



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN TREN ÓPTICO PARA EL EXPERIMENTO DE BIRREFRINGENCIA BICOLOR DE ALTA RESOLUCIÓN

T E S I S
Que para obtener el Título de INGENIERO MECÁNICO
P r e s e n t a

Juan Pablo Jiménez de la Rosa



2.80655



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

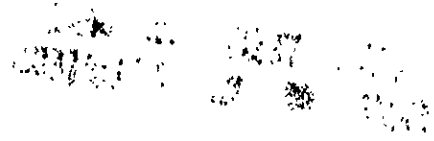


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



A mis padres

A Araceli

Agradecimientos

Este trabajo de tesis se llevó a cabo gracias al apoyo brindado por el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Agradezco la beca otorgada por este Instituto y por el Programa de Becas Tesis de Licenciatura (PROBETEL).

Agradezco profundamente al Dr. Enrique Geffroy por las numerosas (muy numerosas) observaciones, correcciones, aportaciones, críticas, bromas, etcétera, relacionadas con esta tesis, pero sobre todo por la infinita paciencia y por el enorme conocimiento transmitido.

Muchas gracias al equipo de trabajo del Laboratorio de Reología Óptica por su ayuda y colaboración, en especial a Gerardo Guevara por haber domado a Flory, Edwards, Coulomb, Kafka y Compañía hasta convertirlas en eficientes herramientas de trabajo. Muchas gracias también a Tere, Laura y Fernando (Pillín) por su alegre compañía y por compartir ideas, éxitos, fracasos, sopas Maruchan y rolas MP3 durante la realización de nuestras tesis.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería por haberme ofrecido la oportunidad de pertenecer a esa gran comunidad, en especial a los profesores Yukihiro Minami y Pablo García y Colomé porque además de brindarme conocimientos y consejos valiosos, me brindaron su aún más valiosa amistad. A mis cuates de la FI por todos esos exámenes y tareas comentados (después de la entrega, claro está), por todo el esfuerzo en conjunto, por el largo camino recorrido en equipo, por todos los proyectos realizados.

Muchísimas gracias a Pablo y Martha por... pues por todo; a Yica por haberme enseñado a leer y a enfrentar al mundo; a Mali por su cariño; al Spell por su amistad; a Nani por ayudarme con esta tesis. A Célibataire, gracias por tu apoyo, por tu paciencia, por tu amor.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. El Estudio de los Líquidos Poliméricos	5
1.1. Los Materiales Poliméricos	7
1.1.1. Los polímeros en la industria	7
1.1.2. El comportamiento de los polímeros: viscoelasticidad	9
1.1.3. Avances tecnológicos en los polímeros	11
1.2. Flujos Fuertes y Débiles	12
1.2.1. El molino de dos rodillos	13
1.2.2. Polímeros bajo grandes deformaciones	15
1.3. Técnicas Ópticas: Birrefringencia Bicolor Inducida por Flujos	17
1.3.1. Las técnicas de análisis	17
1.3.2. Anisotropía óptica en líquidos poliméricos	18
1.3.3. La técnica de Birrefringencia Bicolor Inducida por Flujos	20
CAPÍTULO 2. Descripción y Diseño Conceptual del Tren Óptico	25
2.1. El Arreglo Óptico para BBIF	27
2.1.1. Descripción del arreglo óptico	27
2.1.2. Características técnicas de los elementos principales	33
2.1.3. Grados de Libertad	35
2.2. Condiciones de Precisión	39
2.2.1. Colinealidad	39
2.2.2. Coincidencia de los puntos de convergencia	40
2.2.3. Orientación de la polarización	41
2.3. Estudio Preliminar del Diseño de Precisión	42
2.3.1. Función de las monturas ópticas	42
2.3.2. Modelos Teóricos de Monturas	43
CAPÍTULO 3. Diseños de Monturas	47
3.1. Monturas Ópticas Genéricas: Precisión y Grados de Libertad	49
3.1.1. Consideraciones previas	49
3.1.2. Montura para lente	52

3.1.3.	Montura para polarizador	53
3.1.4.	Montura para filtro interferométrico	54
3.1.5.	Montura para pinhole	55
3.1.6.	Montura para espejo	56
3.2.	Diseños Detallados	57
3.2.1.	Elementos de diseño	57
3.2.2.	Decisiones previas	58
3.2.3.	Mesa y Plataforma	59
3.2.4.	Dispositivo de dirección	61
3.2.5.	Diseño de las Bases Comunes	61
3.2.6.	Montura A (para espejos)	66
3.2.7.	Montura B (para lentes)	67
3.2.8.	Montura C (polarizador azul)	69
3.2.9.	Montura D (filtro azul)	73
3.2.10.	Sujetador de filtro interferométrico azul	77
3.2.11.	Montura para pinhole: E y F	78
3.2.12.	Montura G (lente objetivo)	78
3.2.13.	Montura H (divisor de haces)	81
3.2.14.	Montura I (filtro verde)	81
3.2.15.	Montura J (haz verde)	81
3.2.16.	Montura K (espejo secundario)	90
3.3.	Calibración del Tren Óptico	91
3.3.1.	Posición de los ejes ópticos y del goniómetro	92
3.3.2.	Acondicionamiento del haz azul	97
3.3.3.	Acondicionamiento del Haz Verde	100
3.3.4.	Lente Objetivo	102
3.3.5.	Detectores y analizadores	102
	CONCLUSIONES	103
	BIBLIOGRAFÍA	105
	ANEXO A	107
	ANEXO B	109
	ANEXO C	110
	ANEXO D.....	114

Objetivo

En esta Tesis se desarrolla un trabajo de diseño mecánico cuyo objetivo es obtener las monturas para los diferentes elementos —lentes, polarizadores, filtros espejos y diafragmas— que componen el tren óptico del experimento de *Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución*. Dadas las exigencias de alta resolución, exactitud y repetibilidad de este experimento, dichas monturas deben permitir los ajustes necesarios en cada elemento óptico para realizar una calibración completa del tren.

Hipótesis

La realización de este trabajo se basa esencialmente en la aplicación del concepto teórico de *grados de libertad*, los cuales representan las posibilidades de movimiento de traslación y rotación necesarias en cada elemento óptico para su calibración. El número de *grados de libertad* de cada elemento óptico se deduce analizando su principio de funcionamiento y sus características técnicas. La definición de las monturas se realiza a partir de la información de *grados de libertad* y de las condiciones de precisión impuestas por el experimento, utilizando criterios de diseño de precisión.

Definición del problema

El arreglo óptico del experimento consta de aproximadamente veinte elementos ópticos que difieren en el número de *grados de libertad* y en los requerimientos de precisión a los que están sujetos. Por tanto, es necesario diseñar una montura adecuada para cada uno de los diferentes elementos. Para simplificar el problema se definen monturas genéricas que resuelvan teóricamente las funciones requeridas por clases generales de elementos ópticos, y más adelante se detallan tales monturas genéricas para adecuarlas a las necesidades específicas de cada elemento dentro del *tren óptico del experimento*.

Se utiliza como herramienta un software de diseño mecánico llamado *Mechanical Desktop (Autodesk)*, que permite crear modelos virtuales en tres dimensiones de las partes mecánicas, simular los ensambles, llevar a cabo modificaciones, y generar los planos finales de fabricación de cada una de las partes. Además, estos modelos virtuales permitirán en un futuro generar los códigos de control numérico para fabricar las partes necesarias.

Objetivo

En esta Tesis se desarrolla un trabajo de diseño mecánico cuyo objetivo es obtener las monturas para los diferentes elementos —lentes, polarizadores, filtros espejos y diafragmas— que componen el tren óptico del experimento de *Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución*. Dadas las exigencias de alta resolución, exactitud y repetibilidad de este experimento, dichas monturas deben permitir los ajustes necesarios en cada elemento óptico para realizar una calibración completa del tren.

Hipótesis

La realización de este trabajo se basa esencialmente en la aplicación del concepto teórico de *grados de libertad*, los cuales representan las posibilidades de movimiento de traslación y rotación necesarias en cada elemento óptico para su calibración. El número de grados de libertad de cada elemento óptico se deduce analizando su principio de funcionamiento y sus características técnicas. La definición de las monturas se realiza a partir de la información de *grados de libertad* y de las condiciones de precisión impuestas por el experimento, utilizando criterios de diseño de precisión.

Definición del problema

El arreglo óptico del experimento consta de aproximadamente veinte elementos ópticos que difieren en el número de grados de libertad y en los requerimientos de precisión a los que están sujetos. Por tanto, es necesario diseñar una montura adecuada para cada uno de los diferentes elementos. Para simplificar el problema se definen monturas genéricas que resuelvan teóricamente las funciones requeridas por clases generales de elementos ópticos, y más adelante se detallan tales monturas genéricas para adecuarlas a las necesidades específicas de cada elemento dentro del tren óptico del experimento.

Se utiliza como herramienta un software de diseño mecánico llamado *Mechanical Desktop (Autodesk)*, que permite crear modelos virtuales en tres dimensiones de las partes mecánicas, simular los ensambles, llevar a cabo modificaciones, y generar los planos finales de fabricación de cada una de las partes. Además, estos modelos virtuales permitirán en un futuro generar los códigos de control numérico para fabricar las partes necesarias.

Objetivo

En esta Tesis se desarrolla un trabajo de diseño mecánico cuyo objetivo es obtener las monturas para los diferentes elementos —lentes, polarizadores, filtros espejos y diafragmas— que componen el tren óptico del experimento de *Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución*. Dadas las exigencias de alta resolución, exactitud y repetibilidad de este experimento, dichas monturas deben permitir los ajustes necesarios en cada elemento óptico para realizar una calibración completa del tren.

Hipótesis

La realización de este trabajo se basa esencialmente en la aplicación del concepto teórico de *grados de libertad*, los cuales representan las posibilidades de movimiento de traslación y rotación necesarias en cada elemento óptico para su calibración. El número de grados de libertad de cada elemento óptico se deduce analizando su principio de funcionamiento y sus características técnicas. La definición de las monturas se realiza a partir de la información de grados de libertad y de las condiciones de precisión impuestas por el experimento, utilizando criterios de diseño de precisión.

Definición del problema

El arreglo óptico del experimento consta de aproximadamente veinte elementos ópticos que difieren en el número de grados de libertad y en los requerimientos de precisión a los que están sujetos. Por tanto, es necesario diseñar una montura adecuada para cada uno de los diferentes elementos. Para simplificar el problema se definen monturas genéricas que resuelvan teóricamente las funciones requeridas por clases generales de elementos ópticos, y más adelante se detallan tales monturas genéricas para adecuarlas a las necesidades específicas de cada elemento dentro del tren óptico del experimento.

Se utiliza como herramienta un software de diseño mecánico llamado *Mechanical Desktop (Autodesk)*, que permite crear modelos virtuales en tres dimensiones de las partes mecánicas, simular los ensambles, llevar a cabo modificaciones, y generar los planos finales de fabricación de cada una de las partes. Además, estos modelos virtuales permitirán en un futuro generar los códigos de control numérico para fabricar las partes necesarias.

Introducción

La importante participación de los materiales poliméricos en el desarrollo de la tecnología en los últimos cincuenta años ha exigido una intensa investigación científica dirigida al entendimiento del comportamiento físico y químico de estos materiales, con la finalidad de mejorar sus propiedades y de obtener procesos de producción y manufactura más eficientes.

Una de las características físicas de los materiales poliméricos de interés al buscar mejorías en sus propiedades es la estructura molecular. Se sabe que la estructura polimérica, formada por largas cadenas moleculares, es generalmente aleatoria; sin embargo, bajo ciertas condiciones puede presentar un ordenamiento que influye de manera crítica en las propiedades mecánicas del material. De ahí la importancia de estudiar las condiciones que provocan el ordenamiento molecular y las consecuencias que este último tiene en propiedades tales como la viscosidad, la resistencia mecánica, o las propiedades ópticas del material.

La estructura de un material polimérico en estado líquido o de una solución polimérica tiende a cambiar, por ejemplo, cuando se encuentra sometida a un flujo. En particular, es posible obtener un alineamiento de las moléculas poliméricas cuando el fluido se encuentra dentro de un flujo elongacional puro. Tal configuración de moléculas alineadas es de gran interés en la investigación de ciencia de materiales poliméricos ya que permite llevar a cabo estudios de dinámica de polímeros sometidos a grandes deformaciones, como las que se presentan durante algunos procesos de conformado. Además, la obtención de polímeros de moléculas alineadas tiene importantes aplicaciones industriales, como la fabricación de fibras.

En el Laboratorio de Reología Óptica del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM se desarrolla un experimento denominado *Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución* con el objetivo de estudiar las propiedades viscoelásticas de líquidos poliméricos sometidos a flujos especiales que inducen grandes deformaciones en la estructura polimérica. Basándose en la medición de la propiedad óptica de birrefringencia del fluido polimérico en estudio, esta técnica permite estudiar los tiempos de relajamiento del material a través de situaciones de flujo variables con el tiempo, con el fin de obtener modelos de dinámica no lineal de polímeros.

El experimento de Birrefringencia Bicolor utiliza un arreglo óptico compuesto por alrededor de veinte elementos ópticos, cada uno de ellos asociado a cierto número de grados de

libertad, que requieren ser ajustados de forma independiente. El procedimiento de ajuste de estos elementos ópticos presenta una gran complejidad debido a varias razones: la primera es que la operación simultánea de numerosos elementos ópticos da lugar a un sistema de muchas variables independientes por controlar; la segunda es que cada uno de los elementos presenta tanto errores en su fabricación como incertidumbre en sus características que deben ser corregidos; una tercera razón es que el experimento en cuestión es de alta resolución por lo que el manejo de los elementos ópticos debe realizarse con altos niveles de precisión.

El objetivo de esta tesis es diseñar las monturas ópticas adecuadas para los componentes del tren óptico, que permitan los ajustes necesarios en cada elemento para realizar una calibración completa del tren óptico satisfaciendo los criterios de alta resolución, exactitud y repetibilidad que exige la técnica de Birrefringencia Bicolor.

Para alcanzar este objetivo es necesario conocer con detalle los requerimientos de precisión del equipo experimental, así como las características técnicas, los errores de fabricación y las necesidades de ajuste de cada componente óptico.

En el Capítulo 1 se explica el contexto en el que se sitúa el experimento de Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución: se justifica la necesidad de investigar el comportamiento de los líquidos poliméricos con fines de desarrollo tecnológico, y se proporcionan los fundamentos teóricos de la mecánica de flujos fuertes (flujos que inducen cambios estructurales) así como los principios en que se basan las técnicas ópticas de estudio de fluidos poliméricos. La finalidad de este primer Capítulo es contribuir a la comprensión del problema planteado para definir las primeras etapas de todo proceso de diseño, a saber: (1) el planteamiento de la necesidad, que en el caso de este trabajo consiste en obtener las monturas ópticas que permitan calibrar el tren óptico con la mayor precisión así como llevar a cabo mediciones de birrefringencia con la exactitud, resolución y repetibilidad que el proyecto exige; y (2) la definición del problema, que estriba en construir estas monturas a partir de elementos comerciales y piezas fabricadas con las máquinas y herramientas disponibles en los talleres del Instituto de Investigaciones en Materiales, bajo las especificaciones determinadas por las condiciones de precisión que requiere el experimentalista.

En el Capítulo 2 se describe la configuración propuesta para el arreglo óptico y se analiza la función que cada elemento efectúa, con el objeto de definir los requerimientos

básicos (grados de libertad) para el diseño de cada montura óptica. Se realiza una investigación acerca de los elementos que componen al tren óptico para conocer sus características técnicas, así como los márgenes de error presentes en los componentes reales, mismos que deben ser corregidos por las monturas ópticas. Finalmente, toda esta información se integra con los conceptos del diseño mecánico de precisión en que se basan los diseños conceptuales propuestos en este mismo Capítulo.

El Capítulo 3 contiene los diseños de configuración para las monturas genéricas de cinco componentes ópticos principales: espejo, lente, filtro, polarizador y *pinhole*. A partir de estas monturas genéricas se establecen los diseños detallados de las monturas ópticas para cada elemento, tomando en consideración los criterios de precisión (resolución, intervalo de funcionamiento, repetibilidad), los *criterios dimensionales* (espacio disponible, altura del haz), la compatibilidad con las partes e instrumentos comerciales, y la eficiencia de la montura en el procedimiento global de calibración del tren. El diseño de las monturas ópticas utiliza un máximo de elementos comerciales disponibles en el Laboratorio de Reología Óptica, fabricando las partes necesarias para adecuar las bondades de estas partes comerciales a las *necesidades de cada montura*. Se busca también que a través de las partes fabricadas, el conjunto de monturas sea homogéneo en su geometría y coherente en su utilización por parte del experimentalista. En este mismo Capítulo se plantea un procedimiento de calibración del tren óptico que muestra la realización de cada uno de los ajustes de los elementos ópticos utilizando las monturas diseñadas.

Capítulo

1

El Estudio de los Líquidos Poliméricos

1.1. Los Materiales Poliméricos

La utilización en la industria de los materiales poliméricos ha significado una revolución en la civilización humana debido al gigantesco número de productos que se obtienen a partir de dichos materiales. Esta participación tan importante de los polímeros en la actividad industrial es consecuencia de las interesantes y variadas propiedades químicas y físicas que presentan. El estudio de tales propiedades, con el fin de entenderlas, predecirlas y mejorarlas, ha ocupado fuertemente la atención de ingenieros y científicos de esta nueva era. De esta forma, la búsqueda de modelos físicos para explicar la viscoelasticidad de los polímeros, así como de nuevas técnicas de procesamiento y manufactura de estos materiales, se convierte en la actividad principal para asegurar el futuro de la industria de los polímeros.

1.1.1. Los polímeros en la industria

Actualmente, los polímeros tienen un enorme número de aplicaciones en la industria. Desde su aparición en la década de los treinta, han reemplazado a los materiales tradicionales como el acero, el cobre, el aluminio, la madera o el vidrio en muchas aplicaciones. En los últimos cincuenta años, la variedad de materiales poliméricos, así como la producción de cada uno de ellos, ha aumentado en forma exponencial. Hoy, la categoría de materiales formada por los polímeros cuenta con más de 10 000 elementos diferentes, todos con aplicaciones industriales. En mucho menos de un siglo, los materiales poliméricos se han convertido en una característica de la civilización humana actual por su importante utilización.

La categoría de materiales poliméricos comprende una amplia variedad de materiales que poseen propiedades y características diferentes. Esta amplia variedad se debe a que los polímeros están formados por moléculas básicas que pueden combinarse mediante reacciones químicas para formar nuevos compuestos, con propiedades físicas y químicas específicas. Además de estas combinaciones químicas, es posible crear aleaciones y mezclas de polímeros con propiedades aún diferentes a las de los polímeros originales. Es así como la industria química produce más de 10 000 polímeros sintéticos diferentes a partir de algunas docenas de moléculas básicas. De esta enorme diversidad de polímeros se obtiene una gigantesca cantidad de productos en la industria del vestido, de la construcción, del empaque, de la medicina, del transporte, y de la fabricación de electrodomésticos y utensilios.

Las ventajas que presentan los polímeros con respecto a los materiales naturales justifica el importante papel que juegan los primeros en la industria. Una de las ventajas principales de los materiales poliméricos es que tienen una relación costo-desempeño superior a la

de otros materiales. Tal es el caso de los plásticos resistentes que han sustituido al acero por tener propiedades mecánicas adecuadas para fabricar herramientas y electrodomésticos a un costo menor. Otros ejemplos son el nylon, que ha reemplazado a la seda, y el poliéster, que ha reemplazado al algodón, por tener texturas similares, pero con costos menores y mayor durabilidad. Igualmente, el polietileno, el policloruro de vinilo (PVC) y el poliestireno han desplazado al papel y al aluminio en la industria del empaque por su mejor desempeño y muy bajo costo de producción.

