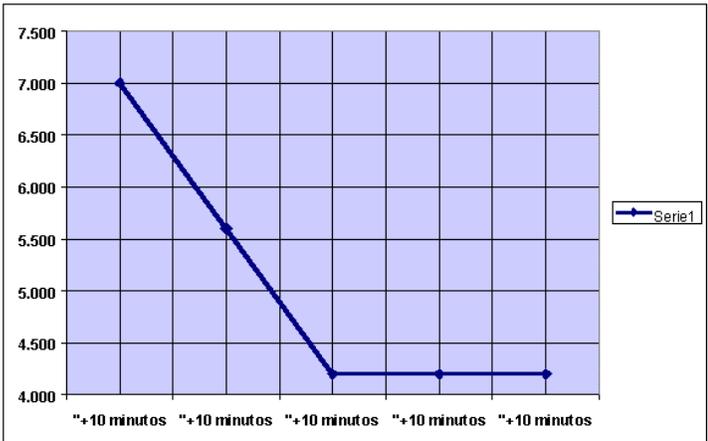


Fig. 4.59 Rapidez del proceso de desgaste abrasivo, carrera normal.
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras

Como podemos ver en la gráfica de la Fig. 4.59, la velocidad de desgaste en los primeros intervalos es mayor, volviéndose después constante.

Graficando el valor promedio de desgaste en relación con los datos de la simulación, obtenemos la siguiente grafica de desgaste abrasivo para 15 micras.

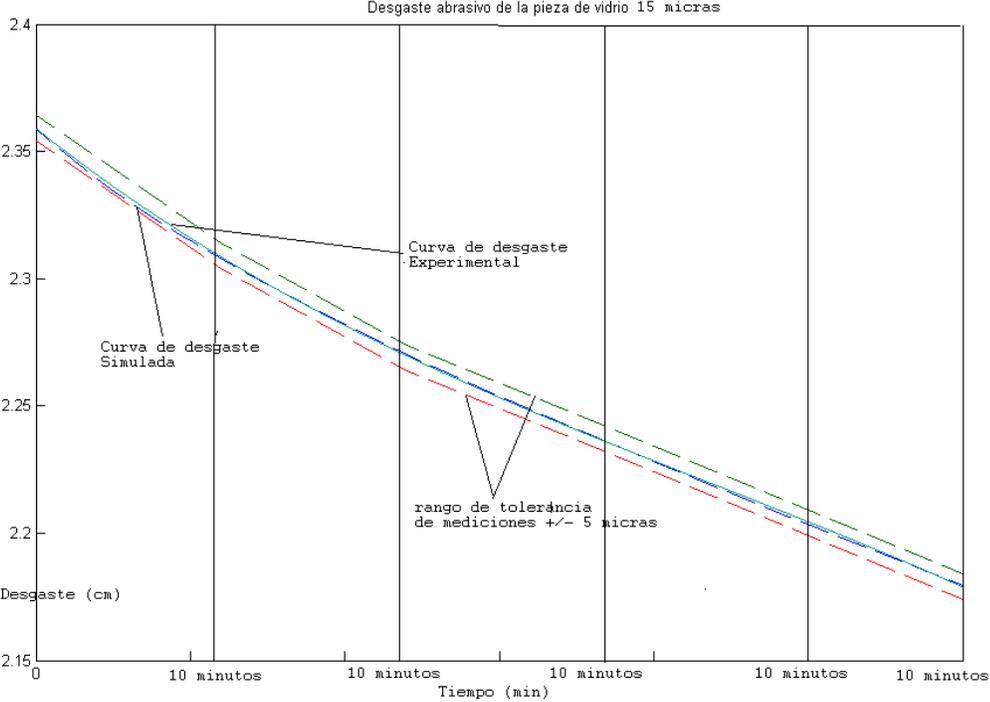


Fig. 4.60 Grafica de desgaste abrasivo con 15 micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo de 25 micras)

Ahora el grano anterior usado es más grande que el grano nuevo de esta forma usaremos la Ec. 3.40 donde empíricamente encontramos los coeficientes K_K , α , β . El diámetro anterior de esmeril esta dado por la etapa anterior de esmerilado (Aprox. 25 micras).

Donde:

$K_K = 0.46 \times 10^{-5}$	$Q = 15$ micras (Abrasivo actual)
$\alpha = 2.0$	$q = 25$ micras (Abrasivo anterior)
$\beta = 0.00025$	

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P_{relativa} * v_{relativa} * \left(\left(1 + \frac{Q}{q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \quad \text{Ec. 4.5}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos de tiempo.

Etapa 2.3

En esta etapa final del segundo experimento se esmeriló la superficie con grano de 9 micras a carrera normal durante 60 minutos, como antes, cada 10 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste lineal de cada vidrio

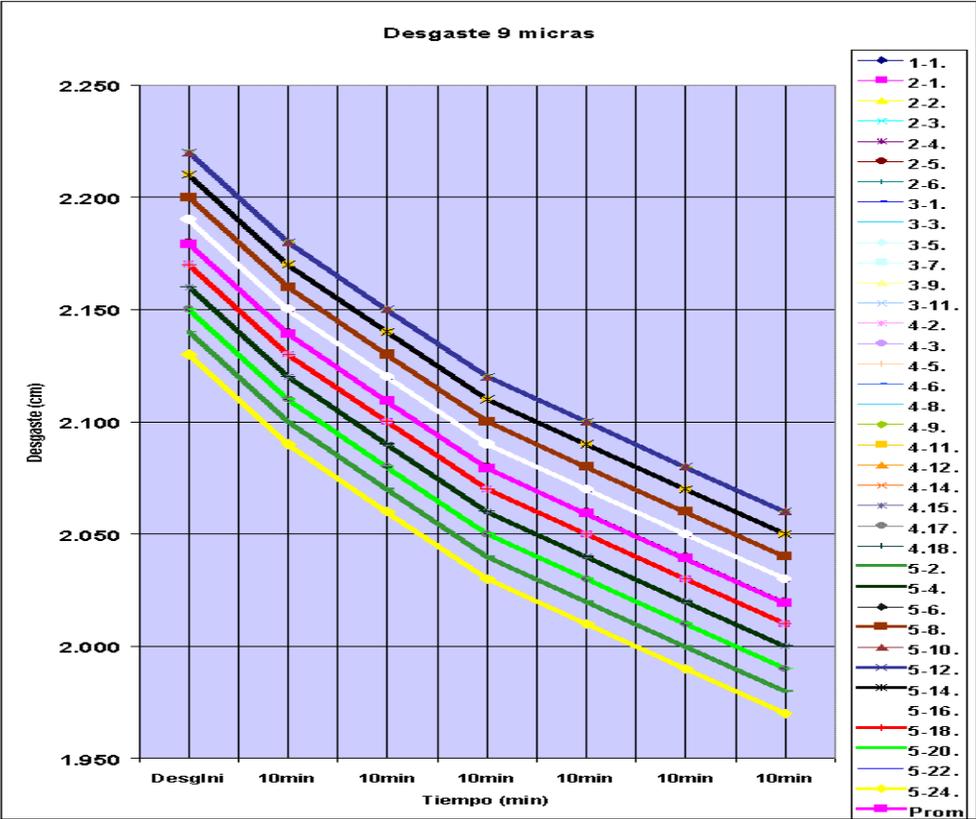


Fig. 4.61 Desgaste abrasivo con grano de 9 micras, carrera normal.
Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.

Graficando los promedios se obtiene la gráfica de desgaste mostrada en la Fig. 4.62

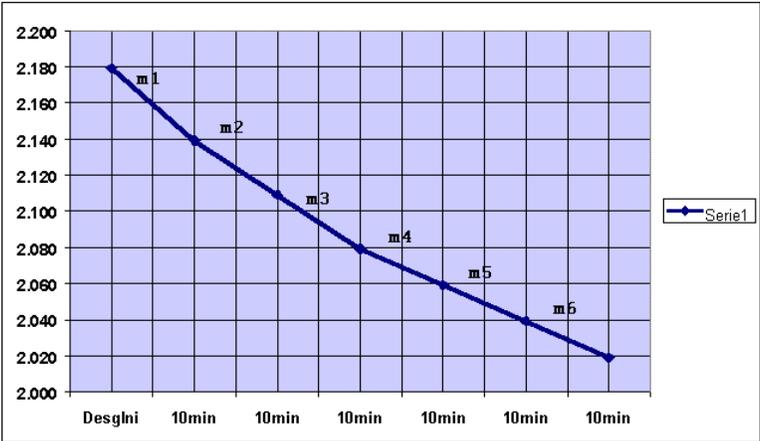


Fig. 4.62 Valor promedio de desgaste, carrera normal.
Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.

Como podemos ver en la gráfica de la Fig. 4.62, al emplear un abrasivo de menor diámetro, el intervalo en donde el proceso de desgaste se hace constante requiere de mayor tiempo (aproximadamente 30 minutos). De igual forma que en los procesos anteriores, el desgaste en los primeros intervalos de tiempo es mayor, en m1 tenemos un desgaste de aprox. 40 micras, posteriormente en m2 y m3 de 30 micras y finalmente en los intervalos m4, m5 y m6 se hace constante el desgaste a aprox. 20 micras cada 10 minutos.

Graficando la pendiente de desgaste se puede tener una idea más clara, de la rapidez con que ocurre el proceso de desgaste.



Fig. 4.63 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal.
Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.

Graficando el valor promedio de desgaste en relación con los datos de la simulación, obtenemos la siguiente grafica de desgaste abrasivo para 9 micras.

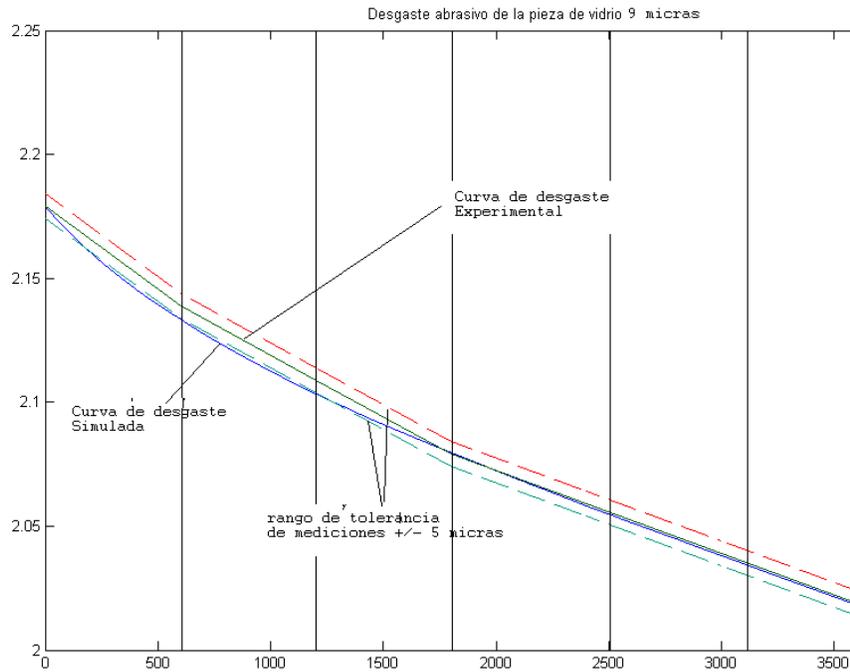


Fig. 4.64 Gráfica de desgaste abrasivo con 9 micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo de 15 micras)

Nuevamente el grano anterior usado es más grande que el grano nuevo, de esta forma usaremos la Ec. 3.40 donde empíricamente encontramos los coeficientes K_K , α , β .

