

FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONOMICAS Y GEOFISICAS DE LA U. N. L. P.

Decano: Ing. CÉSAR A. MONDINALLI

*Serie especial N° 28*

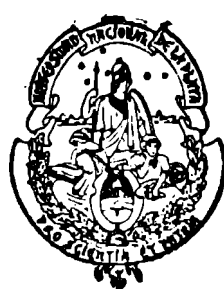
Laboratorio de Optica

---

**Aspectos novedosos y experiencia obtenida en la  
construcción de un espejo primario de 78 cm  
de diámetro para telescopio Ritcher - Chrétien**

Ing. S. J. CHAVASSE

Lic. L. C. MARTORELLI



LA PLATA

República Argentina

1985

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

*Rector Normalizador*

**Ing. Raúl A. Pessacq**

*Guardasellos*

**Ing. Agr. Andrés Ringuet**

*Consejo Superior Provisorio*

*Decanos Normalizadores:* **Ing. Agr. Guillermo Miguel Hang** (Agronomía); **Ing. Luis Julián Lima** (Ingeniería); **Dr. Humberto Quiroga Lavié** (Ciencias Jurídicas y Sociales); **Dr. José Panettieri** (Humanidades y Ciencias de la Educación); **Med. Vet. Alberto Ricardo Dibbern** (Ciencias Veterinarias); **Dr. Francisco Krmpotic** (Ciencias Exactas); **Dr. Oscar Alberto Giacomantone** (Ciencias Médicas); **Cr. Aníbal Edgardo Barreda** (Ciencias Económicas); **Dr. Oscar Guillermo Arrondo** (Ciencias Naturales); **Prof. César Augusto Mondinalli** (Ciencias Astronómicas y Geofísicas); **Prof. Roberto Oscar Rollié** (Bellas Artes); **Arq. Jorge Alberto Lombardi** (Arquitectura y Urbanismo); **Dr. Blas Oscar Barletta** (Odontología). *Director Normalizador:* **Prof. Carlos Manuel Bustamante** (Escuela Superior de Periodismo y Comunicación Social). *Consejeros Docentes:* **Dr. Rafael Víctor Novello**; **Dr. Jorge Alfredo Lynch**; **Prof. Nestor Homero Palma**. *Consejeros Estudiantiles:* **Ataúlfo Pérez Aznar**, **Maura Estela Arrese**, **Hugo Daniel Salomón**.

*Secretario General*

**Ing. Pablo O. Luchessi**

*Pro Secretario General*

**Ing. Pablo A. Rojas**

*Secretario de Asuntos Económico-Financieros*

**Cr. Aldo H. Rossi**

*Secretario de Asuntos Académicos*

**Abog. Carlos A. Raimundi**

**FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONOMICAS Y GEOFISICAS DE LA U.N.L.P.**

*Decano*

**Prof. César Augusto Mondinalli**

*Secretario de Asuntos Académicos*

**Ing. Roberto Mario Pinciroli**

*Secretario Administrativo*

**Esc. Jorge Pedro Gil**

**FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONOMICAS Y GEOFISICAS DE LA U.N.L.P.**

**Decano: Ing. CESAR A. MONDINALLI**

*Serie especial Nº 27*

Laboratorio de Optica

---

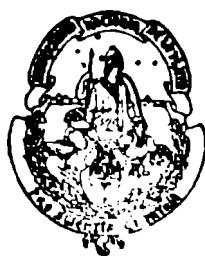
**Aspectos novedosos y experiencia obtenida en la  
construcción de un espejo primario de 78 cm.  
de diámetro para telescopio Ritchey - Chrétien**

**Ing. S. J. CHAVASSE**

**Profesor Titular de Optica Astronómica en la Facultad  
de Ciencias Astronómicas y Geofísicas**

**Lic. L. C. MARTORELLI**

**Ayudante de la Cátedra de Optica Astronómica y Becario  
del CONICET (Dr. Mario Garavaglia)**



**Departamento de Optica**

**1985**



## CONSTRUCCIÓN DE UN ESPEJO DE 78 cm DE DIÁMETRO PARA PRIMARIO DE UN SISTEMA RITCHEY-CHRÉTIEN

### ANTECEDENTES

Desde la época en que se tomó la decisión de no hacer en el Observatorio la óptica del telescopio de 215 cm de diámetro y de enviar los discos de Pyrex a los E.E.U.U. para que se construyeran allá los seis espejos que la componen, quedaron en el Observatorio dos discos iguales de 80 cm de diámetro que originalmente habían sido destinados a ser espejos secundarios del gran telescopio. Además, en lugar de adquirir una máquina grande, capaz de tallar hasta el espejo de 215 cm, se compró en Francia en 1971 una máquina más pequeña, marca REOSC, con capacidad de trabajar piezas hasta 160 cm de diámetro, holgadamente suficiente para construir los más grandes espejos de la óptica de los espectrógrafos coudé para el nuevo telescopio. A poco de su instalación en 1972, y siendo jefe del Departamento de Optica el doctor Ricardo P. Platzeck, se presentó el primer trabajo para ser realizado en la máquina nueva. Fue un espejo esférico de 60 cm de diámetro para ser utilizado como objetivo de cámara en la óptica de un espectrógrafo que se diseñó y construyó en nuestro taller para ser utilizado en trabajos de investigación del Dr. Suárez en el Instituto de Física de nuestra Universidad.

Por otra parte, el espejo primario del telescopio de 80 cm de este Observatorio presenta en su superficie óptica algunas manchas o alteraciones del pulido provocadas presumiblemente por ataque químico del vidrio en la época en que el espejo era replatado periódicamente. La remoción de estas manchas exigiría un nuevo pulido de todo el espejo, tarea comparable a la de figurar uno nuevo.

Existía entonces la posibilidad de hacer un espejo nuevo, utilizando uno de los discos de baja dilatación existentes, para reemplazar el antiguo espejo Carl Zeiss de vidrio común. Se disponía del material, un disco de "Pyrex" de diámetro casi igual, y de los medios técnicos, máquina y personal idóneo, para realizar el trabajo. Pero fundamentalmente existía el deseo de utilizar la nueva máquina para adquirir experiencia en la construcción de espejos mayores de 60 cm, que era el límite alcanzado hasta ese momento. Figurar un espejo de 80 cm de diámetro se presentaba entonces como un trabajo de gran interés técnico, que permitiría a la vez mejorar la óptica del telescopio de nuestro Observatorio.

En 1977, el Ing. S.J. Chavasse, a cargo del Departamento de Óptica del Observatorio por renuncia del Dr. Platzeck, sugirió al Director del Instituto en esa época, Ing. José Mateo, la conveniencia de la construcción del nuevo espejo. La sugerencia fue aceptada, y autorizada por el Director la realización del trabajo.

### ELECCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NUEVO SISTEMA ÓPTICO

Se adoptó para la óptica del telescopio la versión aplanética de un sistema Cassegrain, desarrollada por los ópticos Ritchey y Chrétien, que consta de sólo dos superficies reflectoras, hiperbólicas, una primaria grande y cóncava combinada con una secundaria pequeña y convexa, cuyas excentricidades (o cuyos coeficientes de deformación) son tales que forman un sistema exento de aberración de esfericidad y de coma.

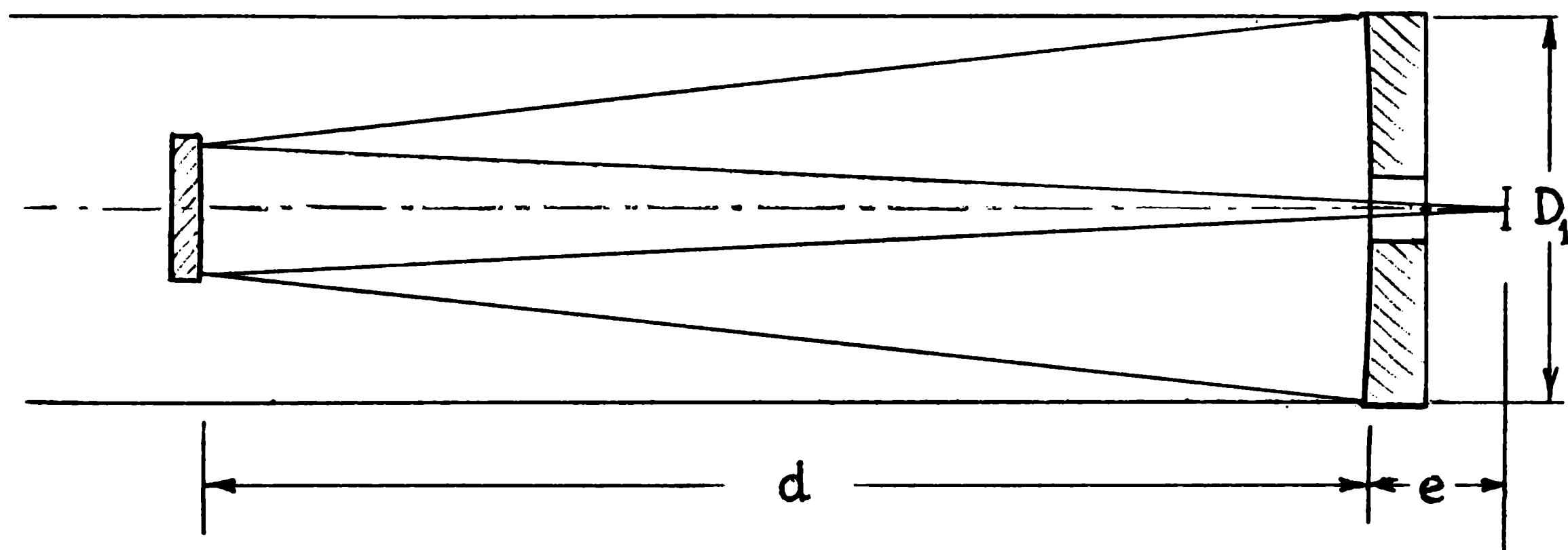
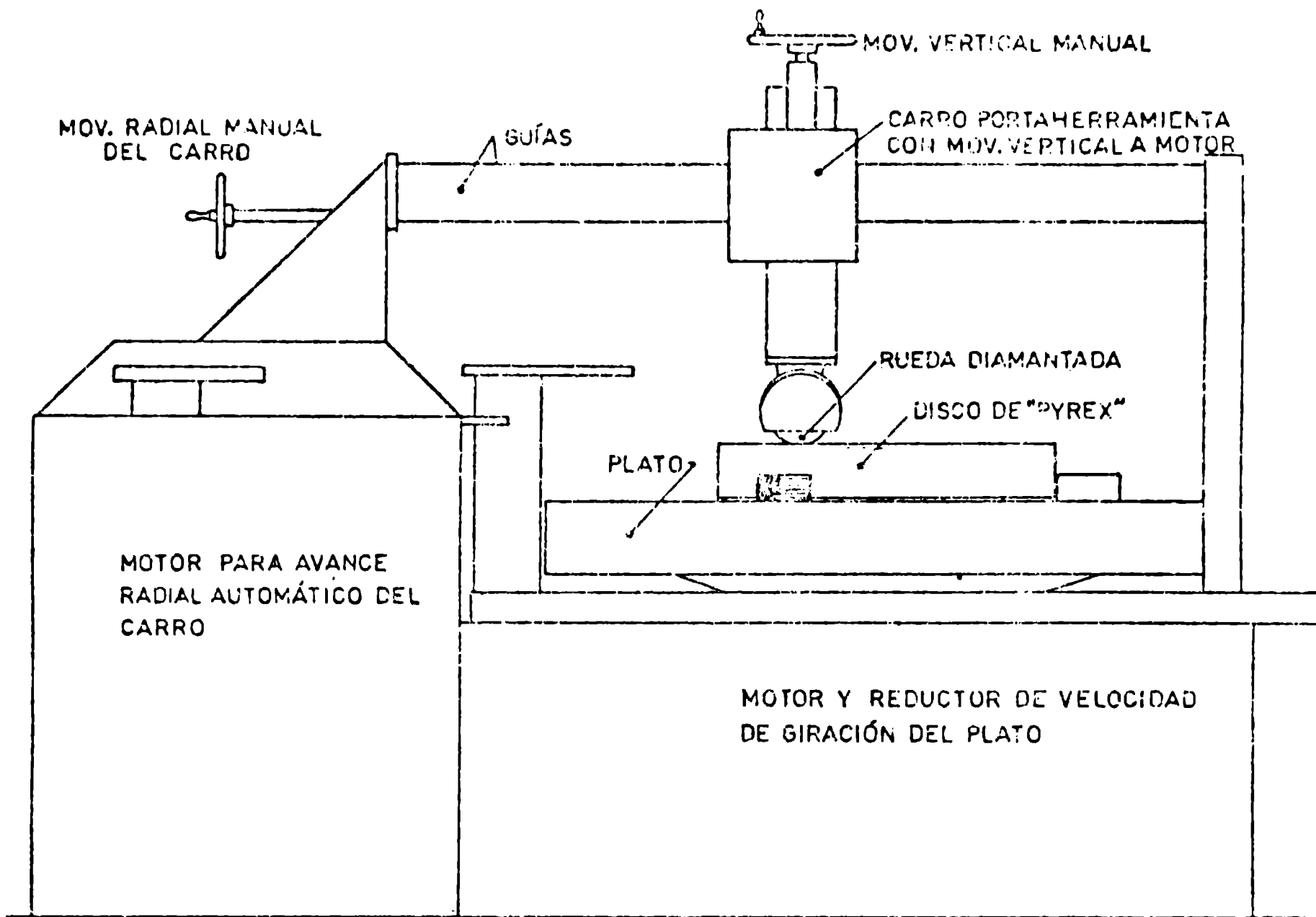