La utilización de los polímeros en la industria ha evolucionado. En un principio, los materiales poliméricos fueron introducidos como substitutos de materiales naturales. Poco a poco, el uso de los polímeros se ha vuelto necesario, a tal grado que muchos productos de consumo cotidiano no podrían imaginarse ya sin la utilización de estos materiales. En la actualidad, la utilización de los polímeros se manifiesta desde la etapa de concepción de nuevos productos: los polímeros han dejado de ser substitutos de otros materiales para convertirse en una parte esencial del proceso de diseño. La tendencia hacia el futuro es generar los materiales poliméricos adecuados para cada aplicación tecnológica.

Ahora bien, tanto el mejoramiento como el aprovechamiento de las propiedades de los polímeros está basado en un conocimiento profundo de la química, física y los procesos de producción y manufactura de estos materiales. Por una parte, la investigación en ciencia de materiales ha demostrado que las propiedades de los polímeros pueden mejorar de forma importante a través de aleaciones y mezclas, así como con la introducción de materiales nuevos creados químicamente. Estos dos caminos constituyen dos líneas de investigación muy vastas en la síntesis de polímeros. Por otra parte, el aprovechamiento de estos materiales innovadores sólo puede realizarse si se desarrollan procesos de producción y manufactura rápidos, económicos y que además consideren los costos ecológicos del "ciclo de uso" de cada tipo de material. En conclusión y de cara al nuevo milenio, es importante llevar a cabo una gran actividad científica y tecnológica en la ciencia e ingeniería de materiales para que los polímeros continúen contribuyendo al bienestar de la humanidad en formas aún más provechosas de como lo han hecho en los últimos 70 años. De la misma forma que los primeros materiales sintéticos, como la bakelita y el nylon¹, fueron creados a partir de la investigación científica, el desarrollo de nuevos materiales poliméricos de alta tecnología será fruto de las necesidades futuras bien planteadas.

1. En 1907, el químico Leo Baekeland inventó el primer material totalmente sintético que él mismo llamó *bakelita* en honor a su apellido. En 1938, tras varios años de investigación, la compañía Du Pont obtuvo la fibra sintética denominada *nylon*.

1.1.2. El comportamiento de los polímeros: viscoelasticidad

Es necesario entender el comportamiento de los polímeros para utilizarlos en aplicaciones industriales y de ingeniería. Por ejemplo, la resistencia mecánica puede ser producto de un alineamiento de las cadenas moleculares en la estructura del polímero, o debido a una alta densidad molecular. Es evidente que además de presentar ventajas, los polímeros tienen otras propiedades que pueden resultar en inconvenientes si no se tiene un claro entendimiento de ellas. Algunos casos son el raro comportamiento viscoso que dificulta enormemente la manufactura de productos, las transiciones experimentadas en la estructura molecular con los cambios de temperatura (transición vítrea, cristalización, degradación), e incluso la propia durabilidad que es la causa de la no degradabilidad de los productos fabricados a base de polímeros y que es un problema ecológico no despreciable.

En comparación con otras sustancias, los polímeros en estado líquido tienen una conducta difícil de predecir que puede dar lugar a problemas en las aplicaciones industriales. Algunos ejemplos experimentales que muestran este comportamiento anormal se obtienen al comparar un líquido polimérico con una sustancia simple como el agua [1]. En un proceso de extrusión, un fluido simple produce un chorro cuyo diámetro disminuye progresivamente, mientras que un líquido polimérico muestra una expansión en la salida del tubo. Al aspirar agua a través de un sifón, el flujo se detiene cuando la extremidad del tubo de aspiración pierde contacto con el agua; si se trata de un fluido polimérico, el flujo se mantiene aún cuando el tubo ha sido extraído del líquido a una distancia considerable. Estos ejemplos se ilustran en la Figura 1.1.

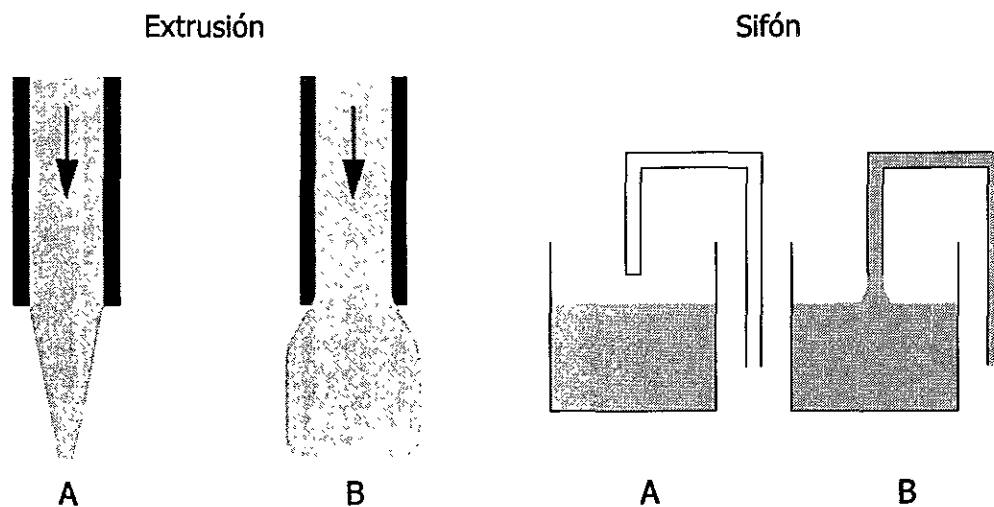


Figura 1.1. Ejemplos experimentales del comportamiento de los líquidos. Las figuras marcadas con letra A corresponden a un líquido simple, como el agua. La letra B corresponde a un líquido polimérico que presenta elasticidad.

Con frecuencia, el comportamiento de los polímeros más simples no puede describirse a partir de ninguna de las dos teorías lineales clásicas, a saber, la teoría elástica y la teoría de la viscosidad. Los sólidos elásticos, como los metales o los materiales cerámicos, obedecen la ley de Hooke para pequeñas deformaciones. Esta ley indica que el esfuerzo es proporcional a la deformación, sin importar la velocidad con que se aplique la carga ni el tiempo que dure su aplicación. Los líquidos viscosos, en cambio, responden ante una fuerza de acuerdo con la ley de Newton, que predice que el esfuerzo es proporcional a la razón de cambio de la deformación, pero es independiente de la deformación en sí.

La conducta de los materiales poliméricos se encuentra en un punto intermedio entre los comportamientos típicos de los sólidos elásticos y de los fluidos viscosos, y se denomina *viscoelasticidad*. Una peculiaridad de los materiales que tienen esta característica, es que a bajas temperaturas se comportan como sólidos elásticos, mientras que a altas temperaturas se comportan como sustancias viscosas.

Asimismo, el comportamiento viscoelástico depende del tiempo y del tipo de esfuerzo o deformación impuesta al material. Cuando se deforma una sustancia viscoelástica regresa a su configuración original después de un cierto periodo de tiempo que se denomina *tiempo de relajamiento*. El tiempo de relajamiento es extremadamente breve en el caso de los líquidos viscosos (del orden de 10^{-10} segundos), y extremadamente largo en el caso de los sólidos elásticos (del orden de 10^{10} segundos). En los líquidos poliméricos, en cambio, los tiempos de relajamiento pueden adquirir valores dentro de un amplio intervalo. El comportamiento de las sustancias viscoelásticas depende de la velocidad con que se aplica la deformación comparada con la velocidad de relajamiento del material [2]. El estudio de la viscoelasticidad consiste en encontrar las relaciones entre las propiedades del material y los tiempos de relajamiento. Estas relaciones o modelos se buscan a través de la experimentación, observando las velocidades de deformación, el retardo de la deformación con respecto del esfuerzo, la dependencia temporal entre el esfuerzo y la deformación, etc. [3]

El estudio del comportamiento viscoelástico y de las propiedades de los líquidos poliméricos requiere de técnicas especiales y de métodos experimentales muy sofisticados [4]. Debido a que las propiedades viscoelásticas son variables con el tiempo, las técnicas experimentales deben enfrentarse a problemas transitorios cuyas velocidades de respuesta son muy diversas. Por ejemplo, en el caso de los polímeros los tiempos de relajamiento pueden variar desde 10^{-9} segundos hasta varios segundos. Además, las deformaciones en fluidos viscoelásticos dan lugar frecuentemente a problemas de dinámica no lineal.

La técnica experimental a la que se dirige el trabajo realizado en esta tesis tiene como objetivo estudiar las propiedades viscoelásticas de líquidos poliméricos sometidos a un flujo especial. Esta técnica permite estudiar los tiempos de relajamiento a través de situaciones de flujo variables con el tiempo, con el fin de obtener modelos de dinámica no lineal de polímeros.

1.1.3. Avances tecnológicos en los polímeros

La investigación científica es la base del desarrollo de nuevos materiales poliméricos y del mejoramiento de las propiedades de los materiales existentes. Esta investigación puede dirigirse hacia el estudio de la estructura molecular polimérica, y hacia el entendimiento de las propiedades viscoelásticas. Es evidente que ambos aspectos están relacionados entre sí, y que también de ambos depende el avance tecnológico de los materiales poliméricas.

Dos técnicas recientes para el desarrollo de polímeros con propiedades interesantes son la elaboración de copolímeros, y la elaboración de mezclas o *blends*¹. Los copolímeros se componen de cadenas moleculares mixtas, formadas por polímeros básicos diferentes [5]. Los *blends* son mezclas de polímeros que poseen propiedades diferentes a las de los constituyentes de dicha mezcla [6].

Un método para mejorar las propiedades mecánicas de un polímero se basa en la diferencia que existe entre los fuertes enlaces covalentes que forman la molécula polimérica, y las débiles fuerzas que existen entre moléculas independientes. Esto significa que la resistencia mecánica de un polímero en la dirección de la cadena molecular es hasta cincuenta veces mayor que la resistencia en la dirección perpendicular. Este es el fundamento físico para desarrollar los llamados *polímeros orientados*, en los que las cadenas moleculares están preferentemente alineadas en una dirección conocida, a diferencia de la estructura convencional aleatoria de las moléculas poliméricas [7]. El estudio de los polímeros orientados es una de las posibles aplicaciones de la investigación a la que se dirige esta tesis.

1. El término en inglés "blend" es comúnmente utilizado para definir este tipo de materiales.

1.2. Flujos Fuertes y Débiles

Existe una clase particular de flujos, denominada *flujos fuertes* que produce grandes deformaciones al actuar sobre fluidos poliméricos e induce alineamientos de las moléculas poliméricas. Estos cambios en la estructura son de gran importancia en el manejo de las propiedades poliméricas y en el estudio de los procesos de conformado. Por ello, resulta interesante estudiar la dinámica molecular bajo condiciones de grandes deformaciones, producidas por un flujo fuerte.

Los flujos fuertes forman parte de una familia de flujos lineales, homogéneos y bidimensionales cuyo campo de velocidades se expresa por la ecuación

$$\mathbf{U} = \Gamma(t) \cdot \mathbf{X},$$

donde \mathbf{U} es el campo de velocidades y \mathbf{X} es la posición. El gradiente $\Gamma(t)$ de este campo de velocidades es independiente de la posición y puede variar en el tiempo, y es de la forma

$$\Gamma(t) = \frac{\dot{\gamma}}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

donde $\dot{\gamma}$ es la "razón de corte" (*shear rate*) y corresponde a la magnitud del gradiente de velocidad, y λ es un parámetro que caracteriza el tipo de flujo. El cociente de la velocidad de deformación (parte simétrica del gradiente de velocidad) entre la vorticidad (parte antisimétrica)¹ para tal campo de velocidades está dado por

$$\frac{\|\mathbf{E}\|}{\|\mathbf{\Omega}\|} = \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda}.$$

Cuando el parámetro λ adquiere valores entre 0 y 1, se tiene un *flujo fuerte*, de tipo extensional y capaz de inducir grandes cambios en la estructura polimérica; cuando $\lambda = 1$, se tiene un flujo puramente extensional; y para valores negativos de λ se tienen *flujos débiles* que producen deformaciones pequeñas. El caso particular en que $\lambda = 0$ corresponde al flujo cortante simple, que no es capaz de inducir grandes cambios en la conformación polimérica, independientemente de la magnitud del gradiente de velocidad.

1. La velocidad de deformación representa las deformaciones que sufre un elemento de fluido en movimiento, mientras que la vorticidad se relaciona con la rotación rígida del volumen.

Las propiedades materiales de todo fluido tales como la viscosidad al corte, primera diferencia de esfuerzos normales, etc., se pueden conocer al medir los esfuerzos inducidos por los flujos antes listados. Desgraciadamente gran parte del conocimiento de propiedades materiales de líquidos poliméricos se ha adquirido utilizando reómetros que producen flujos viscométricos, esto es, esencialmente, flujos débiles como el cortante simple o el flujo de Couette. Un ejemplo de estas técnicas es el dispositivo de cono y plato (del inglés *cone and plate*), utilizado comúnmente en los reómetros, que consiste en dos superficies —una de ellas plana y la otra cónica— entre las que se coloca el fluido polimérico en estudio (ver Figura 1.2). La imposibilidad de generar grandes deformaciones en los polímeros resta valor a este tipo de estudios reométricos.

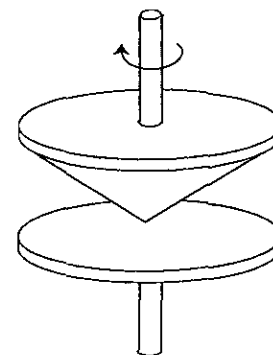


Figura 1.2. Dispositivo reométrico de cono y plato para el estudio de dinámica de fluidos.

En realidad, no es trivial obtener flujos fuertes que produzcan grandes deformaciones para estudiar el comportamiento de los fluidos poliméricos en tales condiciones. Para ello es necesario utilizar dispositivos especiales, tal como un *molino de dos rodillos*, que permite generar la clase completa de flujos fuertes dada por las ecuaciones anteriores. Estos flujos tienen dos características importantes: (1) presentan un punto de estancamiento, situado en el punto medio de la distancia entre los rodillos, que constituye una región muy útil para la caracterización de la dinámica de la conformación polimérica, y (2) existe una solución analítica para flujos bidimensionales no acotados desarrollada por Reyes [8, 9] que permite comparar el flujo de un fluido newtoniano que cumple con la solución analítica, con el flujo de un líquido viscoelástico que puede alterar las condiciones del flujo por sus características propias. La Figura 1.3 muestra las líneas de corriente obtenidas por medio de esta solución analítica.

1.2.1. El molino de dos rodillos

El molino de dos rodillos permite crear diferentes tipos de flujos fuertes por medio de un cambio en su geometría. Este dispositivo cuenta con varios pares de rodillos intercambiables de diferentes diámetros. Dado que la distancia entre los ejes de los rodillos es constante, cada valor de diámetro del par de rodillos conduce a una separación específica entre sus superficies. Al variar esta distancia, el cociente entre la velocidad de deformación y la vorticidad se modifica dando lugar a diferentes flujos. De esta forma, en la región alrededor del punto de estancamiento el molino genera toda una clase de flujos bidimensionales que

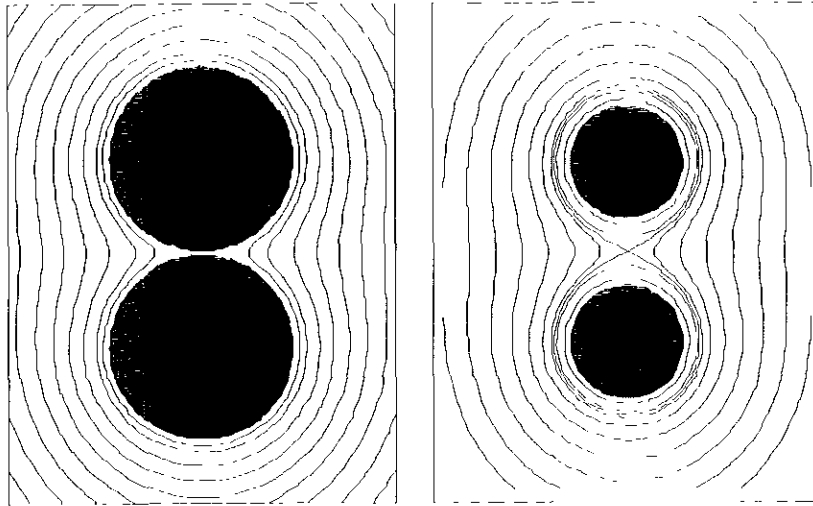


Figura 1.3. Líneas de corriente alrededor y en el punto de estancamiento dentro de la celda de flujo, correspondientes a la solución analítica del flujo generado por el molino de dos rodillos. En cada cuadro se observa un comportamiento diferente del flujo debido a la variación del diámetro de los rodillos, manteniendo constante la distancia entre sus ejes.

incluye desde el flujo cortante simple hasta los flujos fuertes con valores de λ que van desde 0.01 hasta 0.25. La solución analítica preve la posibilidad de valores de λ cercanos a 0.8. Este equipo experimental también puede generar flujos en los que la magnitud del gradiente de velocidades $\dot{\gamma}$ depende del tiempo, controlando la velocidad de rotación de los rodillos a través del tiempo. De esta forma, el molino de dos rodillos genera diferentes historias de deformación (flujos transitorios) entre las que se encuentran: la incitación instantánea de flujo constante, la terminación abrupta de flujo constante, flujos compuestos de velocidad constante, etc.

La cavidad del molino en donde se aloja el fluido polimérico tiene un perfil similar a la silueta de un cacahuate, como se observa en la Figura 1.4. Este contorno corresponde a una línea de corriente promedio del flujo, según la solución analítica de Reyes, y es generado por medio de *splines* para aproximarse lo mejor posible a las condiciones de frontera de dicha solución.

El dispositivo de laboratorio del molino de dos rodillos se ilustra en la Figura 1.5. Los dos rodillos se fabrican bajo las siguientes condiciones dimensionales: sus diámetros deben ser idénticos y la superficie en contacto con el fluido debe ser concéntrica con respecto a su eje de rotación. Estos rodillos se sujetan a la estructura del molino utilizando rodamientos, y vigilando que sus ejes estén perfectamente paralelos entre sí. Los rodillos son accionados por un solo motor de pasos por medio de un sistema de engrane y tornillo sinfín, de tal forma que ambos giren a la misma velocidad. Además, la celda cuenta con un sistema de control de

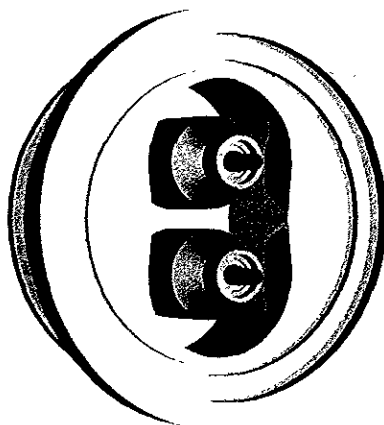


Figura 1.4. Contorno de la cámara que contiene al fluido, generada por splines para modelar una línea de corriente promedio del flujo, que garantiza la mínima perturbación por la presencia del contorno.

temperatura, condición muy importante para las soluciones poliméricas ya que algunas propiedades de estos materiales, como la viscosidad, varían notablemente con los cambios de temperatura.