Donde:

$$K_K = 0.51 \times 10^{-5}$$

$$Q = 9 \text{ micras (Abrasivo actual)}$$

$$\alpha = 3.3$$

$$q = 15 \text{ micras (Abrasivo anterior)}$$

$$\beta = 0.00025$$

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P * v * \left(\left(1 + \frac{Q}{q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \quad \text{Ec. 4.6}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos de tiempo.

El comportamiento del proceso de desgaste de todo este experimento (tres etapas con tres abrasivos de Alúmina de tamaños diferentes) se muestra en la Fig. 4.65

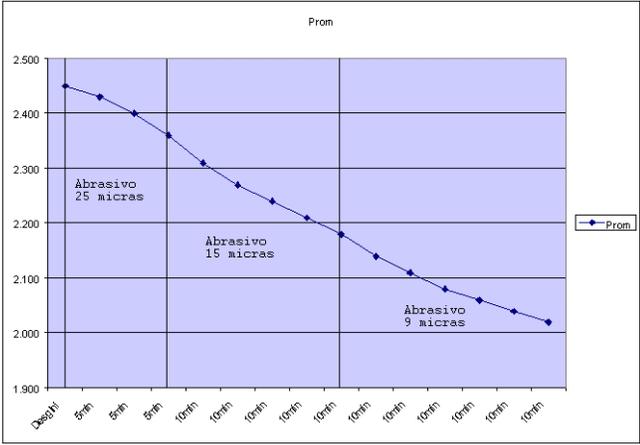


Fig. 4.65 Curva de desgaste abrasivo durante todo el Experimento 2

Graficando las velocidades (rapidez) de desgaste de las tres etapas de este Experimento 2.

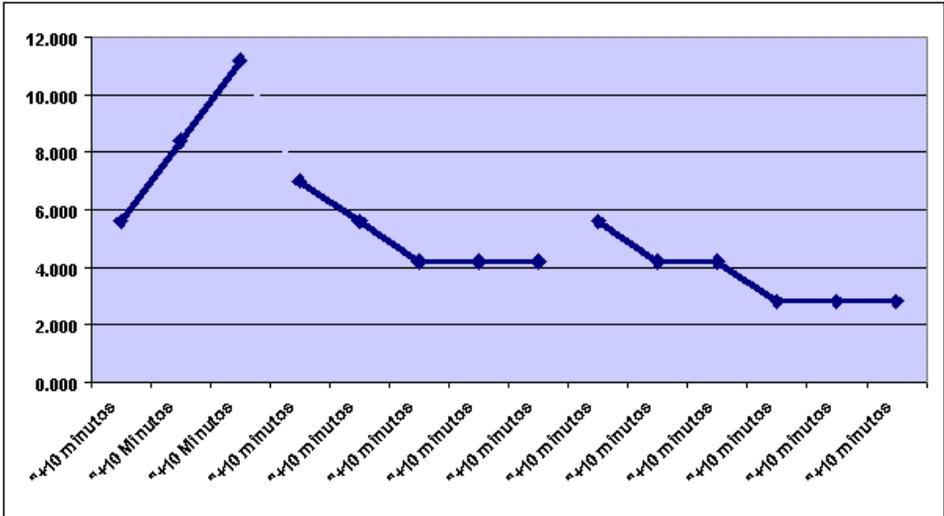


Fig. 4.66 Rapidez de desgaste de las etapas de esmerilado, Experimento 2

Experimento 3

Desgaste abrasivo en caso de corrección de una etapa.

(La superficie inicial fue tratada antes con abrasivo libre de 15 micras.)

Etapa 3.1

Condiciones iguales que en el experimento No. 1

Procedimiento:

Se esmeriló la superficie con grano abrasivo de 25 micras durante 15 minutos (la superficie anterior fue esmerilada con abrasivo libre de 15 micras), cada 5 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste de cada vidrio (altura de los vidrios respecto al plano de la herramienta).

Medimos el desgaste de cada pieza obteniendo los resultados mostrados en las gráficas de la Fig. 4.67.

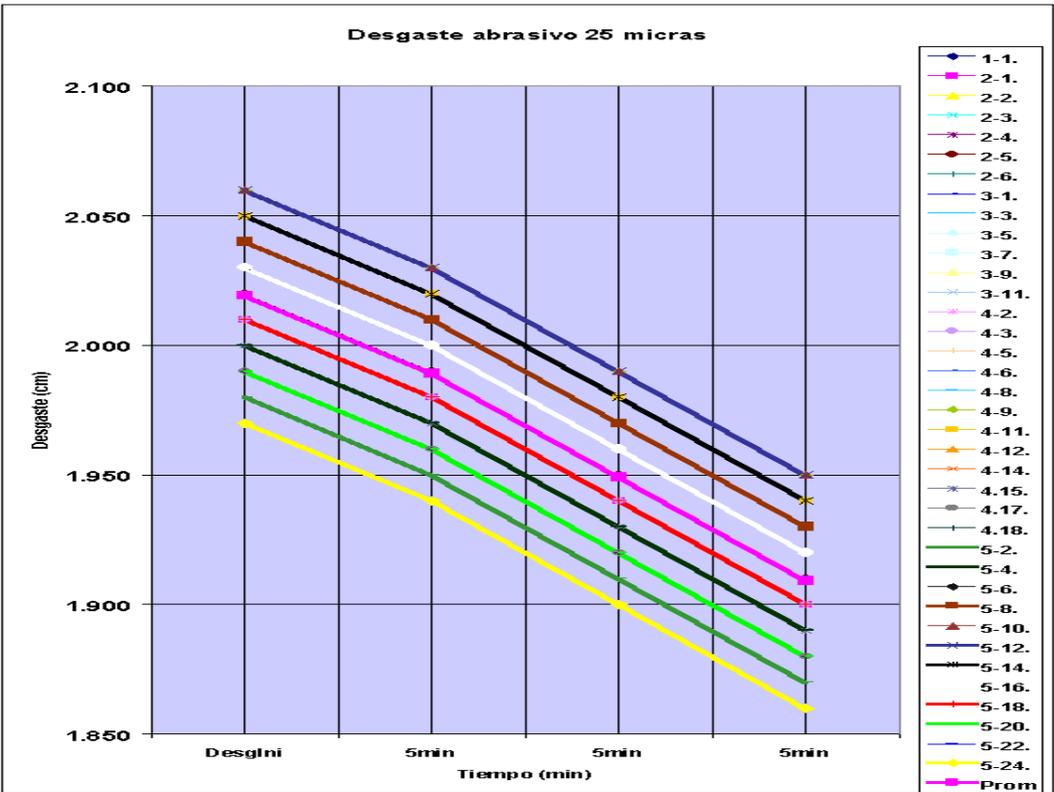


Fig. 4.67 Desgaste abrasivo con grano de 25 micras (la etapa anterior fue esmerilada con grano de 15 micras)

Comparemos ahora las gráficas de las Figs. 4.39, 4.53 y 4.67. La primera (Fig. 4.39) es el proceso de desgaste abrasivo cuya superficie inicial ha sido tratada anteriormente con abrasivo de mayor diámetro (abrasivo fijo), mientras que en la segunda (Fig. 4.53) la superficie inicial fue una superficie pulida.

Claramente podemos observar una similitud del segundo caso con la gráfica del proceso actual (Fig. 4.67) donde la superficie había sido tratada anteriormente con grano más chico y en cierta forma constituye una “superficie pulida de baja calidad”. A diferencia de la superficie pulida en donde los granos de abrasivo primero ruedan en la superficie rayándola, en esta superficie al tener micro-fracturas más abundantes y grandes (producto del grano de 15 micras de la etapa anterior), los nuevos granos de abrasivo casi no rodarán en la superficie por lo tanto el desgaste por rayadura es muy escaso, casi inexistente, aun así podemos observar que en los primeros instantes el desgaste es poco (comparado con el experimento 1) de esta forma al casi no rodar los granos de abrasivo sobre la superficie estos empezaran a fracturas el vidrio, obtenemos la grafica mostrada en la Fig. 4.68

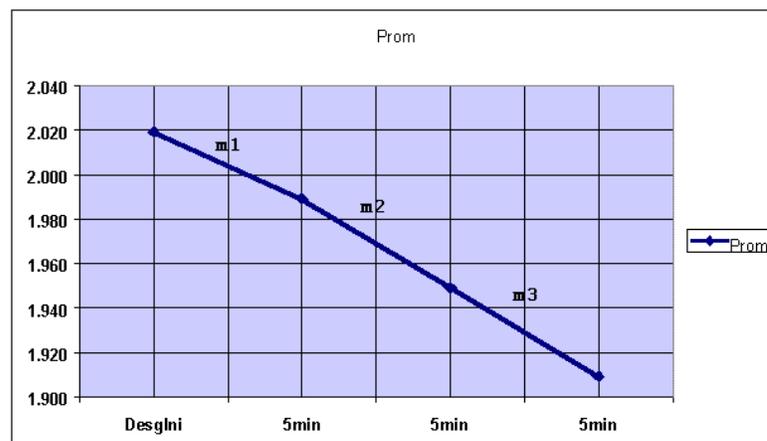


Fig. 4.68 Valor promedio de desgaste, carrera normal.

Abrasivo $Q = 25$ micras, anterior $q = 15$ micras.

Graficando la pendiente de desgaste observamos la rapidez de desgaste como función del tiempo..

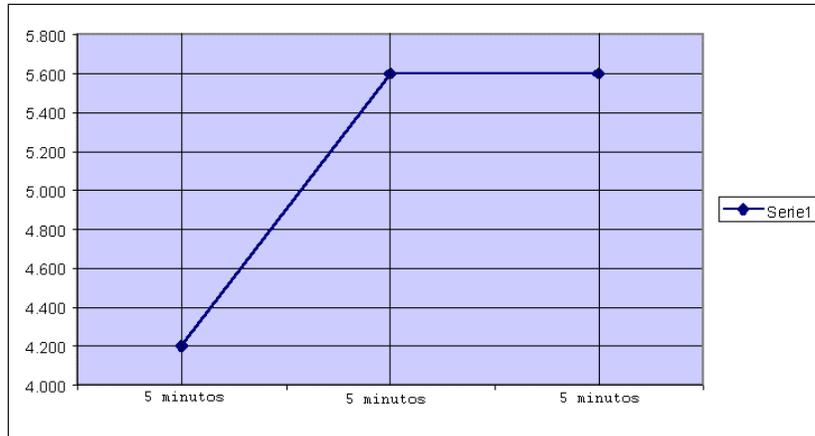


Fig. 4.69 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal.

