

## Instituto de astronomía

### Publicaciones Técnicas



---

**“Comunicación Interna”**

**CI-2002-03**

### HERRAMIENTA HIDRODINAMICA DE PULIDO (HIDRA) PARA LOS ESPEJOS DEL TIM. PARTE II : EXPERIMENTOS DINAMICOS.

A. Cordero, E. Luna, E. Ruiz, J.M. Núñez, J. Gonzalez, V. Cabrera, J. Valdez, L. Salas, I. Cruz-Gonzalez, E. Sohn.

---

# HERRAMIENTA HIDRODINAMICA DE PULIDO (HYDRA) PARA LOS ESPEJOS DEL TIM PARTE II: EXPERIMENTOS DINAMICOS

Alberto Cordero Dávila<sup>a,b</sup>, Esteban Luna Aguilar<sup>a</sup>, Elfego Ruiz<sup>a</sup>,  
Manuel Nuñez Alfonso<sup>a</sup>, Jorge Gonzalez<sup>b,c</sup>, Victor Cabrera<sup>b,c</sup>,  
Jorge Valdez<sup>a</sup>, Luis Salas<sup>a</sup>, Irene Cruz-Gonzalez<sup>a</sup>,  
Erika Sohn<sup>a</sup>

Octubre, 2002

<sup>a</sup> Instituto de Astronomía, Observatorio Astronómico Nacional, UNAM  
Apdo. Postal 877, Ensenada, B.C. 22830, México.

<sup>b</sup> Posgrado en Optoelectrónica de la Fac. de Ciencias Físico - Matemáticas de la BUAP  
Av. San Claudio y Río Verde, Puebla, Pue. 72570

<sup>a,b</sup> Estancia sabática en el IAUNAM-Ensenada

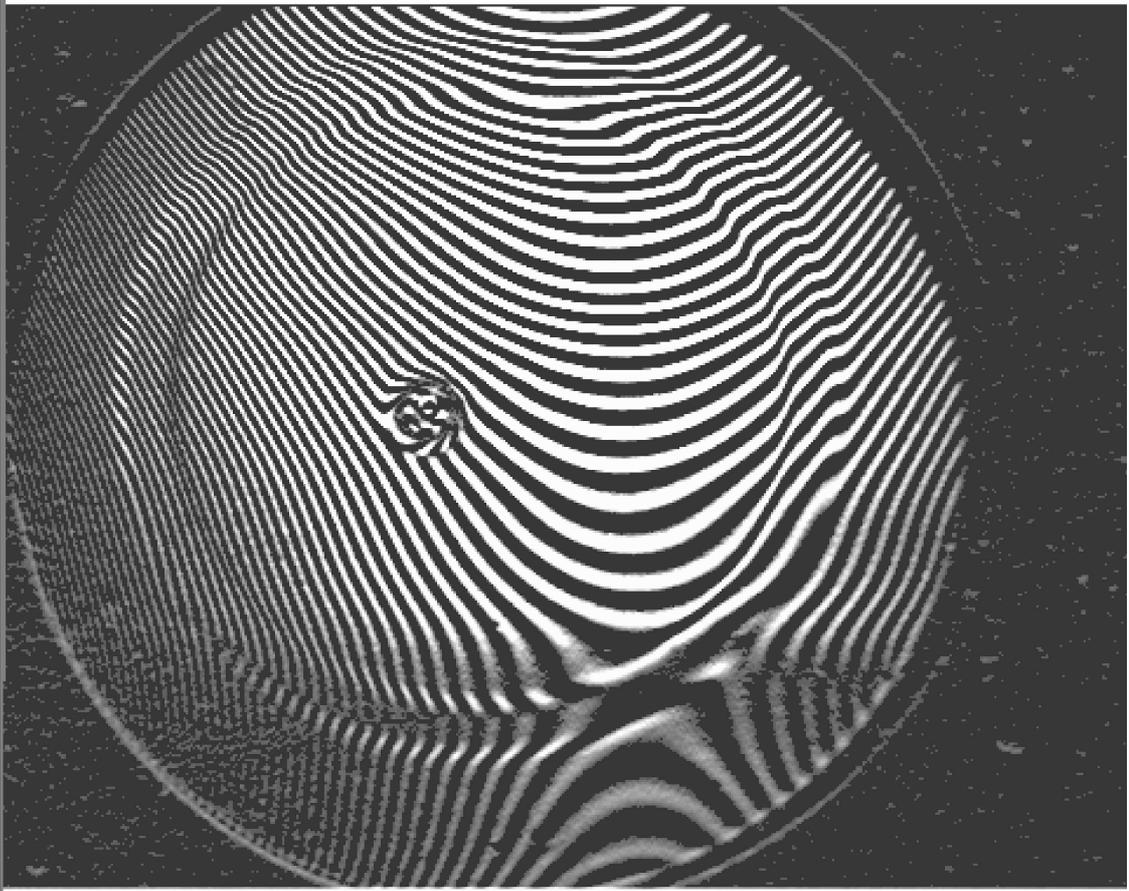
<sup>b,c</sup> Estancia de trabajo en el IAUNAM-Ensenada

## RESUMEN

Este es el segundo trabajo de una serie de reportes experimentales con la herramienta de pulido hidrodinámica **Hydra**. Se describen los resultados obtenidos de los experimentos dinámicos en los que se hace girar al vidrio y se mantiene fija la **Hydra**. Se describen las modificaciones hechas a la máquina pulidora con el objetivo de evitar la sedimentación del pulidor y con esto incrementar sustancialmente la velocidad de desgaste. También, mejoramos el modelo que permite simular el desgastarse de la **Hydra**, para lo cual introdujimos el hecho de que la velocidad de desgaste no es uniforme sobre todos los puntos donde actúa. Finalmente estimamos que la velocidad de desgaste volumétrica, en ésta etapa fue de 0.68 mm<sup>3</sup>/hora que es 13.6 veces más que nuestros resultados de febrero y los reportados en la literatura.

## INDICE

1.- INTRODUCCION	1
2.- EVOLUCION DE LA MAQUINA PULIDORA	3
3.- SIMULACIONES	6
3.1.- Aproximación parabólica	6
4.- EXPERIMENTOS	16
4.1.- Proceso sistemático de evaluación	17
4.2.- Resultados experimentales	20
5.- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	28
5.1- Perspectivas	29
APENDICE A	30
APENDICE B	34
REFERENCIAS	36



# 1 INTRODUCCION

Hasta ahora hemos realizado un conjunto de experimentos estáticos con el objetivo de conocer el desgaste producido por el pulidor lanzado con ayuda de la **Hydra** sobre el vidrio, encontrando que la huella tiene un perfil anular, que la profundidad máxima es directamente proporcional al tiempo de actuación de la **Hydra** y que cada modelo de **Hydra** tiene velocidad de desgaste diferente<sup>1</sup>.

En esta etapa desarrollamos el trabajo dinámico que consiste en realizar y evaluar el desgaste con la **Hydra** fija y el vidrio girando sobre una tornamesa. Antes de realizar estos experimentos y para disminuir la dispersión en los resultados experimentales se realizaron, en primer lugar, diversas modificaciones a la pulidora: Se cambió el motor por uno de velocidad variable, el eje de giro de la tornamesa fue arreglado para evitar el bamboleo. Se desarrolló una nueva montura para sustentar la **Hydra** y lograr la autoalineación. Finalmente, se realizó un aislamiento de la pulidora para evitar contaminación del medio a la máquina y viceversa. En segundo lugar se introdujo un perfil parabólico para describir la huella anular, asignando velocidades de desgaste diferentes para puntos diferentes de la **Hydra**, lo cual mejora los resultados de las simulaciones dinámicas. En tercer lugar, debido a que las velocidades de desgaste eran diferentes para cada **Hydra** y a los resultados contradictorios para una misma herramienta, decidimos realizar experimentos de control antes y al final de cada experimento dinámico. Los experimentos de control consistieron en realizar un experimento estático de 15 minutos para conocer las velocidades de desgaste. En la medida en que el sistema mostró mayor velocidad de desgaste, los tiempos de los experimentos de control se redujeron a 10 min y finalmente a 5 min.

Las modificaciones al arreglo experimental, la introducción de un modelo anular con perfil parabólico en las simulaciones numéricas y los experimentos estáticos de control debieron cerrar el círculo con los experimentos dinámicos. Sin embargo, los experimentos estáticos sacaron a la luz que las velocidades de desgaste eran diferentes al inicio y al final de los mismos, como veremos más adelante, no pudimos relacionar las velocidades de desgaste estáticas con la velocidad de desgaste dinámico, de manera precisa. Los resultados obtenidos nos condujeron a buscar las causas de velocidades de desgaste diferentes. Encontrando que el origen del problema es la sedimentación del pulidor en el recipiente superior, en la batea de la máquina pulidora. Además, la sedimentación de partículas del pulidor en las paredes interiores de las mangueras de alimentación provoca la disminución del gasto y un eventual taponamiento. En consecuencia,

hemos modificado el depósito superior del pulidor y el de la batea, lograndol incrementar la velocidad de desgaste en un factor 4 respecto a las velocidades de desgaste reportados en la literatura.