Este dispositivo está especialmente diseñado para estudiar la dinámica y la estructura de soluciones poliméricas utilizando técnicas ópticas. Para ello se dispone de dos ventanas construidas de vidrio y con películas delgadas de un material antirreflejante, y montadas en tal forma que sus propiedades ópticas no se ven afectadas por esfuerzos residuales. Estas ventanas permiten la observación en una región comprendida entre los rodillos, zona en donde se localiza el punto de estancamiento.

1.2.2. Polímeros bajo grandes deformaciones

El estudio de la dinámica de polímeros en estado líquido sometidos a grandes deformaciones es de gran importancia para las aplicaciones prácticas de estos materiales, por dos razones principales. Una es que este tipo de deformaciones influye fuertemente en sus propiedades mecánicas, y la segunda es que tales deformaciones se producen a menudo en los procesos de conformado de polímeros, sobre todo en los procesos de extrusión a alta velocidad. Un ejemplo del mejoramiento de las propiedades mecánicas de un polímero por medio de grandes deformaciones se logra con polímeros orientados en la fabricación de fibras.

Al someter un fluido polimérico a un flujo fuerte como el generado por un molino de dos rodillos, las moléculas de fluido que se encuentran en el punto de estancamiento o en sus alrededores inmediatos mantienen su posición durante largos periodos de tiempo. Bajo estas condiciones, la distancia entre dos elementos de volumen del fluido localizados en el

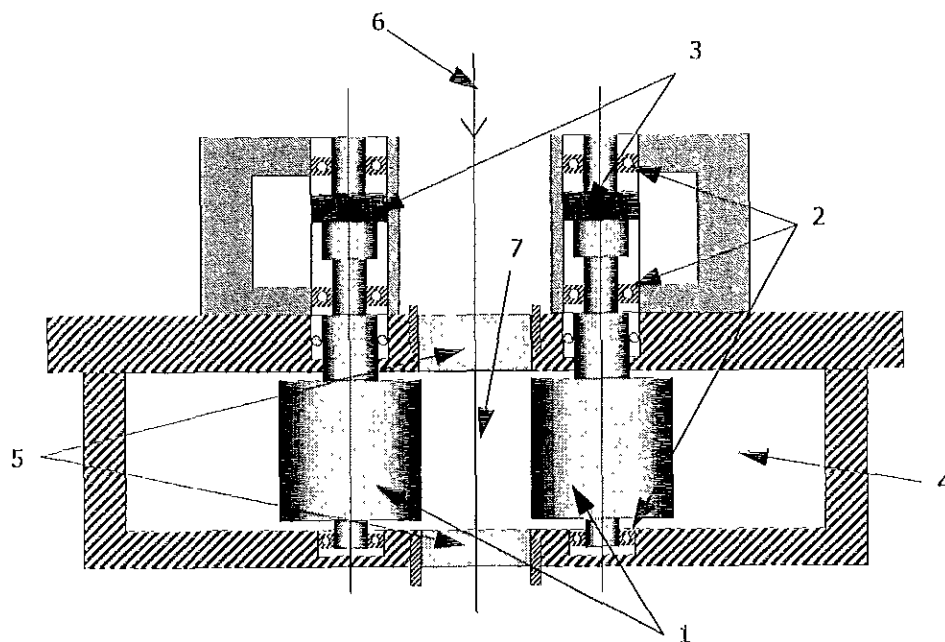


Figura 1.5. Descripción del molino de dos rodillos: (1) rodillos, (2) rodamientos, (3) engranes, (4) cámara, (5) ventanas, (6) eje óptico, (7) zona de observación. En esta figura no aparecen el motor de pasos, el tornillo sinfín ni el sistema de control de temperatura.

punto de estancamiento, considerada infinitesimalmente pequeña en un momento inicial, aumenta de forma exponencial al avanzar el tiempo. Estas fuertes variaciones son las que producen grandes cambios en la estructura del material, pues las macromoléculas del polímero tienden a alinearse siguiendo una orientación particular generando una anisotropía estructural.

Esta anisotropía estructural inducida por flujos tiene como consecuencia que algunas propiedades del material alcancen también estados anisotrópicos. En particular, las propiedades ópticas del material adquieren valores y direcciones principales que pueden ser asociados a la anisotropía estructural. La relación que existe entre la anisotropía estructural y la anisotropía óptica da lugar al estudio del comportamiento de líquidos poliméricos utilizando técnicas ópticas.

1.3. Técnicas Ópticas: Birrefringencia Bicolor Inducida por Flujos

El estudio de los fluidos poliméricos consiste en observar (medir) algunas de sus propiedades físicas y buscar relaciones matemáticas entre estas propiedades y las condiciones de flujo bajo las que se encuentra el fluido. Para ello se utilizan diferentes técnicas experimentales, entre las que se encuentran las técnicas mecánicas y las ópticas. Estas últimas, basadas en la observación de la anisotropía óptica de los materiales, presentan importantes ventajas en el estudio de fluidos sometidos a flujos fuertes. En este capítulo se describe la técnica óptica de Birrefringencia Bicolor Inducida por Flujos, y el principio teórico de su funcionamiento, conocido como elipsómetro de nulos.

1.3.1. Las técnicas de análisis

El comportamiento de los fluidos poliméricos se estudia experimentalmente midiendo los esfuerzos presentes en el fluido y buscando relacionarlos con el campo de velocidades a través de ecuaciones constitutivas. Las técnicas experimentales generalmente consisten en medir esfuerzos, tiempos de relajación, velocidades de deformación y otros parámetros, para después buscar correlaciones o modelos matemáticos entre ellos [3]. Existen diferentes técnicas experimentales destinadas a este tipo de estudios, y sus diferencias estriban en los principios que utilizan para medir estos parámetros. En particular, en esta sección se analizará las diferencias entre las técnicas mecánicas y las técnicas ópticas.

Los métodos mecánicos evalúan los esfuerzos midiendo el torque o la fuerza con que se opone un líquido viscoso a ser sometido a una deformación. Los equipos experimentales comúnmente utilizados en el estudio de líquidos viscoelásticos son los reómetros, y consisten en un eje que impone una deformación angular a la sustancia contenida en una celda especial. El reómetro permite medir los desplazamientos angulares y el torque necesario para llevar a cabo la deformación. Es posible controlar la velocidad de rotación del eje en movimiento, así como definir historias de deformación particulares.

Estos métodos mecánicos presentan algunas desventajas como consecuencia de la arquitectura del equipo. Una de ellas es que las mediciones obtenidas son valores promedio del estado de esfuerzos sobre toda la superficie de interacción (frontera del sistema), y se supone que estos valores son constantes en todo el volumen de estudio. Otra desventaja es que estos procedimientos consideran que el flujo o deformación impuestos producen efectos

importantes sobre el fluido, pero ignoran los efectos que la estructura del fluido pueda ejercer sobre el flujo. Esta segunda desventaja descarta a los métodos mecánicos en el análisis de dinámica no lineal.

Los métodos ópticos analizan la respuesta de los líquidos viscoelásticos al ser traspasados por un haz de luz, y deducen variables dinámicas de sus propiedades ópticas. La técnica de Birrefringencia Bicolor Inducida por Flujos, que se describe en esta Sección, es una técnica óptica de análisis. Las ventajas que ofrecen las técnicas ópticas son: la posibilidad de realizar mediciones muy rápidas, condición importante para evaluar flujos transitorios; la posibilidad de efectuar mediciones locales, a comparación de las técnicas mecánicas que consideran valores globales; y la capacidad de proporcionar información sobre la estructura del líquido en estudio. La principal desventaja de los métodos ópticos es que sólo permiten analizar fluidos transparentes; no pueden utilizarse, por ejemplo, en fluidos que contienen partículas en suspensión. Afortunadamente, los líquidos poliméricos puros, que son opacos en el infrarrojo y ultravioleta, son transparentes en la región del visible [10].

1.3.2. Anisotropía óptica en líquidos poliméricos

La anisotropía estructural es una condición de no equilibrio en un líquido polimérico, como se explica a continuación. Las cadenas moleculares que componen al polímero están formadas por una serie de monómeros alineados unidos entre sí por enlaces químicos covalentes¹. Un enlace covalente entre dos monómeros adyacentes les permite rotar uno con respecto al otro alrededor de la línea que los une; esta posibilidad de movimiento constituye un grado de libertad entre dos monómeros consecutivos. Entonces, una molécula formada por n monómeros alineados, posee hasta n grados de libertad que le conceden un alto grado de flexibilidad. Debido a esta flexibilidad, y bajo la influencia del movimiento Browniano, las moléculas en estado de equilibrio adquieren *formas aleatorias*, y su estructura es por tanto isotrópica. Ahora bien, si se modifica la forma natural aleatoria como resultado de un estiramiento de la cadena polimérica, cada monómero adquiere una proyección en una dirección preferencial que establece una estructura de la cadena y por tanto se dice que es *anisotrópica*. Dicha anisotropía es resultado de los esfuerzos aplicados sobre segmentos de la cadena consecuencia del estiramiento. Así, si el esfuerzo se retira, entonces la dinámica microscópica de la cadena tiende a recuperar su forma natural aleatoria.

1. Un enlace covalente consiste en un par de electrones compartidos entre dos átomos, y que ocupan dos orbitales estables que pertenecen uno a cada átomo.

En una configuración anisotrópica las propiedades macroscópicas del material son dependientes de la dirección. En cambio, el estado isotrópico se caracteriza por propiedades macroscópicas que se promedian ya que todas las direcciones de los monómeros son igualmente probables. Una de las propiedades que varían entre las configuraciones isotrópica y anisotrópica de un material polimérico, es la forma en que la luz (o las ondas electromagnéticas en general) viaja a través de él, fenómeno que se caracteriza por el índice de refracción del material. El índice de refracción de un monómero a lo largo del eje de la cadena es diferente al índice de refracción en la dirección perpendicular. En una configuración isotrópica, esta diferencia de índices se cancela, pues en un volumen de fluido existen todas las orientaciones de monómeros con igual probabilidad. En cambio, si las macromoléculas se encuentran alineadas, una proporción alta de los monómeros están orientados en una dirección específica, y los índices de refracción ya no tienen un mismo valor promedio en todas las direcciones. Es por esto que un líquido polimérico estructuralmente anisotrópico (con moléculas alineadas) presenta una anisotropía óptica: su índice de refracción tiene valores distintos en direcciones diferentes.

Consecuentemente, el índice de refracción de un sistema es en realidad una cantidad tensorial que contiene información sobre las propiedades ópticas en diferentes direcciones. Los componentes de este tensor son números complejos: la parte real de estos números es una medida de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas a través del sistema, y la parte imaginaria corresponde a la atenuación de las ondas por fenómenos de absorción y difracción. Cuando el tensor de índice de refracción tiene valores principales que difieren en su parte real, se dice que el material es *birrefringente*. Cuando los valores principales son diferentes en su parte imaginaria, el material se califica como *dicroico*. En consecuencia, un material que presenta anisotropía óptica puede ser birrefringente o dicroico, y estas características repercuten en la transmisión de ondas electromagnéticas. Los fenómenos de birrefringencia y dicroísmo se pueden observar cuando se hace pasar luz polarizada a través del material, ya que cada componente de polarización del haz de luz se verá afectado por diferentes valores de refracción y atenuación.

Según se ha observado experimentalmente, los líquidos poliméricos en estado anisotrópico presentan grados de birrefringencia mucho más importantes que de dicroísmo en la región del espectro visible. Es por esta razón que las técnicas ópticas de análisis en polímeros se basan principalmente en el estudio de la birrefringencia del material. Se entiende por birrefringencia del material la diferencia que existe entre los valores de índices

En una configuración anisotrópica las propiedades macroscópicas del material son dependientes de la dirección. En cambio, el estado isotrópico se caracteriza por propiedades macroscópicas que se promedian ya que todas las direcciones de los monómeros son igualmente probables. Una de las propiedades que varían entre las configuraciones isotrópica y anisotrópica de un material polimérico, es la forma en que la luz (o las ondas electromagnéticas en general) viaja a través de él, fenómeno que se caracteriza por el índice de refracción del material. El índice de refracción de un monómero a lo largo del eje de la cadena es diferente al índice de refracción en la dirección perpendicular. En una configuración isotrópica, esta diferencia de índices se cancela, pues en un volumen de fluido existen todas las orientaciones de monómeros con igual probabilidad. En cambio, si las macromoléculas se encuentran alineadas, una proporción alta de los monómeros están orientados en una dirección específica, y los índices de refracción ya no tienen un mismo valor promedio en todas las direcciones. Es por esto que un líquido polimérico estructuralmente anisotrópico (con moléculas alineadas) presenta una anisotropía óptica: su índice de refracción tiene valores distintos en direcciones diferentes.

Consecuentemente, el índice de refracción de un sistema es en realidad una cantidad tensorial que contiene información sobre las propiedades ópticas en diferentes direcciones. Los componentes de este tensor son números complejos: la parte real de estos números es una medida de la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas a través del sistema, y la parte imaginaria corresponde a la atenuación de las ondas por fenómenos de absorción y difracción. Cuando el tensor de índice de refracción tiene valores principales que difieren en su parte real, se dice que el material es *birrefringente*. Cuando los valores principales son diferentes en su parte imaginaria, el material se califica como *dicróico*. En consecuencia, un material que presenta anisotropía óptica puede ser birrefringente o dicróico, y estas características repercuten en la transmisión de ondas electromagnéticas. Los fenómenos de birrefringencia y dicróismo se pueden observar cuando se hace pasar luz polarizada a través del material, ya que cada componente de polarización del haz de luz se verá afectado por diferentes valores de refracción y atenuación.

Según se ha observado experimentalmente, los líquidos poliméricos en estado anisotrópico presentan grados de birrefringencia mucho más importantes que de dicróismo en la región del espectro visible. Es por esta razón que las técnicas ópticas de análisis en polímeros se basan principalmente en el estudio de la birrefringencia del material. Se entiende por birrefringencia del material la diferencia que existe entre los valores de índices

taja, el equipo experimental para el proyecto de Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución que se desarrolla en el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigaciones en Materiales presenta mejoras con respecto a la configuración de los equipos convencionales de birrefringencia bicolor: (1) permite una alta velocidad de medición, limitada únicamente por el ancho de banda de los fotodiodos (superior a 250 kHz) utilizados en la detección de señales, lo cual permite obtener hasta 10^4 datos por segundo [11]; (2) realiza mediciones "puntuales", pues la sección transversal de la muestra de medición de aproximadamente $50\ \mu\text{m}$ de diámetro se considera muy pequeña con respecto al dominio de estudio que abarca algunos centímetros de diámetro; (3) tiene un amplio intervalo dinámico, lo que permite estudiar tanto configuraciones isotrópicas (con muy bajo grado de anisotropía) como altamente anisotrópicas; y (4) se constituye por un arreglo óptico robusto que no tiene elementos móviles y cuyo mantenimiento es relativamente sencillo.

El elipsómetro de nulos

El elipsómetro de nulos básico funciona como se explica a continuación (véase la Figura 1.7) [12]. Una fuente de luz monocromática emite un haz de luz de intensidad conocida que pasa a través de un polarizador, cuya orientación es variable, con el fin de poder definir la dirección de la polarización del haz. Este rayo de polarización conocida atraviesa el medio birrefringente, que en el caso de la técnica BBIF es un fluido polimérico en estado anisotrópico, y la birrefringencia del medio modifica el estado de polarización del haz. En seguida, el rayo de luz llega a un analizador, que consiste en un polarizador orientado a 90 grados con respecto al primero. Debido a que los planos de polarización del haz incidente y del analizador no son paralelos, el haz es sólo parcialmente transmitido por el analizador. La intensidad final del haz se mide con un detector, y la diferencia entre las intensidades inicial y final depende de la variación en la polarización inducida por el medio birrefringente. Esta variación es entonces la que permite calcular la birrefringencia óptica del sistema.

En el experimento de BBIF se utilizan dos rayos láser de diferente longitud de onda, por lo que es necesario utilizar dos elipsómetros de nulos independientes dentro de un mismo arreglo óptico. Tal arreglo óptico se compone, esencialmente, de los siguientes elementos:

- Una fuente de luz única que emite los dos haces con intensidades controladas, y con una polarización inicial aproximadamente conocida.
- Un polarizador para cada color, que define la orientación de la polarización de un haz a un ángulo de $\pi/4$ con respecto a la orientación de polarización del otro haz. Es con-

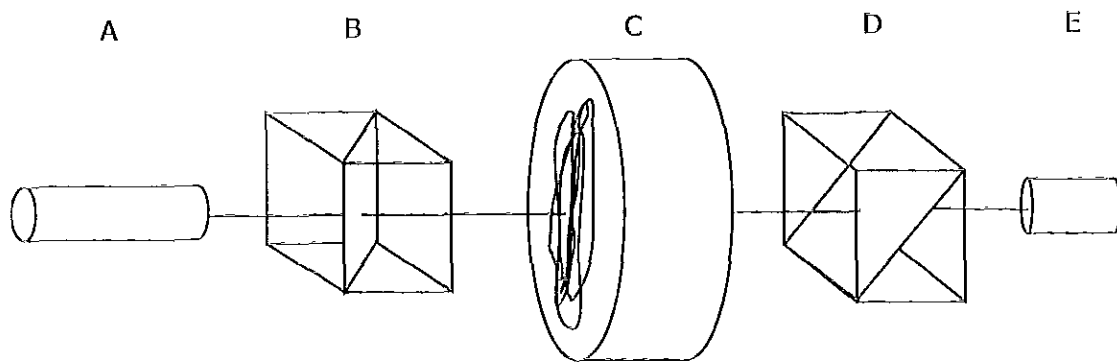


Figura 1.7. Diagrama del elipsómetro de nulos. Los elementos ópticos que lo componen son: (A) fuente de luz, (B) polarizador, (C) medio birrefringente, (D) analizador y (E) detector.

veniente que la orientación inicial de la polarización de los haces se encuentre en la bisectriz del ángulo de $\pi/4$ que forman las direcciones de los polarizadores, de tal manera que la atenuación de la intensidad provocada por estos elementos sea aproximadamente igual para los dos haces incidentes.

- Un analizador para cada color, orientado a $\pi/2$ con respecto al polarizador correspondiente al mismo color.
- Un detector de luz (fotodiodo) para cada color que mide la intensidad final del haz transmitido por el analizador correspondiente.

Con tales orientaciones de los polarizadores y analizadores para cada color, las ecuaciones que describen la propagación de una onda electromagnética polarizada a través de los elementos del elipsómetro de nulos indican que la intensidad de luz que llega a cada uno de los fotodetectores está dada por

$$I = \frac{E_y^2}{2 \sin^2 \alpha} [1 - 2 \cos 2\beta \sin 2\beta (1 - \cos \delta)],$$

donde E_y es el componente vertical de la amplitud de la onda electromagnética inicial, α es la orientación del polarizador con respecto al eje horizontal, β es la dirección de la birrefringencia del medio con respecto al eje horizontal, y δ su retardancia [13, 14].

