



N°3

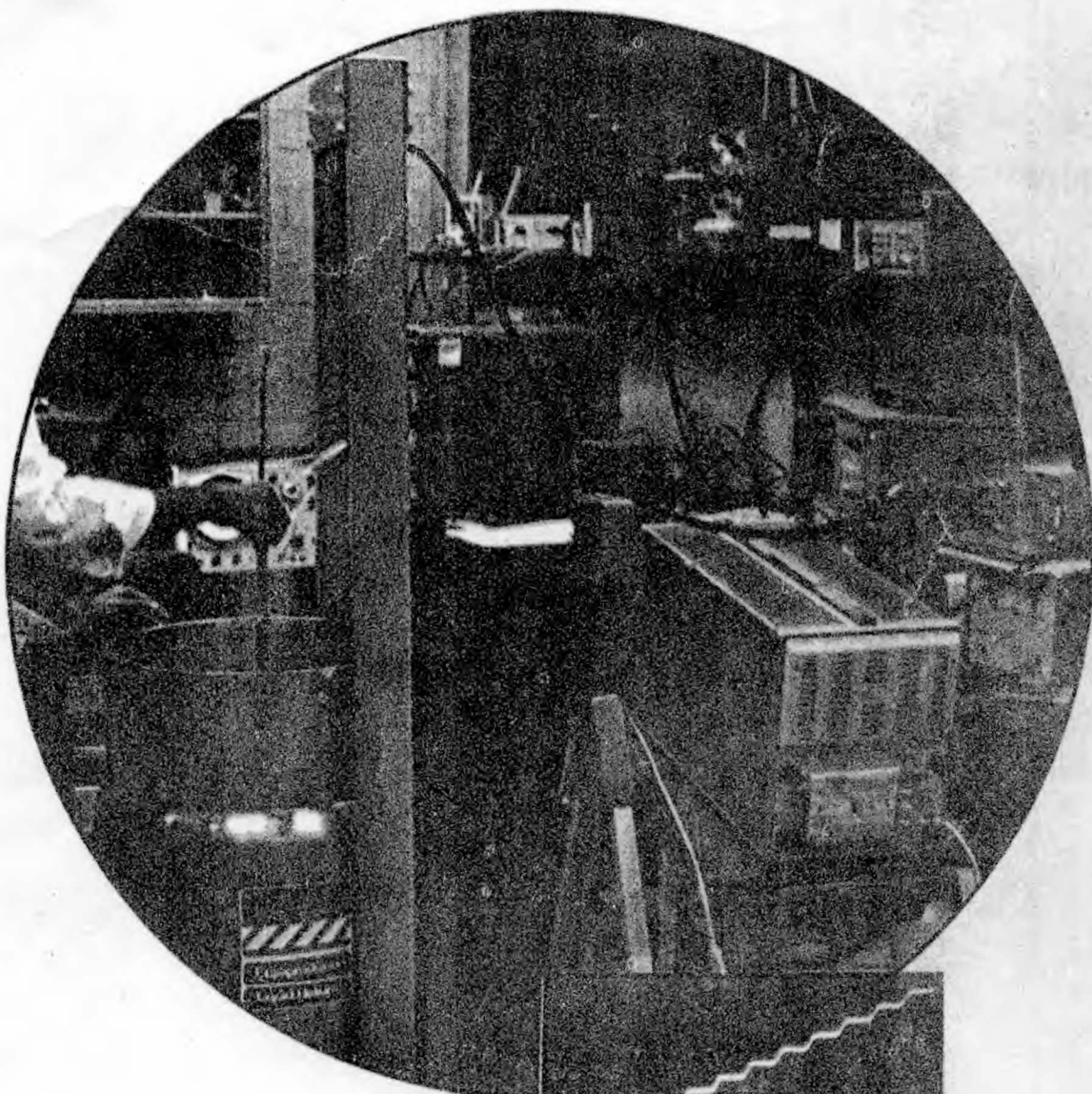
23 JUN 1982

CARTA

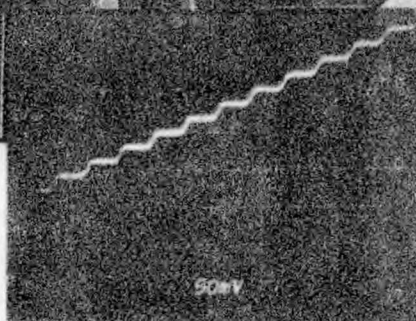
METROLOGICA

PUBLICACION DEL SISTEMA INTERAMERICANO DE METROLOGIA

Aplicaciones del laser a la Macrometrología



CENTRO DE INVESTIGACIONES OPTICAS
CONICET - UNLP - CIC
CASILLA DE CORREO 124
1900 LA PLATA REP. ARGENTINA



APLICACIONES DEL LASER A LA MACROMETROLOGIA

Lic. Zerbino, Héctor J. Rabal, Héctor
P. Ranea Sandoval, Jorge O. Tocho,
Aníbal P. Laquidara, Mario Gallardo
y Mario Garavaglia