FIG. 1 Esquema óptico

Para el espejo primario se eligió una razón focal moderada,  $F_1 = 4,5$  para concordar mejor con la longitud del tubo existente y para no aumentar demasiado las dificultades de ejecución, mientras que para la razón focal del sistema se adoptó  $F = 10$  próxima a la del telescopio de 215 cm ( $F = 8,5$ ) para facilitar el intercambio de instrumental auxiliar. Habiendo fijado este valor y tenida en cuenta la emergencia focal necesaria ( $e = 25$  cm) y el campo lineal aprovechable en el foco Cassegrain, determinado por el agujero central de la celda del primario ( $\phi_A = 120$  mm), se requería un espejo secundario de 290 mm de diámetro. Este valor permitía usar en su construcción discos de "Pyrex" de fabricación nacional de la vidriería Rigolleau.

### DESBASTADO

Esta operación se realiza con la máquina trabajando como una especie de torno de eje vertical. Sobre el plato (ver fig. 2) se coloca



VISTAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN DE LA MÁQUINA. "REOSC"  
CON EL PUENTE DE DESBASTADO INSTALADO

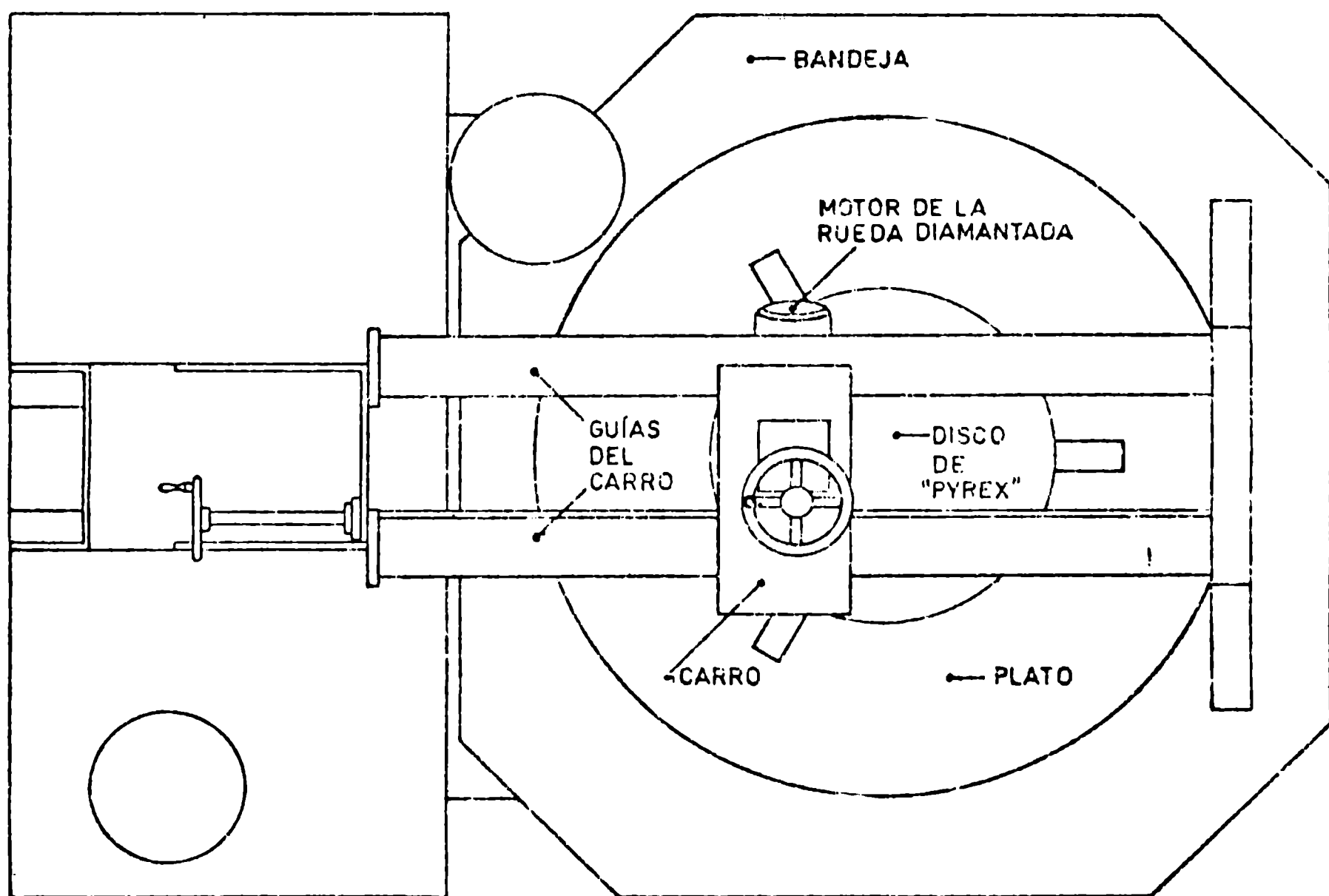
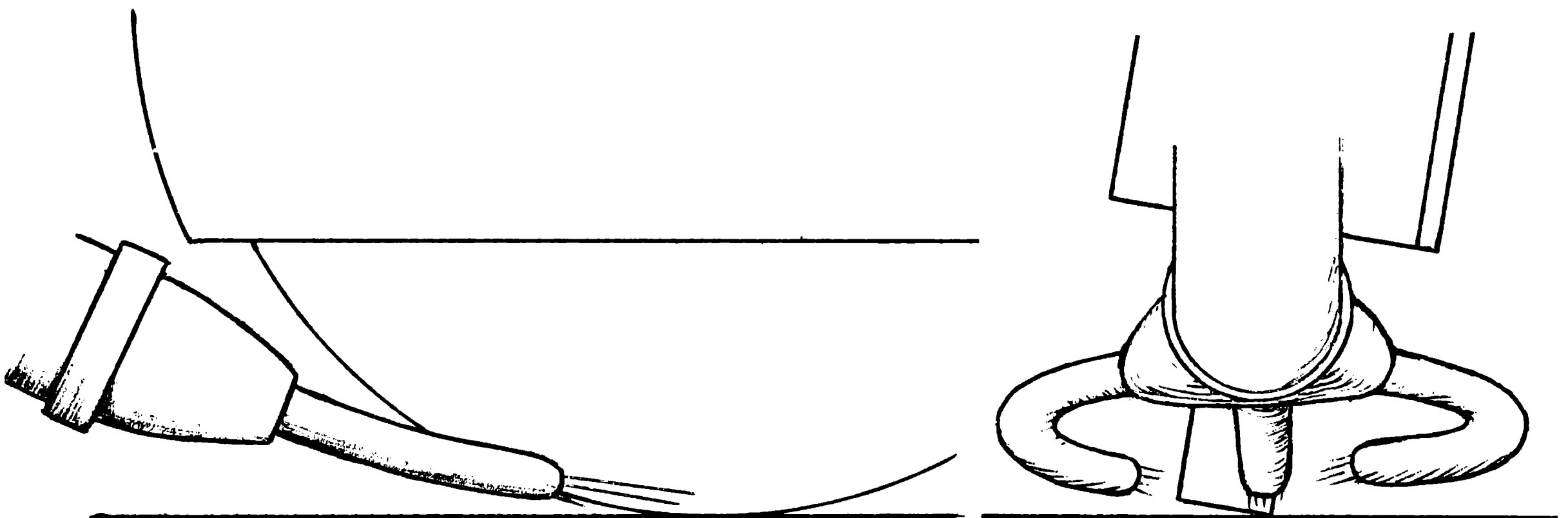


fig. 2



abulonado un puente formado por dos guías cilíndricas horizontales, por las que rueda el carro portaherramienta, y las patas de apoyo. El carro tiene desplazamiento radial (manual o automático). A su vez, el carro lleva guías verticales por donde la herramienta puede moverse verticalmente (manual o automáticamente). La herramienta es una rueda de borde diamantado que gira a 2800 r.p.m., accionada en su mismo eje por un motor trifásico de 2HP.

El desbastado del disco en bruto es para dar a la pieza que se trabaja una forma aproximada a la definitiva. Se realizó utilizando por primera vez discos diamantados, que permiten remover vidrio a mucho mayor velocidad que con el uso de abrasivos en polvo y herramienta frotante. La zona de corte debe recibir abundante agua a presión para una refrigeración eficiente. El sistema que traía la máquina con un solo chorro de agua fue reemplazado por otro con tres chorros, uno