Abrasivo $Q = 25$ micras, anterior $q = 15$ micras.

En la Fig. 4.69 se muestra la relación de pendientes en el proceso abrasivo, a diferencia del experimento 1, el desgaste aumenta hasta un valor lineal de desgaste abrasivo.

Esto es debido a que inicialmente los granos de abrasivo nuevo son más grandes que las micro-fracturas producidas por el grano anterior (15 micras), esto hará que los granos de abrasivo primero rueden en la superficie, causando rayaduras y posteriormente fracturas por impacto y por rodamiento (más rápido).

El proceso de desgaste inicial debido a este efecto a diferencia del experimento 2 (la superficie fue pulida) el proceso de desgaste del material está dado primeramente por la rayaduras del grano de abrasivo sobre la superficie pulida y (en menor grado) por la fracturación por impacto de la superficie del vidrio por el grano abrasivo, estas fracturas al momento de interceptarse unas con otras provocarán un aumento en la cantidad de material removido.

En la Fig. 4.70 se muestra el valor promedio de desgaste en relación con los datos de la simulación, obtenemos la siguiente grafica de desgaste abrasivo para 25 micras de abrasivo usado sobre una superficie esmerilada anteriormente con grano más fino, de 15 micras.

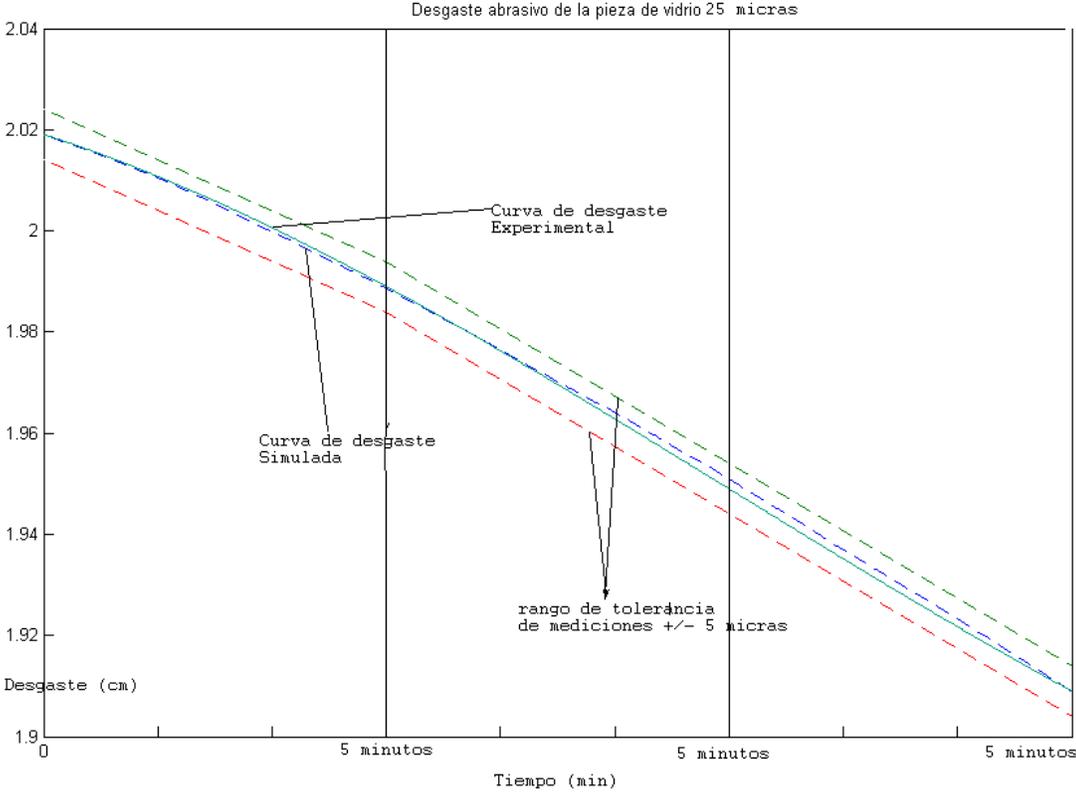


Fig. 4.70 Grafica de desgaste abrasivo con 25 micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo de 15 micras)

Como el grano anterior de trabajo es menor que el diámetro de abrasivo nuevo usaremos la Ec. 3.41 en donde empíricamente encontramos los coeficientes K_K, α, β .

El diámetro anterior de esmeril fue de 15 micras.

Donde:

$$\begin{aligned}
 K_K &= 0.86 \times 10^{-5} & Q &= 25 \text{ micras (Esmeril actual)} \\
 \alpha &= .8 & q &= 15 \text{ micras (Esmeril anterior)} \\
 \beta &= 0.00033
 \end{aligned}$$

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P * v * ((1.6 + \frac{q}{Q}) + \alpha * e^{-\beta * t}) \tag{Ec. 4.7}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos de tiempo.

Etapa 3.2

Se continuó con el proceso abrasivo esmerilando nuevamente la superficie con grano de 15 micras a carrera normal durante 50 minutos, cada 10 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste lineal de cada vidrio (respecto al plano de la herramienta), obteniendo los resultados mostrados en la siguiente gráfica de la Fig. 4.71.

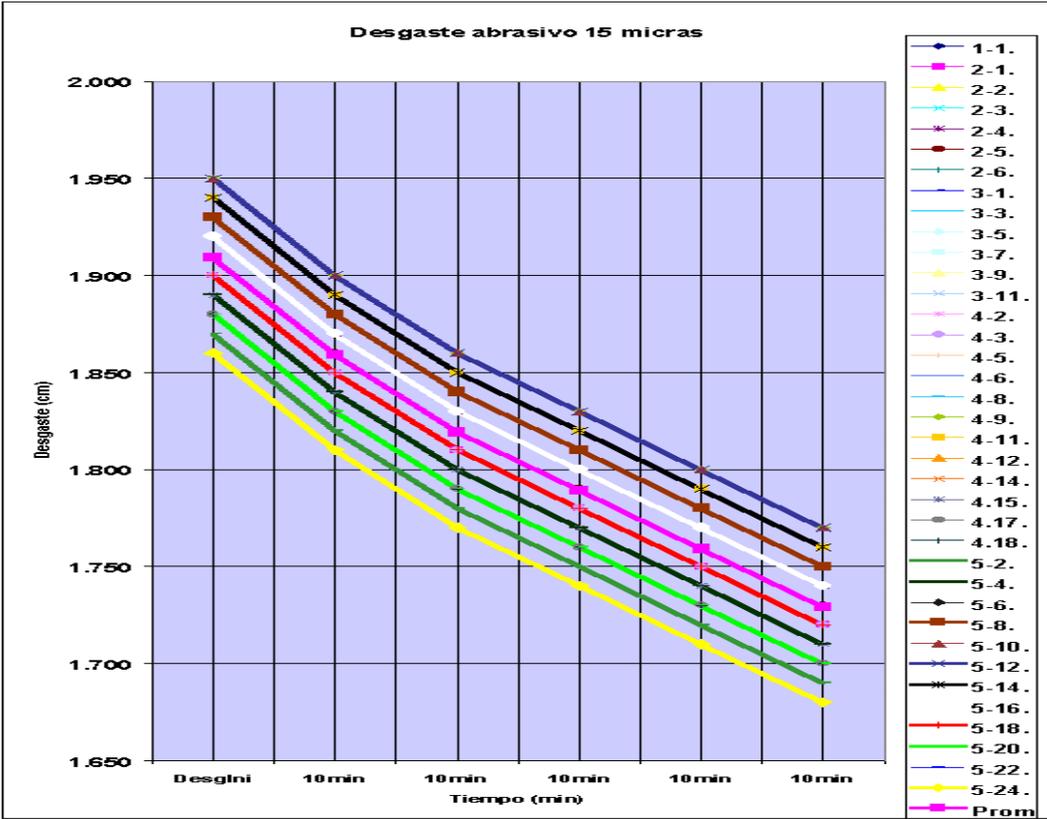


Fig. 4.71 Desgaste abrasivo con grano de 15 micras (la etapa anterior se uso 25 micras)

Graficando el promedio de esos datos del proceso de desgaste, se obtiene la gráfica de desgaste abrasivo del sistema con abrasivo de 15 micras, mostrada en la Fig. 4.72

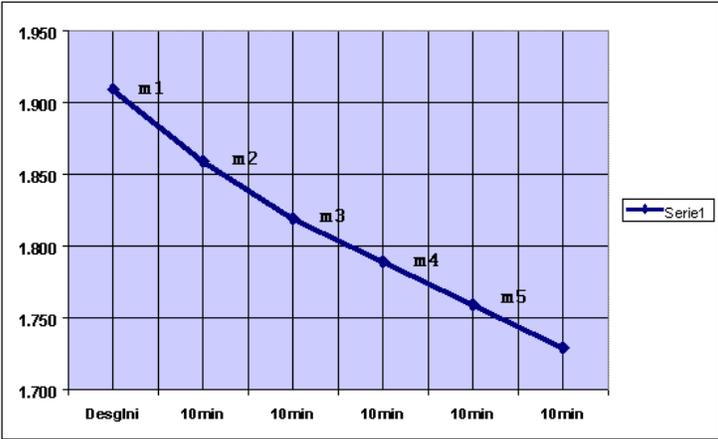


Fig. 4.72 Valor promedio de desgaste, carrera normal.
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras.

Si observamos detenidamente la grafica anterior, nuevamente el proceso de desgaste no es lineal, inicialmente en el intervalo m1 el desgaste es mayor (aprox. 50 micras en 10 minutos), producido por la acción de un grano menor en las micro-fracturas producidas por el grano abrasivo de mayor tamaño empleado en la etapa anterior. Posteriormente en el intervalo m2 el desgaste disminuye a un valor de 40 micras aproximadamente, y finalmente en los intervalos m3, m4, m5 el desgaste se mantiene constante en 30 micras cada 10 minutos.

Graficando la pendiente de desgaste se puede tener una idea más clara, de la rapidez con que ocurre el proceso de desgaste.