Centro de Investigaciones Ópticas
(CIOp) (CONICET - UNLP - LEMIT)
La Plata, Argentina

CONTRIBUCIONES TECNICAS

1. INTRODUCCION

Se describe un método de alineación empleando un láser de He-Ne ($\lambda = 632,8$ nm, $P = 2$ mW) acoplado a un sistema telescópico que permite enfocar el haz luminoso hasta obtener puntos brillantísimos de diámetros mucho menores que $50\mu\text{m}$. El dispositivo se ha empleado en la definición de rectas y de planos en el espacio y en el establecimiento de relaciones geométricas entre rectas, entre rectas y planos y entre planos. Los resultados de esta aplicación macrometrológica del láser son rápida y fácilmente transferidos a la alineación de puntos en el espacio, a la determinación de la recta perpendicular a un plano y a la verificación del paralelismo de rectas y de planos.

2. SISTEMA OPTICO A LASER PARA ALINEAR PUNTOS EN EL ESPACIO

El sistema óptico para estos propósitos deberá ser de diseño especial, apropiado para dichos trabajos. Tal diseño obedece a las características que interesan en la emisión del láser: que sea un haz altamente colimado de luz coherente con distribución gaussiana de intensidad. Estas características se obtienen cuando dentro de la cavidad resonante se sustenta una configuración del campo electromagnético correspondiente al modo resonante más bajo, TEM_{00} , que es aquel que genera efectivamente un frente de onda con distribución gaussiana de intensidad. La cavidad resonante más conveniente es la hemifocal, constituida por un espejo esférico y otro plano, estando ubicado este último en el foco de aquél. El haz según el cual se propaga dicho frente de onda poseerá líneas de propagación hiperbólicas y el diámetro mínimo de la sección del haz o cintura del haz W_0 , quedará determinada por:

$$W_0 = \sqrt{\frac{D \lambda}{\pi}} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda de la radiación y D la distancia entre los espejos. La figura 1 describe la situación experimental señalada. Las dos asíntotas de las líneas de propagación hiperbólicas permiten definir el ángulo de divergencia del haz emitido por el láser, según:

$$\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad (2)$$

La expresión de la divergencia (2) claramente indica que se obtendrán haces de radiación láser más y más direccionales, si se incrementa la cintura W de los mismos. Para obtener cinturas mayores deben emplearse sistemas ópticos apropiados del tipo de los telescopios afocales de montaje galileano o newtoniano.

Cuando el haz luminoso emitido por el láser atraviesa una lente L_1 de distancia focal f_1 , si su cintura W_0 se ubica a la distancia d_0 de L_1 , resultará enfocado de manera que un nuevo valor de cintura W_1 se obtiene a la distancia d_1 de L_1 . Las relaciones entre dichos parámetros son las siguientes:

$$\frac{1}{W_1^2} = \frac{1}{W_0^2} \left(1 - \frac{d_0}{f}\right)^2 + \frac{1}{f^2} \left(\frac{\pi W_0}{\lambda}\right)^2 \quad (3)$$

$$d_1 = f + \frac{(d_0 - f) f^2}{(d_0 - f)^2 + (\pi W_0^2 / \lambda)^2} \quad (3')$$