**FIG. 3**

**Refrigeración de la zona de corte**

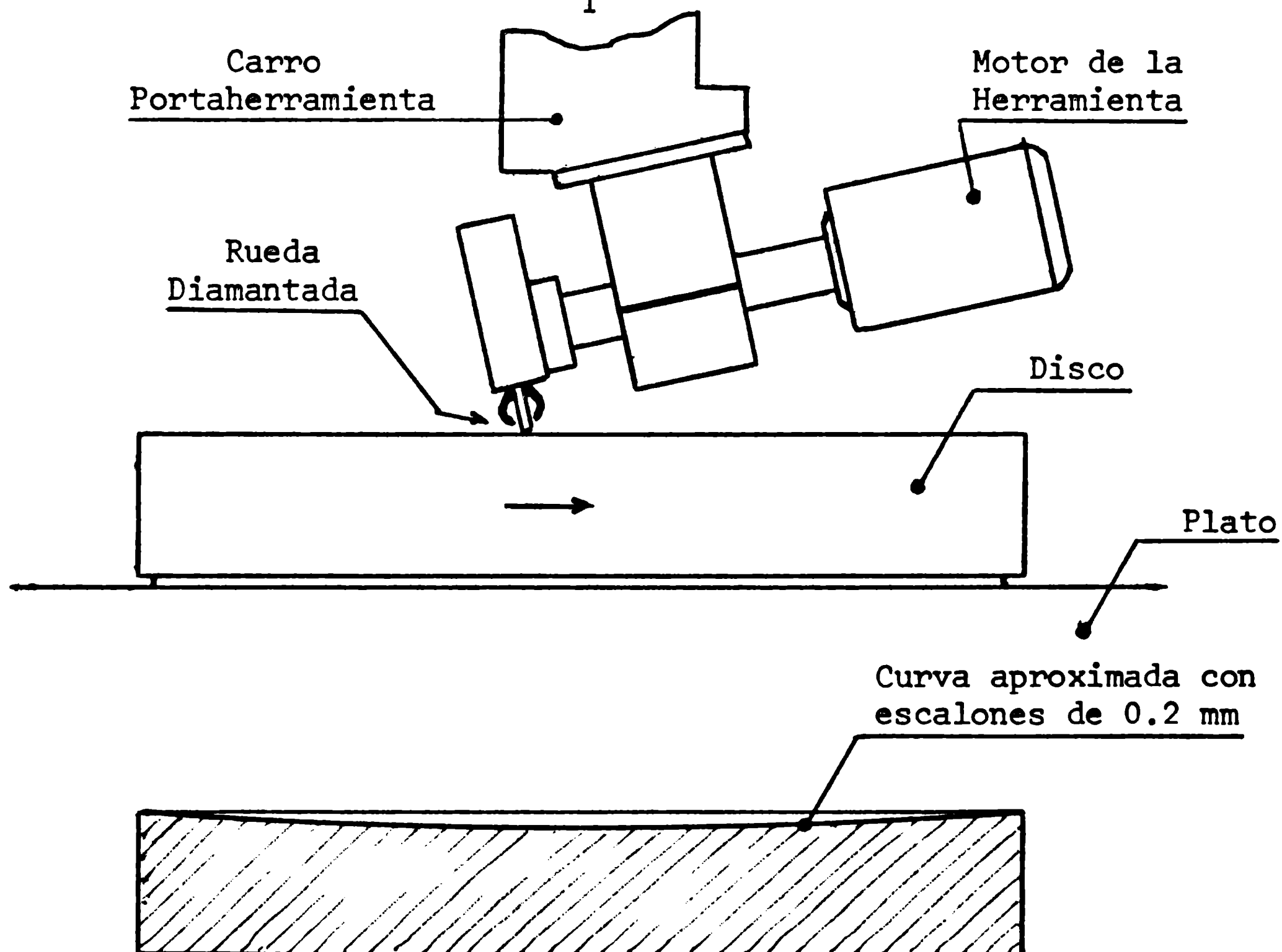
de cada lado y otro al centro, que convergían sobre la parte del disco diamantado en contacto con el vidrio. Sin embargo, a pesar de la refrigeración mejorada sólo fue posible remover vidrio en un espesor de 0,2 mm por pasada, bastante menos de lo que normalmente se logra en este tipo de trabajo. Solamente disponemos de dos discos diamantados de 150 mm de diámetro: uno de 2 mm de espesor, que llegó con la máquina, y otro de 10 mm de espesor, adquirido en el país. Si con cualquiera de ellos se intentaba un corte más profundo, para remover más vidrio por pasada, se producían puntos calientes en la zona de corte, que se manifestaban, a pesar de la fuerte refrigeración, por la aparición de chispas (dentro del agua) que desprendían vidrio en trozos anormalmente grandes (3 ó 4 décimas de milímetro), por brusca expansión del vidrio en los puntos calientes. Un examen del disco diamantado cuyo metal aglutinante parecía ser bronce, mostraba la superficie con varios poros de donde se habían desprendido los pequeños granos de diamante. Este fenómeno descripto limitaba nuestra profundidad de corte a 0,2 mm por pasada, influyendo solamente sobre el tiempo empleado en las operaciones.

Elegido el mejor lado del disco para futura cara óptica, se lo colocó con ésta hacia abajo, apoyado sobre un disco de telgopor de diámetro igual al del espejo y 15 mm de espesor, y se comenzó el trabajo desbastando el dorso del espejo, dejándolo plano, para tener una buena superficie de apoyo.

A continuación se colocó el espejo sobre el plato de la máquina, con la cara óptica hacia arriba apoyándolo sobre tres tacos de madera de igual altura, situados a  $120^\circ$  y próximos al borde del espejo. Se efectuó el centrado del disco sobre el plato, teniendo en cuenta que su borde era bastante irregular pues mostraba la forma de los ladrillos refractarios planos que conformaron el molde circular donde había sido fundido el "Pyrex". Se procedió entonces al desbastado del

borde, quedando el disco con un diámetro final de 780 mm.

Seguidamente se desbastó la cara óptica dejándola plana en una primera etapa, y haciéndole en el borde un bisel a  $45^\circ$  de unos 4 mm de ancho. Se retiró el disco del plato mediante un soporte adecuado, izándolo con el aparejo del puente grúa (peso del disco 130 kg). Se quitaron los tacos de madera y se colocó el disco de telgopor. Luego, adoptando como profundidad de corte el valor de 0,2 mm, se obtuvieron por cálculo los radios de las zonas circulares donde debían efectuarse los sucesivos cortes para que, mediante una superficie escalonada de revolución, se obtuviera una aproximación a la superficie esférica buscada, de radio de curvatura  $R_1 = 7020$  mm.



**FIG. 4 Desbastado con rueda diamantada**

Colocado el disco en el plato, apoyado sobre el disco de telgopor, se efectuó un cuidadoso centrado.

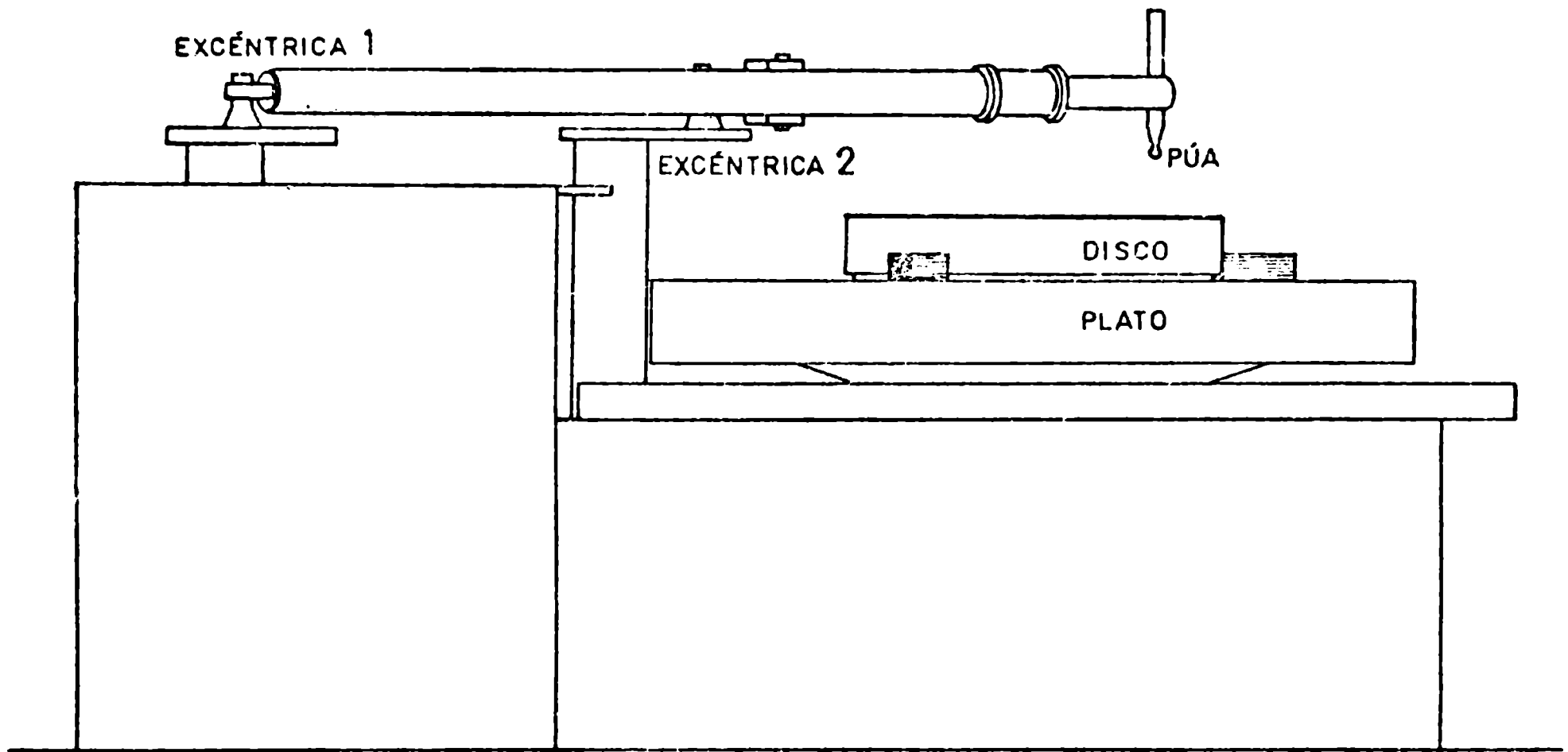
Partiendo de una forma plana de la futura cara óptica, se comenzó el primer corte desde cierta distancia del borde hasta el centro. El segundo corte se comenzó desde una distancia del borde algo mayor hasta el centro, y así sucesivamente, hasta completar unos 53 cortes, con los que se llegó a una forma cóncava aproximada a la esfera con un error de  $\pm 0,1$  mm.

### ESMERILADO GRUESO

El paso siguiente fue el esmerilado grueso que tenía por objeto borrar los escalones de 0,2 mm para llegar a una forma esférica más perfecta. Se preparó para ello una herramienta de vidrio Pyrex de 30 cm de diámetro cortando escalones en la misma máquina y con los mismos radios calculados para limitar las zonas de corte circulares del espejo. Pero en este caso se deseaba obtener una superficie convexa que se adaptara a la forma cóncava del espejo. Este disco tenía también escalones de 0,2 mm de altura y se usaría para borrar los escalones del futuro espejo mediante el esmerilado con abrasivo y agua.

Utilizando el puente grúa se quitó la parte de la máquina destinada al desbastado y se colocaron los brazos en las dos excéntricas.

Se pegó con cera-resina sobre el centro del dorso del disco herramienta, una pieza circular de hierro provista de un agujero central donde podía entrar el extremo esférico de la púa de la máquina, situada en el extremo del brazo más largo. Mediante el accionar de las dos excéntricas de eje vertical se efectuó el trabajo de esmerilado con "carborundum" n° 220 y agua. El disco herramienta, comandado por la púa que mueven las excéntricas fue así frotado sobre toda la superficie del espejo, produciéndose el esmerilado que hizo desaparecer los esca



VISTA EN ELEVACIÓN

VISTA EN PLANTA

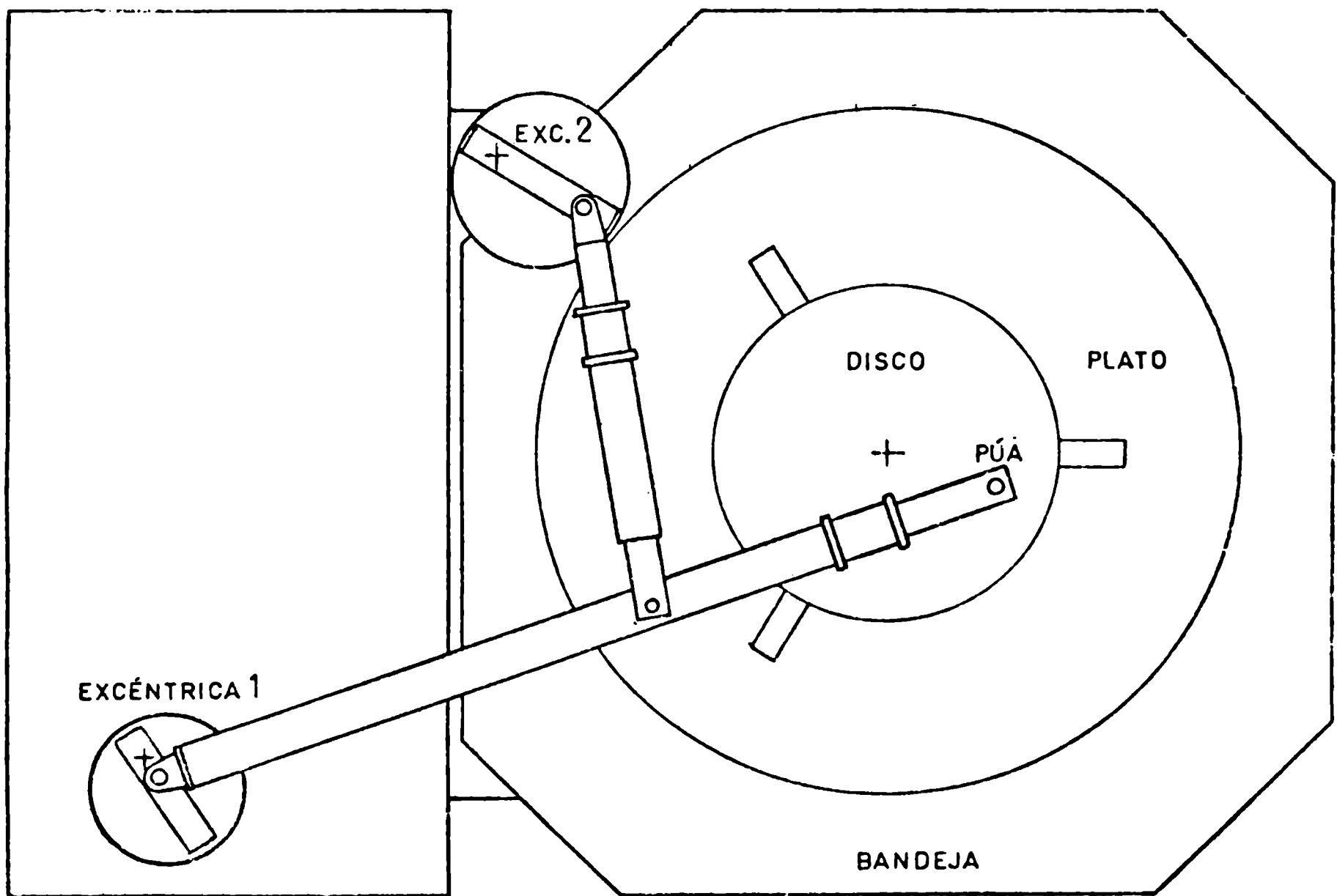


fig. 5

tones. Ambos discos quedaron con forma esférica del mismo radio de curvatura, uno cóncavo y el otro convexo.