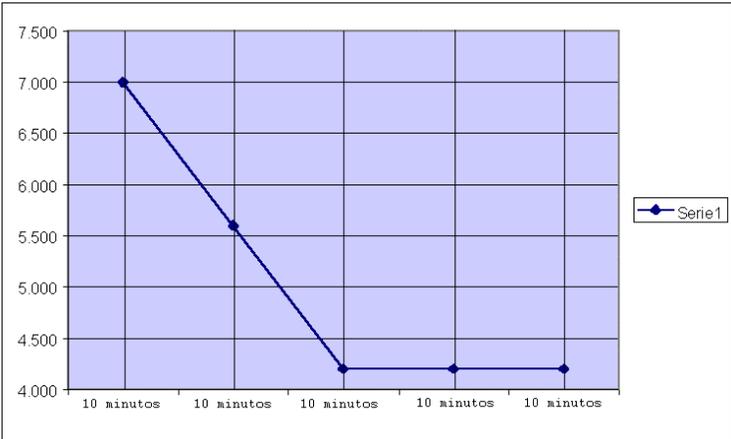


Fig. 4.73 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal.
Abrasivo Q = 15 micras, anterior q = 25 micras.

Etapa 3.3

Se esmeriló la superficie en intervalos de 10 minutos para grano de 9 micras a carrera normal durante un total de 60 minutos, cada 10 minutos se desmontó la herramienta, se lavó perfectamente y se midió el desgaste lineal de cada vidrio.

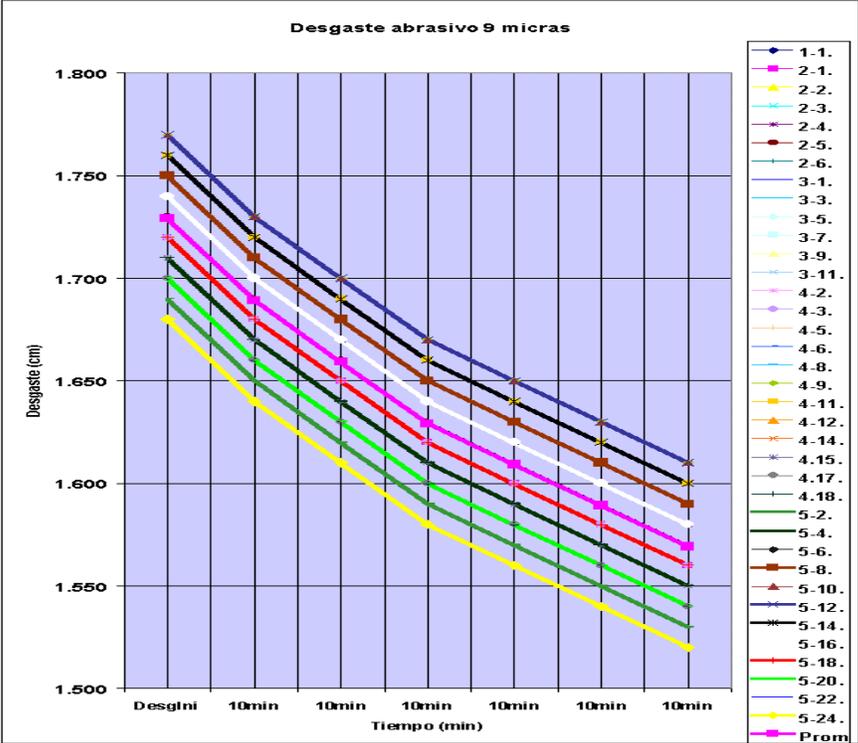


Fig. 4.75 Desgaste abrasivo con grano de 9 micras (la etapa anterior se uso 15 micras) Graficando el promedio de desgastes de todas estas piezas de vidrio se muestra en la Fig. 4.76.

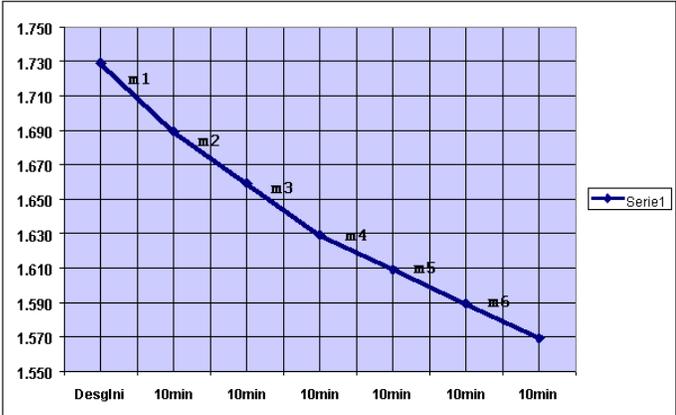


Fig. 4.76 Valor promedio de desgaste, carrera normal. Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.

Como podemos ver en la gráfica de la Fig. 4.76, al emplear un abrasivo de menor diámetro, el intervalo en donde el proceso de desgaste se hace constante requiere de mayor tiempo (aproximadamente 30 minutos). De igual forma que en los procesos anteriores, el desgaste en los primeros intervalos de tiempo es mayor, en m1 tenemos un desgaste de aprox. 40 micras, posteriormente en m2 y m3 de 30 micras y finalmente en los intervalos m4, m5 y m6 se hace constante el desgaste a aprox. 20 micras cada 10 minutos.

Graficando la pendiente de desgaste se puede tener una idea más clara, de la rapidez con que ocurre el proceso de desgaste.



Fig. 4.77 Rapidez de desgaste abrasivo, carrera normal.
Abrasivo Q = 9 micras, anterior q = 15 micras.

Graficando el valor promedio de desgaste en relación con los datos de la simulación, obtenemos la siguiente grafica de desgaste abrasivo para 9 micras.

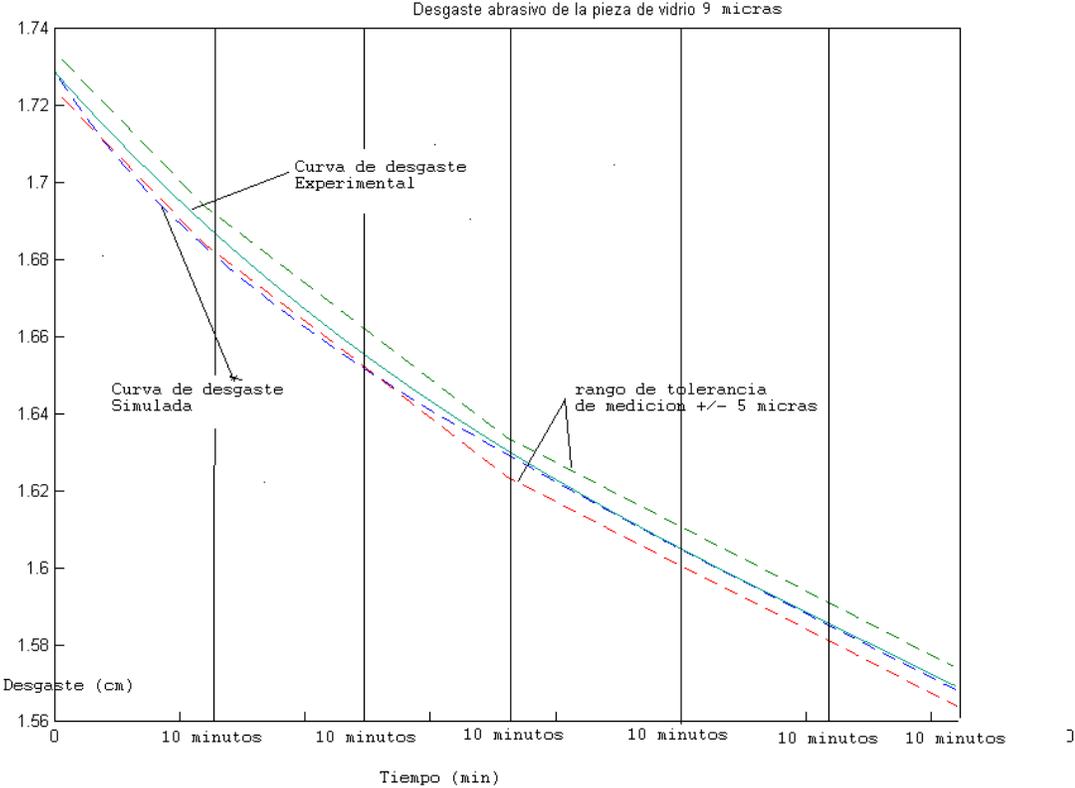


Fig. 4.78 Grafica de desgaste abrasivo con 9 micras (superficie inicial fue tratada con abrasivo de 15 micras)

Usando la Ec. 3.40 empíricamente encontramos los coeficientes K_K , α , β .

El diámetro anterior de esmeril esta dado por el diámetro de abrasivo de la etapa anterior (Aprox. 15 micras).

Donde:

$K_K = 0.51 \times 10^{-5}$	$Q = 9$ micras (Abrasivo actual)
$\alpha = 3.3$	$q = 15$ micras (Abrasivo anterior)
$\beta = 0.00025$	

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P_{relativa} * v_{relativa} * \left(\left(1 + \frac{Q}{q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \quad \text{Ec. 4.9}$$

Estas constantes fueron obtenidas en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos de tiempo.

Graficando los promedios de cada intervalo de tiempo, obtenemos la siguiente grafica de desgaste.

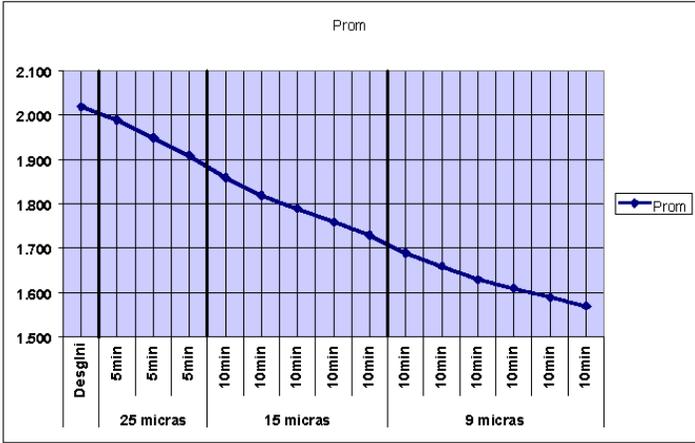


Fig. 4.79 Curva de desgaste abrasivo durante todo el proceso del Experimento 3.

Las velocidades (rapidez) de desgaste de las tres etapas del Experimento 3 se muestran en la Fig. 4.80.