En la siguiente sección se describen las modificaciones realizadas a la pulidora. La sección 3 está dedicada a la modificación de los modelos numéricos de desgaste. En la sección 4 se describen los resultados del desgaste dinámico con el vidrio girando a velocidad angular constante y la **Hydra** fija. Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones y perspectivas.



Figura 1: Primer experimento dinámico de pulido (20/II/01).

## 2 EVOLUCION DE LA MAQUINA PULIDORA

Una parte fundamental en el desarrollo de los experimentos de pulido estáticos y dinámicos, es la máquina pulidora y sus periféricos. Al realizar un experimento por primera vez, no hay gran conocimiento sobre las necesidades de control de las diferentes variables que están en juego en el pulido. Conforme obtuvimos resultados en el pulido iniciamos la optimización de todos los elementos que intervienen en el desarrollo. Así por ejemplo, los primeros experimentos de pulido fueron manuales, es decir, la **Hydra** se movía con la mano para trazar la huella de "pulido", ver Fig. 1.

Las condiciones de presión de sustento de la **Hydra** y del alimentador del pulidor han variado: Primero se usó un depósito que sólo contenía un par de litros de mezcla de pulidor y agua a 40 psi de presión. Esta mezcla se suministraba a la **Hydra** a la presión de sustento de 40 PSI 1.5 psi (= columna de agua de 1m de altura). La huella que dejaba el pulidor en el vidrio, durante el tiempo corto que tardó en vaciarse el contenedor, alentó a pensar en un segundo dispositivo de circulación continua de pulidor. Se iniciaron las pruebas que dieron lugar a una segunda versión del dispositivo alimentador. En este caso se usó un depósito de 19 litros mezclados con 500 ml de Oxido de Cerio, el cual se elevó a 2 metros arriba de la mesa de trabajo, para suministrar al pulidor a una presión de aproximadamente 3 psi. Además se recolectaba el pulidor después PSI, de pasar por la **Hydra** y se recirculaba hacia el depósito superior. Con este sistema ya se pudo efectuar un pulido con suministro continuo durante una hora, ver Fig. 2.

Las mejoras a la máquina pulidora motivaron a seguir acotando el control de esta máquina y con esta idea se inició la caracterización de varias **Hydras**<sup>1</sup>. También fue necesario aislar el área de pulido de los alrededores para evitar que el pulidor salpicara, ver Figura 3. Además, con esta versión fue necesario diseñar un nuevo soporte para la **Hydra**, pues el sistema anterior

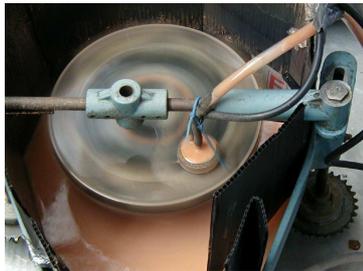


Figura 2: Segundo experimento de pulido (5/IV/01).



Figura 3: Pulidora semi-encapsulada (4/X/01).

no tenía control rígido con el brazo de la pulidora, ver Figuras 2 y 4.

Este nuevo ajuste, dió paso a iniciar la caracterización de la **Hydra** de manera dinámica. Sin embargo, en los primeros intentos de caracterización dinámica se descubrió que el plato donde se sostiene el vidrio tenía un bamboleo de hasta 5 mm en el borde (de 20 cm de diámetro). Una revisión minuciosa del mecanismo mostró que el eje estaba soldado por óxido por lo que fue necesario cambiar el eje y sus rodajes. Sin embargo, este nuevo ajuste hizo que el eje tuviera más fricción y el motor fuera insuficiente para arrastrar el mecanismo, por lo que fue necesario cambiar el motor. Este nuevo motor está acoplado a una transmisión, para variar la velocidad de giro de 0 hasta 400 RPM. Además, el mecanismo propio de la pulidora da lugar a reducir, aún más, la velocidad de rotación necesaria para caracterizar el desbaste producido por la **Hydra** en un intervalo de velocidades de giro.

Con estos cambios también se pensó en hacer una cápsula que aislara más eficientemente el



Figura 4: Mecanismo de sujeción al brazo de la máquina pulidora (21/IX/01).

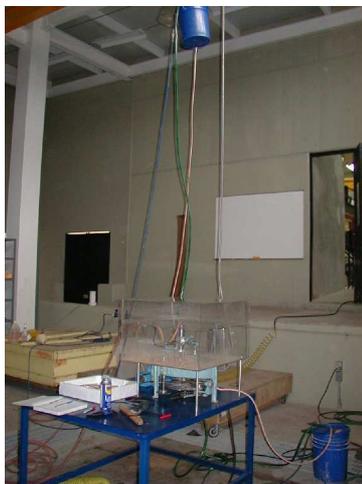


Figura 5: Circuito de pulidor cerrado (6/XI/01).

área de pulido con los alrededores permitiendo cerrar el circuito de pulido, ver Figura 5. Con este circuito cerrado, la eficiencia del pulido mejoró notablemente. Sin embargo, se tenía el problema de que el soporte de la **Hydra** al brazo era muy rígido y las mangueras desbalanceaban la **Hydra**, por lo que fue necesario un nuevo diseño para evitar éstas restricciones y para lograr que la superficie de la **Hydra** se acoplara lo mejor posible a la superficie que se pule. Las modificaciones a la montura se muestran en detalle en la Figura 6.

Estos cambios parecían suficientes para lograr la caracterización dinámica del pulido. Sin embargo, un análisis de los resultados, como se verá en el texto, dió lugar a una revisión de los depósitos de pulidor y agua. Se indentificó que en el depósito de alimentación se sedimentaba el pulidor, por lo que se cambió este depósito por un garrafón comercial de agua purificada conectándolo con la salida hacia abajo, para darle la forma de salida de un embudo (ver Figura 8). Después de estos cambios se hicieron más pruebas al sistema de pulido, pero los resultados seguían sin cambios. Nuevamente se investigó minuciosamente, y se localizó que en el recolector



Figura 6: Detalle de la nueva montura de la **Hydra**.



Alabes

Figura 7: Detalle del arrastre del pulidor.

donde gira el plato base de pulido había gran cantidad de pulidor sedimentado. Fue necesario un cambio adicional, agregando a la salida unos álabes que arrastren el pulidor. En la Figura 7 se muestran estos álabes. Finalmente, encontramos que las partículas del pulidor se adhieren a la pared interior de la manguera, disminuyendo el gasto y por tanto la velocidad de desbaste. Este problema ha sido solucionado temporalmente cambiando las mangueras.

En la Figura 8 se presenta el sistema experimental desarrollado a partir de las modificaciones mencionadas.

## 3 SIMULACIONES

### 3.1 Aproximación parabólica

En las Figuras 9a y 9b se muestran un newtograma y un ronchograma de la huella estática producida por la **Hydra**. Estos resultados son similares a los encontrados con otras **Hydras**



Figura 8: Sistema completo actual.

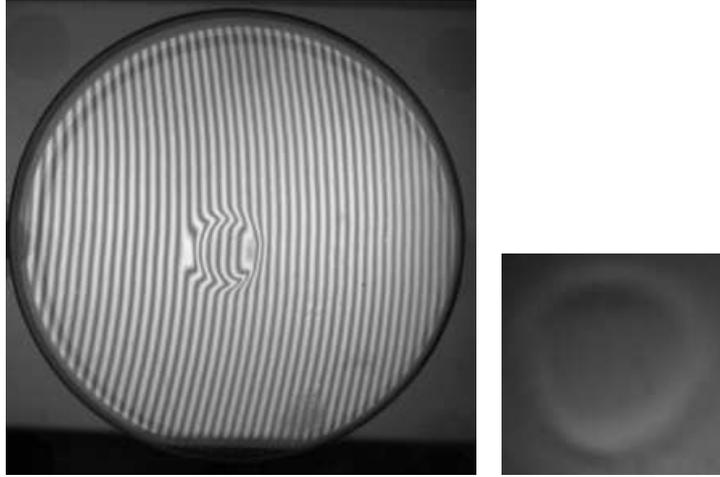


Figura 9: a) Newtongrama que muestra la huella de desgaste experimental estático y b) ronchiograma del mismo desgaste experimental que a).

y fueron descritos anteriormente<sup>1</sup>. A partir de estos resultados se propuso un primer modelo para el perfil de desgaste con una geometría anular de profundidad constante, ver Figura 10, la cual crece linealmente con el tiempo. Con esta hipótesis se desarrolló un algoritmo que permite simular el desgaste cuando la **Hydra** se desplaza sobre el vidrio a velocidad constante. El perfil radial de desgaste simulado que se obtiene, se muestra en la Figura 11.

Como puede observarse de las Figuras 9a y 9b, el perfil de desgaste experimental no muestra realmente una profundidad constante en cada punto del vidrio. Creemos que esto puede atribuirse a que la velocidad con la que la **Hydra** lanza cada partícula de pulidor no es homogénea ó a que la mezcla de pulidor con agua no es radialmente homogénea. En cualquier caso, proponemos un algoritmo de simulación que considera una velocidad de desgaste variable sobre el anillo y con esto se puede obtener una mejor aproximación al experimento.