En la práctica es más conveniente medir los ángulos con respecto a las orientaciones principales definidas por los propios polarizadores, por lo que se define el cambio de variable

$$\beta = \alpha - \chi.$$

Considerando que los polarizadores están orientados a $\pm\pi/8$ con respecto a la vertical ($\alpha=3\pi/8$ para un haz y $\alpha=5\pi/8$ para el otro), introduciendo el cambio de variable propuesto,

y dividiendo la intensidad entre el cuadrado del componente vertical de la amplitud inicial para obtener un valor normalizado, se obtiene que las intensidades normalizadas para cada uno de los dos colores¹ están dadas por

$$i_A = \frac{I_A}{E_{y,A}^2} = \sin^2(\delta_A/2)\sin^2(2\chi)$$

$$i_V = \frac{I_V}{E_{y,V}^2} = \sin^2(\delta_V/2)\cos^2(2\chi).$$
(A)

Puesto que las Ecuaciones A no pueden resolverse analíticamente para cada valor de δ y χ , es factible conocer δ , χ en función de i_A e i_V a partir de una solución aproximada (expansión de series de Taylor para las funciones harmónicas) válida para valores pequeños de δ . Estas ecuaciones proveen la información suficiente para calcular la orientación del índice de refracción χ del medio, y su retardancia δ . De estos valores se obtiene finalmente una solución aproximada para la magnitud de la birrefringencia Δn y su orientación χ .

Tanto χ como δ que caracterizan la condición anisotrópica del fluido son relevantes respecto al flujo fuerte. A través de la experimentación se observa que el parámetro de flujo λ , que según la solución teórica depende únicamente de la geometría de los rodillos (diámetro y separación entre ellos), depende también de la magnitud de la birrefringencia del fluido (Δn). Esto significa que la inclinación del eje de salida del flujo de Stokes prevista por la solución analítica no es la misma que la inclinación de las moléculas alineadas (χ). Por tanto, es importante conocer la orientación de la anisotropía óptica para relacionarla con la magnitud del gradiente de velocidades que la induce.

1. Se utilizan los subíndices A y V para los diferentes haces debido a que en la experimentación se utilizan longitudes de onda correspondientes al color azul y verde.

2.1. El Arreglo Óptico para BBIF

2.1.1. Descripción del arreglo óptico

El experimento de Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución tiene como objetivo estudiar la dinámica lineal, no lineal y los estados transitorios de un fluido polimérico sometido a flujos fuertes. Un sistema experimental capaz de realizar mediciones de BBIF debe cumplir con dos requerimientos básicos. El primero es ofrecer la posibilidad de realizar mediciones de forma repetitiva asegurando que se hagan sobre un mismo elemento de fluido. Esto implica una alta precisión y repetibilidad en la dirección y posición de los haces, así como la igualdad de las propiedades ópticas en ambos colores. El segundo es analizar una sección transversal del elemento de fluido (sección perpendicular al eje óptico) muy pequeña con respecto a la longitud característica del sistema en estudio.

El sistema experimental propuesto por Geffroy [15] permite efectuar mediciones en tiempo real (frecuencia de mediciones de 10 kHz) en una sección transversal del orden de 50 μm . Este experimento consta de: un arreglo óptico específico, que se describe en esta sección; un molino de dos rodillos, descrito anteriormente [8, 9]; y un equipo computarizado de control [16] y de adquisición de datos [17].

Para el funcionamiento eficiente del equipo de BBIF, el arreglo óptico debe satisfacer cuatro condiciones:

- Una fuente de luz estable.
- La complementariedad correcta entre los dos haces, adecuada para calcular la birrefringencia del medio por la solución matemática propuesta en la Sección 1.3.3.
- Una alta sensibilidad.
- La resolución necesaria para realizar mediciones puntuales.

Un arreglo capaz de cumplir con estas condiciones debe controlar la orientación de la polarización de los dos colores por separado, y debe asegurar la igualdad en cuanto a forma, tamaño y posición de los haces. Para ello, el arreglo aquí descrito (ver Figura 2.1) utiliza elementos y monturas ópticas que cuentan con los grados de libertad suficientes para establecer las características necesarias para cada haz de manera independiente.

El objetivo de esta tesis es diseñar las monturas ópticas adecuadas para cada uno de los componentes del tren óptico, que cumplan con los requisitos de precisión y de grados de libertad necesarios.

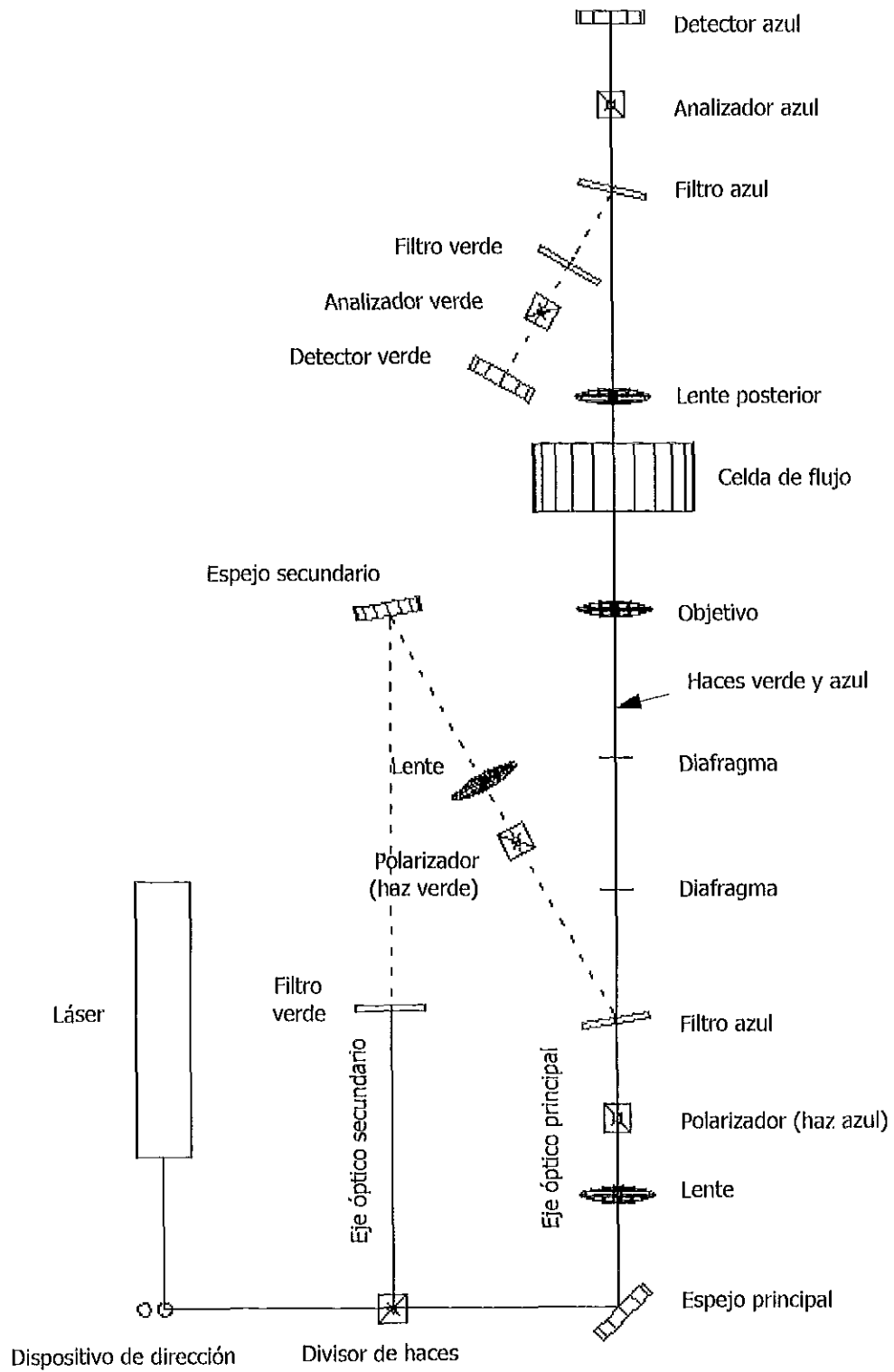


Figura 2.1. El arreglo óptico para el experimento de BBIF.

Fuente de luz

Se utiliza como fuente de luz un láser de argón Spectra Physics modelo 2020 que emite los dos haces utilizados en la técnica BBIF. Estos dos rayos corresponden a un haz azul de 488 nm de longitud de onda y un haz verde de 514.5 nm. Se han elegido estas longitudes de onda pues son las de mayor estabilidad e intensidad que proporciona el láser de argón.

La fuente de luz empleada cuenta con una cavidad etalón isotérmica¹ que se encarga de la estabilidad de la intensidad de los haces, así como con un polarizador rotatorio que define la orientación de la polarización de salida de los haces. De esta forma se tiene una fuente de luz con las siguientes cualidades: (1) un mismo equipo láser proporciona los dos colores, (2) la distribución de la intensidad de la luz es gaussiana, (3) la estabilidad de cada color se controla independientemente.

Dispositivo de dirección

Los dos haces emitidos por la fuente de luz son reflejados por un par de espejos representados en la figura con el nombre de *dispositivo de dirección*². La función de este dispositivo es elevar el haz doble al plano que contiene al tren óptico, y dirigirlo hacia los primeros dos elementos en el tren: el *divisor de haces* y el *espejo principal*. La Figura 2.2 muestra una perspectiva de estos elementos en su localización dentro del tren óptico.

Divisor de haces

El divisor de haces es un cubo compuesto por dos prismas que transmite el 50% de la intensidad del haz incidente manteniendo su dirección, y refleja en un ángulo de 90 grados el otro 50%, sin modificar la polarización. La función de este elemento en el tren óptico es separar en la cara común entre los prismas dos ejes ópticos compuestos cada uno por los dos haces de diferente longitud de onda producidos por la fuente de luz (azul y verde), para después filtrar un color en cada uno de los dos ejes ópticos y manipular las propiedades ópticas de ambos colores de forma independiente.

-
1. La cavidad etalón isotérmica consiste en dos espejos semitransparentes que satisfacen condiciones de planitud y de paralelismo muy estrictas, y cuya función es reducir el ancho de banda de las frecuencias emitidas por el láser a un pico estrecho único.
 2. Se entiende por *Dispositivo de dirección* un sistema cuya función es dirigir el haz hacia un punto, controlando en forma estable y precisa cuatro grados de libertad. El nombre técnico en Inglés es "*beam steering device*".

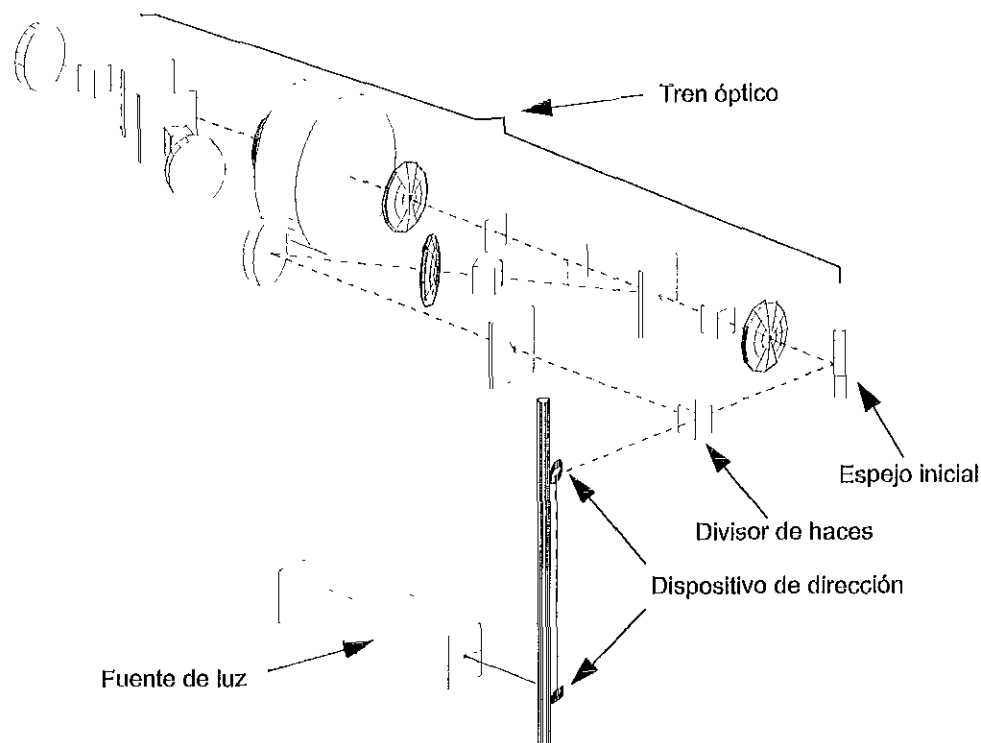


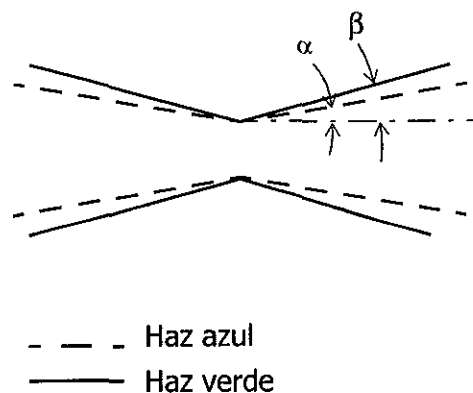
Figura 2.2. Perspectiva del Dispositivo de Dirección, a la salida del equipo láser:

Filtros azul y verde

Los dos haces emergentes del divisor contienen los colores azul y verde. Se utilizan filtros interferométricos con el objeto de separar los dos colores a pesar de tener longitudes de onda casi iguales. El eje óptico secundario (o verde) tiene como primer elemento un filtro a 514.5 nm. Los elementos ópticos posteriores en este eje son atravesados sólo por el haz de este color. En el eje principal, en cambio, se observa una configuración menos simple y con el fin de reducir espacio, ambos colores pasan por los elementos ópticos correspondientes al elipsómetro de nulos del haz azul, el filtro azul se encuentra después de ellos. El resultado de esta configuración es que la polarización de cada color se controla por medio de un polarizador independiente. En la Figura 2.1 nótese que el filtro azul sirve también como superficie reflejante para el haz verde, una vez que su polarización ha sido definida en el eje óptico secundario, con el fin de incorporarlo al eje óptico principal. Como se explicará más adelante, es necesario reducir al máximo el ángulo formado entre eje óptico secundario y el eje óptico principal para no alterar el funcionamiento del filtro azul ni la polarización del haz verde.

Polarizadores

Se utilizan dos polarizadores que sirven para controlar de forma independiente la orientación de la polarización de cada color. El polarizador correspondiente al haz azul se localiza antes del filtro de este color, en el eje óptico principal, y el correspondiente al haz verde en la parte oblicua del eje óptico secundario.



Analizadores

Los analizadores correspondientes a cada color se encuentran en la parte final del tren óptico. Obsérvese que nuevamente son necesarios dos filtros para separar los haces de diferente color y analizarlos independientemente.

Figura 2.3. Coincidencia de los puntos convergentes de los haces azul y verde. En el experimento se requiere que los ángulos α y β sean iguales.

Detectores

Los detectores son los últimos elementos en el tren óptico. Entre el analizador y el detector se agrega un elemento llamado *trampa de luz*, necesario para evitar que luz difractada por las monturas de los analizadores alcance la superficie de detección. Este elemento adicional no aparece en la figura.

Lentes

Puesto que los caminos ópticos recorridos por los haces azul y verde tienen diferente longitud, los haces al alcanzar la celda de flujo tienen diferentes diámetros y ángulos de divergencia. Entonces es necesario que los dos haces converjan en el mismo punto dentro de la celda de flujo, con características geométricas comparables como se ilustra en la Figura 2.3. Para ello se utilizan lentes plano-convexas que permiten enfocar la posición del punto de convergencia.

Objetivo

El *objetivo* es una lente que se utiliza para el enfoque simultáneo de los dos colores. Para realizar mediciones adecuadas, la convergencia de los haces debe situarse exacta-

mente en el punto medio dentro de la celda de flujo. El objetivo desplaza este punto de convergencia a lo largo del eje óptico.

Lente posterior

La función de esta lente localizada después de la celda de flujo es enfocar los haces salientes de la celda de tal forma que su intensidad sea máxima al llegar a los detectores de área muy pequeña. Para ello, la proyección de los haces sobre la superficie detectora debe tener un diámetro mínimo.

Diafragmas

Los *diafragmas*¹ cumplen tres funciones diferentes dentro del arreglo óptico, al colocarlos en diferentes posiciones dentro del tren óptico durante el proceso de calibración. La primera es definir el eje óptico, tomando sus posiciones como referencia inicial para orientar los demás elementos que componen al tren; la segunda es determinar la posición de la cintura de los haces a lo largo el eje óptico; la tercera es identificar la orientación del haz en la que el máximo de intensidad se encuentra sobre el eje óptico. Estas ideas se amplían más adelante.

Espejos

Se utilizan dos espejos en el arreglo óptico. El *espejo principal* es el encargado de dirigir el eje óptico principal, por lo que su orientación debe realizarse con muy alta precisión. El *espejo secundario* dirige el haz verde del eje secundario hacia el filtro azul, pasando por la lente y el polarizador correspondientes a este haz.

Cuando en el arreglo óptico completo se consideran las birrefringencias residuales en los polarizadores, lentes, ventanas de la celda de flujo, etc. entonces dicho arreglo tiene la capacidad de obtener coeficientes de extinción de al menos 10^{-7} . Los mejores resultados de la extinción se obtienen al reducir al máximo los esfuerzos residuales en los filtros, y en las ventanas de la celda de flujo, utilizando diseños adecuados para las monturas. La sensibilidad, precisión y repetibilidad que puede ofrecer este equipo experimental es excepcional, y en combinación con el molino de dos rodillos es capaz de proporcionar mediciones de BBIF muy útiles para el estudio de la dinámica de fluidos en flujos fuertes.

1. El término diafragma se utiliza en el sentido de "disco horadado", y corresponde al término en inglés *pinhole*. Este vocablo extranjero es más común en el lenguaje técnico, por lo que en este texto se utilizan ambas palabras indistintamente.

2.1.2. Características técnicas de los elementos principales

Los principales elementos que componen al tren óptico son cinco: lentes, polarizadores, filtros, *pinholes* y espejos. Es importante conocer las características técnicas de estos componentes ópticos para poder definir posteriormente los grados de libertad que hay que controlar para cada uno de ellos y deducir las monturas ópticas requeridas.

Lente

Se utilizan lentes convergentes plano-convexas, cuya característica principal es la distancia focal, que se calcula por la ecuación de lentes delgadas de tal forma que el punto de convergencia (la cintura del haz) se sitúe en el punto deseado sobre el eje óptico. La posición de una lente en la dirección del tren óptico requiere un ajuste preciso por dos razones: la primera es que la localización del punto de convergencia debe cumplir con una tolerancia estricta aún cuando la distancia focal real de una lente no se conoce con exactitud (el margen de error en la distancia focal de algunas lentes comerciales es de 1%; véase por ejemplo [18]), y la segunda es que el diámetro mínimo de la cintura debe tener el mismo valor para los dos colores en el punto de convergencia.

Polarizador

Los polarizadores son los elementos ópticos que realizan las etapas de polarización y análisis en el elipsómetro de nulos. Los polarizadores utilizados en la primera etapa del elipsómetro de nulos son del tipo prisma *Glan-Thompson*, que ofrece como ventajas: un coeficiente de extinción superior a 10^{-7} y una eficiencia de transmisión de más de 90%, un ancho de banda grande, un ángulo de incidencia amplio. Existe una desventaja importante en estos elementos ópticos: las fichas técnicas de los fabricantes indican que el haz incidente sufre una desviación respecto del haz transmitido hasta de 3 minutos de arco. Aunque este error parece insignificante, las distancias que existen entre los componentes ópticos multiplican este error y se vuelve necesario agregar dos grados de libertad de rotación al polarizador para disminuir este error de dirección.