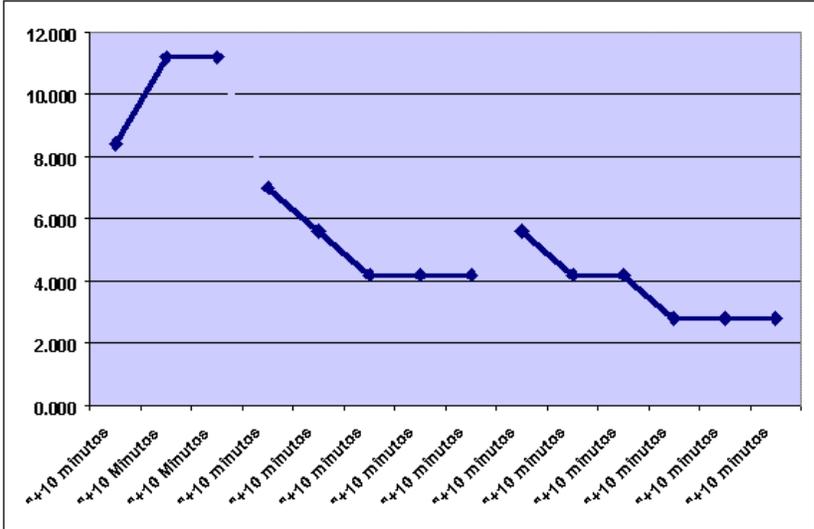


Fig. 4.80 Rapidez de desgaste de las etapas de esmerilado del Experimento 3.

4.6 Etapa de pulido.

4.6.1 Herramienta de poliuretano.

Una vez concluidos los experimentos del proceso de desgaste de esmerilado, se pasó a la etapa de pulido. La superficie de los vidrios se pulió por espacio de 30 minutos hasta que los poros desaparecieron, usando para ello una herramienta de poliuretano como se muestra en la Fig. 4.81.



Fig. 4.81 Herramienta de poliuretano

La máquina pulidora también se ajustó a carrera normal, empleando pulidor de Oxido de Cerio de 0.3 micras. En este caso no se aplicó la fuerza del pivote neumático, la presión solo fue debida al propio peso de nuestra herramienta. Después de 15 minutos de pulido observamos el interferograma mostrado en la Fig. 4.82

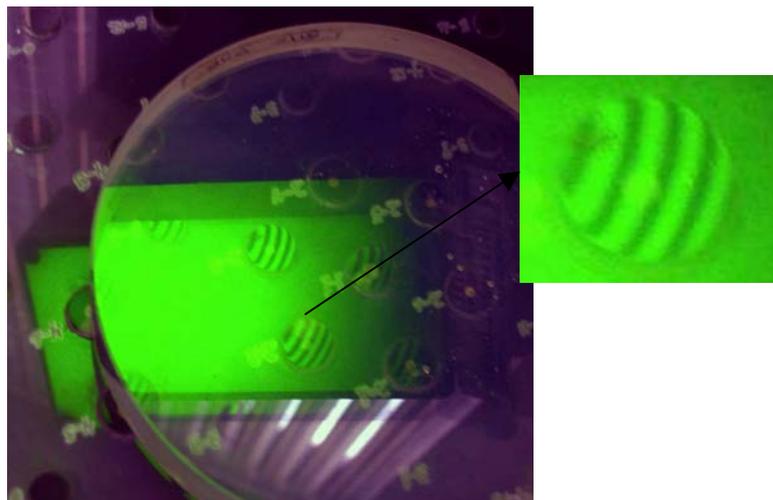


Fig. 4.82 Interferograma del pulido con herramienta de poliuretano

Si observamos el interferograma de la Fig. 4.82 podemos darnos cuenta que en los bordes de cada pieza de vidrio tenemos una pendiente, a esto se le llama efecto de borde caído.

El efecto de borde caído es debido principalmente a las propiedades de la herramienta. Una herramienta blanda como la espuma de poliuretano se deforma por acción de la fuerza que actúa sobre ella, conduciendo a una serie de procesos parciales que colaboran para producir un mayor desgaste en la periferia de cada pieza de vidrio: a) En las orillas se concentra mayor cantidad de abrasivo libre, b) Por la presión local el poliuretano se aplasta, c) Formando una pendiente justo cuando entra en contacto con el borde de cada pieza de vidrio, d) Convirtiéndose así en una especie de “herramienta adaptiva” (Fig. 4.83).

Por lo tanto el desgaste que sucede en las orillas es mayor que el desgaste que sucede en la parte central.

Este fenómeno es muy común en piezas de área muy pequeña, como fue en nuestro caso, para piezas con área muy grande el efecto tiene a desaparecer ya que la fuerza se distribuye en una mayor área de contacto.

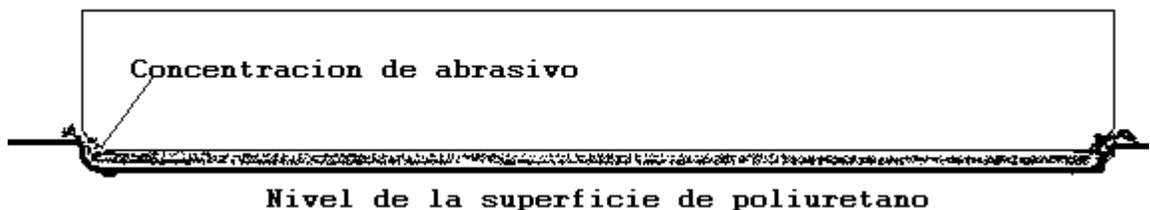


Fig. 4.83 Efecto de borde caído

El mejor método para eliminar el efecto de borde caído es usar una herramienta pulidora más dura (por ejemplo de chapopote) de esta forma la herramienta pulidora no se deformará por acción de la fuerza que actúa sobre ella y los granos de abrasivo se distribuirán más uniformemente sobre las superficies de contacto.

4.6.2 Herramienta de chapopote.

Para corregir el efecto de borde caído, se construyó una herramienta más dura que la herramienta de poliuretano, usamos para esto una herramienta hecha a partir de chapopote como se muestra en la Fig. 4.84,



Fig. 4.84 herramienta de chapopote

El procedimiento para fabricar la herramienta de chapopote es el siguiente: primero se calentó la herramienta de chapopote por aproximadamente 10 minutos en agua caliente para ablandar su superficie y hacerla maleable.

Posteriormente se coloca la herramienta de chapopote aun caliente sobre una superficie plana de referencia Fig. 4.85.



Fig. 4.85. Herramienta sobre el plano de referencia

De esta forma, cuando el chapopote es maleable, adquiere la forma de la superficie deseada (el plano de referencia en este caso). Para obtener mejores resultados, se aplica una fuerza hacia abajo para que el chapopote alcance buen contacto con toda la superficie, como se muestra en la Fig. 4.86



Fig. 4.86 Aplicación de fuerza a la herramienta

De esta forma la superficie de la herramienta de chapopote se comporta como una superficie plana, con la ventaja que esta superficie es menos deformable que la herramienta de poliuretano.

La herramienta de chapopote preparada fue de un diámetro menor que la herramienta esmeriladora-pulidora. Para evitar que la herramienta de chapopote se deformara por el peso de la herramienta y la distribución de los vidrios, invertimos las posiciones de los discos, la herramienta de chapopote se colocó en la parte superior y la herramienta esmeriladora-pulidora en la parte inferior Fig. 4.87.

El proceso de pulido fue de aproximadamente 10 minutos, a carrera normal.



Fig. 4.87 Pulido de las piezas de vidrio con herramienta de chapopote.

En la Fig. 4.88 se muestra el interferograma de este caso. Se observa que las franjas de interferencia de cada superficie han mejorado sensiblemente, aunque todavía no corresponden a las de una superficie plana.

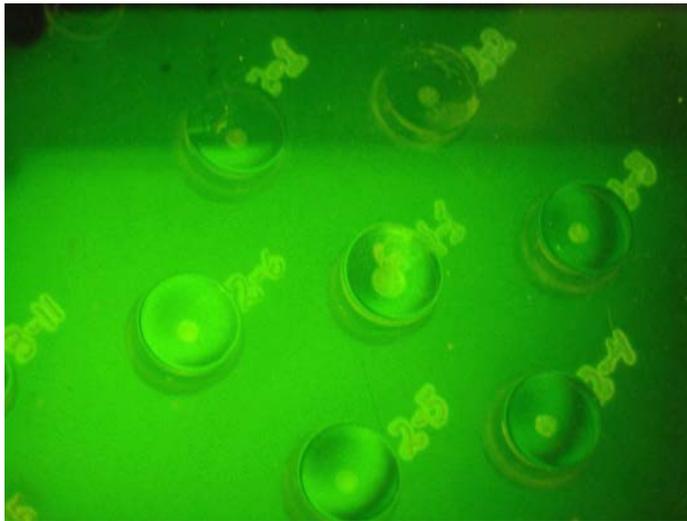


Fig. 4.88 Interferograma de la superficie con herramienta de chapopote

En resumen podemos considerar dos casos en los procesos de desgaste abrasivo. Con una superficie inicial trabajada anteriormente con grano de abrasivo de mayor tamaño al que se vaya a usar y cuando la superficie ha sido tratada inicialmente con un grano menor (por ejemplo una superficie pulida).

Esto se debe principalmente a que la superficie tiene fracturas muy grandes (cuando es el caso de una superficie tratada con grano de esmeril mayor al que se va a usar) o muy pequeñas, (provocas por un grano menor al que se va a usar).

En el primer caso los granos de abrasivo de cada etapa de esmerilado (25, 15 y 9 micras) trabajan contra una superficie "fracturada", mientras que en el segundo caso el nuevo esmeril se encuentra con una superficie "lisa".