Lo que está implícito en el modelo, es que la velocidad de desgaste,  $v(r)$ , depende del punto de la **Hydra**. Por otra parte, la profundidad de la huella,  $h$ , está dada por la relación

$$h = v(r)t \quad (1)$$

donde  $t$  es el tiempo.

El perfil propuesto para  $v(r)$  se muestra en la Figura 12.  $v(r)$  es igual a cero con excepción del intervalo,  $r_{in} < r < r_{ex}$ . En este intervalo en una aproximación a  $v(r)$  obedece a la ecuación:

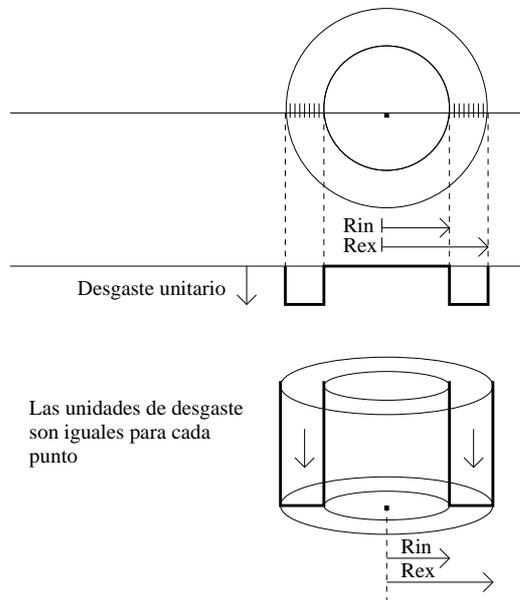


Figura 10: Huella de desgaste simulado.

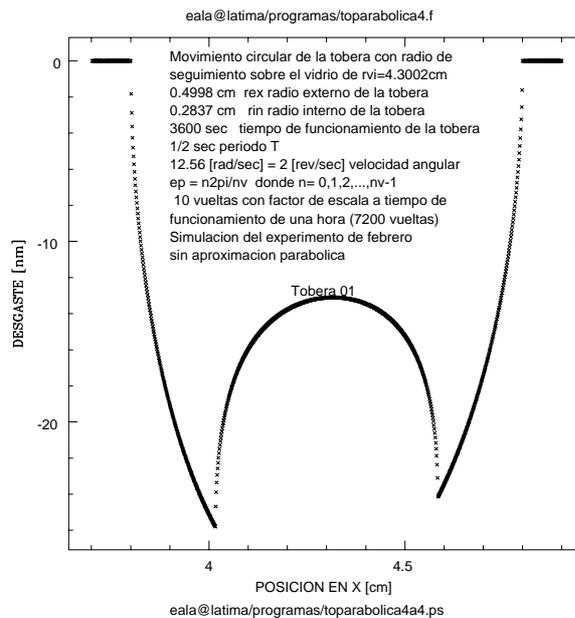


Figura 11: Simulación del experimento de febrero sin aproximación parabólica.

$$v(r) = \alpha r^2 + \beta r + \gamma. \quad (2)$$

donde  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$  son las incógnitas que más adelante se obtendrán. Además proponemos las siguientes condiciones:

$$v(r_{in}) = 0, \quad (3)$$

$$v(r_{ex}) = 0. \quad (4)$$

$$v(r^*) = v_0 \quad (5)$$

donde  $r^*$  es la coordenada radial de mayor desgaste producido por la **Hydra** y  $v_0$  es la velocidad máxima de desgaste, y los radios  $r_{in}$  y  $r_{ex}$  son el radio interno y externo de la huella (Figura 10).

De las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) pueden obtenerse  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$  con el siguiente sistema de ecuaciones:

$$0 = \alpha r_{in}^2 + \beta r_{in} + \gamma, \quad (6)$$

$$0 = \alpha r_{ex}^2 + \beta r_{ex} + \gamma, \quad (7)$$

$$v_0 = \alpha r^{*2} + \beta r^* + \gamma. \quad (8)$$

De donde se obtiene

$$\alpha = \frac{v_0}{(r^* - r_{in})(r^* - r_{ex})}, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{v_0 (r_{ex} + r_{in})}{(r^* - r_{in})(r^* - r_{ex})}, \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{v_0 r_{ex} r_{in}}{(r^* - r_{in})(r^* - r_{ex})}. \quad (11)$$

tiempo (min)	T01 Profundidad (nm)	T03 Profundidad (nm)	T04 Profundidad (nm)
1	0	0	0
5	68.26	68.26	297.87
10	136.50	109.22	136.52
20	78.01	136.52	198.58
30	168.03	204.79	496.45

Tabla 1: Estimación de la profundidad como función del tiempo.

Tobera	Material	característica	velocidad máxima [nm/sec]
01	acrílico	ninguna	0.2275
03	metálica	campana	0.2275
04	metálica	1/r	0.9929

Tabla 2: Velocidad máxima de avance.

Los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  obtenidos de las ecuaciones (9), (10) y (11) se sustituyen en las ecuaciones (1) y (2) para obtener la profundidad de desgaste dependiente de la posición radial de la **Hydra**.

El cálculo de la velocidad  $v_0$  se realizó mediante las pendientes de las gráficas de desgaste contra tiempo de los resultados experimentales descritos en la Tabla 1, tomando los intervalos de 0 a 5 minutos; ya que se desea reproducir el experimento de febrero donde el tiempo medio de ataque de la **Hydra** sobre cada punto del vidrio fue de 1 minuto. En la Tabla 2 se muestran los valores de  $v_0$  obtenidos para las tres **Hydras** utilizadas T01, T03 y T04.

El modelo descrito sistemáticamente fué usado para simular perfiles dinámicos de desgaste. La gráfica del desgaste con este perfil parabólico en función de la posición radial para el experimento de febrero se muestran en la Figura 13. Nótese que la gráfica aparece suavizada con respecto a la Figura 11 y la profundidad máxima es menor. Los datos utilizados para realizar la simulación aparecen en la Tabla 3. Los radios internos y externos se obtuvieron de medidas directas del espejo pulido en febrero, la velocidad de desgaste  $v_0$  se obtuvo de la Tabla 2,  $R_{vi}$  es el radio desde el centro del vidrio al centro de la huella y el resto de los parámetros son propuestos, pues como se verá más adelante, la variable determinística es el tiempo total de

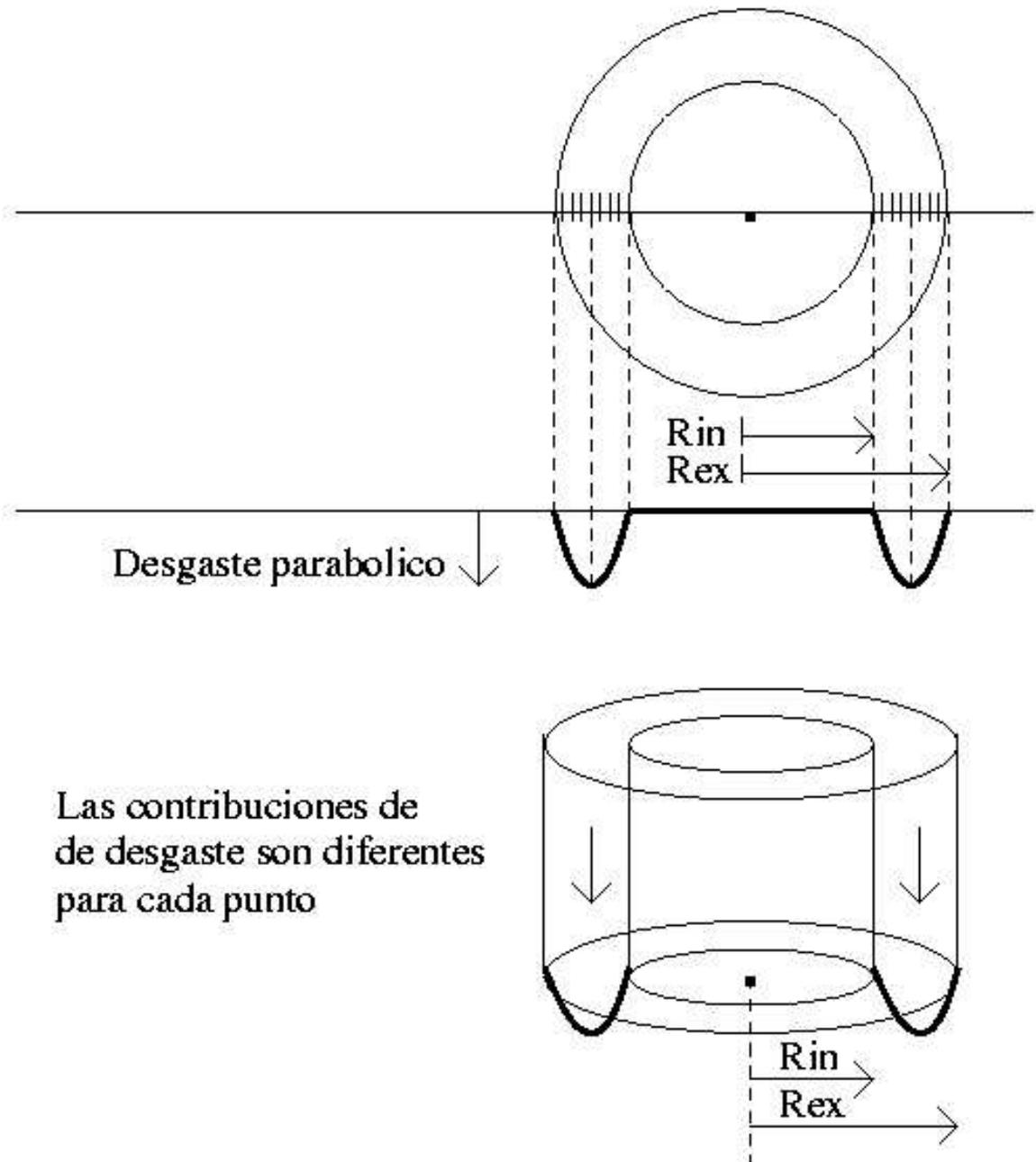


Figura 12: Contribución de desgaste parabólico.