Los analizadores consisten en polarizadores de tipo *Thompson* (divisores de haz), con los cuales es posible utilizar las dos componentes de polarización resultantes del haz incidente. Estos polarizadores se utilizan cuando se requiere conocer los dos componentes ortogonales de polarización. Existen polarizadores comerciales de este tipo con eficiencias de transmisión superiores a 90%, coeficientes de extinción del orden de 10^{-7} , y ángulo de incidencia máximo igual a 5° . Este tipo de polarizador presenta un error de 5 minutos de arco en

la dirección del haz transmitido que no es crítico para nuestro arreglo. La principal propiedad óptica que el operador ajusta en un polarizador es su orientación, misma que se debe obtener con una resolución de 0.1 minutos de arco.

Filtro

Los filtros adecuados para este experimento son de tipo *bandpass*, consistentes en un apilamiento de capas dieléctricas que permite sólo el paso de un pequeño intervalo del espectro visible. Estos filtros tienen una capa protectora para el apilamiento que consiste en una superficie altamente reflejante, que se utiliza en el arreglo óptico como se menciona más adelante. Como principales características, estos filtros tienen una transmisión no menor de 50%, al centro de la longitud de onda que se transmite (en este experimento son las longitudes de 488 y 514.5 nm), con un pequeño intervalo del espectro del orden de 1nm.

Una importante desventaja de este tipo de filtros es que tienen un alto grado de birrefringencia debido a su fabricación: las películas interferométricas que conforman el apilamiento están unidas entre sí por una capa delgada de resina epóxica que desafortunadamente almacena esfuerzos residuales, los cuales le dan al apilamiento su característica birrefringente. Una opción para reducir el grado de birrefringencia de un filtro es agregar un grado de libertad rotacional alrededor del eje óptico, de tal forma que sea posible encontrar una orientación del elemento que presente el mínimo de birrefringencia. Además, dada la pequeña ventana de transmisión, si se modifica el ángulo de incidencia, la posición central de la longitud de onda transmitida se corre hacia valores más grandes (colores más verdes).

Pinhole

Estos elementos consisten en una lámina delgada sobre la que se efectúa una perforación de diámetro reducido y de muy baja elipticidad. Para las necesidades del experimento, mencionadas anteriormente, es necesario utilizar *pinholes* de diámetros diferentes, en un intervalo entre 50 y 500 μm .

Espejo

Las características que definen a un espejo son la longitud de onda de funcionamiento, el coeficiente de reflectancia, y los valores de planitud y calidad de la superficie, entre otras. Utilizando espejos de la mejor calidad, ninguno de los valores de estas características influye en el número de grados de libertad del elemento óptico.

2.1.3. Grados de Libertad

La función de cada elemento dentro del arreglo óptico está asociada a una posición y orientación específicas que deben obtenerse dentro de un margen de tolerancia establecido por las exigencias de operación del tren óptico. Para ello, cada elemento se coloca sobre una montura que le proporciona los grados de libertad necesarios para su ajuste dentro de un intervalo y con la resolución apropiada al intervalo de tolerancia correspondiente.

Los grados de libertad son el primer criterio que se toma en cuenta para la definición conceptual de las monturas, y consisten en el número de movimientos únicos independientes que un cuerpo puede o debe realizar. Todo cuerpo puede llevar a cabo, en principio, seis movimientos independientes: tres movimientos de traslación en direcciones ortogonales (que pueden corresponder a los ejes x , y , z de un sistema cartesiano) y tres movimientos de rotación alrededor de las mismas direcciones. Esto es, todo cuerpo tiene inicialmente seis grados de libertad. Si se restringe cada uno de los seis de forma independiente, el cuerpo adquiere una posición estable (estado estático); si se restringen sólo algunos de los seis el cuerpo puede realizar movimientos, mientras que si se agregan más de seis restricciones el cuerpo queda sometido a esfuerzos (estado hiperestático).

La definición conceptual de las monturas para cada elemento óptico se propone a partir de los grados de libertad necesarios *para su ajuste*. Es evidente que colocar y orientar cualquier elemento óptico dentro del arreglo significa definir sus seis grados de libertad, pero para la definición de las monturas sólo se considera los grados de libertad necesarios para ajustar la posición y orientación de los elementos *con precisión*. Esta definición inicial se continúa más adelante incluyendo los criterios de resolución e intervalo de movimiento. Finalmente, la definición detallada de cada montura se realiza tomando en cuenta los factores de espacio disponible, procedimientos de calibración, geometría de los elementos ópticos y disposición de los elementos sobre la mesa de experimentación.

A continuación se desarrolla la definición conceptual de las monturas que se utilizan para los cinco elementos ópticos principales.

Lente

Una lente se caracteriza por un plano transversal. La distancia que existe entre este plano y el punto de convergencia de los rayos que atraviesan la lente —punto focal—es la distancia focal. Establecer la posición del punto focal a lo largo el eje óptico constituye un grado de libertad en traslación.

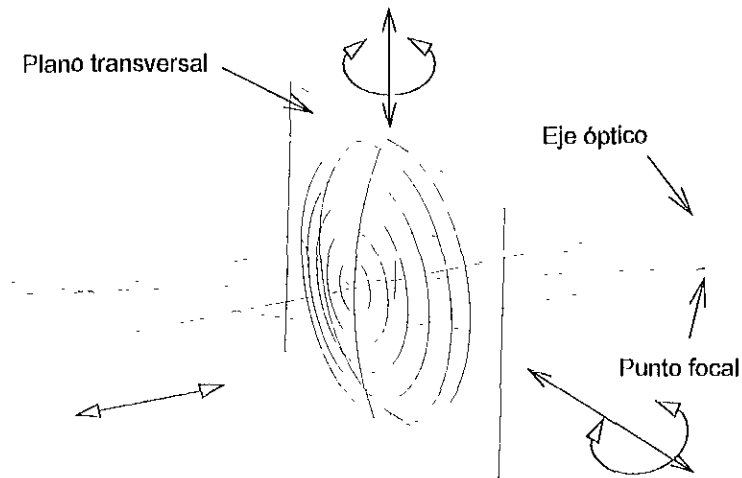


Figura 2.4. Grados de libertad de una lente: tres de traslación a lo largo de los ejes más dos de rotación sobre los ejes marcados.

La posición del centro de la lente sobre el plano perpendicular al eje óptico se determina por los dos grados de libertad de traslación restantes. Es necesario controlar los grados de libertad que definen el centro de la lente ya que, como se observa en la Figura 2.4, sólo el rayo que pasa por el centro de la lente mantiene su dirección invariable, todos los demás rayos son desviados para converger en el punto focal.

El ángulo de incidencia de los rayos sobre la lente es también un parámetro importante para su utilización. Este ángulo de incidencia depende de la orientación de la cara plana de la lente —se utilizan lentes plano-convexas en el experimento— con respecto al plano perpendicular al eje óptico. Para definir este ángulo se requiere actuar sobre dos grados de libertad en rotación, alrededor de dos ejes situados en el plano transversal, y perpendiculares entre sí.

Las lentes tienen simetría circular alrededor del eje óptico, por lo que el tercer grado de libertad en rotación carece de importancia.

Polarizador

En principio, el único ajuste necesario en un polarizador es su orientación alrededor del eje óptico (ángulo acimutal), correspondiente a un grado de libertad en rotación. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, existe un error en el paralelismo de las caras del polarizador que produce una desviación entre el haz incidente y el haz transmitido, y que obliga la

inclusión de los dos grados de libertad angulares restantes para ajustar la dirección del haz transmitido.

La posición del polarizador en el plano perpendicular al eje óptico, que corresponde a dos grados de libertad en traslación, no necesita ajustarse con precisión pues la sección transversal del elemento es muy grande (del orden de 10mm) con respecto al diámetro del haz (del orden de $10\mu\text{m}$). La posición del polarizador a lo largo del eje óptico tampoco es una dimensión precisa. En

conclusión, los tres grados de libertad en traslación no son necesarios en la montura del polarizador. En la Figura 2.5 se ilustran los grados de libertad necesarios para el polarizador.

Filtro

El funcionamiento de un filtro interferométrico no necesita, en principio, de ningún ajuste preciso. Ahora bien, la birrefringencia presente en el filtro debido a los esfuerzos residuales puede reducirse si existe la posibilidad de girar el filtro alrededor del eje óptico hasta encontrar la orientación que presenta menor grado de birrefringencia.

En el caso específico del filtro que se utiliza también como superficie reflectora, el ajuste de la orientación de esta superficie se vuelve importante, y es necesario agregar dos grados de libertad en rotación. Los grados de libertad asociados al filtro se muestran en la Figura 2.6.

Pinhole

El ajuste importante en los *pinholes* es su posición en el espacio, correspondiente a los tres grados de libertad en traslación. Sin embargo, la función de los *pinholes* es establecer puntos de referencia requeridos durante el procedimiento de calibración del tren óptico, por lo que

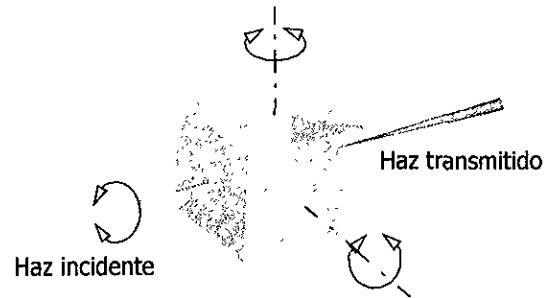


Figura 2.5. Grados de libertad de un polarizador. El haz transmitido puede encontrarse dentro del cono mostrado a la derecha, debido al error de paralelismo en las caras.

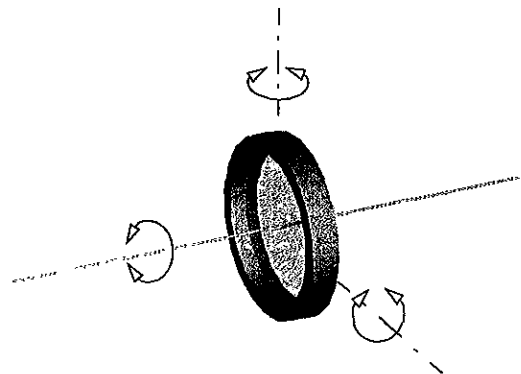


Figura 2.6. Grados de libertad de un filtro de un filtro interferométrico necesarios en el eje óptico principal.

su posición se establece en un principio de manera arbitraria. Los desplazamientos de traslación del *pinhole* no son realmente ajustes de precisión. Véase la Figura 2.7.

Espejo

La orientación de la superficie del espejo establece la dirección del haz reflejado, por lo que los dos grados de libertad de rotación involucrados requieren un ajuste muy preciso. En general, la posición del espejo no es importante, sin embargo en el caso del espejo inicial se requiere un desplazamiento horizontal perpendicular al eje óptico principal para trasladar el haz reflejado hasta hacerlo coincidir con el eje óptico, como se ve en la Figura 2.8.

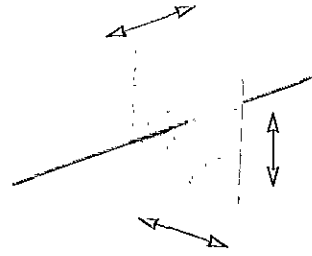


Figura 2.7. Grados de libertad del pinhole.

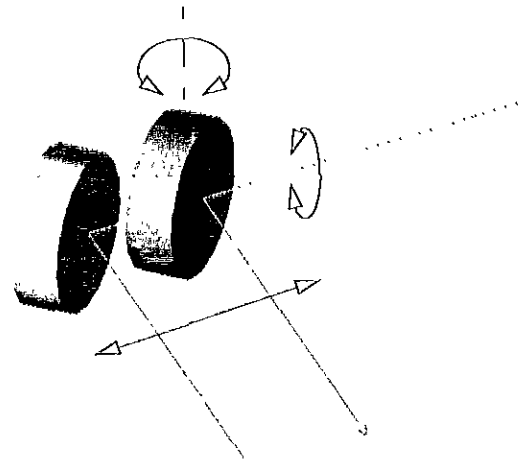


Figura 2.8. Grados de libertad del espejo. El desplazamiento del espejo traslada el haz reflejado.

2.2. Condiciones de Precisión

La técnica BBIF se basa en la evaluación instantánea de la birrefringencia y de su orientación a través de dos mediciones simultáneas. Estas dos mediciones deben hacerse sobre el mismo elemento de fluido, ya que la birrefringencia de un sistema es una función que varía fuertemente con respecto a la posición. Esta condición se traduce en que los elementos de fluido analizados por cada color deben ser idénticos en cuanto a tamaño, localización y forma. Para ello, los haces necesitan ser colineales, y tener iguales punto focal y ángulo de divergencia.

Debido a que las propiedades ópticas de los dos haces se controlan por separado, el tren óptico debe cumplir esencialmente con dos condiciones de precisión para la validez de las mediciones:

- La colinealidad de los haces en el punto de medición
- La coincidencia de los puntos de convergencia de los haces

Existe una tercera condición de precisión asociada al control de la polarización de los dos colores, ya que la técnica BBIF consiste en evaluar el cambio en la polarización de cada uno de los haces al atravesar el medio birrefringente. En consecuencia, la tercera condición de precisión es:

- La orientación de la polarización de los haces

2.2.1. Colinealidad

Los haces atraviesan una serie de elementos que modifican sus propiedades ópticas: dirección, diámetro del haz, ángulo de divergencia. En particular, la dirección de los haces varía al pasar a través de los siguientes elementos: lente, polarizador (a causa del error de paralelismo existente entre sus caras), filtro (al ser utilizado como superficie reflectora) y espejo.

La condición de colinealidad no se puede definir por un simple valor de tolerancia debido a varias razones. En primer lugar, el haz de luz utilizado es de tipo *gaussiano* [19], lo que significa que los valores de intensidad en una sección transversal del haz tienen una distribución gaussiana; es decir, el haz no puede representarse como un cilindro de diámetro específico, sólo es posible definir un tubo imaginario dentro del cual se encuentre un porcentaje de la intensidad total del haz. Por ejemplo, puede determinarse que dentro de un diámetro de 5 μm se encuentra el 90% de la intensidad del haz, y es común denominar "diámetro del haz" al valor correspondiente a un porcentaje de intensidad determinado. En segundo lugar, el haz transmitido por algunos elementos ópticos, como las lentes o los polarizadores,

no es colineal al haz incidente, lo que significa que el haz no forma una línea recta a lo largo del tren óptico, sino que recorre una trayectoria segmentada.

Se establece como condición de colinealidad el hecho de que, para los dos colores, la intensidad total transmitida a través de dos diafragmas de diámetro definido, y separados por una distancia determinada, sea idéntica.

Esta condición de colinealidad debe verificarse varias veces durante el proceso de calibración del tren, ya que al agregar un nuevo elemento óptico las orientaciones y diámetros del haz varían. La condición final de colinealidad se obtiene colocando dos *pinholes* de 50 μm , uno en el centro de la celda de flujo, y otro a una distancia de 50 cm antes de la celda, y verificando que el 60% de la intensidad de cada color se obtiene a través de este arreglo [15].

2.2.2. Coincidencia de los puntos de convergencia

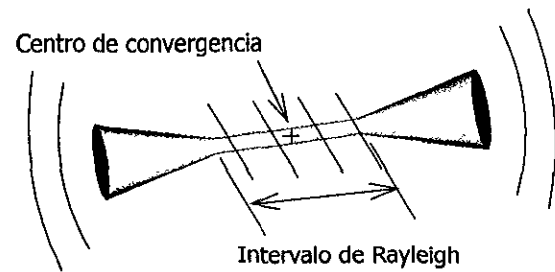
Al pasar a través de una lente plano-convexa, un haz de luz tipo *gaussiano*, converge hasta un diámetro mínimo llamado *cintura* y cuyo valor depende esencialmente de la longitud de onda y de la distancia focal de la lente. Ahora bien, este diámetro mínimo se obtiene a lo largo de una región, y no sólo en un punto, como lo indica la Figura 2.9. La longitud de esta región, caracterizada por el *intervalo de Rayleigh*, es de alrededor de 7.5 mm para las longitudes de onda y la lente objetivo utilizadas en el experimento.

El centro de convergencia se define como el punto medio de la región de Rayleigh. La coincidencia de los puntos de convergencia de los dos colores significa, en términos reales, que el centro de convergencia de un color se encuentre dentro de la cintura o región de Rayleigh del otro color. Dada la longitud característica de la región de Rayleigh, la condición de coincidencia a lo largo del eje óptico principal se satisface utilizando una precisión del orden de 1 mm.

Teóricamente es posible calcular la distancia focal de las lentes utilizadas para cada color, de tal forma que la cintura de los dos haces tenga el mismo diámetro y se cumpla la condición de coincidencia. Sin embargo, la longitud real de las lentes se conoce con incertidumbre (1% de error, según algunos catálogos) y es necesario agregar un grado de libertad a la montura de las lentes para ajustar la localización del punto focal sobre el eje óptico, con una resolución mínima de 1mm.

Finalmente, se requiere que el centro de convergencia de los dos colores se sitúe en el centro de la celda de flujo. Para este ajuste se coloca un *pinhole* en el centro geométrico

Figura 2.9. El haz converge hasta un radio mínimo —cintura— en una región llamada intervalo de Rayleigh. En este intervalo, los frentes de onda son planos paralelos, mientras que fuera de esta región son superficies esféricas concéntricas. El centro de convergencia es el punto medio dentro de esta zona.



de la celda de flujo¹ y se desplaza la lente del objetivo a lo largo del eje óptico, hasta enfocar el haz en el *pinhole*.

2.2.3. Orientación de la polarización

En un sistema de dos haces, es conveniente que la orientación inicial de la luz se encuentre en la bisectriz del ángulo formado por las direcciones de polarización de ambos colores. Entonces, estableciendo una polarización vertical en la salida de la fuente de luz, una orientación acimutal de los polarizadores para cada color en un ángulo de $\pi/8$ con respecto a la dirección vertical (formando un arreglo simétrico con respecto a esta dirección), y una orientación relativa entre el polarizador y el analizador de cada color de $\pi/2$, se obtiene una configuración de dos elipsómetros de nulos independientes.

De esta forma se tienen dos condiciones de precisión a satisfacer secuencialmente. La primera es la orientación relativa de $\pi/4$ entre los elipsómetros azul y verde, ya que este ángulo está incluido en la solución matemática desarrollada en la Sección 1.3.3. Se requiere para esta condición una precisión del orden de un segundo arco. La segunda condición es la orientación relativa de $\pi/2$ entre cada polarizador y el analizador correspondiente, misma que debe obtenerse con una precisión de 0.1 minutos de arco.

1. El diseño del soporte de la celda debe permitir sustituirla por una montura que sostiene al *pinhole*, de tal forma que este último materialice el centro geométrico de la celda de flujo.

2.3. Estudio Preliminar del Diseño de Precisión

2.3.1. Función de las monturas ópticas

Las monturas ópticas son los mecanismos que soportan a cada uno de los elementos del tren óptico en el experimento de BBIF. Las funciones de estas monturas son: localizar y orientar los elementos ópticos, así como permitir los grados de libertad necesarios para su calibración, satisfaciendo los requerimientos de precisión. La función de localización y orientación de cada elemento óptico consiste en determinar las coordenadas correspondientes a sus seis grados de libertad. Los valores exactos de estas coordenadas se calculan teóricamente en función de la operación que cada elemento desempeña dentro el tren óptico, y las monturas deben situar los elementos ópticos con la mayor exactitud posible en estas coordenadas. Sin embargo, la función de calibración es necesaria debido a que es imposible obtener con exactitud total la localización y orientación teórica de los elementos. Existen dos razones por las que se requiere incluir movimientos de ajuste en las monturas ópticas: las aberraciones, o errores intrínsecos de los elementos ópticos, y el alineamiento. La primera razón es producto de la incertidumbre en las características de los elementos ópticos, como la distancia focal de una lente o la birrefringencia de un filtro. La segunda razón, se debe a los errores de fabricación tanto de los elementos ópticos como de las monturas.