De esta forma, basándonos en los resultados experimentales se encontraron dos ecuaciones que se pueden emplear para calcular el desgaste en función de cada tamaño de grano usado anteriormente: Eq. 3.40 y 3.41

Por lo tanto la gráfica de desgaste acumulado en función del tiempo y del tipo de grano usado es presentada en la Fig. 4.89

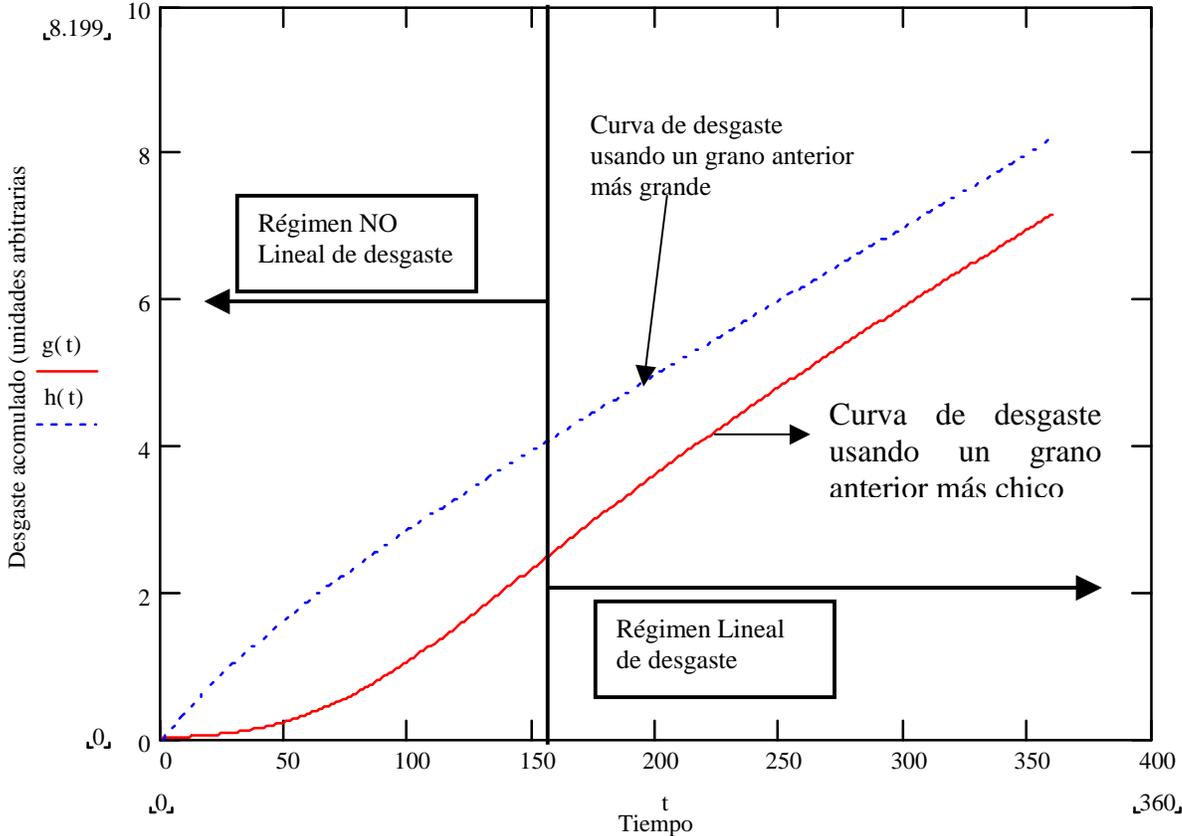


Fig. 4.89 Relación de desgaste acumulado en función del grano de abrasivo usado anteriormente.

REFERENCIAS

- [1] T.S. Izumitani, "Optical glass", Hoya corporation, American institute of physics, 1983
- [2] Kumanin K. G "Generation of optical surfaces" London: The focal library, 67-104, 1967.

CAPITULO V

Análisis de resultados.

En este capítulo se analizarán los resultados que se obtuvieron en los tres experimentos del proceso de esmerilado y pulido.

5.1 Análisis de resultados en el proceso de esmerilado.

Análisis del experimento 1, donde se trabajó con una superficie que ha sido tratada anteriormente con grano de esmeril más grande (abrasivo fijo de la generadora de planos Blanchard) y las etapas subsiguientes en el proceso normal de esmerilado (esmerilado con abrasivo de 25 micras, abrasivo de 15 micras, abrasivo de 9 micras).

Podemos observar en las graficas de desgaste que los primeros instantes la curva de desgaste es mayor, y decrece hasta un valor constante diferente para cada tamaño de abrasivo libre.

Al principio, mientras las micro-irregularidades del vidrio son mayores que el tamaño del nuevo grano, la razón de desgaste es grande. Al avanzar el proceso aumenta la densidad de las micro-irregularidades producidas por el nuevo tamaño de grano, por lo que la razón de desgaste decrece hasta un nuevo valor límite, cuando solo existen estas nuevas micro-irregularidades más pequeñas, es decir donde las micro-fracturas producidas por el grano anterior hayan desaparecido y solo tenemos las producidas por el nuevo abrasivo.

El proceso de desgaste con abrasivo libre es un fenómeno estocástico y estadístico; de acuerdo a las investigaciones de Kumanin[2], al avanzar el proceso se van formando fracturas cónicas en el material, debido a los impactos aleatorios que ocurren entre las superficies de la herramienta y del vidrio, donde los granos de abrasivo son los “agentes de impacto”. Estas fracturas se interceptan produciendo desprendimiento de material.

La probabilidad de que las fracturas produzcan puntos débiles cuando se interceptan depende del área de contacto, así mismo su resistencia a la abrasión

también dependerá del área. Es necesario que transcurra un tiempo (t) para que la distribución de puntos débiles se estabilice en el nuevo valor.

Una vez estabilizado el número de puntos débiles, la superficie tendrá su mínimo valor de resistencia al desgaste, de esta forma el desgaste será máximo, manteniéndose constantes estos valores para tiempos posteriores del proceso, como se pudo observar en las gráficas de desgaste del experimento 1 y en las etapas donde el grano anterior de esmeril es mayor que el grano nuevo (25 micras a 15 micras a 9 micras) en donde tenemos un régimen lineal.

El tiempo que deberá de transcurrir para que el valor de desgaste se estabilice, depende de factores como, dureza del vidrio, tamaño de grano abrasivo trabajado anteriormente etc.

Analizando los resultados de los experimentos 2 y 3 en los que, a diferencia del experimento 1, la superficie ha sido tratada anteriormente con un grano de esmeril de menor tamaño.

En el espacio de trabajo existente entre la herramienta y el vidrio penetra un número indefinido de granos de abrasivo, en donde la cantidad de granos abrasivos depende en primer lugar de la concentración de la suspensión y en segundo lugar de la topografía de las superficies trabajadas. La resistencia de los granos y de los materiales varía dentro de amplios márgenes de valores, por lo que una parte de ellos se fractura aún a esfuerzos pequeños y otra parte de ellos va rodando entre las superficies de la herramienta y del vidrio, por lo que realiza el desgaste abrasivo por medio de micro-facturación.

Al principio, las micro-fracturas producidas por la etapa anterior son más pequeñas que el diámetro del nuevo grano abrasivo, por lo que el grano de esmeril rodará entre la superficie de la herramienta y del vidrio.

De esta forma, existen dos tipos de movimientos que puede realizar el abrasivo:

RODAMIENTO, con lo que al desplazarse puede provocar fracturas por compresión o por impacto, con lo que la micro-estructura obtenida será una sucesión de fracturas cónicas irregulares.

DESLIZAMIENTO, cuando la superficie inicial es una superficie pulida, algunos granos de abrasivo al desplazarse no provocarán fracturas sino que se deslizarán

produciendo RAYADURAS (scratches) en la superficie, al interceptarse estas, producen desprendimiento de material.

Una vez que la densidad de fracturas sé a distribuido en toda la superficie, el desprendimiento de material ocurre a un ritmo constante (régimen lineal).

Si graficamos la relación de desgaste abrasivo usando un mismo tamaño de grano de esmeril, se evidencian los efectos de las condiciones previas a la etapa actual del proceso de esmerilado, como se muestra en la Fig. 5.1.

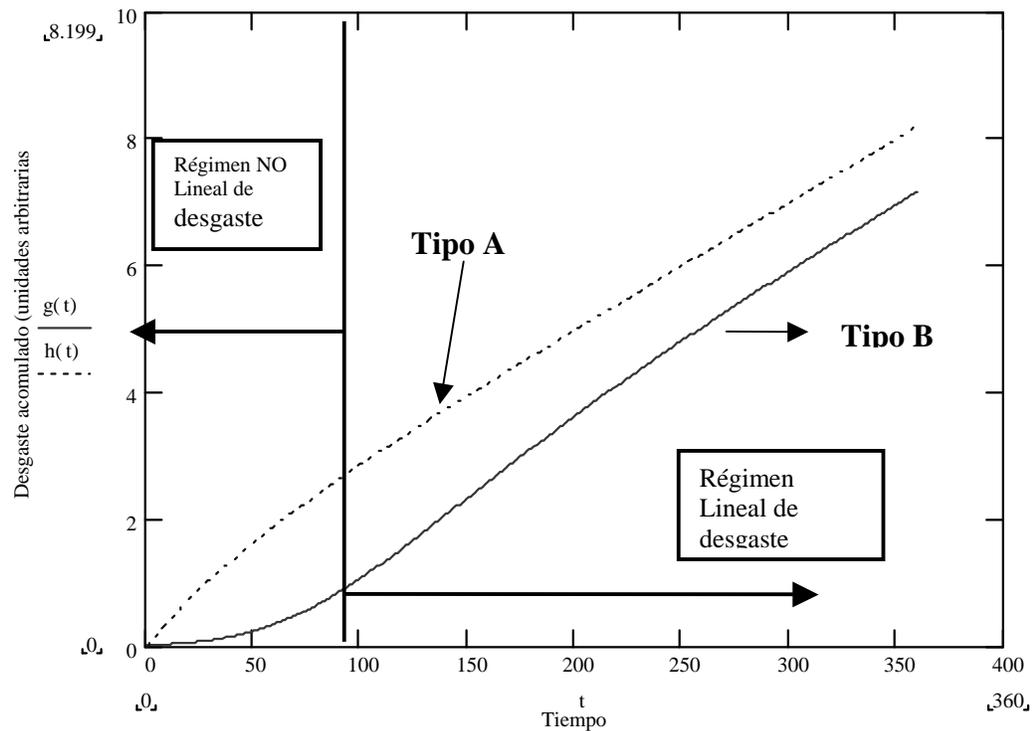


Fig. 5.1 Tabla de desgastes en función del tiempo de esmerilado

La Fig. 5.1 muestra el comportamiento típico de dos tipos de proceso de desgaste abrasivo:

Tipo A. La relación de desgaste cambia linealmente con el tiempo, excepto por un intervalo de tiempo inicial, donde la rapidez de desgaste es mayor, debido a que previamente la superficie fue tratada con un tamaño de abrasivo más grande, que produjo grandes fracturas residuales. Cuando actúa el nuevo abrasivo de menor tamaño produce un gran desprendimiento de material, debido a que los puntos donde se interceptan las fracturas son muy débiles (las micro-

fracturas son muy grandes) produciendo un desprendimiento mayor de material, después de un tiempo, las micro-fracturas serán todas producidas por la acción del nuevo abrasivo lo que estabiliza el proceso de desgaste.

Tipo B. La rapidez de desgaste se incrementa durante un intervalo, excepto por un instante de tiempo inicial, donde el desgaste (a diferencia de la relación Tipo A) tiene una rapidez menor, que se incrementa con el tiempo. Esto es debido a que la superficie ha sido tratada anteriormente con grano abrasivo de menor diámetro, como puede ser una superficie pulida.