### ESMERILADO FINO

Con el esmerilado fino se llevó la superficie óptica, con la rugosidad dejada por el esmerilado grueso, a las condiciones de ser pulida. Para ello es necesario utilizar una herramienta del mismo tamaño que el espejo, y que sea suficientemente rígida y resistente.

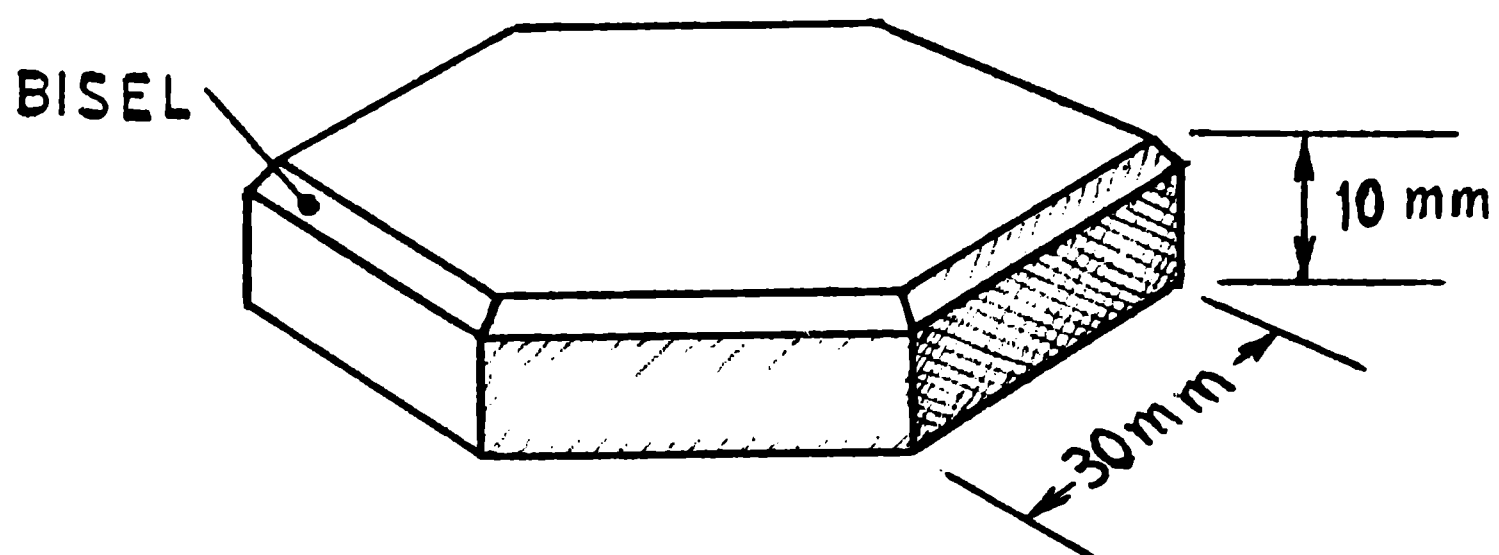
### CONSTRUCCIÓN DE LA HERRAMIENTA

Habiendo ensayado una herramienta formada con yeso y una armadura de hierro, se presentaron problemas con el fraguado del yeso y esta circunstancia llevó a pensar en una herramienta de hormigón liviano armado. Esta técnica es original y ya había sido utilizada con éxito por Chavasse en el espejo de 60 cm de diámetro. La superficie abrasiva debe ser hecha con trozos regulares de vidrio o cerámicos. En nuestro caso utilizamos elementos cerámicos de forma exagonal, provenientes de la demolición de un antiguo piso de un local sanitario del pabellón principal del Observatorio. Estos elementos de color blanco, no vitrificados (blanco mate), tenían el tamaño y la forma ideal: contorno exagonal regular de 30 mm de lado y un espesor de 10 mm.

Para formar la herramienta se cortó en chapa de aluminio de casi 1 mm de espesor, una tira de 2,60 metros de largo por 20 cm de ancho. Se colocó esta chapa alrededor del espejo haciéndola sobresalir sobre el borde unos 8 cm y se la ciñó con dos vueltas de alambre.

Se preparó un número suficiente de elementos cerámicos como para cubrir todo el espejo y se cortaron algunos en mitades para adaptar-

los mejor a la forma redonda del borde. En cada uno de ellos se hizo el biselado de las seis aristas de una cara exagonal.



**FIG. 6 Cerámico exagonal biselado**

Se cubrió la superficie cóncava del espejo con una delgada capa de grasa mineral, lo mismo que la parte sobresaliente de la cara interna de la chapa de aluminio. Todos los elementos cerámicos preparados se mojaron por inmersión en agua y se colocaron sobre la superficie engrasada del espejo, con la cara biselada hacia abajo. Se preparó entonces una mezcla de una parte de cemento, dos de arena y agua suficiente, que se extendió sobre los exágonos cerámicos hasta formar una capa de casi 1 cm de espesor, recubriendo también parte de la chapa de aluminio.

Con hierro de alta resistencia de 4,2 mm de diámetro se hizo una armadura formada por hierros diametrales en dos niveles y hierros circulares concéntricos. Se colocaron tres asas de hierro a 120° y en el centro una pieza cilíndrica de hierro con un agujero cónico central para la púa, pieza que llevaba soldados tres hierros de  $\phi 6$  mm que fueron atados a la armadura descrita. Colocado este conjunto sobre la capa de concreto, se hormigonó con hormigón liviano, utilizando como agregado grueso "Ripiolita", que es de muy baja densidad. Se terminó el hormigonado con una capa de arena y cemento, cuidando de dejar des

cubiertas las tres asas y el agujero de la pieza central. Se mantuvo húmeda la herramienta durante varios días para un buen fraguado del hormigón.

A los pocos días se sacó la banda de aluminio y después de tres semanas se movió la herramienta accionando desde el agujero central y ayudando desde los bordes con las manos.

Se retiró la herramienta del espejo y ambos se limpiaron quitando todo resto de grasa. Se cepilló la herramienta para desprender los granos de arena superficiales, se prolijaron los bordes retocándolos con cemento puro y después que estuvo bien seca se pintó con esmalte sintético en su cara superior, bordes y en la parte biselada de los exágonos, para evitar el desprendimiento de granos de arena.

De esta manera quedó la herramienta del mismo diámetro que el espejo, formando un cuerpo monolítico de un peso aproximado a los 50 kg, y adaptada su superficie cerámica convexa a la cóncava del espejo.

#### COMIENZO DEL ESMERILADO FINO

Utilizando "carborundum" n° 3F y agua, se comenzó el esmerilado en la máquina con la herramienta grande y carreras moderadas, para aumentar lo menos posible el radio de curvatura de las superficies en contacto, ya que la disposición de espejo cóncavo abajo y herramienta arriba, tiende a aumentarlo. Un espejo de este tamaño se trabaja siempre así, lo que no ocurre con espejos pequeños, donde pueden permutarse las posiciones de espejo y herramienta.

La herramienta se fue adaptando perfectamente a la curva del espejo que se fue controlando con un esferómetro.

Se continuó el esmerilado con abrasivos en polvo de granos cada vez más finos, utilizando los números de "Microgrit" 20 y 12. Con cada uno de estos abrasivos se trabajó un tiempo suficiente como para



asegurar que había desaparecido toda huella del grano inmediato anterior.

Al dejar el uso de un abrasivo y antes de pasar al siguiente de grano más fino, se efectuaba un cuidadoso lavado del espejo y del plato de la máquina para eliminar todo vestigio del grano utilizado.

El trabajo de los abrasivos fue reduciendo el ancho del bisel inicial del espejo que llegó a medir sólo unos 2 mm de ancho. Aunque era algo angosto, se prefirió dejarlo así para prevenir el borde caído en los últimos dos milímetros durante el pulido.

Observada la superficie del espejo con una lupa de fuerte aumento se constató su aspecto uniforme, sin huella alguna de los abrasivos anteriores, con lo cual se dio por terminado el esmerilado fino.

El tiempo total de esmerilado es difícil de estimar por cuanto el trabajo de este espejo se tomó como trabajo de fondo, dejándolo de lado para atender otras tareas de rutina o cada vez que se presentaba en el taller algún trabajo urgente. Sin embargo podría decirse que en el esmerilado fino debió haberse empleado unas 20 horas netas. El espejo se mantuvo siempre apoyado sobre un disco de espuma de goma de 20 mm de espesor, durante el esmerilado fino y el pulido.

## PULIDO

No disponiendo al principio de la brea especial para óptica, que es brea vegetal, la herramienta de pulido se preparó con brea mineral común que venden las casas de materiales de construcción para juntas de dilatación, impermeabilización, etc. y que es también conocida como asfalto sólido.

## PREPARACION DE LA HERRAMIENTA DE PULIDO

Se resolvió hacer la herramienta pegando panes de brea exagonales premoldeados, casi del mismo tamaño que las piezas cerámicas que

formaron la herramienta, sobre cada uno de dichos elementos cerámicos. Para preparar los exágonos de brea se procedió así: un disco de vidrio plano grueso de unos 30 cm de diámetro se colocó en posición horizontal, bien nivelado, sobre una mesa. Con una cinta de cartón más ancha que el espesor del disco, se lo rodeó y ató con un hilo, formando un reborde de 10 mm sobre todo el borde del vidrio. Se mojó con agua jabonosa la superficie plana del disco y se derramó una cierta cantidad de brea fundida hasta formar una capa de unos 8 mm de espesor. Mediante una herramienta mojada, (previamente preparada con una chapa rectangular doblada en forma de un exágono), usada en forma de sacabocados, se cortó la capa de brea antes de que se enfriase, en trozos exagonales de 26 mm de lado y 8 mm de espesor.

Habiendo quitado del disco la cinta de cartón, se fueron separando los exágonos de brea (que no se pegaron al vidrio por el agua jabonosa) y se enjuagaron con agua fría y se secaron. Después de efectuar una cuidadosa limpieza de la herramienta, se secó bien y fue colocada en posición horizontal, con la cara de trabajo hacia arriba, la que se pintó con pintura asfáltica preparada con la misma brea disuelta en bencina. Sobre cada exágono cerámico se pegó un exágono de brea, y como éstos eran algo menores en tamaño que los cerámicos, quedaron formados entre ellos una suerte de canales, que resultan indispensables para una buena adaptación de la herramienta al espejo y para la circulación del agua con el polvo de pulir.

### ADAPTACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE PULIDO

Colocado el espejo sobre la máquina se lo mojó con agua jabonosa y habiendo calentado la herramienta en agua hasta unos 50°C se la colocó sobre el espejo dejándola unos minutos con pesos encima para aumentar la presión y lograr una buena adaptación. Esta operación se re

pitió dos o tres veces, agregando en la última vez el polvo de pulir disgregado en agua, con lo cual se pintó la superficie del espejo antes de establecer el contacto. Después de algunos minutos de prensado se movió la herramienta sobre el espejo y se la retiró nuevamente. Se observó entonces la superficie de los panes de brea, donde se pudo ver por el aplastamiento que la adaptación era buena y que los canales no se habían reducido demasiado.

De esta manera la herramienta quedaba preparada para la operación de pulido.

### HACIA UNA SUPERFICIE ESFÉRICA PULIDA

Dispuesta la máquina para el pulido, con las excéntricas reguladas para que en ningún momento la herramienta tomara posiciones peligrosas por su proximidad al borde del espejo, se comenzó esta etapa del trabajo. Se eligieron las velocidades menores en el movimiento del plato y del brazo conductor de la herramienta. A intervalos regulares se agregaba agua con polvo pulidor (que en nuestro caso fue Bahlite, nombre comercial de un polvo para pulir color blanco, de la firma Bausch y Lomb).

Al cabo de dos horas de trabajo se pudo hacer la primera prueba óptica para medir el radio de curvatura, mediante reflexión en la superficie semipulida.

Colocado el espejo frente al aparato de Foucault se observó una buena forma esférica con un radio de curvatura de 7090 mm.

Se continuó con el pulido en forma similar durante varios días haciendo controles diarios con el aparato de Foucault para verificar el mantenimiento de la forma esférica. Con una lupa de mediano aumento se controlaba periódicamente la marcha del pulido, trabajando

hasta observar la total desaparición de las huellas dejadas por el esmeril más fino. A medida que el pulido avanzaba se fueron reduciendo las excentricidades de los muñones que comandaban el brazo de pulir, para impedir el efecto de borde rebajado.

Esta etapa concluye cuando se tiene el espejo con forma esférica y totalmente pulido.

### FIGURADO DEL ESPEJO

Habiendo adoptado una combinación de espejos del tipo llamado Ritchey-Chrétien, la forma del espejo primario debía ser ligeramente más apartada de la esfera que la correspondiente al parabolóide del Cassegrain equivalente.

Esta mayor deformación, que lleva a un espejo de forma hiperbólica está definida numéricamente por el llamado coeficiente de deformación que para el caso de la parábola vale  $b = -1$  y para el nuestro  $b = -1,208$ .

Para pasar de la forma esférica al parabolóide o hiperbolóide de revolución quitando la menor cantidad de vidrio debe profundizarse el centro del espejo y rebajarse el borde, de modo que no se modifique la zona de radio igual al 70% del radio del espejo. En este trabajo fue imposible utilizar la herramienta grande preparada, la cual terminó de ser útil una vez logrado el espejo esférico. En nuestro caso se llegó a la forma hiperbólica quitando vidrio preferentemente en la zona central.

Fue necesario entonces trabajar el espejo con herramientas sub-diámetro, llamadas así a todas aquellas de diámetro menor que el del espejo. Se preparó una herramienta en el disco de hormigón armado de 60 cm de diámetro utilizando en la construcción del espejo esférico para la cámara de espectrógrafo mencionado al comienzo. A efectos de

realizar un trabajo que no dejara zonas escalonadas de revolución en la superficie óptica y para esfumar el efecto del borde de esta herramienta, se la hizo en forma de estrella (ver Figura 7). Se trabajó

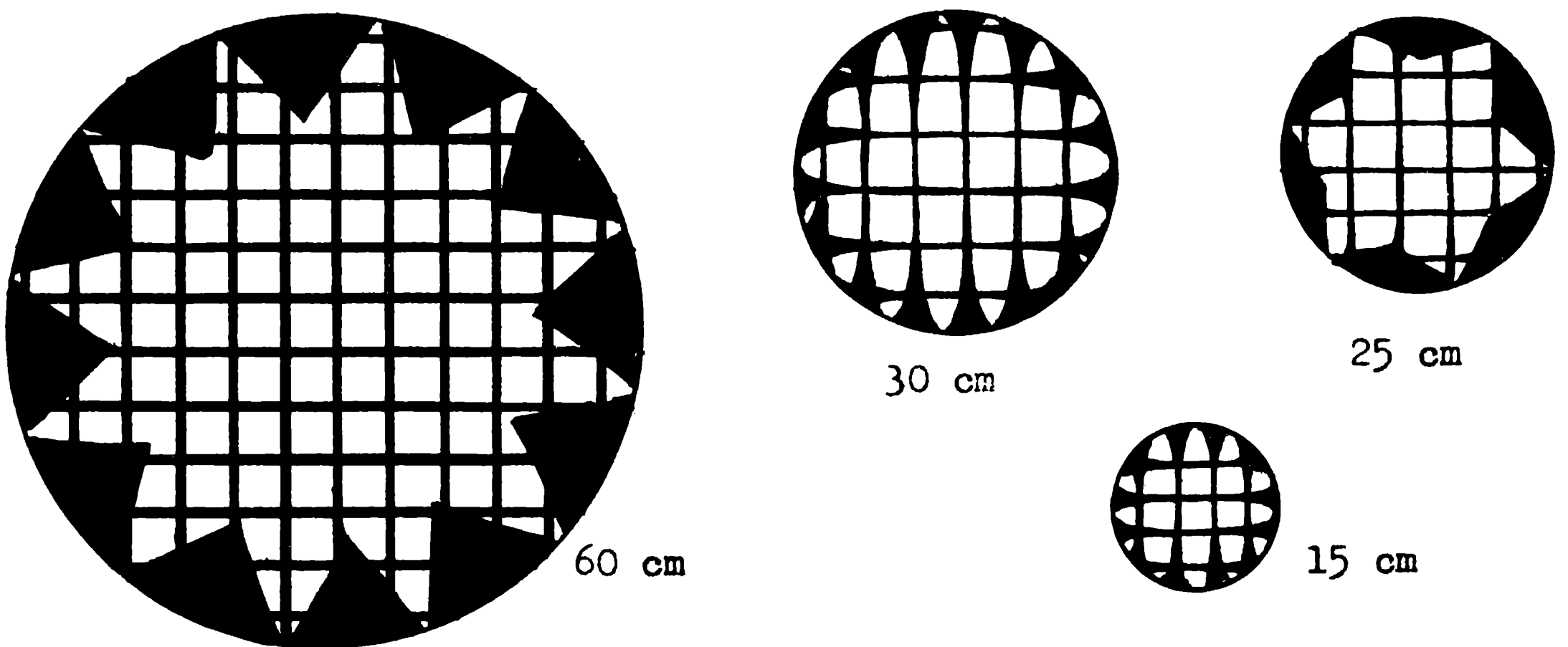


FIG. 7 Diversas herramientas subdiámetro.

insistiendo con el pasaje de la herramienta por el centro del espejo y se fue controlando la modificación de su forma con el aparato de Foucault (ver gráficos de perfiles). Efectuando cada dos horas de trabajo las mediciones que permitían hallar la forma del perfil del espejo, se confeccionaron numerosos gráficos, observando cuantitativamente cómo se acercaba su forma a la de un paraboloide.

Con la herramienta de 60 cm de diámetro no fue posible llegar a la forma final, por ser aun demasiado grande. Se prepararon entonces herramientas de 30 y de 25 cm de diámetro con las que se prosiguió el trabajo, acercándose cada vez más el espejo a la forma deseada. Estas herramientas también se hicieron en forma de estrella para prevenir la aparición de zonas de revolución (fig. 7).

El control con el aparato de Foucault se realizó utilizando una pantalla de 8 zonas, graficando la forma del semiperfil del espejo mediante un método de integración gráfica que se describirá más adelante.

Viendo la necesidad de insistir más en unas zonas del espejo que en otras, para quitar vidrio en las partes más elevadas, se ensayó el trabajo simultáneo de tres herramientas. Para ello se preparó una chapa en forma de triángulo equilátero de unos 58 cm de lado y 1 cm de espesor, con una púa próxima a cada vértice. En cada una de ellas, se hizo trabajar una herramienta de diámetro comprendido entre 12 y 25 cm. La máquina gobernaba este sistema de 3 herramientas actuando sobre el centro del triángulo de chapa, el cual tenía los vínculos necesarios para impedir su giración. Sin embargo, las herramientas mismas no estaban impedidas de girar sobre su eje y ello se reveló más tarde como un error de acuerdo con el efecto producido sobre el espejo. El movimiento irregular de rotación de estas herramientas, que por momentos giraban y por momentos no, fue la causa de la aparición, por primera vez, de defectos localizados que no eran de revolución. Estos defectos se detectaron midiendo la forma del espejo en 4 posiciones distintas, obtenidas girando el espejo  $45^\circ$  entre cada una de las medidas. Con el sistema de Foucault estudiamos el perfil del espejo en un diámetro horizontal colocándolo en posición vertical, colgado sobre una cinta de acero inoxidable que lo rodea por debajo en su semicircunferencia inferior. De las lecturas efectuadas en ese diámetro horizontal surge la información para representar la semimeridiana del espejo, pero esto no nos dice si el espejo tiene su defecto a la derecha o a la izquierda del centro, pues en este método se presupone que los defectos son sólo de revolución.

Si hubiéramos querido tener una vista de conjunto de todo el espejo, donde pudieran apreciarse sus defectos que no fueran de revolución, deberíamos haber construido un sistema dióptrico de corrección que anulara la aberración esférica de sobrecorrección que presenta el espejo cuando es observado desde su centro de curvatura. En otras palabras, deberíamos reemplazar el sistema de medición con pantalla de

zonas por un sistema de medición de cero, mediante la interposición de una lente correctora próxima a la imagen que forma el espejo. Esto no se hizo porque exigía una modificación del aparato de Foucault.

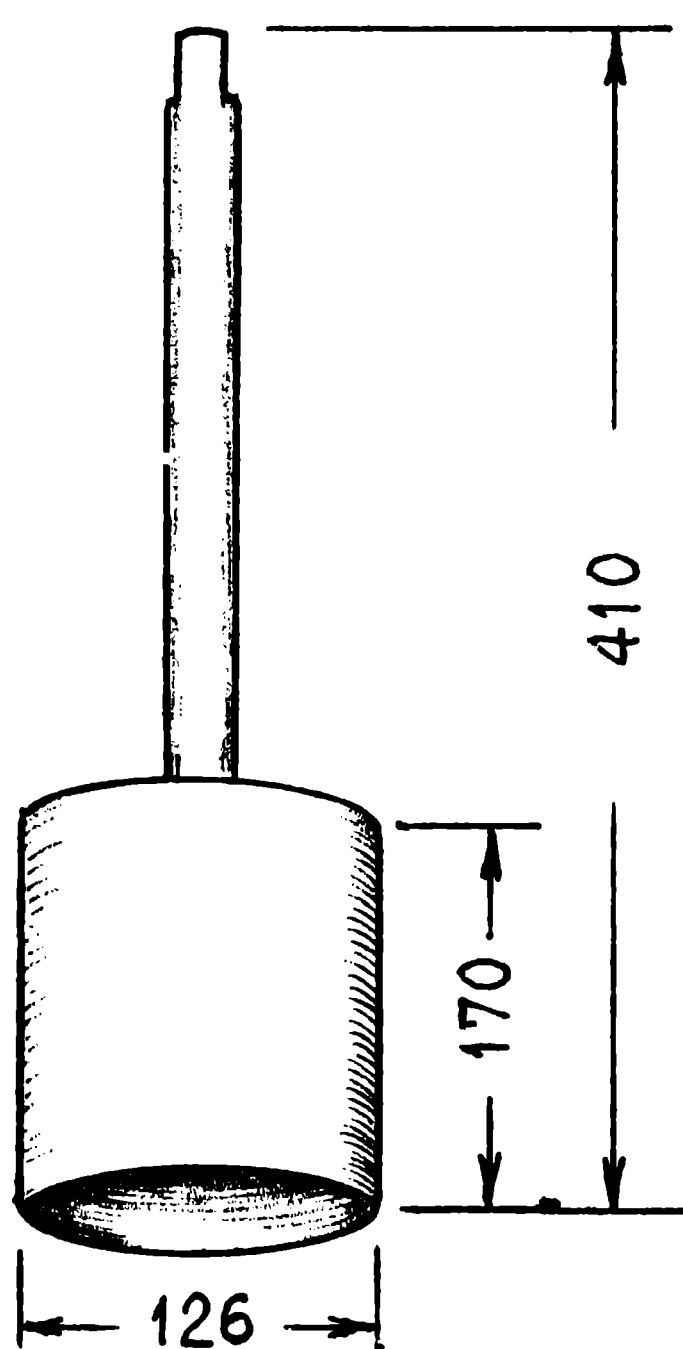
Una vez que las mediciones mostraron la aparición de defectos apartados de una simetría de revolución se pensó en corregirlos utilizando nuevamente la herramienta completa pero con una muy reducida carretera radial, de no más de 4 o 5 centímetros de amplitud, y con un vínculo que impidiera su giro. Esta era la única manera de utilizar una herramienta completa de modo que actuando sobre una superficie, ya tan apartada de la forma esférica, pudiera trabajar sin tender a llevar nuevamente el espejo a la forma esférica. En otras palabras, una herramienta grande con carrera corta se comporta como herramientas pequeñas de diámetro del orden de dicha carrera.