El criterio más importante en el diseño de las monturas ópticas consiste en saber traducir los ajustes necesarios para un elemento óptico en el número adecuado de grados de libertad. De la aplicación correcta de este criterio depende la exactitud en la posición y orientación del elemento, y en consecuencia, la eficiencia de la montura. Por el contrario, una decisión errónea sobre el número de grados de libertad produce resultados inadecuados, como (1) la ausencia de movimientos de ajuste, (2) la falta de precisión en los movimientos, (3) el incremento del tiempo de calibración requerido debido a monturas demasiado complejas y (4) una estabilidad inferior del mecanismo.

El diseño del conjunto de monturas ópticas tiene como objetivo cumplir con las condiciones de precisión establecidas en la Sección 2.2 a través de un procedimiento de calibración. Cada montura debe cumplir con las condiciones de estabilidad, exactitud y repetibilidad¹ que satisfagan las necesidades de dicho procedimiento.

1. Dado que estos términos suelen utilizarse en el lenguaje común con varias acepciones, se incluyen sus definiciones correspondientes al diseño de precisión en el Anexo A.

2.3.2. Modelos Teóricos de Monturas

En la Sección 2.1.3 se estableció que cada montura óptica debe suministrar el número de grados de libertad requeridos para ajustar la posición y orientación del elemento óptico correspondiente. Por medio de restricciones cinemáticas la montura elimina los grados de libertad excedentes para permitir únicamente los movimientos necesarios. Si la montura ejerce sobre el elemento óptico menos restricciones de las necesarias le permite movimientos no deseados, mientras que un exceso de restricciones anula movimientos imprescindibles o incluso conduce a una situación hiperestática que induce esfuerzos en el elemento óptico.

Una restricción cinemática se puede modelar teóricamente por el concepto de *contacto puntual*, que es el que se obtiene entre una esfera y un plano, ambos elementos considerados perfectos y de rigidez infinita. Si al mismo tiempo se considera que el contacto entre ellos carece por completo de fricción, la esfera puede girar en todas direcciones y trasladarse sobre el plano sin ninguna resistencia. Los movimientos que la esfera puede realizar en tal situación son cinco: rotación alrededor de los tres ejes cartesianos y traslación en los dos ejes paralelos al plano. En conclusión, el contacto puntual entre dos cuerpos rígidos elimina un grado de libertad en el movimiento relativo de ambos.

El concepto de contacto puntual se puede extender a muchos cuerpos por la aseveración siguiente: *el número de contactos puntuales entre dos cuerpos rígidos es igual al número de grados de libertad restringidos en el movimiento relativo de ambos* [21].

A partir de este concepto, es posible definir una serie de monturas teóricas básicas que se muestran en la Figura 2.10. El arreglo (a) consiste en dos esferas unidas entre sí por una varilla rígida, colocadas sobre un plano. Los dos contactos puntuales entre el plano y el cuerpo compuesto eliminan dos grados de libertad, y permiten dos movimientos de rotación y dos de traslación. La configuración (b) consiste en una esfera colocada dentro de una ranura formada por dos planos que se cortan. Los dos contactos puntuales imponen dos restricciones, pero esta vez los grados de libertad permitidos son tres de rotación y uno de traslación a lo largo de la ranura. En (c) se observa una esfera dentro de una cavidad triédrica (cavidad formada por tres planos no paralelos). Los tres contactos puntuales restringen los tres grados de libertad en traslación de la esfera. El arreglo (d) muestra de nuevo un arreglo de dos esferas unidas, colocado en un plano sobre el que se ha practicado una ranura en V. Existen en esta configuración tres contactos puntuales que eliminan un movimiento de rotación y dos de traslación. Finalmente el arreglo (e) presenta tres esferas unidas rígidamente entre sí colocadas sobre un plano. Los tres contactos puntuales eliminan ahora dos grados de

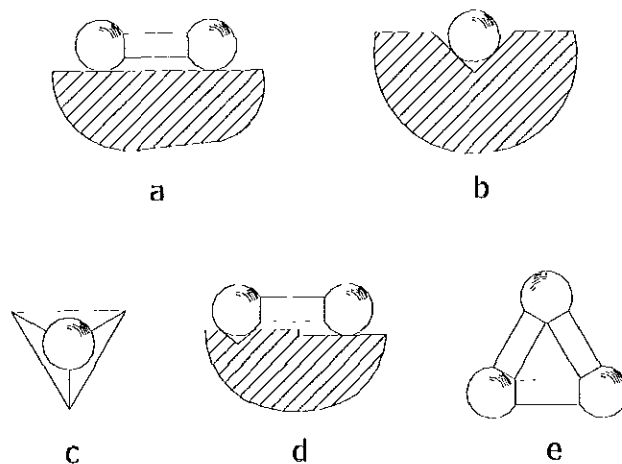


Figura 2.10. Ejemplos de monturas teóricas básicas. (a) Dos esferas unidas rígidamente sobre un plano. (b) Esfera dentro de una ranura. (c) Esfera dentro de una cavidad triédrica. (d) Dos esferas unidas entre sí, en contacto simultáneo con una ranura y un plano. (e) Tres esferas unidas sobre un plano.

libertad en rotación y uno en traslación. De estos ejemplos se deduce que *cada unión entre dos esferas elimina un grado de libertad en rotación, y el número total de grados de libertad de traslación eliminados es el de la esfera más restringida dentro del mismo cuerpo* [21].

Con estas ideas básicas es posible combinar contactos puntuales para generar modelos teóricos que se requieren en el diseño de las monturas ópticas. En particular, si se utilizan sistemas que eliminan (o controlan) cinco grados de libertad para ajustar cada movimiento en forma independiente, los diseños de monturas se establecen ensamblando varios mecanismos que se encargan cada uno de un movimiento de ajuste.

Se proponen ahora tres modelos teóricos básicos que se utilizan en lo sucesivo como herramientas para los diseños de monturas reales. El primero es un sistema que aísla un movimiento de traslación utilizando cinco contactos puntuales. Estos cinco puntos no pueden localizarse en el mismo plano, pues tal configuración es equivalente a tres esferas unidas entre sí en contacto con el plano, y las dos esferas restantes son redundantes. La solución consiste en poner en contacto estas dos esferas restantes con otro plano que no sea paralelo al primero, como se muestra en la Figura 2.11. Tal modelo se utiliza en aplicaciones prácticas que requieren de movimientos de traslación axial, como por ejemplo los rieles que soportan el carro de un torno.

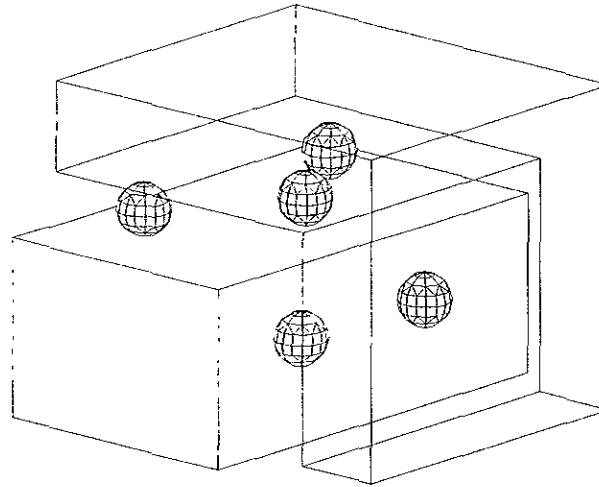


Figura 2.11. Modelo teórico de una montura que permite un grado de libertad en traslación.

El segundo modelo de interés es el que permite un único movimiento de rotación. Nuevamente son necesarios cinco contactos puntuales, pero dispuestos de manera distinta. El movimiento de rotación puede obtenerse por medio de una varilla con una esfera en cada extremo, y colocando una de ellas dentro de una ranura en V y la otra en una cavidad triédrica. En la práctica este modelo se lleva a cabo sustituyendo las esferas por rodamientos, o utilizando el contacto entre dos superficies cilíndricas en un mecanismo aún más simple.

El tercer modelo es conocido como *montura cinemática*. Una montura cinemática es la que elimina los seis grados de libertad de un cuerpo sin imponer ningún esfuerzo o deformación. Esta montura se muestra en la Figura 2.12 y consiste en tres esferas unidas entre sí, que están en contacto respectivamente con una cavidad triédrica, una ranura en V y un plano (es común substituir la cavidad triédrica, imposible de fabricar convencionalmente, por una superficie cónica que se obtiene utilizando la punta de una broca). Aunque esta configuración elimina seis grados de libertad, es posible utilizarla para ajustes de rotación si se agrega un dispositivo que modifique la longitud de una de las varillas verticales.

Los modelos teóricos propuestos se deben modificar cuando se diseña un sistema real, pues los contactos puntuales significan esfuerzos infinitos en el punto de contacto. En algunos casos, los contactos puntuales se reemplazan por contactos entre superficies para distribuir las cargas y disminuir los esfuerzos, y en otros casos se utilizan elementos especialmente diseñados para articulaciones, como son los rodamientos, cojinetes, rótulas, etcétera.

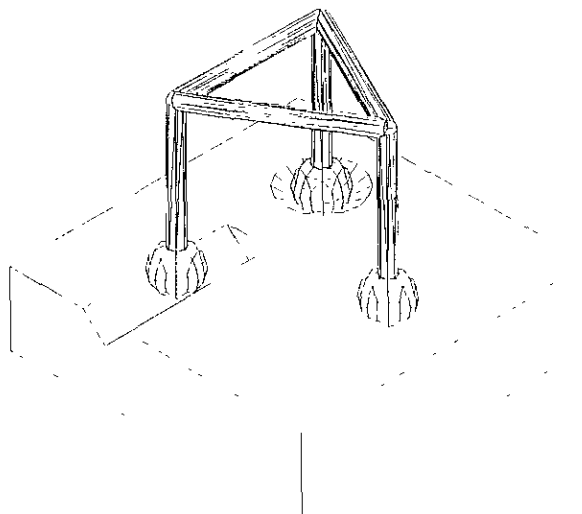


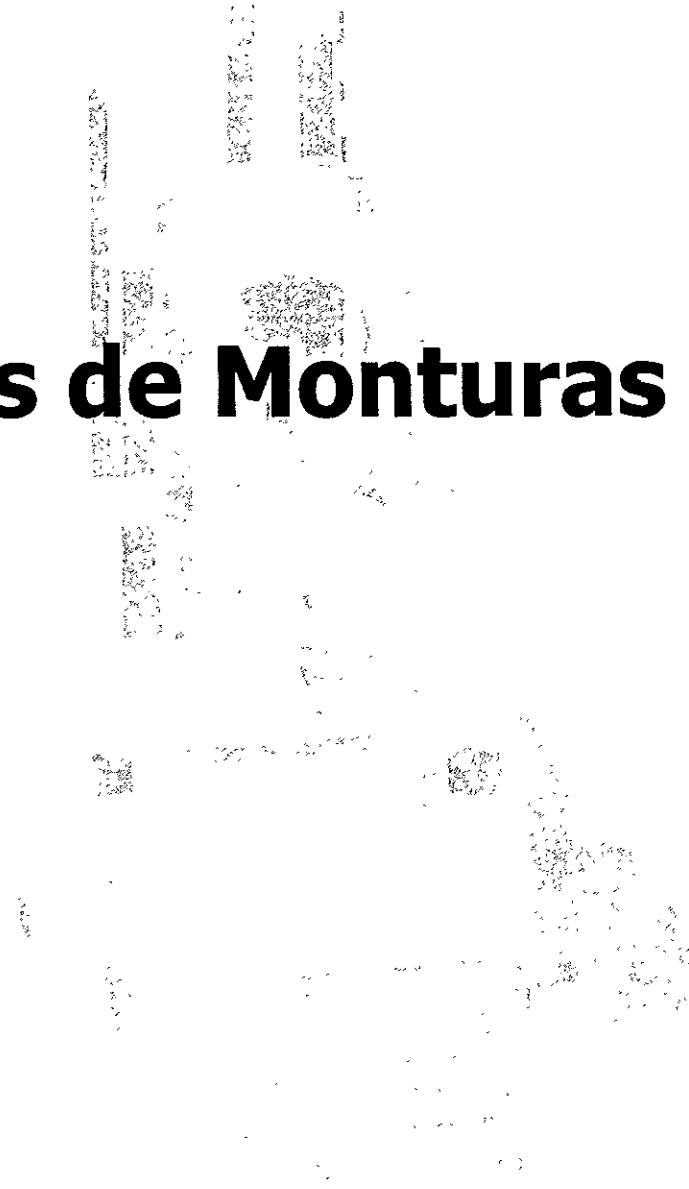
Figura 2.12. Modelo teórico de una montura cinemática. La cavidad triédrica ha sido reemplazada por una superficie cónica.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que mientras más se aleje el diseño real del modelo teórico, más estrictas deben ser las tolerancias de fabricación para que el mecanismo funcione como se espera.

Capítulo

3

Diseños de Monturas



3.1. Monturas Ópticas Genéricas: Precisión y Grados de Libertad

En esta Sección se proponen los modelos de monturas ópticas con base en las condiciones de precisión que exige el experimento, las características técnicas de cada elemento óptico y los grados de libertad necesarios para los ajustes. Los cinco elementos ópticos básicos que se han estudiado (lente, polarizador, filtro, *pinhole* y espejo) aparecen más de una vez en el arreglo óptico. Se propone entonces, para cada uno de los elementos básicos, un modelo genérico de montura que se adapta más adelante a las condiciones individuales de cada elemento. Con este propósito, en esta sección se establecen primero algunas consideraciones previas que son útiles para todo el proceso de diseño, y se proponen cinco monturas genéricas para los diferentes elementos, incluyendo los valores de resolución e intervalo de cada grado de libertad. En algunos casos se estudia la posibilidad de efectuar dos ajustes (basto y fino) en un mismo movimiento.

3.1.1. Consideraciones previas

Sistema de referencia

Ya que el sistema óptico antes propuesto contiene más de veinte elementos, resulta conveniente establecer un sistema de referencia global y con base en éste definir para cada elemento un marco de referencia local. Lo anterior tiene como objetivo eliminar ambigüedades para establecer los movimientos, ajustes o coordenadas para los elementos ópticos.

El sistema global de referencia —o sistema principal— consiste en el eje óptico común a todos los elementos —denominado también *eje longitudinal*, ya que a lo largo de él se presenta la mayor dimensión en el arreglo óptico—; el eje transversal, paralelo a la mesa; y el eje vertical, perpendicular a la misma. Los ejes transversal y vertical pertenecen a un plano perpendicular al eje longitudinal (plano transversal), de tal forma que el sistema global establecido es ortogonal.

Base común

La configuración del arreglo óptico presentada en el Capítulo 2 muestra que todos los elementos ópticos coinciden en tres características importantes:

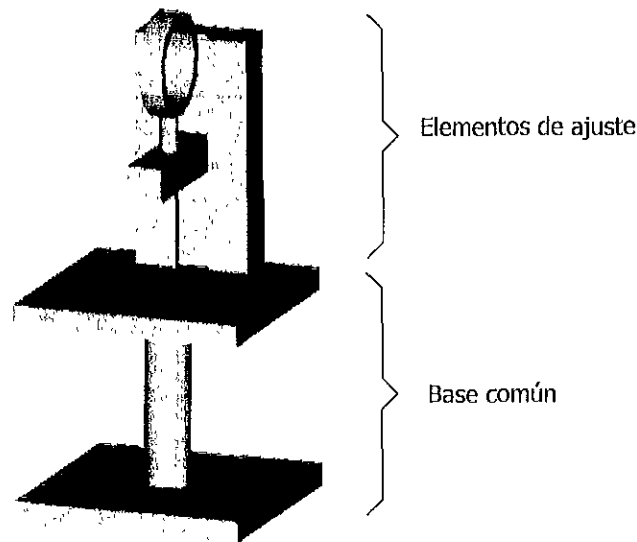


Figura 3.1. Estructura general para las monturas ópticas que consiste en una base común sobre la que se agregan los elementos de ajuste necesarios para cada elemento óptico. En esta figura se muestra, por ejemplo, un modelo que posee ajustes de traslación sobre el eje vertical y de rotación alrededor del mismo eje. Utilizando columnas de diferente altura, la base común se adapta a las necesidades de cada montura óptica.

- Están colocados sobre la misma mesa de referencia
- Están alineados
- Se encuentran a la misma altura, pues sus centros se sitúan en el eje óptico.

Estas características comunes justifican el diseño de un modelo de base idéntico para todas las monturas (o la mayoría), que cumpla con las siguientes funciones: facilitar la colocación alineada de los elementos sobre la mesa, elevar a una misma cota cada elemento óptico a través de la variación de un solo parámetro de diseño: la altura de la columna de la base, y ajustar *grasso modo* la altura de la montura dentro de un intervalo de unos 20 mm con una resolución de 1 mm.

A partir de esta idea se propone una estructura general para todas las monturas, compuesta por una base común en la parte inferior que se encarga de colocar el centro del elemento óptico en una posición cercana al eje óptico sobre el plano transversal, y una serie de elementos móviles en la parte superior que realicen los movimientos de ajuste. Esta estructura general se muestra en la Figura 3.1.

Precisión en la dirección del láser

Los espejos y el filtro azul tienen la función de dirigir el haz hacia el centro de la celda de flujo. El experimento requiere obtener esta dirección con una precisión de 1% con respecto al diámetro del haz de luz. Esta condición de precisión establece la resolución de los grados de libertad correspondientes en las monturas de estos elementos ópticos.

Si se define un diámetro para el haz gaussiano de una fuente láser de 0.5 mm, entonces en el plano transversal donde se tiene dicho diámetro debe considerarse como necesario que el disco de luz proyectado se ubique con una exactitud del 1%, lo que representa la necesidad de ajustar la orientación del haz de manera que en el plano transversal seleccionado tenga desplazamientos del orden de 5 μm .

El ángulo de incidencia θ —entre la normal de la superficie reflejante y el rayo incidente— se considera como el parámetro que define la orientación del espejo. Véase la Figura 3.2.

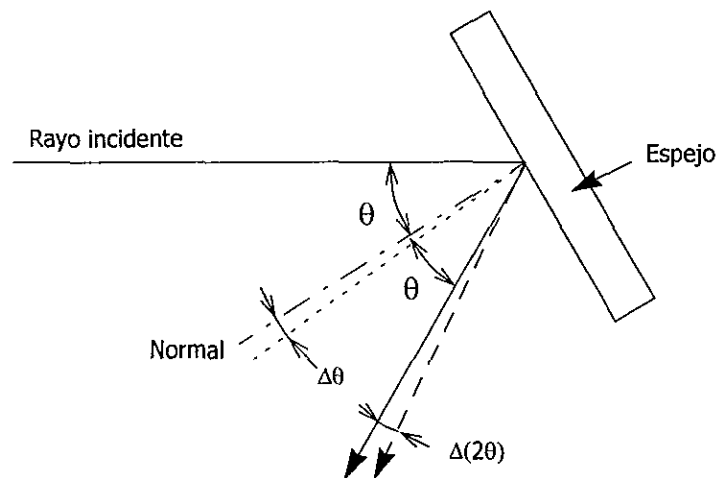


Figura 3.2. Cálculo de la resolución angular requerida en los elementos reflejantes para satisfacer la condición de precisión en la dirección del láser.