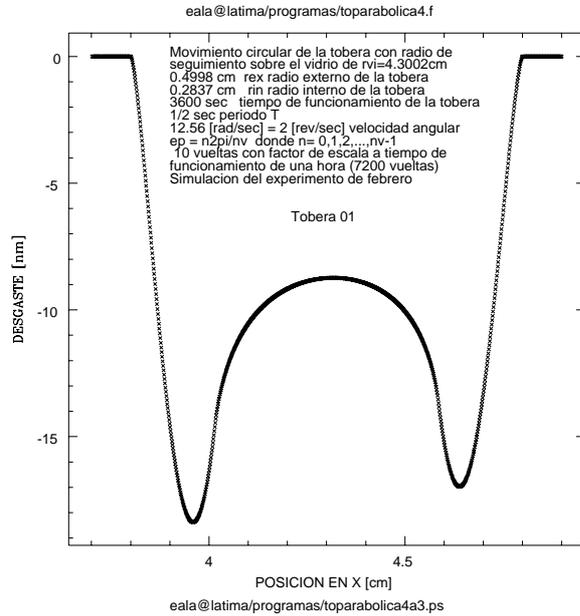


Figura 13: Simulación del experimento de febrero asumiendo un perfil parabólico en los valores de la velocidad de desgaste.

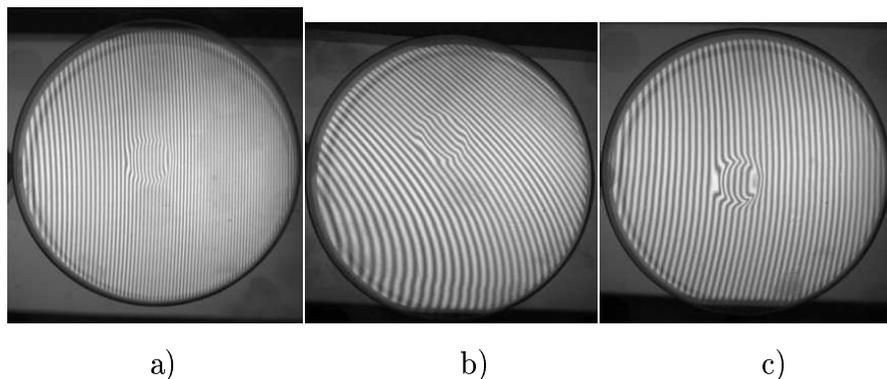


Figura 14: Newtongramas de la **Hydra 01** de los experimentos de septiembre; a) huella de 10 minutos; b) huella de 20 minutos y; c) huella de 30 minutos.

Velocidad de desgaste máxima $v_0$	0.2275 nm/sec
Radio interno	0.2837 cm
Radio externo	0.4998 cm
Rvi	4.3002 cm
Velocidad angular	12.56 rad/sec
Período	0.5 sec
Número de vueltas	7200

Tabla 3: Parámetros utilizados para la simulación del experimento de febrero.

actuación de la **Hydra** en cada punto sobre el vidrio. En el programa “**toparabolica3**”, se incluyó el perfil parabólico de desgaste y las velocidades de desgaste  $v_0$  mostradas en la Tabla 2. En el Apéndice A se presenta un listado. Un último aspecto que abordamos en las simulaciones está relacionado con el tiempo de cómputo. Se realizaron simulaciones con un tiempo de funcionamiento de la **Hydra** de 1 hora. En la Figura 15 se muestra la gráfica de los desgastes,  $h$ , contra posición de la simulación con 1 hora de funcionamiento y con un período de revolución de 10 segundos, lo que implicó 360 vueltas y un tiempo de máquina de 46 minutos.

Debido al gran consumo de tiempo de cómputo que lleva simular el funcionamiento de la **Hydra** para una hora y más adelante hacer simulaciones con tiempos mayores, se pensó en escalar las contribuciones de desgaste producido por un número menor de vueltas y multiplicar este desgaste por el factor adecuado. Esto significa conocer el número de vueltas a partir de las cuales se llega al estado estacionario. En la Figura 15, se muestra el caso de la simulación para la **Hydra** actuando durante 3600 segundos. La Figura 16 se obtuvo simulando para 100 segundos y escalando 36 veces. Los desgastes máximos obtenidos con simulaciones completas y escaladas fueron de **0.96 nm** en ambos casos. Lo cual muestra que con solo 10 vueltas puede llegarse al estado estacionario. En conclusión, encontramos que con una simulación de tan solo 10 vueltas llegamos a una curva de desgaste que no varía en forma y sólo se incrementan sus valores por el factor de tiempo, tal como se explicó en el parrafo anterior. Es decir, el factor determinante es el tiempo total en que la **Hydra** actúa sobre un punto del vidrio.

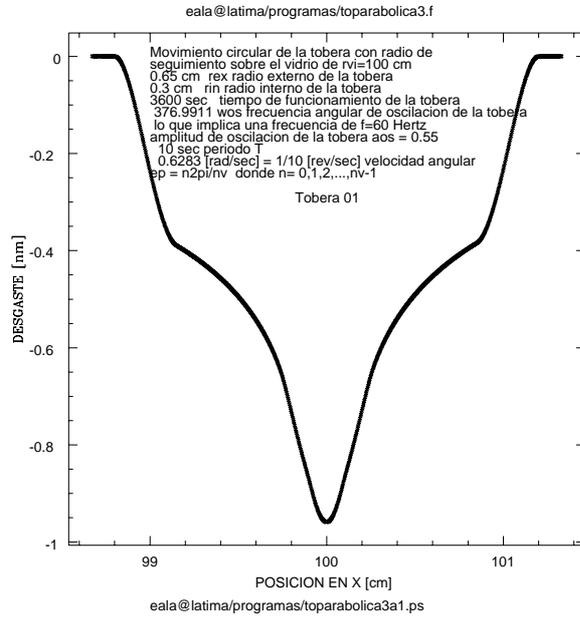


Figura 15: Desgaste producido por 1 hora de funcionamiento de la **Hydra**.

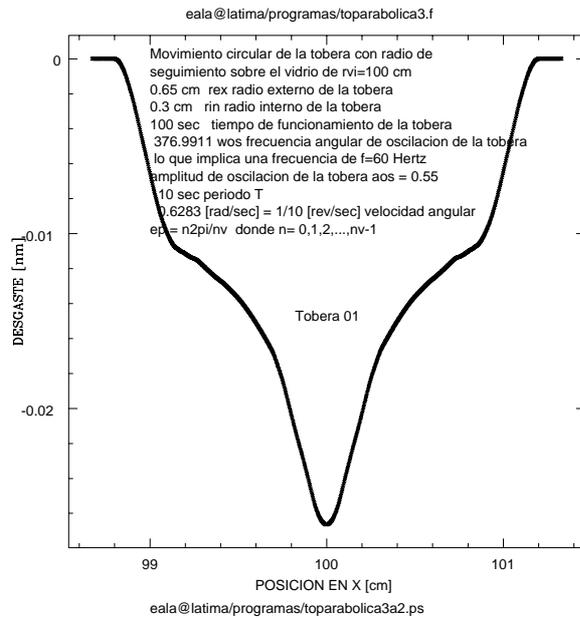


Figura 16: Desgaste producido por 100 segundos de funcionamiento de la **Hydra**.

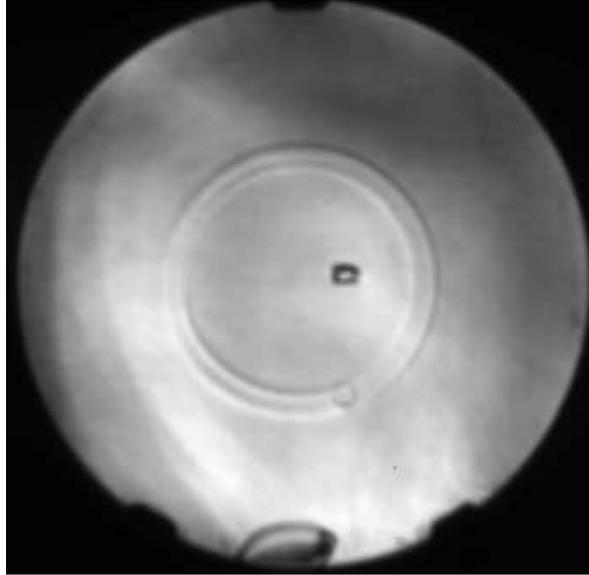


Figura 17: Foucaultgrama observado del desgaste producido por la **Hydra** T01.