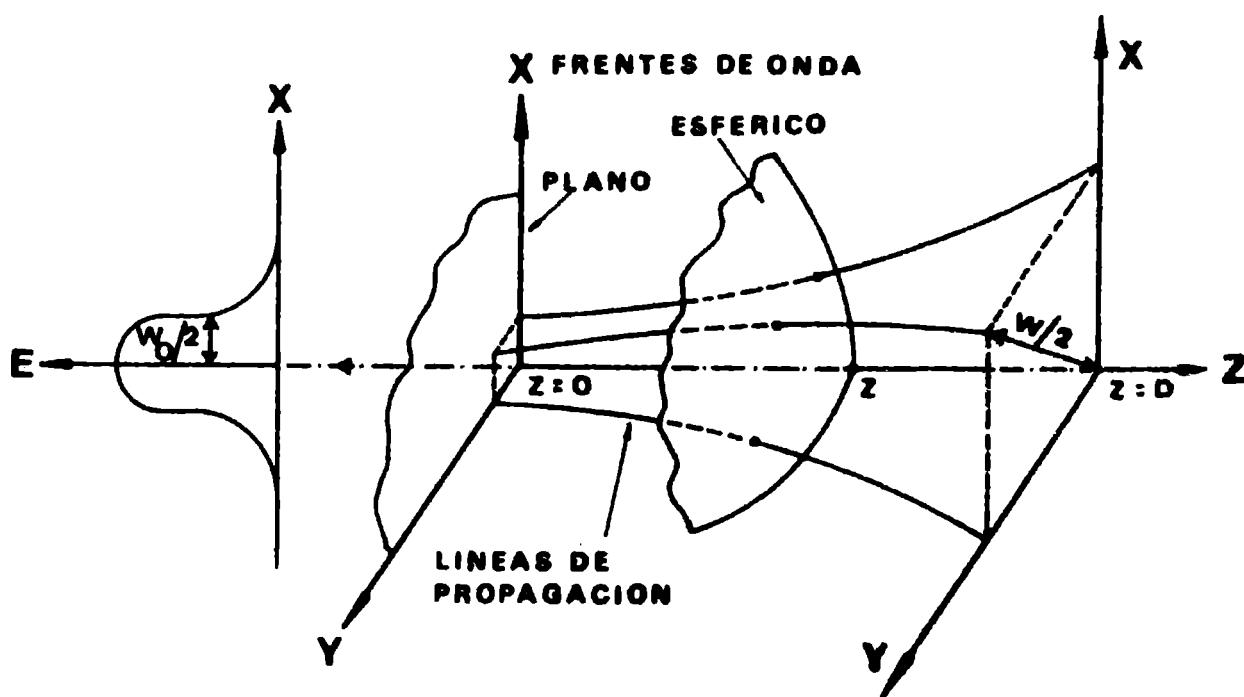


Figura 1

En la práctica, no se puede tener suficiente control sobre las dimensiones de la cintura original del haz W_0 y menos aún sobre su posición en el eje de la cavidad resonante, ya que ambos parámetros dependen fuertemente de las condiciones geométricas y físicas de la cavidad, por lo que, para emplear la fórmula (2) resulta necesario introducir algunas simplificaciones. Ellas son, suponer que la cintura del haz W_0 dentro de la cavidad hemifocal es igual al diámetro del haz emergente del láser y que, por lo tanto, d_0 es prácticamente

igual a f_1 . El resultado de esta simplificación es que:

$$W_1 = \frac{f \lambda}{\pi W_0} \quad (4)$$

La ecuación (4) permite establecer lo siguiente:

- La cintura W_1 del haz enfocado es proporcional a la longitud de onda λ y a la distancia focal f_1 de la lente, así como inversamente proporcional a la cintura W_0 o, dentro de las simplificaciones establecidas anteriormente, proporcional al diámetro del haz incidente sobre la lente. Si la cintura W_0 del haz incidente es mayor que la apertura de la lente, ésta fija el valor de la cintura del haz.
- Para una radiación de longitud de onda λ , la condición de mejor enfoque (W_1 mínimo) se logra para el menor valor del cociente f_1/W_0 , el que a su vez, puede asimilarse a la luminosidad de las lentes, $f_1/\text{número}$.

El análisis referido a la acción de una lente puede extenderse para analizar el acoplamiento de dos lentes con el objeto de formar un sistema telescópico. Para ello, se emplea la ecuación (4) teniendo presente que la cintura del haz de salida de la primera lente -lente expansora- deba ser igual a la cintura del haz que admite la segunda lente -lente colimadora- acoplada a la primera guardando la relación telescópica, esto es, que la diferencia que las separa sea igual a la suma de las respectivas distancias focales. De modo tal que la cintura final del haz W resulta igual a:

$$W_2 = \frac{f_2}{f_1} W_0 \quad (5)$$

Luego, si $f_2 > f_1$, el sistema telescópico produce un incremento de la cintura del haz W_2 o, según la ecuación (2), disminuya su divergencia.