Inicialmente las micro-fracturas en la superficie son menores que el tamaño del nuevo abrasivo, de esta forma el abrasivo inicialmente rueda entre las dos superficies produciendo fracturas cónicas, pero separadas unas de otras lo que produce muy poco desprendimiento de material. Conforme el proceso avanza, estas fracturas empezarán a interceptarse, lo que incrementará la cantidad de material desprendido hasta que las fracturas producidas por el nuevo grano de esmeril se distribuyan en toda la superficie, lo que provocará que el desgaste sea constante en función del tiempo de trabajo

Un parámetro importante que se considera en el proceso de esmerilado es la constante de desgaste abrasivo de un vidrio, en forma general se define esta constante como el valor relativo de desgaste en forma volumétrica de un vidrio muestra, en relación con un desgaste volumétrico de un vidrio estándar bajo iguales condiciones de esmerilado.

En estudios realizados por T.S Izumitani[1] mostró que en forma general No existe una relación específica entre la razón de desgaste del vidrio y su micro-dureza (dureza Knoop). Para vidrios Flint, la relación es más o menos evidente, no así para los vidrios Crown. Por esto se emplea más frecuentemente el concepto “facilidad de ruptura” o “resistencia relativa al desgaste”.

5.2 Análisis de resultados en el proceso de pulido.

A diferencia de la etapa de esmerilado en donde el desgaste es un proceso de facturación, en el proceso de pulido la superficie no es fracturada, sino que es tallada.

Inicialmente las fracturas que posee la superficie son producto de la última etapa de esmerilado, al alargar el tiempo de pulido estos detalles desaparecen, lo que indica que el proceso de pulido constituye un desgaste muy suave de la superficie del vidrio a partir de los puntos más elevados de las fracturas, que por el carácter aleatorio del proceso se suavizan adquiriendo un aspecto de “conos” o “poros” residuales, como comúnmente se les llama y que corresponden a las fracturas más profundas producidas por el esmerilado.

Durante el pulido, debido a que los granos de esmeril se incrustan en el material blando de la herramienta, NO ocurren nuevas fracturas en el vidrio, sino que el proceso es similar a producir en el vidrio micro-cortes tangentes a la superficie, lo que hace que los puntos más elevados producidos por la etapa de esmerilado se pulan primero, al avanzar el proceso de pulido, estas áreas pulidas aumentan en tamaño hasta cubrir toda la superficie del vidrio

De acuerdo a esto, la herramienta pulidora debe tener una viscosidad suficiente para que los granos de abrasivo se incrusten en ella, pero al mismo tiempo deberá de tener una rigidez suficiente, para evitar que se deforme.

En un primer experimento los vidrios se pulieron con una combinación de herramienta de poliuretano y Oxido de Cerio, obteniéndose una superficie óptica plana con aproximadamente 5 franjas de convexidad, debidas al efecto de borde caído. Esto se debió a que la herramienta de poliuretano se deformó a causa de la presión de las piezas de vidrio contra ella.

Posteriormente usamos una herramienta de chapopote. Esta es más rígida que la herramienta de poliuretano por lo cual se obtuvieron mejores resultados en la superficie óptica, de aproximadamente una franja de interferencia.

De esta forma podemos mostrar los cambios que sufre la superficie en los procesos abrasivos, dado por la Fig. 5.2

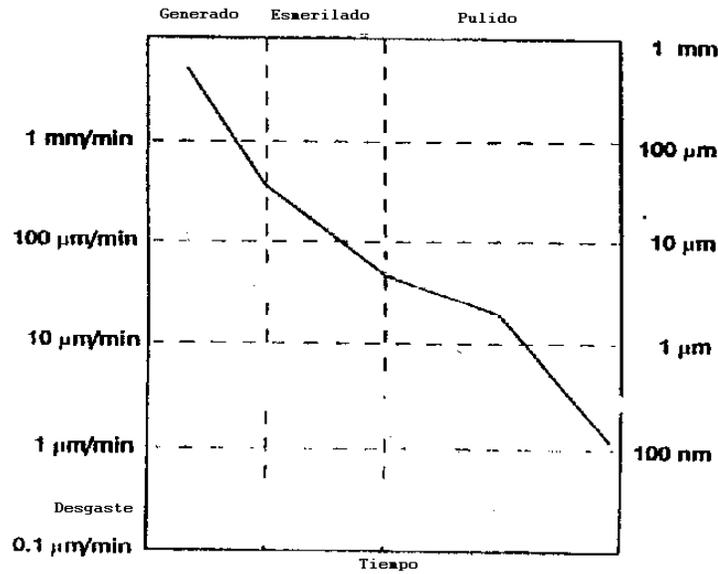


Fig. 5.2 Proceso abrasivo de una superficie óptica

5.3 Estimación de desgaste usando nuestras ecuaciones de simulación.

El aspecto más importante de este trabajo de tesis fue encontrar un modelo matemático que representara el comportamiento de desgaste abrasivo como función del tiempo de trabajo, de los parámetros de la máquina esmeriladora (como son presión, velocidad angular de los discos en contacto, ajuste de excentricidad de pivote de oscilación etc.) y parámetros tales como el tipo de grano abrasivo empleado, la dureza de la herramienta, las propiedades mecánicas del vidrio usado etc.

La calidad de esta representación teórica se verificaría contra resultados experimentales y una vez encontrado este modelo matemático, se refinaría hasta poder determinar con su ayuda la topografía final de la superficie óptica.

Usamos como referencia la ecuación propuesta por Kumanin[2] (Ec. 1.3), la cual predice el desgaste lineal en función de los parámetros de dureza de la herramienta, tamaño de abrasivo, constante relativa de desgaste, presión y velocidad. El desprendimiento en los primeros instantes en general esta en

función de varios parámetros como dureza del vidrio y de la herramienta, velocidad, presión etc.

Cuando iniciamos el proceso abrasivo de una superficie previamente tratada con un grano de esmeril mayor al que vamos a usar, las micro-fracturas provocadas por la acción abrasiva anterior son muy grandes, especialmente si la superficie ha sido tratada con una herramienta de abrasivo fijo (Por ejemplo rectificada en la maquina de planos Blanchard).

Cuando iniciamos el proceso con el grano abrasivo de menor tamaño, el desgaste en los primeros instantes, es muy rápido. Suponemos que esta alta velocidad de desgaste se debe principalmente a la concentración de presión sobre los picos de material que sobresalen entre las profundas fracturas del material, además del hecho demostrado por Kumanin[6], que son fracturas cónicas que se interceptan sin desprendimiento de material, por lo que en la etapa que se inicia, la acción de un grano esmeril menor provocará que el material fracturado por la etapa anterior termine por desprenderse.

Conforme el nuevo proceso de desgaste avanza, las fracturas provocadas serán ahora de un tamaño similar al del grano abrasivo usado, por lo tanto su comportamiento de desgaste será lineal, es decir, el desprendimiento de material será aproximadamente $1/3$ del tamaño de grano en toda la superficie y se mantendrá a ese ritmo por tiempo indefinido, mientras se siga empleando el mismo tamaño de grano.

De igual forma ocurre al usar un grano de abrasivo libre mayor (Por ejemplo 25 micras) y emplear luego uno menor (por ejemplo 15 micras). El comportamiento del desgaste abrasivo es similar, en los primeros instantes un desgaste mayor y variable y después un desgaste menor y constante.

Existe otro comportamiento de desgaste en función del grano de abrasivo usado previamente. Cuando esmerilamos una superficie que ha sido pulida anteriormente, el desgaste se invierte, es decir, en los primeros instantes la rapidez de desgaste es menor y va aumentando paulatinamente, hasta que la superficie se ha fracturado a un valor similar al tamaño de grano usado, lo que estabiliza la velocidad del proceso de desgaste abrasivo.

Esto se debe principalmente a que inicialmente la superficie tiene fracturas muy pequeñas, (provocadas por el grano pulidor 0.3 micras por ejemplo), mientras que los granos de abrasivo en la etapa de esmerilado son de 25, 15 y 9 micras. Esto hace que los granos de esmeril se encuentren con una superficie “lisa”, y no con una superficie “fracturada” como en los casos anteriores, en estas condiciones, inicialmente, los granos de abrasivo ruedan sobre la superficie. Por la acción de la presión aplicada, poco a poco se empezarán a formar fracturas en la superficie. Conforme el proceso avance, estas fracturas (que son de un tamaño similar al grano usado) se interceptarán provocando desprendimiento de material, después de un tiempo el desgaste se podrá considerar lineal.

De acuerdo a lo anterior, se propusieron dos ecuaciones de desgaste:

Para un grano anterior (q) más grande que el actual (Q):

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot Q}{\delta \cdot S} P * v * \left(\left(1 + \frac{Q}{q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \quad \text{Ec. 5.1}$$

Para un grano anterior (q) más pequeño que el actual (Q):

$$I_L = K_k \cdot \frac{k \cdot \theta}{\delta \cdot S} P * v * \left(\left(1.6 + \frac{q}{Q} \right) + \alpha * e^{-\beta * t} \right) \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde α , β , K_k , δ , son constantes del sistema, que dependen de la relación entre los tamaños de abrasivo, la dureza de la herramienta y la constante abrasiva del material.

Donde α es positiva para relación de grano de esmeril anterior más grande que el esmeril a usar y negativa cuando el grano de esmeril anterior es más chico.

Estas constantes se determinaron en forma empírica y reflejan la variación exponencial de desgaste en los primeros intervalos de tiempo.

El término que refleja la pendiente de desgaste está dado por la relación entre el diámetro de esmeril anterior (q) y el diámetro del esmeril nuevo (Q). En

términos generales las pendientes en el proceso de desgaste usando las relaciones: (grano anterior (Blanchard)-grano nuevo (25 micras)) (grano anterior (pulido)-grano nuevo (25 micras)) (grano anterior (15 micras)-grano nuevo (25 micras)), no tienen el mismo valor.

En el primer paso se producen micro-fracturas muy internas debido a la gran presión y gran velocidad que aplica la herramienta abrasiva (de la máquina Blanchard) contra la pieza de vidrio, de esta forma cuando esmerilemos con abrasivo de 25 micras habrá rastros de estas micro-fracturas durante los instantes iniciales y solo se eliminarán en las etapas subsiguientes del proceso abrasivo.

Cuando esmerilamos una superficie con abrasivo libre de 25 micras, en donde la superficie ha sido trabajada anteriormente con grano de esmeril más chico (15 micras, 9 micras o superficie pulida) tenemos el caso inverso, las micro-fracturas iniciales son muy pequeñas ya que el efecto de la acción del grano libre sobre el vidrio es mucho menor que la que ejerció el grano de la herramienta fija en el caso anterior; esto hace que las fracturas fácilmente se eliminen con los procesos subsiguientes.

De lo anterior concluimos que aun cuando las dos superficie se esmerilen con grano abrasivo del mismo diámetro, las condiciones iniciales al proceso Siempre afectarán el comportamiento de la curva de desgaste.