## 4 EXPERIMENTOS

El objetivo de esta serie de experimentos es el conocimiento de las variables que gobiernan el funcionamiento de la **Hydra** en movimiento, trabajando con un sistema cerrado.

Para lograr lo anterior requerimos repetibilidad de nuestros resultados dinámicos. Para tal objetivo, se realizaron aproximadamente 35 horas de experimentos sobre vidrio de 150 x 150 x 6 mm. Como se dijo<sup>1</sup>, se ha usado vidrio de ventana pues la calidad óptica que presentan sus superficies es suficiente, en la mayoría de los casos, para nuestros experimentos.

Para analizar el desgaste del pulidor, se llevaron a cabo experimentos de pulido dinámico con duración de 1, 2, 3 y 4 horas . En cada uno se hicieron dos pruebas estáticas de control, una antes de iniciar y la otra al finalizar el pulido dinámico. Estas dos pruebas estáticas, originalmente fueron pensadas para predecir el comportamiento dinámico y conocer la evolución del pulidor en el tiempo del experimento. Sin embargo, han sido realmente usados como medidas de la eficiencia y comportamiento azaroso del pulido, como veremos más adelante. También se han obtenido muestras de la suspensión antes y después de las pruebas de control, pero aún no se han analizado.

## 4.1 Proceso sistemático de evaluación

Dada la cantidad de experimentos que se han realizado hasta ahora, debimos establecer un sistema de medición confiable y repetitivo que es el siguiente:

a) Cuando se termina el experimento de pulido, el vidrio se limpia adecuadamente y se etiqueta, grabando permanentemente, en la cara opuesta a la pulida, con un “lápiz” de diamante la siguiente clave:

TxxMxxxhddmmaahhmm

donde:

*Txx* - El número de la **Hydra**.

*Mxx* - Montura.

*xh* - Tiempo de pulido dinámico en horas.

*ddmmaa* - Fecha en que se realizó el experimento (día/mes/año).

*hhmm* - Hora de inicio del experimento.

Posteriormente se pinta de negro mate la cara opuesta a la usada en el experimento para evitar reflexiones parásitas y por tanto patrones de franjas no deseados.

b) Las huellas fueron obtenidas con las pruebas de ronchi y newton. Para el caso de la prueba de newton se usó un plano óptico de 2 pulgadas (planicidad  $\lambda/10$ ) y de cada vidrio se obtuvieron tres interferogramas que corresponden:

1. Experimento de control inicial. Este consistió en una prueba estática de 15, 10 ó 5 minutos con la **Hydra** colocada en el centro del vidrio lo que nos permite calcular la velocidad máxima  $v_0$ , de desgaste, al inicio del experimento dinámico. La imagen fué grabada con el siguiente nombre de archivo:

T04M01C15mddnov01hhmmpppNNN.fits

donde

*T04* -Tobera 04

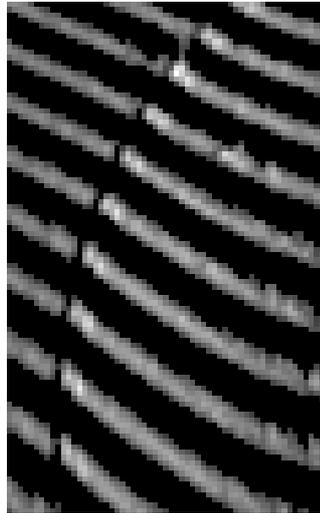
*C15m* -Prueba de control inicial de 15 minutos en el centro del vidrio.

*ppp*- Tipo de prueba que se usó (“new” para el caso de la prueba de newton y “ron” para la prueba de ronchi)

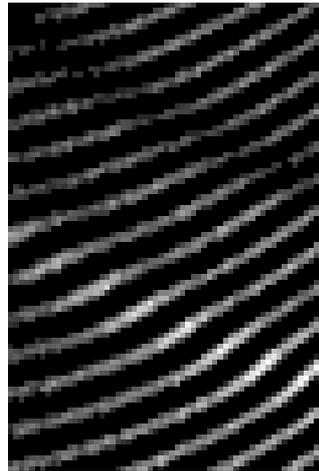
*NNN*- Número progresivo asignado por el programa que guarda la imagen en formato “fits”.

2. Experimento dinámico, fue realizado con el vidrio girando a velocidad constante y con la **Hydra** estática colocada aproximadamente a 5 cm del eje de giro. Las imágenes obtenidas usan la nomenclatura descrita en el inciso a) cambiando “C15m” por “xh” (x es el número de horas).
3. Experimento final de control. También estático de 15, 10 ó 5 minutos, con la **Hydra** colocada en una de las esquinas del vidrio, esto permite conocer el desgaste al final del experimento. La imagen fue grabada con la nomenclatura descrita en el inciso i) arriba, en este caso se cambia “C15m” por “E15m”.

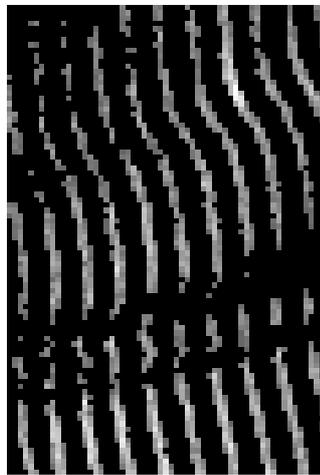
c).- Evaluación de los interferogramas. Se usó la prueba de ronchi para conocer en forma cualitativa la topografía de la superficie. Para obtener datos cuantitativos, usamos el interferómetro de newton como se describió en el primer reporte de esta serie<sup>1</sup>. Para apoyar el proceso de evaluación de los newtongramas se realizó la esqueletización de los interferogramas, ver el Apéndice B, lo que nos permitió conocer con mayor precisión los centros de las franjas interferométricas y disminuir el error de medición visual.



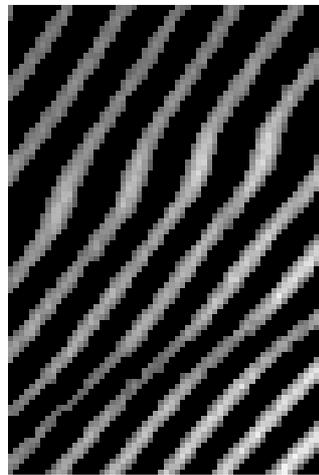
a) 1 hora de pulido



b) 2 horas de pulido



c) 3 horas de pulido



d) 4 horas de pulido

Figura 18: Newtongramas de las primeras huellas dinámicas en diferentes tiempos.

## 4.2 Resultados experimentales

En las Tablas 4 y 5 aparece una descripción de todos los experimentos realizados en esta segunda etapa del trabajo. Como puede notarse se tienen más de 35 horas efectivas de experimentos dinámicos y de control. En las columnas 2, 3, 4 y 5 aparecen las fechas de realización del experimento, tiempo inicial acumulado, tiempo final acumulado y profundidad máxima de la huella. En la Tabla 6 se separan los resultados de los experimentos de control y en la Tabla 7 se presentan los experimentos dinámicos agregándose, en ambos casos, la velocidad de desgaste en la columna 5.

Durante las primeras 21 horas de experimentos dinámicos intentamos confirmar la relación entre la profundidad de la huella y el tiempo. En la Figura 18 se muestran los newtogramas de las huellas dinámicas producidas en esta primera etapa. Después de medir la profundidad máxima de las “zanjas” dinámicas, graficamos los resultados que se muestran en la Figura 19. Después de un ajuste por mínimos cuadrados, y su respectivo análisis estadístico, encontramos que la velocidad de desgaste dinámico fue de  $43.11 \pm 14.1$  nm/h. La dependencia entre la profundidad de la huella dinámica y el tiempo pareciera ser lineal. Sin embargo, el problema fundamental que encontramos fue una gran dispersión, alrededor del 33%, de los datos experimentales, que en principio podían ser evaluados con los experimentos de control.

Una gráfica de la velocidad de desgaste para los experimentos estáticos (inicial ( $\square$ ) y final ( $\triangle$ )) y dinámicos ( $\bullet$ ) se muestran en la Figura 20. Como puede notarse, en el intervalo de 21 horas (1260 minutos), las tres velocidades de desgaste tienen un comportamiento similar. Sin embargo, sus dispersiones son altas y por lo tanto no pueden correlacionarse con la precisión requerida menor al 10%.