La figura 2 muestra esquemáticamente el efecto telescópico sobre un haz gaussiano, como así también ilustra sobre la profundidad de foco obtenida por

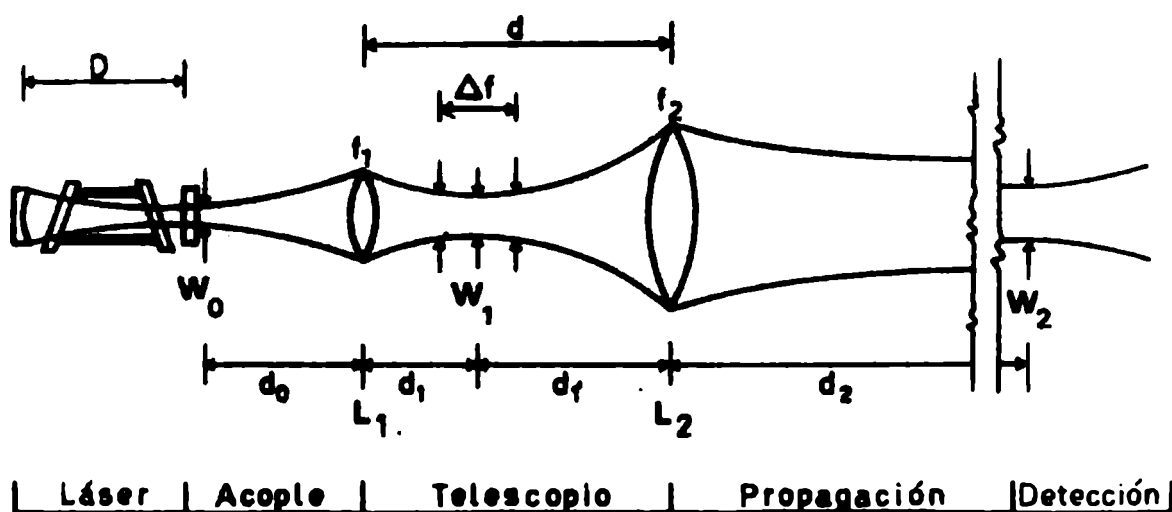


Figura 2

el sistema telescópico. La profundidad de foco Δf se define arbitrariamente como la distancia entre los puntos en los que la cintura del haz W se ha incrementado en un 5%. La aplicación de las expresiones previas, permite calcular Δf como:

$$\Delta f = \frac{0,32 \pi W^2}{\lambda} \quad (6)$$

El acoplamiento de un sistema telescópico a un láser, como el mostrado en la figura 2, permite dos variantes de importancia; por un lado puede disponerse del telescopio a distancias variables de del láser y, por otro, para un valor dado de d_0 , puede desplazarse la lente colimadora variando la distancia d .

El resultado general, sin embargo, produce la variación de la distancia d_2 a la que se encuentra la cintura final del haz W_2 .

El análisis de estos dos procesos de enfoque de un haz gaussiano a distancias variables, puede hacerse derivando la expresión (3'). Una variación Δd_0 en la posición d_0 del telescopio con respecto al láser produce una variación en la posición de la cintura final W_1 igual a:

$$\Delta d_1 = \frac{f_1^2 D^2 - f_1^2 (d_0 - f_1)^2}{\{(d_0 - f_1)^2 + D^2\}^2} \Delta d_0 \quad (7)$$

A su vez, una variación de la distancia relativa d entre las lentes significa una variación de la distancia d' , de tal modo que se producirá un cambio en la posición de la cintura final W_1 del haz, igual a:

$$\Delta d_2 = \frac{f_2^2 (\pi W_1^2 / \lambda)^2 - f_2^2 (d'_1 - f_2)^2}{\{(d'_1 - f_2)^2 + (\pi W_1^2 / \lambda)^2\}^2} \Delta d'_1 \quad (8)$$

Resulta evidente que el signo de Δd_1 y Δd_2 en las expresiones (7) y (8), respectivamente, depende de las relaciones que guarden D , $d_0 - f_1$, y W_1^2 / λ , $d'_1 - f_2$.