La relación entre la variación angular del espejo y la consecuente variación en la dirección del haz es

$$\Delta(2\theta) = 2 \cdot \Delta\theta. \quad (3.1)$$

Entonces, la variación angular mínima obtenida en la dirección del haz es dos veces la variación mínima angular en la orientación del espejo (resolución de la montura). Esto significa que la resolución en la orientación del elemento debe ser doblemente estricta que la resolución angular necesaria para la dirección del haz.

La resolución angular θ_{res} requerida para la dirección del haz se obtiene por

$$\tan(\theta_{\text{res}}) = \frac{0.005 \text{ mm}}{L} \cong \theta_{\text{res}}, \quad (3.2)$$

donde L es la distancia en milímetros entre el elemento reflejante y el plano de proyección.

Finalmente, la resolución angular $\Delta\theta$ requerida en la montura está dada por

$$\Delta\theta \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{0.005}{L}. \quad (3.3)$$

3.1.2. Montura para lente

Las lentes requieren de cinco grados de libertad para su ajuste completo: tres de traslación y dos de rotación. Se propone una montura que permite ajustar los tres grados de libertad de traslación en dos etapas: un ajuste basto y un ajuste fino, y los dos movimientos de rotación directamente en un ajuste fino. El diseño funcional de esta montura se muestra en la Figura 3.3.

Los mecanismos de ajuste basto para los tres grados de libertad de traslación sirven para mejorar la posición del centro de la lente con una resolución de 1 mm dentro de un intervalo de al menos 10 mm. Estos movimientos de ajuste basto proporcionan versatilidad a la montura, ya que permite modificaciones en la altura del eje óptico así como amplias variaciones de la distancia focal de la lente.

Los ajustes finos para los movimientos de traslación son necesarios para compensar los errores de fabricación en las monturas y la incertidumbre en las especificaciones de la lente. En lo que corresponde a los desplazamientos vertical y transversal, la resolución debe ser igual o menor al error de concentricidad de 0.1 mm de las lentes comerciales [18], con un desplazamiento mínimo de 1 mm. Este valor para el intervalo del ajuste fino corresponde a la resolución del ajuste basto. En la coordenada longitudinal, el ajuste fino depende de la condición de coincidencia de los puntos de convergencia descrita en la Sección 2.2.2. Ahora bien, puesto que el ajuste basto proporciona la resolución de 1 mm requerida en la condición de coincidencia, se puede prescindir del mecanismo de ajuste fino en el desplazamiento longitudinal.

Los ajustes en los movimientos de rotación necesitan una resolución de 3 minutos de arco, que es el error de desviación en el haz transmitido que presentan las lentes comerciales [18].

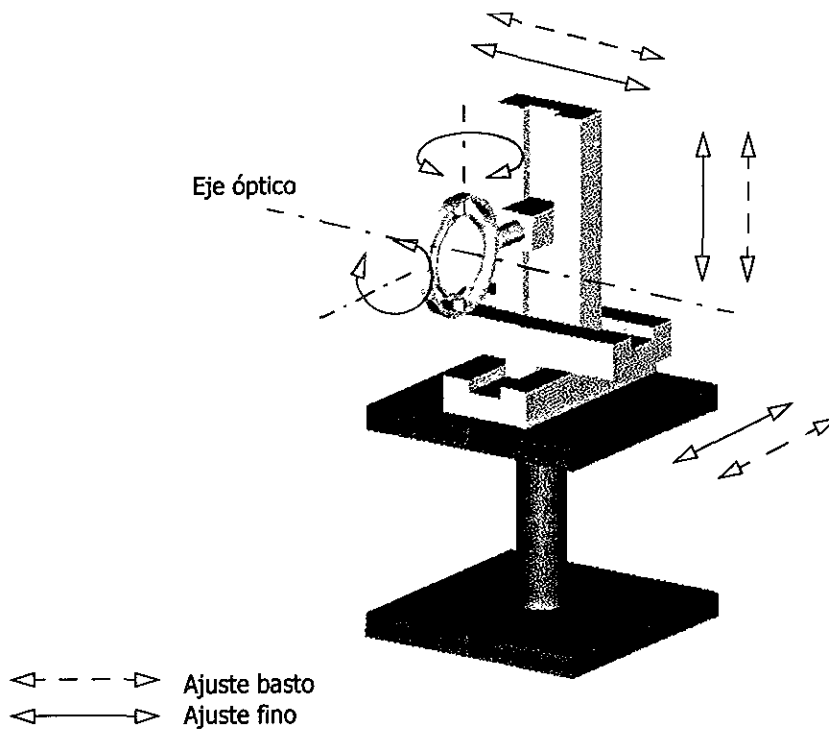


Figura 3.3. Montura genérica para lente. Los tres grados de libertad en traslación tienen mecanismos de ajuste basto y fino; los dos grados de libertad de rotación sólo tienen ajuste fino.

3.1.3. Montura para polarizador

El polarizador requiere de tres grados de libertad en rotación para su ajuste completo. De estos tres movimientos, la rotación alrededor del eje longitudinal es el más importante ya que es el que controla la dirección del ángulo de polarización del haz transmitido por el polarizador (ángulo acimutal). Los dos grados de rotación restantes son necesarios para compensar el error de paralelismo entre las caras del elemento, como se explica en la Sección 2.1.3. La resolución en el movimiento acimutal (alrededor del eje longitudinal) es la requerida por el experimento para ajustar la dirección del plano de polarización, es decir, 0.1 minutos de arco. La resolución en los otros dos grados de libertad de rotación debe ser suficiente para contrarrestar el error de paralelismo de las caras, que de acuerdo al fabricante puede alcanzar hasta 3 minutos de arco. Además de los grados de libertad de rotación, es conveniente prever un movimiento de ajuste basto en el desplazamiento vertical, con el fin de aproximar el centro del polarizador al eje óptico. Debido a que esta condición no requiere ninguna precisión para el funcionamiento del elemento óptico, la resolución que provee la base común es

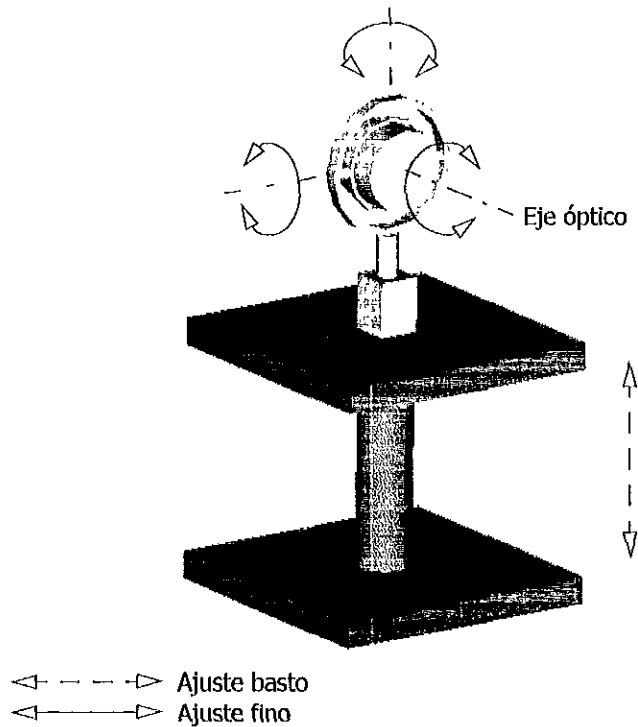


Figura 3.4. Montura genérica para polarizador. El ajuste principal es el movimiento alrededor del eje óptico. El ajuste basto en traslación vertical se lleva a cabo en la base común.

suficiente (1 mm dentro de un intervalo de por lo menos 10 mm). La montura propuesta para el polarizador se muestra en la Figura 3.4.

3.1.4. Montura para filtro interferométrico

Este elemento óptico requiere únicamente un ajuste basto de rotación acimutal para disminuir los efectos de birrefringencia debidos a su fabricación. Una resolución del orden de un grado es suficiente para este ajuste, por lo que no es necesario incluir mecanismos de precisión para llevarlo a cabo. Consecuentemente se requiere de una montura óptica sencilla, con un solo grado de libertad, además del ajuste basto de traslación vertical que provee la base común.

Sin embargo, para el caso particular del filtro azul en el arreglo óptico, una montura tan simple no es suficiente. Esto se debe a que el filtro azul se utiliza como superficie reflectante para dirigir el haz proveniente del eje secundario hacia la celda de flujo. Esta función adicional (como espejo) del filtro azul exige dos grados de libertad en rotación alrededor de los ejes vertical y transversal.

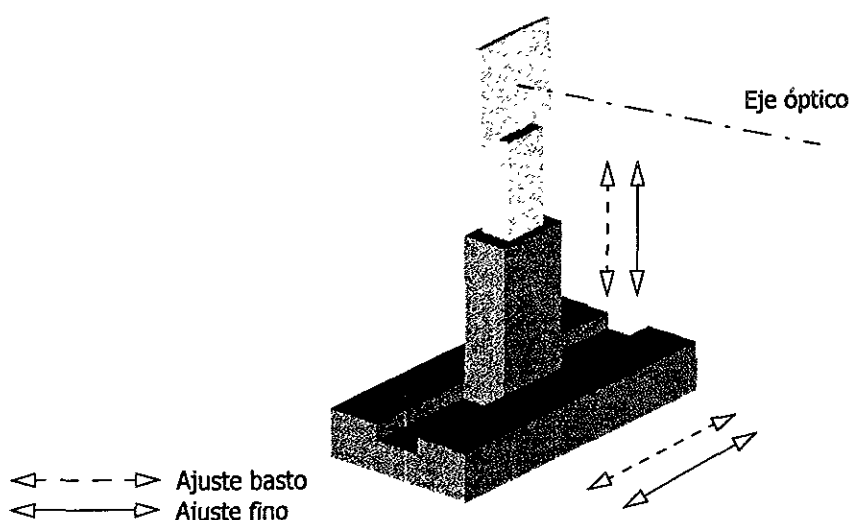


Figura 3.5. Montura genérica para pinhole. Los ajustes bastos en las direcciones vertical y transversal permiten desplazar la posición del eje óptico. El ajuste fino vertical se requiere para asegurar la igualdad en la altura de los dos pinholes utilizados como referencia.

La resolución de estos ajustes se calcula por la Ecuación 3.3, donde $L = 800$ mm, distancia aproximada entre el filtro azul y la celda de flujo. Ello implica un valor de 0.65 segundos de arco para la resolución angular de la montura del filtro azul en sus movimientos de rotación alrededor de los ejes vertical y transversal. El modelo de montura para el filtro azul es igual al propuesto para el polarizador (Figura 3.4).

3.1.5. Montura para *pinhole*

La posición de los *pinholes* no necesita ajustarse ya que estos elementos se utilizan como referencias durante las diferentes etapas del proceso de calibración del arreglo óptico. En cada una de las etapas, el procedimiento consiste en colocar *pinholes* en lugares específicos sobre el eje óptico, y manipular uno a uno los otros elementos ópticos hasta que el haz coincide con los *pinholes*.

Para llevar a cabo su función, los *pinholes* necesitan una montura que ofrezca la posibilidad de que más de un *pinhole* defina un mismo disco en el espacio. Esto es, para definir el eje óptico paralelo a la mesa sobre la cual se colocan las monturas, se utilizan dos *pinholes* que requieren ajustarse uno respecto del segundo en los dos grados de libertad en el plano transversal. Estos dos ajustes se realizan por medio de movimientos de traslación fino y basto con una resolución de 0.1 mm. La montura genérica propuesta para el *pinhole* se ilustra en la Figura 3.5.

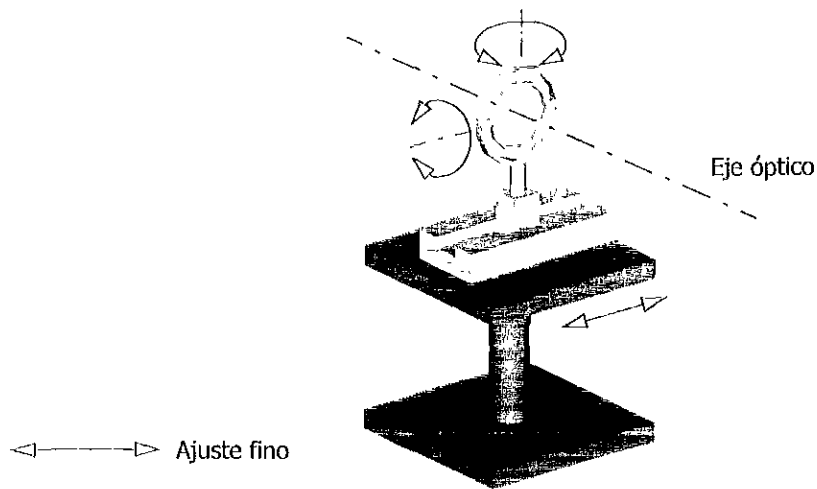


Figura 3.6. Montura genérica para espejo. La resolución requerida en los movimientos de rotación del espejo es especialmente estricta.

3.1.6. Montura para espejo

La función de los espejos, que es dirigir los haces luminosos hacia un punto específico, es muy delicada cuando el espejo se encuentra alejado de su objetivo. En el arreglo óptico en estudio, las distancias que separan a cada uno de los dos espejos de su objetivo final—la celda de flujo— son las mayores dimensiones que existen en el tren óptico y por lo tanto sus monturas requieren la mejor resolución dentro del experimento.

Para calcular la resolución necesaria se utiliza la Ecuación 3.3 donde la distancia L es 1500 mm para el espejo principal y 680 mm para el espejo del eje óptico secundario, por lo que se requieren resoluciones de 0.35 segundos y 0.75 segundos respectivamente. Estos son los valores de resolución para los dos grados de libertad en rotación de los espejos.

El espejo principal necesita, adicionalmente, un ajuste fino de traslación en la dirección transversal, para lograr desplazamientos laterales del haz reflejado y poder hacerlo coincidir con los *pinholes* de referencia sobre el eje óptico principal. Considerando que el menor valor de posicionamiento vertical y transversal del diámetro del rayo láser que se utiliza es de $5\ \mu\text{m}$, una resolución de $1\ \mu\text{m}$ en la traslación del espejo es suficiente (ver Figura 3.6). Este requerimiento se detalla más ampliamente en la Sección 3.3 de calibración del haz.

3.2. Diseños Detallados

En esta Sección se describen los diseños detallados de las monturas que se utilizan en el tren óptico del experimento de BBIF del Laboratorio de Reología Óptica del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Es importante señalar que cuando ha sido posible utilizar una montura comercial, ello se ha hecho, cubriendo el mayor número de grados de libertad con lo disponible comercialmente; sin embargo, casi para todos los elementos ópticos se requiere el maquinado de partes complementarias, o incluso el diseño y producción de toda la montura —que en algunos casos cubre ocho grados de libertad. De esta forma, los diseños de las monturas utilizan algunas partes e instrumentos comerciales así como partes fabricadas en los talleres del IIM-UNAM para alcanzar las precisiones requeridas en cada montura. Se proporciona información acerca de las partes e instrumentos comerciales, para poder hacer referencia a ellos a lo largo de las descripciones detalladas de cada montura, y se define también los materiales a utilizar en las partes fabricadas.

3.2.1. Elementos de diseño

Monturas Newport

Para efectuar las funciones de movimiento de traslación y rotación de precisión se utilizan elementos de la marca Newport en la mayoría de los ensambles diseñados. El catálogo de Newport [23] incluye las especificaciones técnicas correspondientes a resolución, intervalos de ajuste y dimensiones principales, mismas que se emplean como datos de base para definir las piezas a fabricar.

Micrómetros

Los desplazamientos de varias monturas se efectúan utilizando micrómetros de la marca Mitutoyo, que tienen resolución de 0.01 mm e intervalos de desplazamiento variables de 13 ó 50 mm. En algunos casos se eligen micrómetros con escala *vernier*, lo que proporciona una resolución de 1 μm .

Otras partes comerciales

Se utiliza también una serie de partes comerciales, como tornillos métricos (principalmente M4 y M6), resortes, pernos, rondanas, esferas de acero, insertos de gran dureza, entre otros. La referencia de estos elementos se hace con base en catálogos disponibles, pero no se menciona un fabricante en especial.

Materiales

Prácticamente todas las piezas, salvo cuando se especifique lo contrario, están diseñadas para ser fabricadas en la aleación de aluminio 6061. Se elige aluminio por ser un material ligero, con un buen coeficiente entre rigidez y peso, y no presenta corrosión. Las piezas se anodizan después de su fabricación para aumentar su resistencia a la corrosión y mejorar su acabado. Se utiliza un anodizado negro mate para reducir las reflexiones especulares de la luz, característica importante en el diseño de monturas ópticas. La aleación de aluminio 6061 se elige por su facilidad de maquinado, su calidad en el producto terminado, características necesarias para obtener las tolerancias establecidas. La buena "maquinabilidad" de la aleación de aluminio 6061 es una ventaja suficiente sobre otras aleaciones de aluminio como la 6063, aunque presenta el inconveniente de no tener gran disponibilidad en México. En algunas partes que requieren de una dureza elevada se utiliza acero inoxidable, y en otras cuya función es reducir los coeficientes de fricción, se utiliza bronce. Las especificaciones técnicas de los materiales utilizados se incluyen en el Anexo B.

3.2.2. Decisiones previas

Nomenclatura de las monturas

Para simplificar la denominación de cada montura, se utiliza el código que aparece en la Tabla 3.1. Nótese, por una parte, que las Monturas *E* y *F* son iguales, ya que soportan al mismo tipo de elemento óptico¹. Por otra parte, la Montura *J* sostiene dos elementos ópticos —la lente y el polarizador del haz verde— debido al espacio reducido de que se dispone para situar estos dos elementos. Los elementos de la etapa de análisis y detección (lente posterior, analizadores y detectores) se sitúan en la base de la celda de flujo —goniómetro²— y su diseño no se incluye en esta tesis.

Elevación del haz

La elevación del haz con respecto a la plataforma debe ser lo más pequeña posible, para reducir las flexiones de las piezas verticales (columnas) de las monturas. Esta elevación

-
1. Es posible utilizar un sólo diafragma para la calibración, si su montura permite colocarlo en diferentes puntos sobre el eje óptico manteniendo su altura.
 2. La necesidad del uso de un goniómetro se propone para hacer estudios complementarios de dispersión de luz, para el mismo tipo de experimento.