Podemos dividir los resultados experimentales realizados en dos etapas. Durante los primeros 1260 minutos se realizaron 6 experimentos dinámicos de diferentes intervalos de duración y 12 estáticos de control (de 15 minutos), uno al inicio y otro al final de cada prueba dinámica. Al final de cada etapa se hicieron dos cambios básicos a la máquina: Se incorporaron, ver Figura 20, (minuto 1260) los álabes para impedir que el pulidor se sedimentara en la batea de la pulidora y se cambió la manguera (minuto 1980) de alimentación del pulidor que va del depósito superior a la pulidora. Con estos cambios, durante la segunda etapa de 790 minutos se hicieron 6 experimentos dinámicos con sus correspondientes estáticos. En las Tablas 4 y 5 aparecen la fecha de realización de cada experimento, el intervalo de duración, la profundidad de la huella, y la velocidad de desgaste en nm/min para los experimentos estáticos y en nm/h

para los experimentos dinámicos. Nótese que la presentación de los resultados es cronológica porque queremos resaltar el avance en la calidad de la máquina. En la Figura 20 aparecen graficadas las velocidades de desgaste debido a que el tiempo de duración de cada experimento fue variando de acuerdo al mejoramiento de nuestros resultados.

La primera idea de incorporar los experimentos de control estáticos fue para usarlos como calibración de los experimentos dinámicos. De hecho puede notarse de la gráfica de la Figura 20, que existe una clara correlación entre los resultados de los experimentos dinámicos y los estáticos de control, iniciales y finales. En contraparte, debe destacarse que en la primera etapa ( primeros 1260 minutos) los resultados experimentales dinámicos están dentro de los estáticos de control, mientras que durante la segunda etapa los experimentos dinámicos se salen del rango de los dos estáticos. Los desgastes al final aparecen mejorados hasta en un factor de 2.7 para el estático inicial, 4.6 para el estático final y 4 para los dinámicos, todos estos cambios, fuera de control, aún no tienen explicación, pero seguiremos trabajando para lograr la estabilidad del proceso.

Para finalizar el presente reporte debemos hacer una comparación de los desbastes dinámicos obtenidos cuando se aplicó la **Hydra** por una hora varias veces, durante las 34 horas de experimentos realizados. En las Figuras 21 a), b), c) y d) se presentan los cuatro interferogramas obtenidos que muestran los desgastes logrados cuando la **Hydra** se aplicó durante una hora a los 15, 1270, 1345, 1985 minutos respectivamente. Las velocidades de desgaste pueden ser consultadas en las Tablas 4 y 5. En la Figura 22 se muestra una gráfica de las velocidades de desgaste obtenidas de los experimentos mencionados. La gráfica muestra justamente el mejoramiento de la máquina pulidora. Las velocidades de desgaste fueron desde 45.5 nm/h hasta 273 nm/h. Esto significa que se puede generar un canal de 8 mm de ancho, un radio medio de 50 mm y una profundidad de 273 nm/h, e implica que podemos desgastar 0.68 mm<sup>3</sup>/h de vidrio de manera controlada.

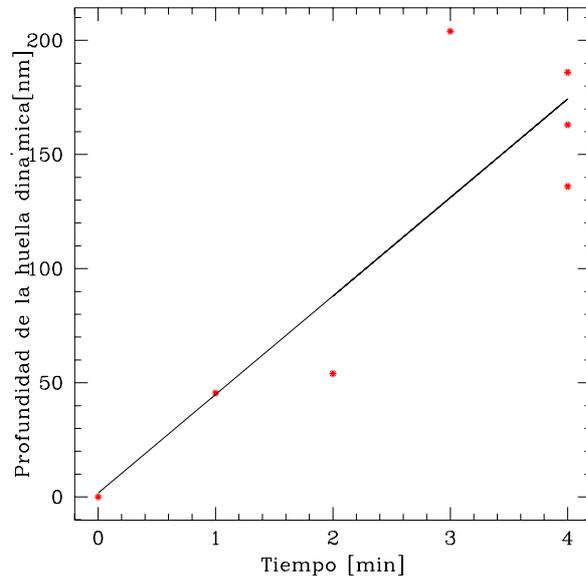


Figura 19: Profundidad máxima de la huella contra el tiempo, producida durante las primeras 12 horas de experimentos dinámicos.

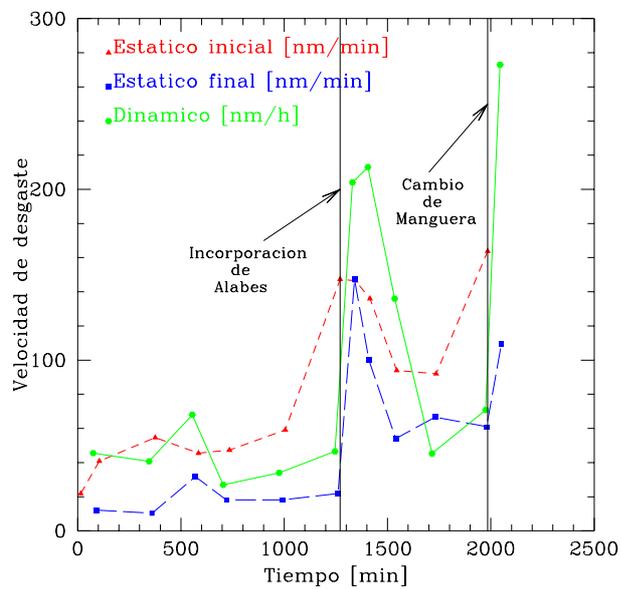
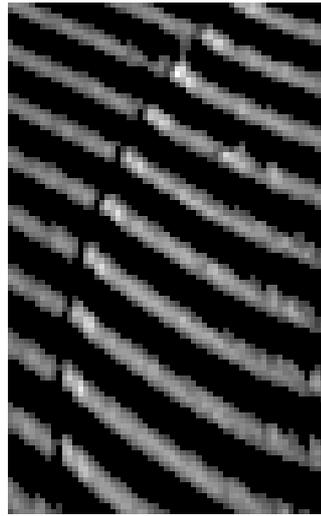
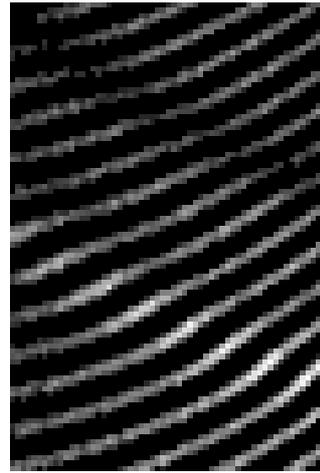


Figura 20: Velocidad media de desgaste producido por la **Hydra** T04 estática al inicio y al final de los experimentos dinámicos de 1, 4, 3, 2, 4, 4,1, 1, 2, 3, 4 y 1 horas. Dos fenómenos: a) la velocidad de desgaste es la misma al inicio y al final en el experimento (27/nov/2001) y b) la velocidad de desgaste es muy superior a las anteriores.



a)



b)



c)



d)

Figura 21: Newtongramas de las huellas dinámicas de 1 hora.

Descripción	Fecha	Ti[ $\text{min}$ ]	Tf[ $\text{min}$ ]	Profundidad [ $\text{nm}$ ]
Control inicio	nov06	0:00	0:15	327
Experimento	nov06	0:15	1:15	45.5
Control final	nov06	1:15	1:30	182
Control inicio	nov07	1:30	1:45	614
Experimento	nov07	1:45	5:45	163
Control final	nov07	5:45	6:00	156
Control inicio	nov12	6:00	6:15	819
Experimento	nov12	6:15	9:15	204
Control final	nov12	9:15	9:30	477
Control inicio	nov13	9:30	9:45	682
Experimento	nov13	9:45	11:45	54
Control final	nov13	11:45	12:00	273
Control inicio	nov14	12:00	12:15	710
Experimento	nov14	12:15	16:15	136
Control final	nov14	16:15	16:30	273
Control inicio	nov15	16:30	16:45	887
Experimento	nov15	16:45	20:45	186
Control final	nov15	20:45	21:00	328

Tabla 4: Profundidad de la huella con la **Hydra** T04 (estáticos y dinámicos) para diferentes tiempos.

Control inicio	nov27	21:00	21:10	1474
Experimento	nov27	21:10	22:10	204
Control final	nov27	22:10	22:20	1474
Control inicio	nov28	22:20	22:25	732
Experimento	nov28	22:25	23:25	213
Control final	nov28	23:25	23:30	500
Control inicio	nov30	23:30	23:35	682
Experimento	nov30	23:35	25:35	273
Control final	nov30	25:35	25:40	273
Control inicio	nov30b	25:40	25:45	470
Experimento	nov30b	25:45	28:45	136
Control final	nov30b	28:45	28:50	333
Control inicio	dic01	28:50	28:55	462
Experimento	dic01	28:55	32:55	283
Control final	dic01	32:55	33:00	307
Control inicio	dic03	33:00	33:05	819
Experimento	dic03	33:05	34:05	273
Control final	dic03	34:05	34:10	546

Tabla 5: Profundidad de la huella con la **Hydra** T04 (estáticos y dinámicos) para diferentes tiempos. Incorporación de álabes.