De este modo, empleando un láser de He-Ne con emisión en $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ y 2 mW de potencia pueda proyectarse un haz luminoso a diferentes distancias y sobre pequeñas áreas muy brillantes. Sin embargo, las pequeñas áreas iluminadas por la luz del láser pueden tener una distribución de intensidad sumamente irregular. Esta situación se supera totalmente introduciendo en la posición de la cintura W_1 un diafragma de pequeña apertura que actúa como filtro espacial. La figura de difracción producida por el filtro espacial cuando incide sobre él la radiación del láser concentrada por la lente expansora L_1 , se proyecta sobre el plano de la lente colimadora L_2 , de modo que su lóbulo central ilumina completamente la pupila de salida de L_2 . Se obtiene así una iluminación regular según una distribución de campana, de perfil aproximadamente gaussiano, en la cintura final de W_2 .

La figura 3 muestra una fotografía de laboratorio del sistema óptico de enfoque y del láser.

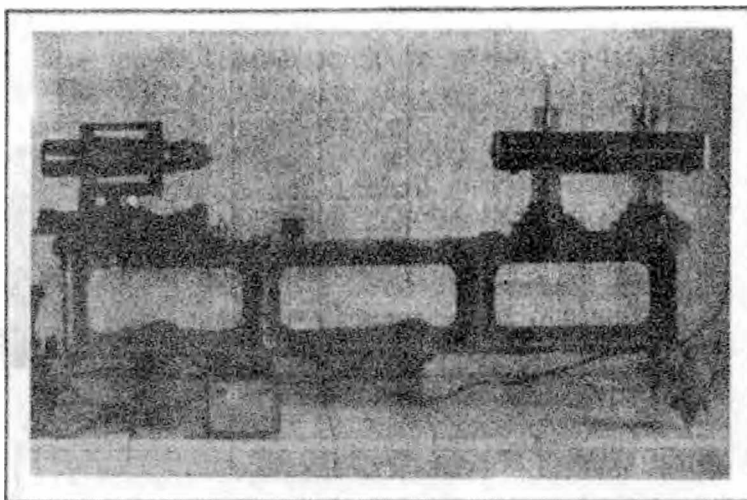


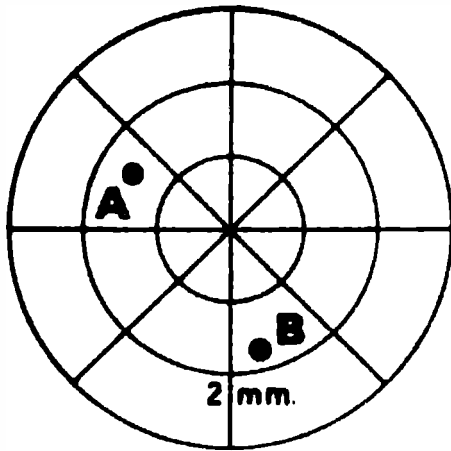
Figura 3

Es así como el haz del láser se puede concentrar hasta tener diámetros menores que $50\ \mu\text{m}$, de manera que el punto luminoso sobre los blancos se hace tan brillante que permite su detección aún con luz ambiente intensa. Es interesante destacar que, en las experiencias que se describen, este método ha sido utilizado sin inconvenientes a pesar de las grandes variaciones de intensidad de la luz ambiente en las distintas zonas de trabajo; regiones con iluminación natural (luz del día), iluminación artificial y penumbra. Entonces, la luz del láser se puede proyectar enfocándola sobre blancos provistos de marcas fiduciarias adecuadas para la observación visual de la mancha luminosa, o sobre placas fotográficas, para registrar el lugar de su incidencia o sobre detectores para controlar electrónicamente su posición. La figura 4 muestra ejemplos de cada uno de ellos. Si el láser empleado emite radiación linealmente polarizada, puede variarse convenientemente la sensibilidad del método introduciendo en el camino óptico entre el láser y el telescopio un polarizador. Con él se varía la intensidad del haz sobre los diferentes tipos de blancos para facilitar la observación de las manchas luminosas. Con cualesquiera de esos instrumentos de detección instalados sobre las piezas, vigas, columnas o componentes de grandes estructuras, es posible determinar sus deformaciones bajo cargas midiendo con gran precisión las variaciones de la posición del punto luminoso. Las estructuras pueden ser metálicas o de hormigón y de diferentes tipos, como las de edificios, bases de grandes máquinas, puentes, caminos, presas, etcétera.