En la siguiente tabla se muestran las constantes para cada uno de los experimentos

Experimento	Kk	Alfa	Beta	Q	q	I(estable)	Ecuacion
1-1	.56 E-05	0.9	0.00025	25	50	40 micras	Ec. 5.1
1-2	.46 E-05	2	0.00025	15	25	30 micras	Ec. 5.1
1-3	.51 E-05	3.3	0.00025	9	15	20 micras	Ec. 5.1
2-1	.83 E-05	-1.4	0.00036	25	0.3	40 micras	Ec. 5.2
2-2	.46 E-05	2	0.00025	15	25	30 micras	Ec. 5.1
2-3	.51 E-05	3.3	0.00025	9	15	20 micras	Ec. 5.1
3-1	.86 E-05	0.8	0.00033	25	15	40 micras	Ec. 5.2
3-2	.46 E-05	2	0.00025	15	25	30 micras	Ec. 5.1
3-3	.51 E-05	3.3	0.00025	9	15	20 micras	Ec. 5.1

En la última parte de la gráfica se muestra el valor de desgaste estable (I estable), este valor representa el régimen lineal de desgaste y se mantiene constante.

El mecanismo de desgaste con abrasivo libre en los primeros instantes de tiempo existen dos procesos de desgaste, por fracturas y por rayaduras, la diferencia entre estos dos mecanismos depende de las propiedades del vidrio mismo, el tamaño de abrasivo, las propiedades mecánicas de la herramienta y las condiciones dentro del proceso de esmerilado tales como, presión, velocidad relativa, etc.

REFERENCIAS

[1] T.S. Izumitani, "Optical glass", Hoya corporation, American institute of physics, 1983

[2] Kumanin K. G "Generation of optical surfaces" London: The focal library, 67-104, 1967.

" Michael J. Cumbo" New machines, Tools, and process for modern Optics Manufacturing Class notes, University of Rochester, 2002

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

6.1 Conclusiones

Los procesos de manufactura óptica requieren hoy en día de técnicas más avanzadas para producir superficies ópticas más precisas.

Existen nuevos métodos para generar, esmerilar y pulir superficies ópticas, uno de los métodos más avanzados emplea el “Efecto Magnetoreológico”, en donde campos magnéticos modifican las propiedades de un fluido de trabajo (abrasivo libre dentro de un fluido magnético), con el que se obtienen superficies ópticas de alta precisión.

Para cualquier método es necesario conocer en forma microscópica el fenómeno de desgaste abrasivo, para poder generar, esmerilar y pulir superficies ópticas más precisas. En nuestro país se emplean todavía procesos de manufactura óptica “tradicionales”, que en algunos casos datan del siglo XVI..... y por diversas razones los deberemos seguir aplicando, fundamentalmente por razones económicas.

El origen de esta tesis y su financiamiento provinieron de un proyecto binacional México-Cuba, auspiciado y apoyado por el CONACYT, cuya finalidad consiste en el desarrollo de dos instrumentos polarimétricos, buscando su transferencia al sector industrial. Esos instrumentos son: Un sacarímetro polarimétrico y Un espectro elipsómetro.

El área de mayor valor agregado en ambos casos, es la manufactura de las componentes ópticas de estos instrumentos. La óptica en general y el diseño y manufactura ópticas en particular constituyen la mayor fortaleza del CIO, por lo que el énfasis se ha centrado primeramente en desarrollar los procesos de manufactura de las componentes ópticas necesarias y posteriormente se enfocará en el diseño óptico de nuevos instrumentos para estas aplicaciones.

El proyecto más avanzado es el Sacarímetro polarimétrico y la componente óptica de mayor valor agregado y que emplea materiales amorfos, como los que

estamos familiarizados a manejar, son las barras cilíndricas de caras plano-paralelas, manufacturadas en vidrios magneto ópticos.

El trabajo de esta tesis entonces, está orientado a la manufactura precisa y económica de barras cilíndricas de vidrio magneto-óptico, con caras plano paralelas, que constituirán los núcleos de las celdas de Faraday que inducirán rotaciones controladas del plano de polarización de los haces laser en esos instrumentos.

Inicialmente este trabajo de tesis se avocó a dos aspectos principales:

1.- Diseño y construcción de una máquina generadora de barras cilíndricas y de una herramienta esmeriladora-pulidora de barras con extremos plano-paralelos.

2.- Una simulación numérica que predijera el avance del desgaste abrasivo y la topografía del disco superior al final del proceso de desgaste, con diferentes tamaños de granos abrasivos. Esto con el fin de minimizar el desperdicio del vidrio magneto-óptico (que es terriblemente caro), optimizar la precisión de las piezas y maximizar el número de ellas en cada procedimiento de manufactura.

Debido a la carga de trabajo del taller mecánico y al tiempo limitado (un semestre) disponible, el trabajo debió centrarse principalmente en la simulación numérica y la verificación de los resultados experimentales en el proceso de esmerilado con diferentes tamaños de grano abrasivo a diferentes condiciones iniciales de superficie facturada.

Para tal efecto se desarrolló un algoritmo de simulación que, bajo las constantes del sistema (constantes mecánicas tanto de la herramienta esmeriladora como constantes del vidrio usado) nos determina el desgaste sufrido en cada una de las piezas de vidrio y que cumple con los resultados experimentales de los procesos de desgaste.

Dividiremos las conclusiones en dos partes: parte mecánica y simulación numérica del proceso de desgaste abrasivo.

Las conclusiones que competen a nuestra máquina generadora de barras cilíndricas son muy pocas ya que al término de esta tesis aun no se termina de construir completamente. Solo se presentó el diseño de las cajas de engranes que se acoplarán a la fresadora, mismas que se encuentran actualmente en fabricación.

En forma general esta máquina, a diferencia de las expuestas en el capítulo 1, tiene la ventaja de que está basada en los mecanismos de una fresadora mecánica, lo que le conferirá más precisión y robustez.

Otro punto interesante es que en el diseño de la máquina generadora se tomaron precauciones para evitar la torsión entre los ejes donde se colocará la pieza de vidrio a generar, con lo que esperamos poder fabricar barras cilíndricas muy delgadas, inicialmente de 5 y 3 milímetros de diámetro.

Esta máquina contará con controles automáticos y motores a pasos para poder hacer el sistema semi-automático en algún momento posterior.

Se diseñó y construyó una herramienta esmeriladora-pulidora para barras cilíndricas con caras plano-paralelas. Al no tener construida la máquina generadora de barras de vidrio los experimentos con esta herramienta esmeriladora-pulidora se enfocaron investigar los procesos de esmerilado y pulido de las piezas de vidrio de soporte.

Esta herramienta tiene la ventaja de será posible esmerilar y pulir simultáneamente dos tipos de barras de diferente diámetro (3 y 5 mm), además de que su estructura hexagonal permitirá el ahorro de material magneto-óptico, ya que emplea piezas pequeñas en los elementos de soporte de las barras cilíndricas y en los de apoyo adicional.

Su diseño permite una estabilidad térmica (aluminio) y mecánica (perfil trapezoidal) para evitar que una vez que tengamos las barras cilíndricas colocadas en los orificios, se fracturen dentro de ellos durante el proceso de esmerilado y pulido

El trabajo más importante entonces, en esta tesis, fue la simulación numérica del proceso de desgaste abrasivo que ocurre en una máquina esmeriladora tradicional, como la Strasbaugh empleada.

El modelo matemático que predice el desgaste con diferentes granos de abrasivo constituye una mejora al representado por la ecuación fundamental de desgaste propuesta por Kumanin[1].

La ecuación de Kumanin se modificó para satisfacer los resultados experimentales del proceso de desgaste determinados mediante los tres experimentos realizados (en total nueve etapas de desgaste abrasivo independientes). Para lograrlo se incluyó un término que representa la relación de tamaños de grano empleados (anterior y actual en cada etapa).

De los resultados experimentales se encontró una parte no lineal del desgaste abrasivo en los primeros instantes de cada proceso, cuando entra en acción el nuevo tamaño de esmeril.

Esta ecuación conjunta no solo las propiedades mecánicas del vidrio y de la herramienta, sino también los parámetros mecánicos de la maquina esmeriladora, de esta forma fue posible predecir el comportamiento con diferentes combinaciones de grano abrasivo y condiciones previas a cada proceso de esmerilado.

Los resultados obtenidos se compararon con los resultados experimentales, obteniéndose resultados muy aproximados entre sí.

En conclusión:

Se determinó experimentalmente que las condiciones previas a cada etapa de desgaste abrasivo, también afectan la rapidez de desgaste, al menos durante los primeros instantes, tanto en superficies previamente esmeriladas como en superficies previamente pulidas.

Se propusieron dos ecuaciones para representar las etapas del proceso de desgaste abrasivo, según sean las condiciones previas de la superficie óptica: “Esmerilada” cuando el tamaño de los granos del abrasivo anterior fue mayor que el actual y “Pulida” cuando el abrasivo anterior es menor.

En los tres experimentos y en las nueve etapas en las que se subdividieron, estas ecuaciones constituyeron una buena representación matemática de cada proceso de desgaste abrasivo, con un error acumulado que es menor al 1% en cada etapa.

La precisión de estas representaciones del desgaste abrasivo, fue suficiente para predecir la forma que obtendrían las superficies que interactuaban.

Se constató indirectamente que en el proceso de desgaste con abrasivo libre existen dos mecanismos, fractura y rayado del vidrio Itzumitani[2]. La diferencia entre estos dos mecanismos depende de las propiedades del vidrio mismo, del tamaño de abrasivo, las propiedades mecánicas de la herramienta y las condiciones del proceso de esmerilado mismo, tales como presión, velocidad relativa, etc.

6.2 Trabajos a futuro.

La tarea más importante para trabajos a futuro, es sin duda experimentar con diferentes tipos de vidrios, con diferente constante de desgaste abrasivo, de esta forma podremos perfeccionar este trabajo, hasta cubrir un amplio espectro de materiales a los que se pueda aplicar confiablemente las simulaciones numéricas del proceso de desgaste abrasivo.

Otro punto que queda a futuro es concluir la construcción de la máquina generadora de barras cilíndricas, con lo que podremos usar barras cilíndricas de diferentes tipos de vidrio y determinar el grado de desgaste, entrenarse en la técnicas de esmerilado, pulido y verificación de planaridad que se deberán de aplicara a las barras cilíndricas.

Existen también otras líneas de investigación que se pueden tomar a partir de los resultados que se obtuvieron en el desarrollo de esta tesis. Una de ellas es la investigación en nuevas herramientas esmeriladoras, como son las de polvo de diamante ya sea en forma de pellets de diamante o como diamantes electrodepositados sobre un metal.

Sin duda un punto interesante a investigar a futuro también es el comportamiento preciso de la parte no lineal en las curvas de desgaste abrasivo.

REFERENCIAS

- [1] Kumanin K. G “*Generation of optical surfaces*” London: The focal library, 67-104, 1967.
- [2] T.S. Izumitani, “Optical glass”, Hoya corporation, American institute of physics, 1983