Descripción	Fecha	Ti [min]	Tf [min]	Velocidad de desgaste [nm/min]	profundidad [nm]
Control inicio	nov06	0:00	0:15	21.8	327
Control final	nov06	1:15	1:30	12.13	181.95
Control inicio	nov07	1:30	1:45	40.9	631.5
Control final	nov07	5:45	6:00	10.4	156
Control inicio	nov12	6:00	6:15	54.6	819
Control final	nov12	9:15	9:30	31.8	477
Control inicio	nov13	9:30	9:45	45.46	681.9
Control final	nov13	11:45	12:00	18.2	273
Control inicio	nov14	12:00	12:15	47.3	709.5
Control final	nov14	16:15	16:30	18.2	273
Control inicio	nov15	16:30	16:45	59.13	886.95
Control final	nov15	20:45	21:00	21.86	327.9
Control inicio	nov27	21:00	21:10	147.4	1474
Control final	nov27	22:10	22:20	147.4	1474
Control inicio	nov28	22:20	22:25	146.4	732
Control final	nov28	23:25	23:30	100	500
Control inicio	nov30	23:30	23:35	136	680
Control final	nov30	25:35	25:40	54	270
Control inicio	nov30b	25:40	25:45	94	470
Control final	nov30b	28:45	28:50	66.6	333
Control inicio	dic01	28:50	28:55	92	460
Control final	dic01	32:55	33:00	61	305
Control inicio	dic03	33:00	33:05	163.8	819
Control final	dic03	34:05	34:10	109.2	546

Tabla 6: Velocidad de desgaste con la **Hydra** T04 estática para diferentes tiempos.

Descripción	Fecha	Ti[ $\text{min}$ ]	Tf[ $\text{min}$ ]	Velocidad de desgaste [ $\text{nm/h}$ ]
Experimento	nov06	0:15	1:15	45.5
Experimento	nov07	1:45	5:45	40.75
Experimento	nov12	6:15	9:15	68
Experimento	nov13	9:45	11:45	27
Experimento	nov14	12:15	16:15	34
Experimento	nov15	16:45	20:45	46.5
Experimento	nov27	21:10	22:10	204
Experimento	nov28	22:25	23:25	213
Experimento	nov30	23:35	25:35	136
Experimento	nov30b	25:45	28:45	45.3
Experimento	dic01	28:55	32:55	70.75
Experimento	dic03	33:05	34:05	273

Tabla 7: Velocidad de desgaste con la **Hydra** T04 en el caso dinámico para diferentes tiempos.

Fecha	Periodo[ $\text{seg}$ ]	Profundidad
nov07	12	146 nm
nov14	5	273 nm
nov15	25	160 nm

Tabla 8: Profundidad de la huella con la **Hydra** T04 en movimiento para diferentes períodos.

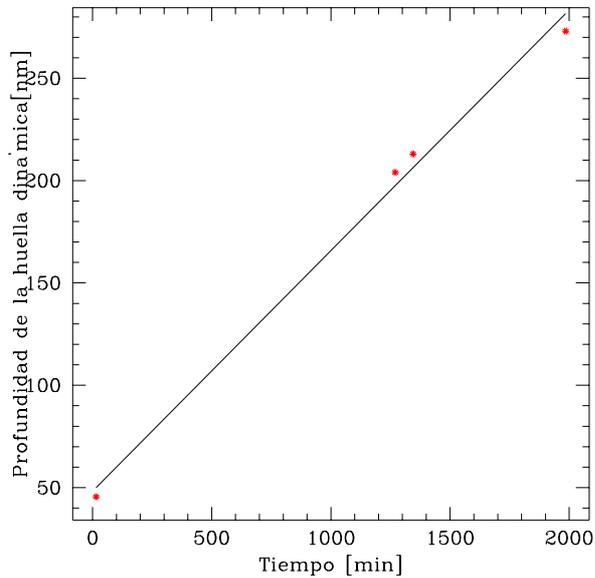


Figura 22: Gráfica de profundidad máxima contra tiempo.

## 5 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Hemos realizado y medido los primeros experimentos dinámicos de desgaste con la **Hydra**. Los resultados muestran, por un lado, que es posible obtener superficies pulidas, con errores medidos de  $\lambda/10$ , y por el otro que las velocidades de desgaste puntuales pueden mejorarse sensiblemente. Las velocidades estimadas de los experimentos de febrero fueron del orden de 15 nm/h. En la actualidad se han logrado 273 nm/h, es decir, hemos mejorado los resultados en un factor de más de 18 veces. El volumen de desgaste actual es de **0.68 mm<sup>3</sup>/h**. El volumen de desgaste reportado por Fähnle<sup>2</sup> es de **0.05 mm<sup>3</sup>/h**, lo cual significa que hemos mejorado en un factor de 13.6 veces el estándar internacional actual de esta tecnología. En contraparte, el hecho de obtener velocidades de desgaste en un rango tan grande, significa una gran dispersión y por tanto una baja predictibilidad. El punto importante es que sabemos que las mejoras se deben a un cuidadoso manejo de la suspensión: Impidiendo que las partículas de pulidor se sedimenten en la batea y adhieran a las paredes de las mangueras. Esto último provoca que el volumen del pulidor disminuya y eventualmente se tape la alimentación. Estos resultados son muy alentadores y prueban aún más la factibilidad del pulido con **Hydra** y motivan a continuar con este trabajo experimental.

## 5.1 Perspectivas

La perspectiva que tenemos para la siguiente etapa experimental, requiere la modificación del sistema de reciclaje de la suspensión. Con esto se perseguiría, como principal meta, la repetibilidad de los resultados hasta ahora logrados. Esto debe hacerse con el mejoramiento de los sistemas de tubería y con una investigación minuciosa de la distribución de partículas del pulidor en la suspensión, o bien de los efectos de este fenómeno. Además de lo anterior y en la perspectiva de que el problema mencionado se resolverá; debemos ahora investigar el proceso inverso. Esto es, dada una superficie deseada encontrar los tiempos de estancia de la **Hydra** en cada zona de la superficie. Finalmente, investigaremos la calidad de pulido obtenido para altas frecuencias.

## APENDICE A

c En este programa se introducen los parametros reales de la **Hydra**, asi  
c como la informacion de la constante a que multiplica al desgaste h.  
c Para obtener de esta manera una aproximacion mas real del  
c comportamiento de la **Hydra**  
c Programa con el que calcula el tiempo total  
c (tito)  
c que un punto  $P(x,0)$ , del vidrio esta  
c en contacto con una herramienta anular que  
c tiene una velocidad angular  $w_{\text{vang}}$  y  
c oscila en la direccion X con frecuencia  
c angular  $w_{\text{os}}$ , amplitud  $a_{\text{os}}$  y fase inicial  $ep=0$   
c  $r_{\text{vi}}$  radio de seguimiento de la **Hydra** sobre el vidrio  
c  $r_{\text{ex}}$ =radio de la huella externa de la **Hydra**  
c  $r_{\text{in}}$ =radio de la huella interna de la **Hydra**  
c  $v$ =velocidad de traslacion de la **Hydra**  
c  $ep$ =fase inicial del Mov Arm Sim de la **Hydra**  
c  $x_{\text{v}}$ =coordenada X de un punto analizado  
c sobre el vidrio  
c  $\text{delt}$ =intervalo de tiempo entre dos muestreos  
c  $t$ =instante de tiempo en que se analiza  
c la posicion de la **Hydra**.  
c  $(x_{\text{ct}}, y_{\text{ct}})$ =coordenadas del centro de la **Hydra**  
c  $(x, y)$ =coordenadas del punto  $(x_{\text{v}}, 0)$  del vidrio  
c respecto al centro del la **Hydra**.  
c  $r_{\text{o}}$ =distancia del punto del vidrio respecto  
c al centro de la **Hydra**  
c  $\text{tito}$ =tiempo total de contacto del punto del  
c vidrio con la **Hydra**.  
real\*8 rex,rin,v,wos,aos,ep,xv,delt,t,pi,delteta,dist  
real\*8 xct,yct,x,y,ro,tito,rv,rvi,wvang,a,b,rve  
real\*8 a1,b1,c1,dife,del,del1,del2,tprop  
real\*8 ato,mt01,mt03,mt04  
real\*8 tf, per,nv

```

real*8 corrida(1002),scorrída(1002),axv(1002),chu(1002)
integer ii,cc
integer i,j,nve
open (unit=2,file='datoscirpara3.par')
tito=0.
read(2,*)rex
read(2,*)rin
read(2,*)wos
read(2,*)aos
read(2,*)rvi
read(2,*)wvang
read(2,*)mt01
read(2,*)mt03
read(2,*)mt04
read(2,*)tf
close(2)
c Se analizan puntos del vidrio que estan
c sobre el eje X, comprendidos entre 0 y
c rex+aos (extremo de contacto de la Hydra)
c Los resultados de la parte negativa son los
c mismos porque el eje Y es un eje de simetria
c Calculo de los coeficientes de la aproximacion parabolica
dife=(rex+rin)/2
del1=(rin**2)*rex+(rex**2)*dife+(dife**2)*rin
del2=(dife**2)*rex+(rin**2)*dife+(rex**2)*rin
del=del1-del2
a1=(rex-rin)/del
b1=((rin**2)-(rex**2))/del
c1=((rex**2)*rin-(rin**2)*rex)/del
c write (*,*)'rex =',rex
pi=3.14159
per=2*pi/wvang
nv=tf/per
ato=mt01
c do aos=0.,0.0,0.111