Se preparó la herramienta completa mediante una limpieza y calentamiento en agua, para colocar sobre el espejo y producir su adaptación a la nueva forma de la superficie. Hecho esto, se trabajó durante pocos minutos (no más de 5) y se colocó nuevamente el espejo frente al aparato de Foucault para ver el resultado obtenido. Aquí se comprobó el error cometido, al observarse una serie de seis u ocho surcos concéntricos que aparecían en la figura del espejo y al comprobarse, por las medidas, un retroceso hacia la forma esférica. Evidentemente, el trabajo de esos pocos minutos se hizo con la herramienta insuficientemente adaptada, ya sea por no haber alcanzado la temperatura suficiente al calentarla o por el tiempo o presión escasos en la operación de prensado. Este resultado nos llevó en ese momento a abandonar el método de la herramienta completa, que hoy vemos nuevamente como el método correcto. Se intentaron entonces otras soluciones con herramientas menores.

## PERFORACIÓN CENTRAL DEL ESPEJO

Estando el espejo próximo a su forma definitiva se consideró oportuno iniciar la perforación central sin llegar a la cara opuesta, con lo cual el cilindro de vidrio a quitar del centro se mantendría en su posición, facilitando el figurado en la zona central del espejo.

Para esta operación no se disponía de una máquina adecuada, de modo que hubo que improvisar una, utilizando la máquina REOSC. Se comenzó por quitar las excéntricas y colocar mediante el puente grúa la parte de la máquina destinada al desbastado. Se retiró del portaherramienta la herramienta diamantada, con su eje y su motor. Se construyó una "bizcochera" o sea un cilindro hecho con chapa de 1,5 mm de espesor, con un diámetro exterior de 126 mm, altura 170 mm, y con una espiga cilíndrica soldada (ver figura), que se usa para cortar agujeros por abrasión.



**FIG. 8 Bizcochera**

Esta herramienta podía desplazarse axialmente unos 30 mm deslizando su espiga dentro de una gruesa vaina abulonada al carro portaherramientas. Mediante una palanca podía accionarse la espiga desplazando la herramienta verticalmente, pero estaba impedida de girar. El espejo era el que rotaría.

Para proteger la superficie óptica próxima al agujero se pegó sobre su centro, con cera-resina, una placa circular de vidrio plano de



170 mm de diámetro y 5 de espesor. Se evitó el contacto directo entre la placa y el espejo, interponiendo un anillo de película plástica autoadhesiva.

En la palanca que movía verticalmente la herramienta se fijó una leva que era accionada por tres piezas abulonadas al plato, que eran las mismas que sostenían el espejo centrado, de modo que, en cada vuelta, se producían 3 elevaciones y descensos automáticos de la bizcochera. El operario sólo debía alimentar la zona de corte con polvo abrasivo n° 220 y agua, y accionar de vez en cuando el motor que desciende el carro portaherramienta.

Se perforó así el espejo hasta unos 10 mm antes de llegar a la cara opuesta. El ancho del corte era de aproximadamente 3 mm. Después de un buen lavado y de despegar el vidrio de protección disolviendo el pegamento con kerosene, se quitó el plástico autoadhesivo, se volvió a lavar y secar y la ranura de corte se rellenoó con varios metros de un cabo de nylon de 2 mm de diámetro, colocando al final cera para sellar perfectamente la ranura circular. El agujero no se había terminado para conservar el cilindro central de vidrio en su sitio, evitando la tendencia al borde rebajado alrededor del agujero.

Cuando el espejo estaba ya muy próximo a su forma definitiva, las medidas con el aparato de Foucault comenzaron a hacerse sumamente difíciles porque no se obtenía una razonable repetición de los resultados, o sea de las formas obtenidas, y parecía que la forma del espejo se había hecho más sensible a las variaciones de temperatura.

Sin haber llegado a establecer una relación cuantitativa, se sospechó que las causas de estas anomalías podían deberse al material agregado dentro del corte del agujero central (cera) que, comportándose como sólido, tenía diferente coeficiente de dilatación que el vidrio pyrex, creando presiones variables a nivel de la superficie del espejo, donde se encontraba la cera. Con esto podía modificarse la zona central del espejo al cambiar la temperatura, deformación suficiente

te como para ser detectada por el sensible método de medición.

Para descartar este posible efecto se determinó entonces terminar el agujero central, quitando el cilindro de vidrio. Así se hizo y se biselaron luego los bordes del agujero en la cara óptica y en el dorso del espejo, con un bisel de unos 4 mm a 45°.

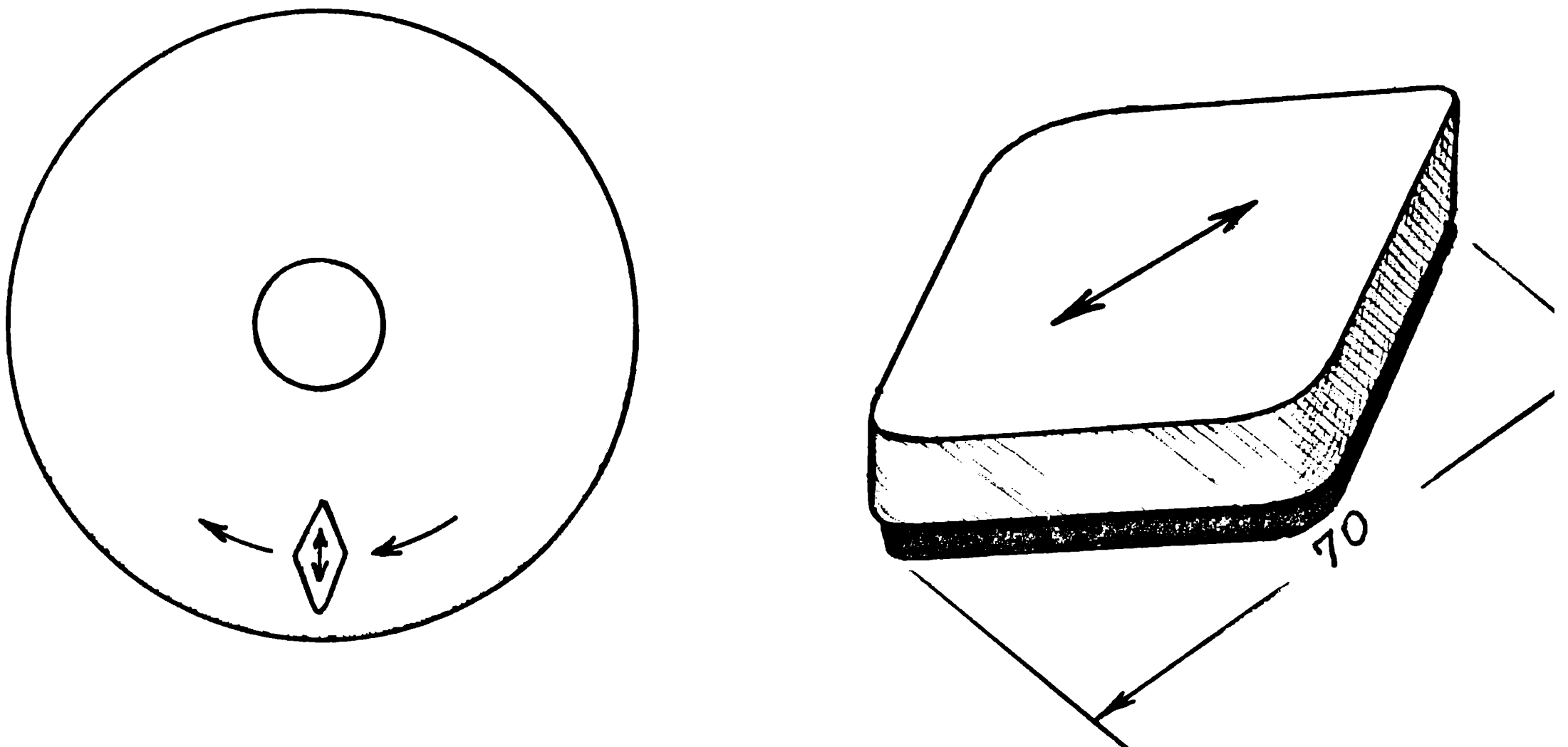
### PREPARACIÓN DE HERRAMIENTAS CON BREA ESPECIAL PARA ÓPTICA

Se había observado que los resultados obtenidos con los retoques programados con distintos tipos de herramientas, no tenían una relación siempre racional con los resultados obtenidos. Como era la primera vez que se trabajaba en espejos de ese tamaño se podía suponer que era en esos casos, de espejos ya más grandes, donde se empezaban a notar las limitaciones de la brea mineral usada hasta entonces. En esa época se presentó la oportunidad de recibir una importante donación de más de 300 kg. de brea vegetal especial para óptica, importada desde Francia, a través de una atención de la Empresa Petroquímica General Mosconi, como generosa retribución a pequeños trabajos de mantenimiento realizados en nuestro laboratorio, de un espectrofotómetro de absorción atómica de dicha empresa.

La continuación de los trabajos del figurado del espejo se suspendió durante los meses que duraron los trámites de importación, en espera de la brea especial. Cuando se dispuso de ella se prepararon varias herramientas pequeñas, con las que se continuaron los retoques a mano, con el espejo girando sobre el plato de la máquina o bien colocando el espejo sobre una cubierta de camión dispuesta sobre bancos a una altura conveniente y dentro de un gran fuentón existente de 1,15 m de diámetro.