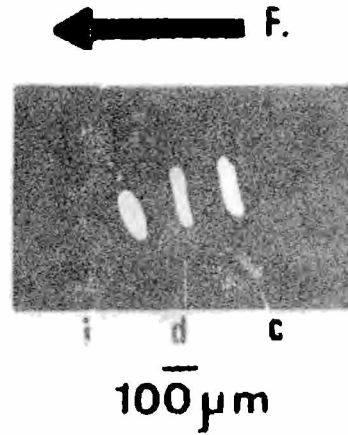
3. APLICACIONES DEL SISTEMA OPTICO A LASER PARA DETERMINAR RECTAS Y PLANOS Y SUS RELACIONES

Una aplicación del sistema óptico de enfoque permite determinar rectas en el espacio. En efecto, para materializar la recta representada por el haz es necesario determinar las coordenadas espaciales de por lo menos dos puntos contenidos en ella. Para ubicar estos puntos se utilizan blancos provistos de movimientos micrométricos según los tres ejes coordenados. El haz proveniente del sistema óptico se enfoca sucesivamente sobre el plano de los blancos y su posición exacta se determina moviendo los tornillos micrométricos.

Los blancos, como ya se señaló anteriormente, pueden ser placas con mar-



a) A y B corresponden a las observaciones antes y después de aplicar la carga.



b) Ampliación en positivo de una placa de registro.

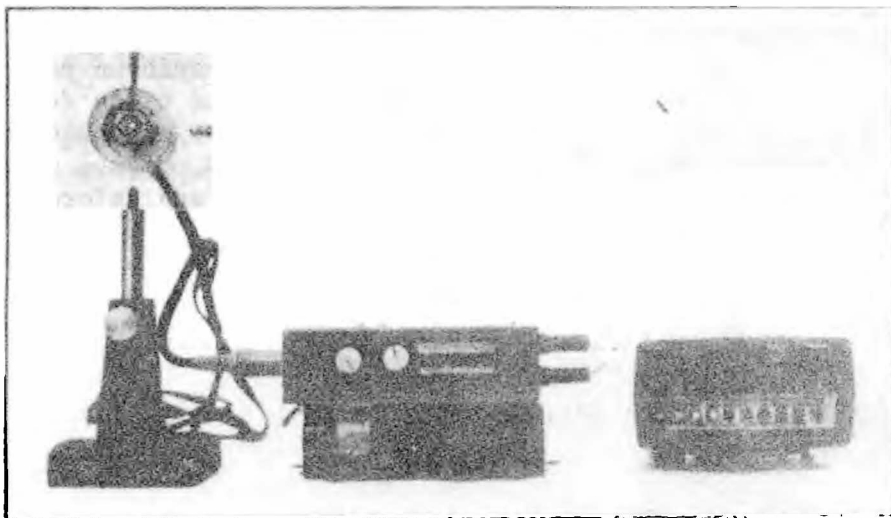
F: Fuerza de carga

i: Estado inicial

c: Estado de carga

d: Estado de descarga

Pueden determinarse el módulo de la deformación y el ángulo que ella forma con la línea de acción de F.



c) Detector de cuadrante con su fuente de alimentación y visor digital.

Figura 4

cas fiduciarias útiles para la observación visual o detectores fotoelectrónicos. En este caso, los registros fotográficos resultarían muy engorrosos, por lo que no se recomienda su empleo.

La ubicación de los puntos brillantes que definen una recta mediante el uso del sistema de alineación a láser fue verificada con un autocolimador. Esta verificación se realizó montando ambos instrumentos en un eje óptico común. La distancia entre ellos fue de 30 m. Las posiciones de los puntos sucesivos enfocados con el sistema a láser se comprobaron con el autocolimador, encontrándose que las mismas correspondían a una recta dentro de las precisiones del anteojo.

Para determinar planos en el espacio haciendo uso del sistema óptico descrito, pueden emplearse las dos variantes siguientes: una a espejo rotatorio y otra a red plana de difracción por transmisión o reflexión.

Cuando un haz de luz incide sobre un espejo plano que rota, el haz reflejado describe en general una superficie cónica. Si el haz incidente es perpendicular al eje de rotación del espejo, la superficie dada por rotación del haz reflejado degenera en un plano que es perpendicular al eje de rotación del espejo y contiene al haz incidente. Para materializar un plano π que contenga una recta r dada, se hace pasar un haz por los puntos pertenecientes a ella, y se lo hace incidir sobre un espejo plano montado en un sistema que permita fijar un eje de rotación perpendicular al haz incidente. El haz reflejado determina un plano π en el sentido de que, con una adecuada combinación del sistema de enfoque y la rotación del espejo, se puede materializar cualquier punto de dicho plano en el espacio mediante los blancos con movimientos xyz antes mencionados.