```

```

a=(rvi-aos-1.2*rex)
nve=int(nv)
do cc=0,nve
ep=cc*2*pi/nv
do i=0,1000
c Por la simetria del problema el analisis se
c inicia
dist=2*(1.2*rex+aos)/1000
xv=a+dist*i
delteta=2*atan(rex/rvi)
delt=delteta/(10000*wvang)
c rex/v es la mitad de intervalo de tiempo durante
c el cual algun punto activo de la huella de la Hydra
c esta en contacto con algun punto del eje X
do j=1,10000
t=j*delt
c El punto inicial del centro de la Hydra esta
c en (0,0) y de ahi se mueve en direccion +Y.
c Para tomar en cuenta la mitad faltante solo
c se duplica,al final el intervalo de tiempo
c calculado
c Calculo de las coordenadas del centro de la
c Hydra
rv=rvi+aos*sin(wos*t+ep)
xct=rv*cos(wvang*t)
yct=rv*sin(wvang*t)
c Calculo de las coordenadas del punto del
c vidrio respecto al centro de la Hydra
x=xct-xv
y=yct
ro=sqrt(x*x+y*y)
c Se decide si el punto del vidrio esta en la
c zona activa de la Hydra o no.
if ((ro.gt.rex).or.(ro.lt.rin)) then
c Punto fuera de la zona de contato con la Hydra

```

```

tito=tito
else
c Punto en la zona de contacto con la Hydra.
c asumiendo que el punto ha estado en contato
c con la Hydra por un intervalo delt.
tprop=a1*(ro**2)+b1*ro+c1
c Al poner tprop=-1 se quita la aproximacion parabolica
c tprop=-1
tito=tito+delt*-tprop
endif
enddo
corrida(i)=tito
axv(i)=xv
scorrda(i)=scorrda(i)+corrida(i)
c write (*,*)'tito =',tito
tito=0.
enddo
c scorrda(i)=scorrda(i)+corrida(i)
enddo
open(unit=1,file='datostopa3a.dat')
do ii=1,1000
chu(ii)=-2*scorrda(ii)*ato
write (1,*)axv(ii),chu(ii)
enddo
close(1)
call system('sm<topa3graf3.sm')
write (*,*)'nve =',nve
stop
end

```

## APENDICE B

### ESQUELETIZACION DE INTERFEROGRAMAS

La recuperación de la fase a partir de un interferograma se logra mediante diferentes técnicas<sup>5</sup>. En nuestro caso seguimos dos caminos; el primero es evaluar el interferograma mediante la técnica propuesta por Takeda<sup>3</sup>, en la cual se obtiene la transformada de Fourier del patrón. Del espectro de potencias se aísla uno de los órdenes de difracción y posteriormente es centrado para eliminar la frecuencia portadora: El segundo método de evaluación del interferograma es estimar localmente las desviaciones de cada franja extrapoliándola del valor teórico de entre dos máximos o mínimos. Los interferogramas que se procesan son del tipo Newton y Fizeau, en superficies planas.

El método de aislamiento tiene varias dificultades, la primera es que si el interferograma tiene una frecuencia portadora baja, entonces los órdenes de difracción están traslapados con el orden cero y la dificultad radica, en este caso, en la separación de estos órdenes. Por otro lado, si la frecuencia portadora es alta, entonces la eliminación de ésta resulta más adecuada, teniendo la limitante en el número de franjas dado por el teorema del muestreo. Una dificultad adicional de esta técnica es que, cuando los defectos a medir son muy grandes o están convolucionados con un patrón con aberraciones residuales, del tal manera que las franjas tienen formas caprichosas entonces la fase aparece envuelta y con alguna frecuencia residual. Pareciera que los interferogramas tuviesen coma, astigmatismo o aberración esférica. Estas aberraciones son debidas a que estamos usando vidrio de ventana, el cual no es apropiado para pruebas ópticas. En estos casos, el método de desentrelazado resulta particular para cada muestra. Los métodos de desentrelazado de fase que hemos utilizado no han sido suficientemente robustos para todos los casos tratados en este trabajo.

El método de evaluación local ha dado mejores resultados, pues podemos localizar los máximos y/o mínimos de franjas adyacentes y luego extrapolar las desviaciones de acuerdo a la separación teórica entre extremos. Esta es la razón por la que enfocamos la atención a facilitar y optimizar la medición de desviaciones de las franjas de los interferogramas. Para hacer esto hicimos un programa para dar seguimiento a los máximos de cada franja (Fringe tracking). Este consiste en buscar los máximos con los píxeles adyacentes y en cuatro direcciones usando una matriz de 5 X 5 píxeles<sup>2</sup>, ver la Tabla 9. Este método no fue satisfactorio, debido a que el contraste que se obtenía en los patrones resultantes era muy bajo.

Otro método parecido al seguimiento de franjas es el conocido comúnmente como esqueleti-

$P_{-22}$	$P_{-12}$	$P_{02}$	$P_{12}$	$P_{22}$
$P_{-21}$	$P_{-11}$	$P_{01}$	$P_{11}$	$P_{21}$
$P_{-20}$	$P_{-10}$	$P_{00}$	$P_{10}$	$P_{20}$
$P_{-2-1}$	$P_{-1-1}$	$P_{0-1}$	$P_{1-1}$	$P_{2-1}$
$P_{-2-2}$	$P_{-1-2}$	$P_{0-2}$	$P_{1-2}$	$P_{2-2}$

Tabla 9: Matriz para encontrar intensidades máximas en las franjas

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

Tabla 10: Máscaras para encontrar derivadas. Operador horizontal de Sobel.

zación. Este difiere del anterior en que en el método de seguimiento de máximos (o mínimos) se investiga el lugar geométrico de las franjas, examinando varios pixeles en todas las direcciones del punto inicial, moviendo la posición del pixel en dirección en donde resulta la suma máxima (o mínima) o alternativamente, el gradiente es mínimo. Este tipo de seguimientos inician con una marca y terminan al final de la franja. Si hay más de una franja, son necesarias varias marcas. En general, este tipo de seguimiento no pasa por toda la imagen. La esqueletización utiliza aproximaciones similares al seguimiento de extremos, pero en lugar de seguir los picos o valles moviendo el pixel a lo largo de la franja, toda la imagen esta sujeta a una matriz detectora de picos, en este caso usamos una matriz de 3 X 3 conocida como máscara vertical de Sobel<sup>5</sup>, aunque en algunos casos es más apropiada la máscara horizontal de Sobel (ver Tabla 10 y 11). Con estas dos máscaras, el proceso de esqueletización es sencillo y basta con usar un filtro pasa bajas. En nuestro caso el filtro se construyó con la siguiente condición: Si el número de cuentas en cada pixel está por debajo de 100, las cuentas del pixel son disminuidas a cero, en caso contrario se conserva el valor. En el desarrollo de este trabajo son presentados los esqueletos de interferograma obtenidos con este criterio.

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Tabla 11: Máscaras para encontrar derivadas. Operador vertical de Sobel.

## REFERENCIAS

- 1.- Luna, E., Cordero, A., Ruiz, E., Nuñez, M., González, J., Cabrera, V., Valdez, J., Martínez, B., García, B., García, V., Salas, L., Cruz-Gonzalez, I., Sohn, E. y Córdova, A., “Herramienta hidrodinámica de pulido **Hydra** para los espejos del TIM. Parte I: Experimentos estáticos y simulaciones dinámicas”, (Aceptado para su publicación en el IAUNAM).
- 2.- Fähnle, O. L., Van Brug, M. and Frankena, H. J., ”Fluid jet polishing of optical surfaces”, *Appl. Opt.* **37**, 6771-6773, 1998.
- 3.-Takeda M., Ina, H., and Kobayashi, S.,“ Fourier transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry”, *J.Opt. Soc. Am.*,Vol 72, 156-160, 1982.
- 4.- Yatagi T.,Interferogram analysis, Chap. 3, “Intensity based analysis method”, Edited by D. W. Robinson and G. T. Reid, Institute of Physics Publishing, 72-93, 1993.
- 5.- Malacara D., Servin M. and Malacara, Z. , Interferogram analysis for optical testing, Chap. 4, “Fringe contouring and polynomial fitting”, edit. Merceel Dekker, Inc. 90-91, 1998.



**Comité Editorial de Publicaciones Técnicas  
Instituto de Astronomía  
UNAM**

**M.C. Urania Ceseña  
Dr. Carlos Chavarria  
M.C. Francisco Murillo**

**Observatorio Astronómico Nacional  
Km. 103 Carretera Tijuana-Ensenada  
22860 Ensenada B.C.  
[editorial@astrosen.unam.mx](mailto:editorial@astrosen.unam.mx)**