Estos trabajos consistieron en retoques zonales de defectos de revolución que venía manteniendo el espejo desde antes del cambio de brea. Algunas pequeñas herramientas de retoque se hicieron de forma

romboidal para suavizar el efecto de su borde, trabajando sobre el



**FIG. 9 Pequeña herramienta romboidal**

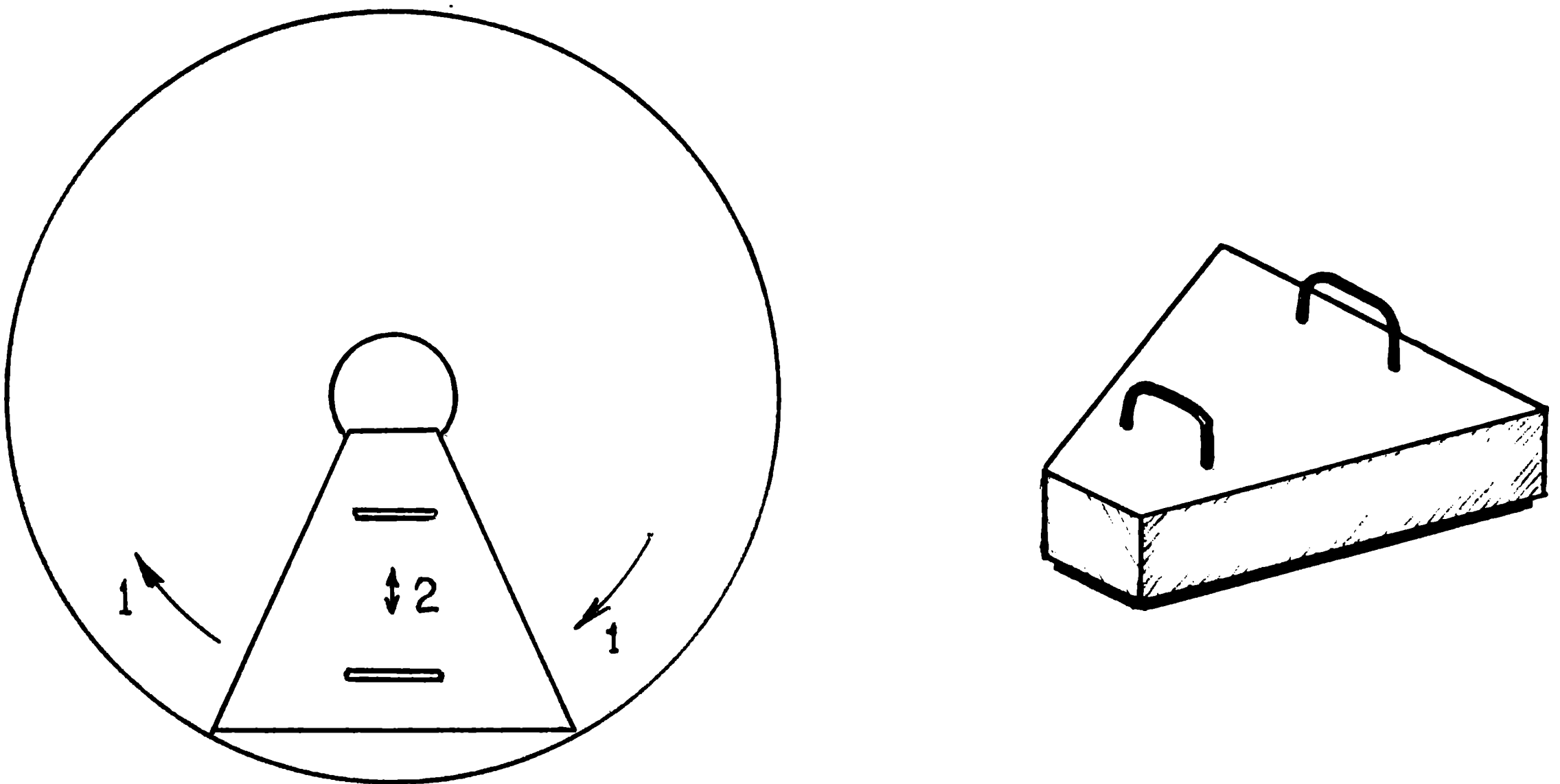
espejo con el eje mayor en dirección radial y adoptando carreras también radiales de amplitudes siempre menores que el largo de la herramienta. Este tipo de retoques permitía bajar zonas de revolución elevadas y siempre se hacían en número de vueltas enteras del espejo.

#### LA HERRAMIENTA TRAPEZOIDAL

Después de efectuar nuevas lecturas con el aparato de Foucault para obtener la forma del perfil alcanzado hasta ese momento, se vio que el espejo aún mostraba restos de las zonas anulares que se habían producido con el trabajo de la herramienta completa insuficientemente asentada.

Se pensó entonces en utilizar una herramienta nueva de forma trapezoidal y de accionamiento radial que, con carrera corta, de 6 o 7 cm para nuestro caso, apoyara sobre un sector del espejo, de modo que las

bases del trapecio estuvieran en dirección tangencial y los otros dos lados en dirección casi radial, como muestra la figura 10. La altura del trapecio era casi igual a la distancia entre borde del agujero y borde externo. La carrera propia de esta herramienta debía componerse con el movimiento de rotación del espejo, y tenía por objeto principal borrar los surcos dejados por la herramienta completa poco adaptada y



**FIG. 10** La herramienta trapezoidal

contribuir en menor grado a reducir los defectos locales sin simetría de revolución.

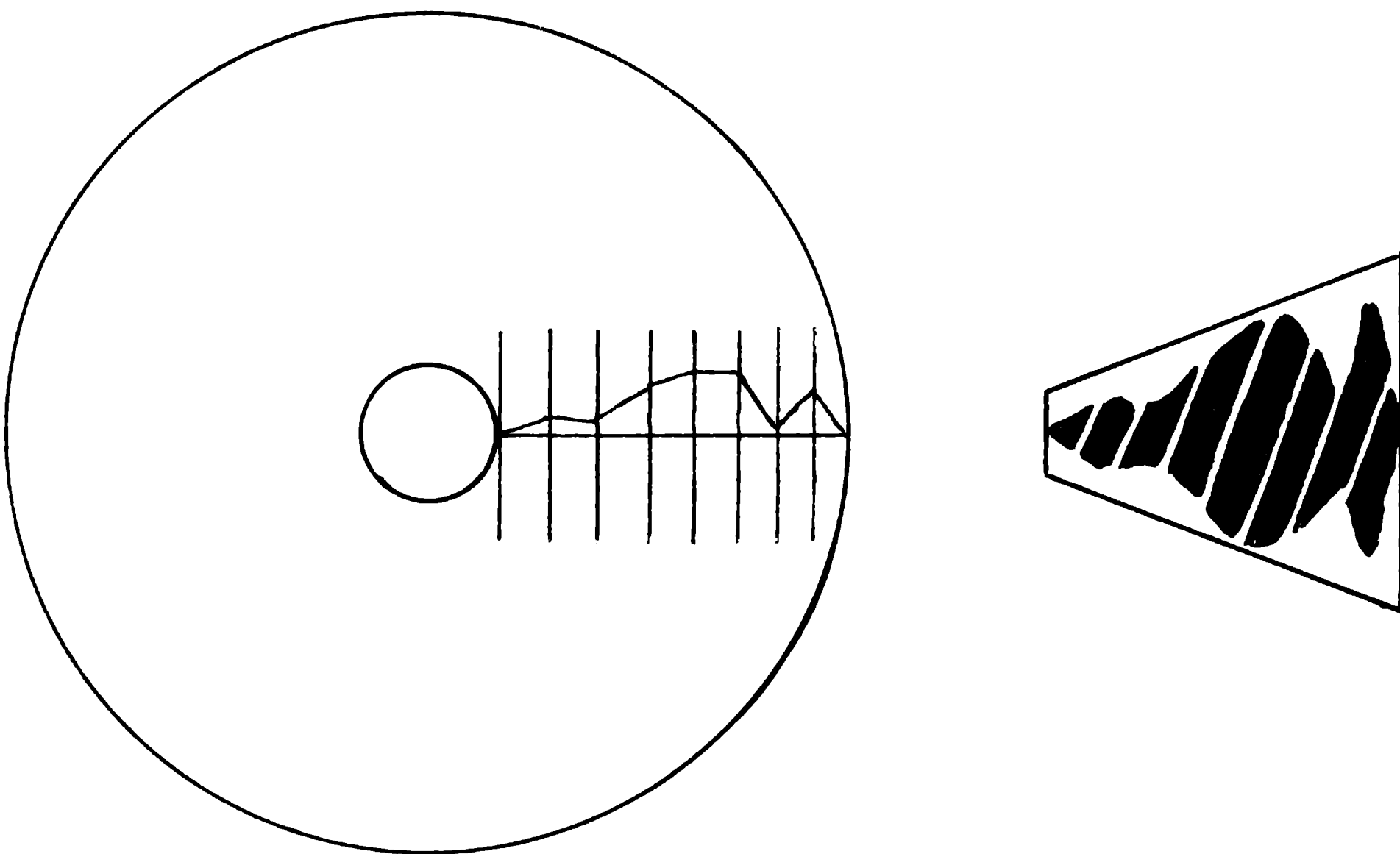
Esta herramienta se preparó haciendo una especie de caja de chapa de hierro, sin tapa, que se rellenó con hormigón, colocándole dos asas de hierro (ver figura). Su medidas fueron

base mayor 40 cm

base menor 8 cm

altura 36,5 cm  
 espesor 6 cm

El movimiento de esta herramienta respecto del espejo está representado en la figura 1 por las flechas 1 y 2. La primera indica el movimiento de rotación del espejo y la segunda, la amplitud del movimiento alternativo de la herramienta. Es conveniente marcar en el plato de la máquina la posición de comienzo del trabajo para terminarlo en el mismo punto, o sea cumpliendo un número entero de vueltas del plato. Este tipo de herramienta es original y ofrece una posibilidad o recurso interesante: una vez determinada la forma de la semimeridiana del



**FIG. 11 La herramienta trapezoidal recortada para corregir la forma medida en el espejo.**

espejo se recortan los bordes laterales de la brea de la herramienta de modo que en sus lados se reproduzca la forma del espejo. Haciendo esto con el cuidado de respetar las posiciones radiales de los accidentes

tes de la curva que representa el perfil, para transportarlos a la curva del borde de la brea de la herramienta, esta presentará un ancho mayor de brea actuando sobre la zona donde haya que sacar mayor cantidad de vidrio (zonas elevadas) y un ancho menor de brea para las zonas deprimidas del espejo. Así se puede corregir, con el trabajo de una sola herramienta, los defectos de revolución que pueda presentar el espejo a lo largo de su radio. De todos modos el uso de este tipo de herramienta conviene complementarse con otras técnicas que incluyan herramientas circulares con borde en forma de estrella, o herramientas pequeñas para retoques locales.

Cuando además deben corregirse defectos que se apartan de la figura de revolución, como es el caso de este espejo, debido a la acción de herramientas no controladas en su rotación, lo razonable es utilizar una herramienta de diámetro total, haciéndola trabajar con muy corta carrera longitudinal (3 a 4 cm) y en posición centro de herramienta sobre centro de espejo. Esta herramienta puede tener la forma de una flor de 6 u 8 pétalos, cada uno de los cuales tendrá la forma explicada para la herramienta trapezoidal. El trabajo sobre el espejo que producirá esta herramienta se parecerá más a un torneado de la superficie que al que produce un frotamiento de vaivén, debido al predominio del movimiento circular sobre la pequeña carrera longitudinal.

#### RESULTADOS DE LOS CONTROLES ÓPTICOS EFECTUADOS

El control de la marcha del trabajo consistió en determinar la forma de la semimeridiana de la superficie óptica por el método de Foucault. Se utilizó una pantalla que dividía al espejo en 8 zonas concéntricas, correspondiéndole a cada una de ellas un par de ventanas simétricas de la pantalla. Por cálculo se hallaron las posiciones teóricas de los centros de curvatura de cada par ( $\Delta R_T$ ) y con el apara

to de Foucault se determinaron las posiciones reales observadas ( $\Delta R_{OB}$ ). La diferencia (e) entre las posiciones teóricas y observadas nos daba un error que, multiplicado por un factor (K), dependiente de la zona considerada, permitía conocer el valor de la pendiente de error (S) entre la superficie teórica y la real del espejo para cada uno de los pares de ventanas descubiertos por la pantalla.

A partir de allí, continuaba una integración gráfica hecha con las pendientes (S) halladas, que daba la forma del semiperfil del espejo en una escala conveniente, donde las ordenadas estaban ampliadas en un factor  $5 \times 10^4$ , y las abscisas reducidas en un factor 0,5.

Estas planillas de cálculo fueron concebidas para efectuar un mínimo de operaciones.

Reproducimos como ejemplo una de las planillas de cálculo con su perfil correspondiente a la semimeridiana del espejo. Corresponde a la lectura número 84 (ver fig. 12).

En la figura 13 se muestra el estado actual de la superficie, medida en cuatro diámetros distintos separados en  $45^\circ$ . Como puede apreciarse, se cumple con la tolerancia de no tener diferencias mayores de  $\lambda/8$ .

Es necesario destacar que en todo momento hemos contado con la dedicación y experiencia del señor A. de Palo acumulada en muchos años de trabajo en superficies ópticas y con los consejos del señor J.N. Schwab que ha sabido comunicarnos la información recogida en grandes establecimientos ópticos franceses que visitó.