La otra variante consiste en utilizar una red de difracción de transmisión o de reflexión. El plano de la red debe ser perpendicular a una recta r , previamente determinada, contenida en el plano π que se desea materializar. Si la red de difracción se elige de modo que posea una constante baja, por ejemplo 70 líneas/mm, se obtienen 35 haces coplanares, correspondientes a los sucesivos órdenes de difracción. Mediante los blancos provistos de movimientos métricos xyz se pueden materializar los puntos del plano π que se desea definir en el espacio.

La determinación de planos perpendiculares entre sí, se realiza con la metodología siguiente. Dada una recta r contenida en un plano π , el conjunto de todas las rectas perpendiculares a r en un punto P de ella determinan un plano que es perpendicular a π . Entonces, dado un plano π materializado por la rotación de un espejo, para determinar un plano perpendicular a π , se toma un haz reflejado en el espejo y se lo hace incidir sobre un prisma cubo (escuadra óptica) de manera que la reflexión sobre la primera cara coincida con el haz incidente i . En tal caso, el haz transmitido que se refleja en la interfase, emergerá perpendicular al haz i . Al rotar al prisma alrededor del haz i manteniendo la condición para el haz reflejado en la primera cara, el haz emergente describirá un plano perpendicular al plano π , que puede ser materializado mediante la selección de algunos de sus puntos por el método de los blancos con montaje xyz. En lugar de un prisma cubo se puede emplear también un pentaprisma.

El trazado de una recta perpendicular a un plano se lleva a cabo de la siguiente manera. La traza de la intersección de dos planos perpendiculares a

un tercero es perpendicular a éste. Luego, para describir una recta perpendicular a un plano dado π , materializado por un espejo que rota, es suficiente determinar los planos perpendiculares a dos rectas contenidas en π , y la traza de su intersección será la recta buscada. Para esto se emplean dos espejos rotatorios que determinan el mismo plano π . Tal determinación se consigue imponiendo al segundo espejo, la condición de que el haz reflejado en él se enfoque en un punto del plano π , que no pertenezca a la recta determinada por el haz incidente.

Por último, la determinación de rectas paralelas entre sí se obtiene teniendo en cuenta que dos rectas perpendiculares a un mismo plano π son paralelas. Luego, para determinar dos rectas paralelas que pasen por dos puntos A y B del plano π es suficiente aplicar lo referido a la determinación de una perpendicular colocando sucesivamente el prisma cubo en tales puntos.

La sucesiva aplicación de la determinación de rectas perpendiculares a planos permite, a su vez, materializar dos planos paralelos entre sí.

Con el instrumental y la técnica desarrollados se obtienen excelentes resultados en la determinación de las coordenadas de puntos en el espacio, con precisiones del orden de los 10 μm . Esa misma precisión se extiende también a la determinación de rectas y planos en el espacio y a las diferentes relaciones entre dichos elementos. De este modo, se tiene dominio de una tecnología capaz de atender el control de calidad del maquinado de grandes piezas complejas, como blocks de motores, cigüeñales, tapas de cilindros, etcétera.

4. APLICACIONES DEL DISPOSITIVO Y METODOLOGIA DESCRIPTOS

El dispositivo óptico a láser y la metodología para trazar rectas y describir planos en el espacio, así como para determinar las relaciones de paralelismo y perpendicularidad entre rectas, entre rectas y planos y entre planos fueron aplicados en diversas verificaciones e inspecciones de campo (1). En ellas se trabajó hasta distancias de 26 m y con precisiones adecuadas a los requerimientos, siendo la mayor obtenida del orden de los 10 μm .

El dispositivo y la metodología descriptos son de construcción e implementación simple, respectivamente, para aquellos que poseen un entrenamiento conveniente.

5. AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, al Servicio Naval de Investigación y Desarrollo, a la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología y a la Organización de los Estados Americanos (Programa Multinacional de Física de La Plata).

REFERENCIAS

- (1) *Alineación empleando un sistema óptico de enfoque y un láser. Aplicaciones en la industria naval.* L.M. Zerbino, H.J. Rabal, H.F. Ranea Sandoval, J.O. Tocho, M. Gallardo y M. Garavaglia. *Ingeniería Naval (España)* 524, 48, 1979.