ESPEJO PRIMARIO RITCHEY-CHRÉTIEN OBSERVATORIO U.N.L.P.									
DIAMETRO = 780 mm b = -1,208					MATERIAL PYREX			FECHA 7-MAY-77	
ESPESOR = 125 mm RADIO CURV. = 7090					F = 4.5				
	ZONA	1	2	3	4	5	6	7	8
RADIO EXTERNO	mm	64 118	166	210	250	288	324	358	385
RADIO MEDIO $r_m$	mm	91	142	188	230	269	306	341	372
$\Delta R_T = -b r_m^2 (2R)^{-1}$	mm	0,705	1,718	3,011	4,507	6,164	7,977	9,906	11,759
$\Delta R_T$ (referido zona 1)	mm	0,000	1,013	2,306	3,802	5,459	7,272	9,201	11,054
$K = r_m R^{-2}$	$\times 10^{-5}$	0,181	0,282	0,374	0,458	0,535	0,609	0,678	0,739

PLANILLA N°	ZONA	1	2	3	4	5	6	7	8
FECHA	K	0,181	0,282	0,374	0,458	0,535	0,609	0,678	0,739
LECTURA FOUCAULT	mm	4,50	5,52	6,49	8,28	10,08	12,92	14,63	14,63
$\Delta R_{OB}$	mm	0,00	1,02	1,99	3,78	5,58	8,42	10,13	10,13
$\Delta R_T$	mm	0,00	1,01	2,31	3,80	5,46	7,27	9,20	11,05
$e = \Delta R_T - \Delta R_{OB}$	mm	0,00	-0,01	+0,32	+0,02	-0,12	-1,15	-0,93	+0,92
$e_c$	mm	+0,14	+0,13	+0,46	+0,16	+0,02	-1,01	-0,79	+1,06
$S = e_c K$	$\times 10^{-5}$	+0,025	+0,037	+0,172	+0,073	+0,011	-0,615	-0,536	+0,783

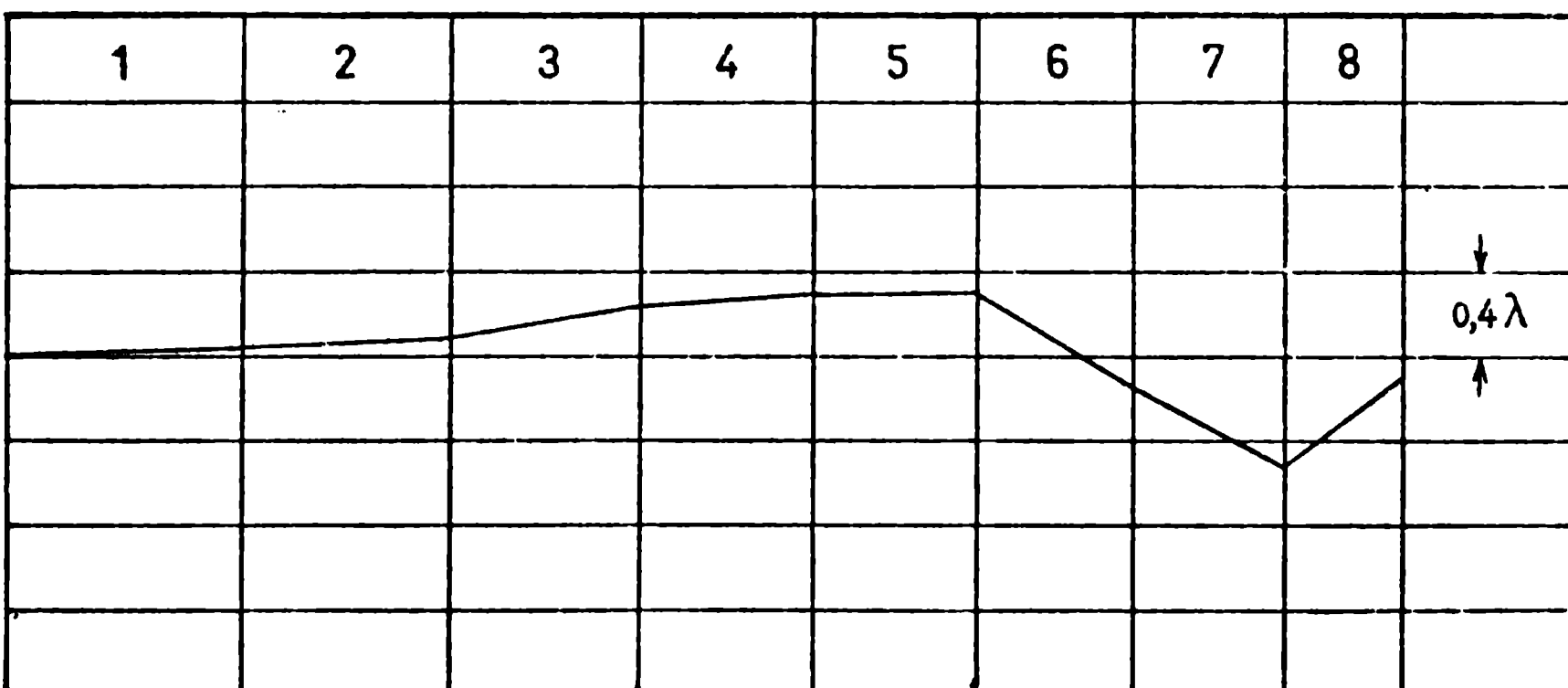


fig.12



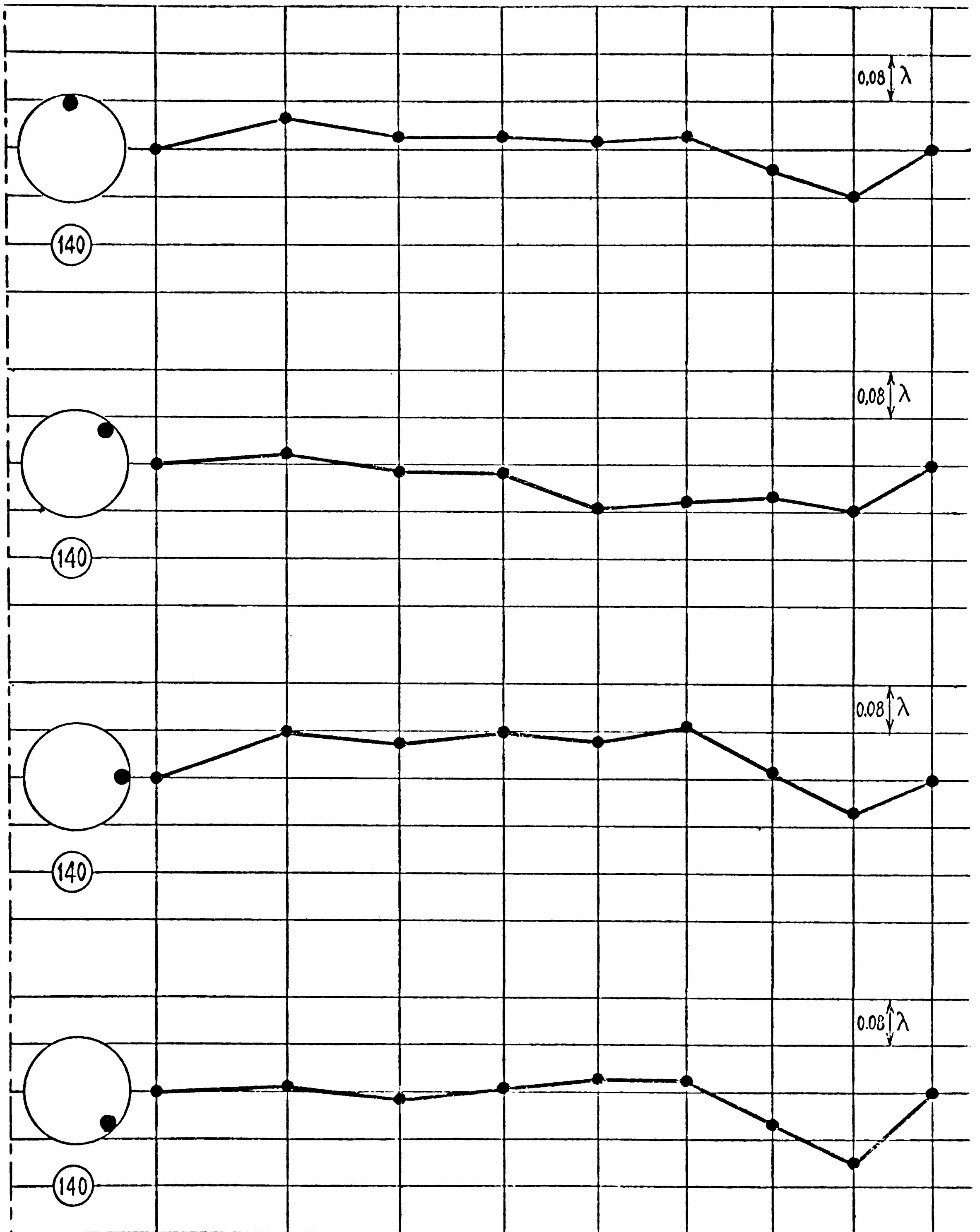


FIG. 13

CARACTERÍSTICAS DEL TELESCOPIO RITCHEY-CHRÉTIEN  
DE 78 cm

Diámetro de espejo primario	$D_1 = 780 \text{ mm}$
Distancia focal de espejo primario	$f_1 = 3545 \text{ mm}$
Radio de curvatura	$R_1 = 7090 \text{ mm}$
Relación focal de espejo primario	$F_1 = 4,5449$
Factor de aumento de espejo secundario	$\gamma = 2,2$
Distancia focal del sistema	$f = 7799 \text{ mm}$
Relación focal del sistema	$F = 10$
Emergencia focal	$e = 250 \text{ mm}$
Distancia foco primario-espejo secundario	$p = 1185,94 \text{ mm}$
Distancia espejo secundario-foco Cassegrain	$p' = 2609,06 \text{ mm}$
Distancia entre espejos	$d = 2359,06 \text{ mm}$
Radio de curvatura del secundario	$R_2 = 4348,44 \text{ mm}$
Diámetro espejo secundario sin campo	$D'_2 = 260,94 \text{ mm}$
Diámetro de campo Cassegrain	$\Phi_C = 110 \text{ mm}$
Diámetro de campo primario	$\Phi_1 = 50 \text{ mm}$
Diámetro angular de campo del telescopio	$\phi'_T = 48',49$
Incremento por campo	$\Delta D_2 = 33,37 \text{ mm}$
Diámetro de espejo secundario	$D_2 = 294,21 \text{ mm}$
Diámetro de montura del secundario	$D_{2M} = 303 \text{ mm}$
Obstrucción de conjunto secundario	$\sigma = 15,1 \%$
Longitud de pantalla de secundario	$\ell_{B2} = 43 \text{ mm}$
Diámetro máximo de agujero	$D_{A(MAX)} = 270,33 \text{ mm}$
Diámetro mínimo de agujero	$D_{A(MIN)} = 127,65 \text{ mm}$
Longitud de pantalla sobre primario	$\ell_{B1} = 886,38 \text{ mm}$
Diámetro de pantalla sobre primario	$D_B = 190,23 \text{ mm}$
Diámetro de círculo sin luz sobre secundario	$D_{A2} = 57,16 \text{ mm}$
Longitud de montura de secundario	$\ell_2 = 240$
Diámetro menor de montura de secundario	$D_{2m} = 268 \text{ mm}$

## ABERRACIONES DEL SISTEMA

Aberración de esfericidad : Nula

Coma : Nula

Astigmatismo (Diámetro del  
círculo astigmático a 55 mm  
del eje óptico) :  $\phi_A = 49 \mu\text{m}$

Curvatura de campo  
(Radio de curvatura) :  $R_c = 1207 \text{ mm}$

Distorsión  
(Valor lineal a 55 mm del  
eje) :  $= +16,6 \mu\text{m}$

Nota Todos los parámetros del telescopio y las aberraciones han sido calculadas con las fórmulas contenidas en la publicación de la serie especial N°26 "Sobre el diseño de telescopios de dos espejos", S.J. Chavasse - L.C. Martorelli.