Elemento Óptico	Montura
Espejo Inicial	A
Lente (haz azul)	B
Polarizador (azul)	C
Filtro azul	D
Diafragma	E, F
Lente Objetivo	G
Divisor de haces	H
Filtro verde	I
Lente (verde)	J
Polarizador (verde)	J
Espejo (eje secundario)	K

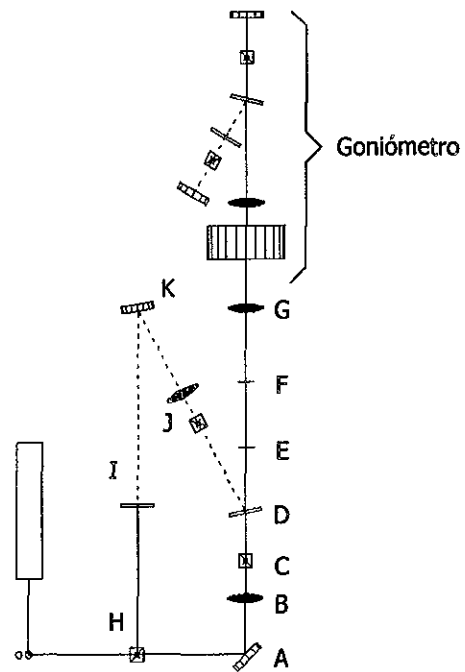


Tabla 3.1. Nomenclatura de las monturas utilizadas en el tren óptico. Los elementos coinciden con la Figura 2.1.

mínima queda determinada por la montura que se utiliza para sostener el divisor de haces, pues es la más voluminosa. El valor de elevación que se utiliza como referencia para el diseño del resto de las monturas es de 155 mm.

3.2.3. Mesa y Plataforma

El experimento de Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución utiliza elementos ópticos cuya localización y orientación requiere precisión micrométrica. Este arreglo óptico está sujeto a movimientos producidos por vibraciones, variaciones térmicas, y cargas (esfuerzos) estáticas y dinámicas, que desafortunadamente disminuyen la resolución y precisión de las mediciones.

Para disminuir estas perturbaciones, el arreglo óptico se coloca sobre un soporte rígido aislante de vibraciones. Dicho soporte debe cumplir con cinco condiciones para mejorar la precisión y resolución de las mediciones: (1) una estructura dinámicamente rígida que atenúe las vibraciones resonantes, (2) un sistema de aislamiento de vibraciones, (3) una estructura rígida que se deforme lo menos posible ante grandes cargas estáticas, (4) un control de la temperatura ambiente para reducir las variaciones de temperatura y (5) un diseño que sea poco sensible a las variaciones de temperatura.

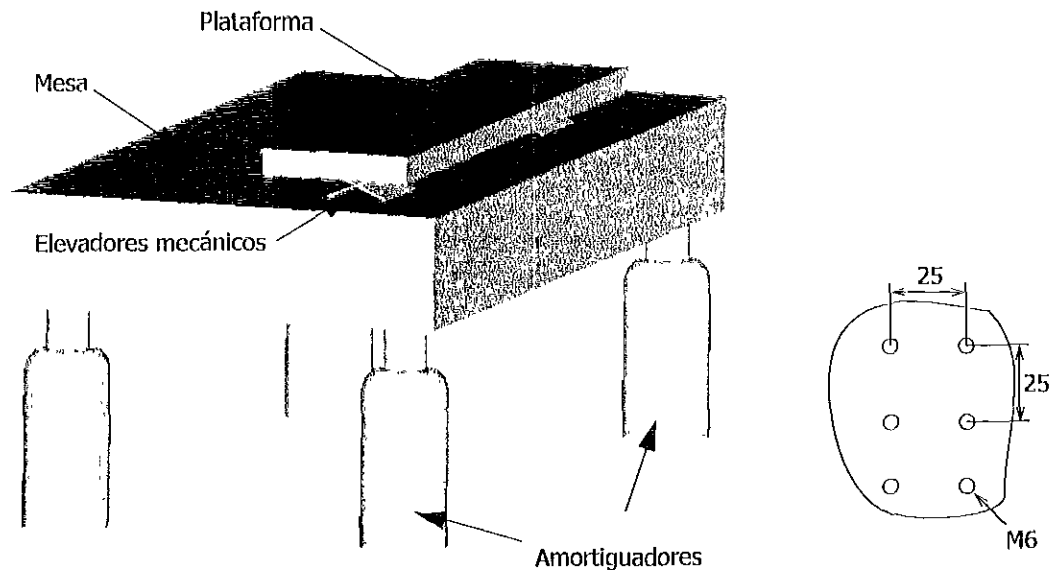


Figura 3.7. Mesa antivibraciones y plataforma. El equipo láser se coloca directamente sobre la mesa, mientras que el arreglo óptico se sitúa sobre la superficie de la plataforma. El esquema de la derecha muestra el arreglo de barrenos con cuerda M6 de ambas superficies.

Se utiliza una mesa anti-vibraciones Newport modelo RS 2000, que proporciona una atenuación óptima de modos vibracionales, una elevada rigidez en su estructura, y una superficie de material resistente a la corrosión y cuyas dimensiones son prácticamente invariantes ante los cambios de temperatura. Además, la mesa está sostenida por amortiguadores neumáticos que atenúan las vibraciones verticales y horizontales. Adicionalmente, se coloca sobre la mesa una plataforma para elevar el nivel sobre el que se colocan las monturas ópticas con respecto a la superficie de la mesa, como se observa en la Figura 3.7. La altura entre ambas superficies se regula a través de dos elevadores mecánicos¹ de gran capacidad de carga (500 kg) y de precisión: la necesidad de rigidez, amortiguamiento y estabilidad es resultado de la complejidad de alineamiento del tren óptico completo. Se requiere aproximadamente de dos a cuatro días para alinearlo y se necesita que esta alineación se mantenga hasta por periodos de seis meses.

Las superficies de la mesa y plataforma tienen un arreglo de perforaciones con cuerda M6, espaciadas por 25 mm, sobre toda el área de trabajo. Con el fin de proteger la mesa contra derrames accidentales, dichas perforaciones están selladas con un material

1. La altura sobre la mesa RS-2000 de más de 30 cm es resultado de las dimensiones (altura) del goniómetro y de la celda de flujo (molino de dos rodillos). Por ello es necesario poder ajustar la altura sobre la mesa del tren óptico completo, respecto de la altura del goniómetro.

resistente a la corrosión y a sustancias activas comúnmente utilizadas en laboratorios, como ácidos, bases y solventes. Estas perforaciones facilitan la localización alineada de las monturas del tren óptico, y sirven al mismo tiempo como referencia para establecer las distancias entre los elementos ópticos.

3.2.4. Dispositivo de dirección

El haz emitido por el equipo láser es manipulado inicialmente por un elemento Newport llamado *dispositivo de dirección*, que consta de dos espejos con dos grados de libertad de rotación cada uno (Figura 3.8). La altura del haz a la cabeza del láser es aproximadamente de diez centímetros por lo que se requiere elevarlo cerca de veinte centímetros más. La función de esta montura óptica es elevar el haz hasta el plano en que se sitúan los ejes ópticos principal y secundario, y dirigirlo hacia el divisor de haces con gran precisión y extrema estabilidad.

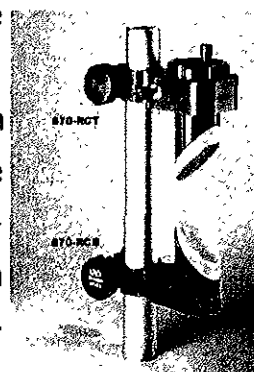


Figura 3.8. Dispositivo de dirección.

3.2.5. Diseño de las Bases Comunes

Una Base Común se utiliza en las Monturas A, B, C, D, G, y K. En el caso de las monturas para pinholes (E y F) y para filtro (I) es posible prescindir de ella pues una simple columna cilíndrica de altura variable satisface las necesidades previstas.

Las funciones de la Base Común son tres: fijación de cada montura sobre la superficie de la plataforma; ajuste basto de traslación en el sentido transversal; y ajuste basto en la altura de la montura.

Base cinemática universal M-BK-3

Para la función de fijación y ajuste basto sobre la mesa, se utiliza una base cinemática universal fabricada por Newport (modelo M-BK-3). Esta base, ilustrada en la Figura 3.9, consiste en dos placas complementarias que se fijan entre sí por medio de una unión cinemática (unión que elimina los seis grados de libertad entre dos cuerpos sin imponer esfuerzos entre ellos, véase la Figura 2.12). La placa inferior se fija a la plataforma por medio de un tornillo M6, y la placa superior se hace solidaria al cuerpo de la Base Común. Esto permite quitar

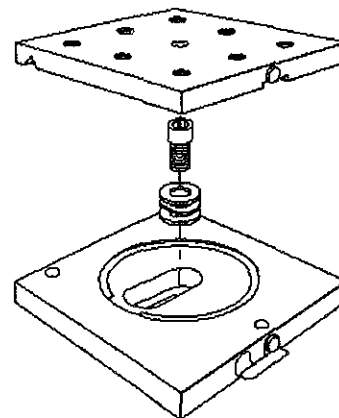


Figura 3.9. Base cinemática universal M-BK-3, de Newport.

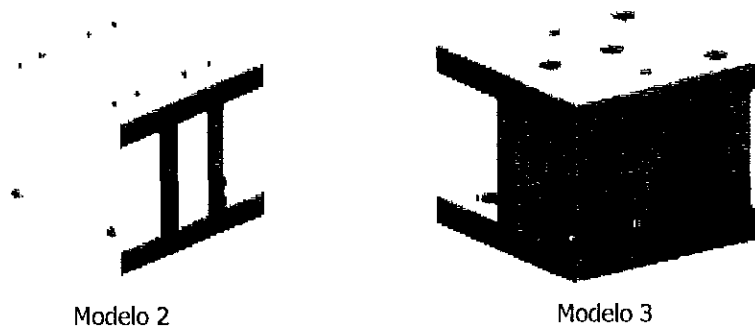


Figura 3.10. El modelo 2 reduce el balanceo de la placa superior, pero sus columnas pueden flexionarse. El modelo 3 es más estable, por lo que se adopta para el diseño de la Base Común.

y poner la montura completa sin necesidad de remover ningún tornillo, proporcionando una excelente repetibilidad —inferior a un segundo de arco en los tres ejes— en el proceso de retirar y colocar la montura en su misma posición sobre la plataforma.

El ajuste basto sobre la mesa se obtiene gracias a que la base M-BK-3 puede fijarse en cualquier punto y orientación dentro de un radio de 20 mm centrado en el barreno de fijación de la mesa.

Cuerpo de la Base Común

El cuerpo de la Base Común se elige entre tres modelos diferentes: el primero es un perfil en forma de I, el segundo es también un perfil en I de doble columna, y el tercero cuenta con dos placas verticales perpendiculares entre sí.

El primer modelo, por tener una única columna, es menos estable y la placa superior oscila alrededor de la dirección longitudinal. El segundo modelo supera al primero pues cuenta con dos columnas paralelas que reducen la posibilidad de balanceo; sin embargo su configuración no impide que ambas columnas se inclinen hacia los lados y pierdan su verticalidad. El tercer modelo ofrece aún dos ventajas sobre el segundo: la disposición perpendicular de las columnas favorece su verticalidad y elimina por completo la posibilidad de balanceo pues los puntos de apoyo están separados al máximo. Este último modelo es entonces el más conveniente por su estabilidad y rigidez. Los modelos segundo y tercero se ilustran en la Figura 3.10.

En la placa horizontal inferior se practican 4 barrenos con caja para alojar los tornillos M6 que sirven para fijar el cuerpo de la Base Común con la base M-BK-3. Cada columna se fija a las placas horizontales por medio de dos tornillos M4. La placa superior se modifica de

acuerdo a los elementos de ajuste que se utilizan en cada montura. Cada cuerpo de base se ha diseñado con una altura que coloca al elemento óptico a la altura del tren óptico, esto es, a 155 mm con respecto a la superficie de la plataforma.

Bujes

Para agregar la posibilidad de ajuste basto en el desplazamiento vertical, se diseñan bujes que se colocan en cada tornillo entre la placa horizontal inferior y la base M-BK-3. El espesor rectificado de estos bujes es de 1 y 2 mm, de tal forma que por medio de un apilamiento de varios bujes se puede modificar la altura de la montura con una resolución de 1 mm en un intervalo de hasta 10 mm.

En la Figura 3.11 se observa un maquinado en la superficie del buje, que tiene por objetivo reducir el área de contacto a un anillo delgado, para proporcionar mayor precisión.

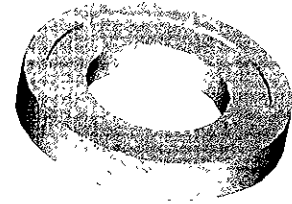


Figura 3.11. Buje utilizado para aumentar la elevación del elemento óptico.

Dimensiones y tolerancias

Las dimensiones y tolerancias calculadas en los párrafos siguientes hacen referencia a la información que aparece en los planos correspondientes a la Base Común: *Placa Inferior*, *Columna Longitudinal* y *Columna Transversal*, que se encuentran en el Anexo C.

Espesor de placas. El espesor de las placas horizontales no es una dimensión funcional. Se establece un espesor de 10 mm para mantener la homogeneidad con las piezas Newport, que utilizan placas del mismo espesor. Debido a que esta dimensión no requiere precisión, una tolerancia de ± 0.2 mm es suficiente.

Las placas utilizadas en los diseños de las monturas son también de 10 ± 0.2 mm, mientras no se especifique otra dimensión o tolerancia.

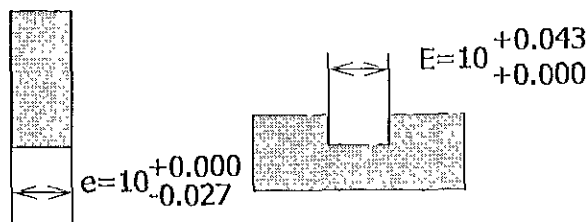
Placas horizontales. Las dimensiones de la Placa Inferior son iguales a las de la base M-BK-3, es decir, un cuadrado de 76.2 mm (3 pulgadas) de lado, con una tolerancia de ± 0.2 mm. Las dimensiones de la Placa Superior dependen del elemento que se coloca en cada montura.

Ranuras. La profundidad de las ranuras que alojan a las columnas es de 2 mm, dimensión mínima que permite una fácil colocación de las columnas, con una tolerancia de ± 0.1 mm.

Ajuste H9h8:

$$J_{\min}=0$$

$$J_{\max}=0.07$$



$$\text{Tolerancia del cortador: } E=10 \begin{matrix} +0.025 \\ +0.000 \end{matrix}$$

$$J_{\min} = E_{\min} - e_{\max} = 0 \longrightarrow e_{\max} = 10.000$$

$$J_{\max} = E_{\max} - e_{\min} = 0.07 \longrightarrow e_{\min} = 9.955$$

$$e=10 \begin{matrix} +0.000 \\ -0.045 \end{matrix}$$

* Unidades en milímetros

Figura 3.12. Cálculo de las tolerancias en el maquinado de las ranuras y del espesor de las columnas para obtener un ajuste h8H9.

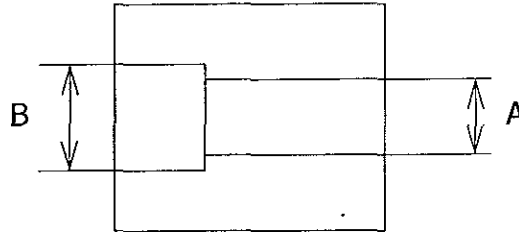
El ancho de las ranuras y el espesor de las columnas necesitan un ajuste de tipo H9h8 (ver Figura 3.12) que permite un ensamble manual preciso [24]. Dado que las ranuras se maquinan con un cortador de diámetro 10 mm cuya tolerancia según los catálogos es de [0, +0.025] para este diámetro, el ajuste H9h8 impone la tolerancia en el espesor e de la columna.

Paralelismo. La superficie superior de la Base Común debe satisfacer una condición de paralelismo de 0.01 mm^1 con respecto a la superficie de la plataforma, de tal forma que todos los puntos situados en la superficie de la Placa Superior tienen un error máximo en su elevación sobre la superficie de la plataforma del orden de $1/10000$ con respecto a las dimensiones de la placa. Para obtener esta condición sin recurrir a tolerancias de paralelismo encadenadas entre las piezas que conforman la base (Placa Superior, Placa Inferior y Columnas) se practica un maquinado de superficie después de ensamblarla, obteniendo así entre las superficies inferior y superior de la Base Común el paralelismo que proporciona la fresadora. Es importante señalar que la base no debe desmontarse después de haber realizado el maquinado, pues de lo contrario se perderá el paralelismo.

Barrenos. Las dimensiones estándar de los barrenos y cajas para alojar los tornillos M6 (fijación de la placa inferior con M-BK-3) y M4 (fijación de columnas con placas horizontales) se resumen en Tabla 3.2 [25].

1. Esta tolerancia geométrica significa que la superficie en cuestión debe situarse entre dos planos teóricos separados entre sí por 0.01 mm y paralelos a la superficie de referencia (en este caso, la de la plataforma).

	Diámetro barreno A		Diámetro caja B
	Ajuste apretado	Ajuste libre	
M4	4.40	4.80	8.25
M6	6.40	6.80	11.25



* La profundidad mínima de la caja es igual al diámetro nominal del tornillo

Tabla 3.2. Dimensiones estándar para alojamientos con caja de tornillos.

Tolerancias de localización. La localización de los barrenos se establece con la misma tolerancia que Newport reporta en la fabricación de sus piezas: ± 0.1 mm en las coordenadas x y y sobre el plano. El error máximo de localización entre barrenos correspondientes de dos piezas a unir es de 0.2 mm en cada dirección, dando lugar a una excentricidad máxima de 0.2828 mm (ver Figura 3.13). De esta forma puede utilizarse un ajuste apretado en el diámetro de los barrenos.

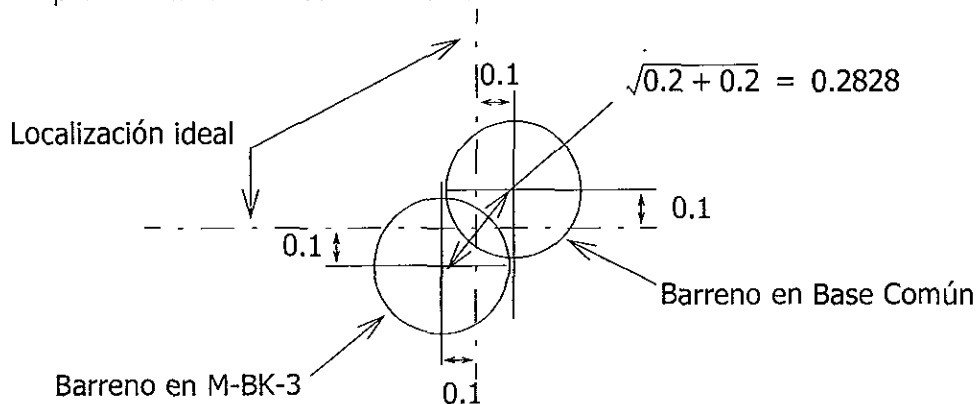


Figura 3.13. Cálculo del error en la localización de los barrenos.

Asimismo, se establece una tolerancia de simetría de 0.2 mm tanto para la localización de los barrenos con caja M4 con respecto a las ranuras, como para los correspondientes barrenos con cuerda en el canto de las columnas con respecto al plano medio de las mismas.

3.2.6. Montura A (para espejos)

Movimientos de Ajuste

Las estrictas condiciones de resolución angular que se determinaron en la Sección 3.1.6, se satisfacen utilizando la Montura de Ultra-resolución para Espejos (*Ultra-resolution Mirror Mount*) modelo 610 de Newport. Esta montura tiene una resolución angular inferior a un segundo de arco, dentro de un intervalo de 13 grados, e incluye ajustes basto y fino en las dos rotaciones en direcciones vertical y transversal. Para el movimiento de ajuste en traslación transversal, se agrega una base de traslación micrométrica Newport modelo M-423, con un micrómetro de 1 μm de resolución (utilizando la escala *vernier*). Estos dos elementos de Newport aparecen en la Figura 3.14.

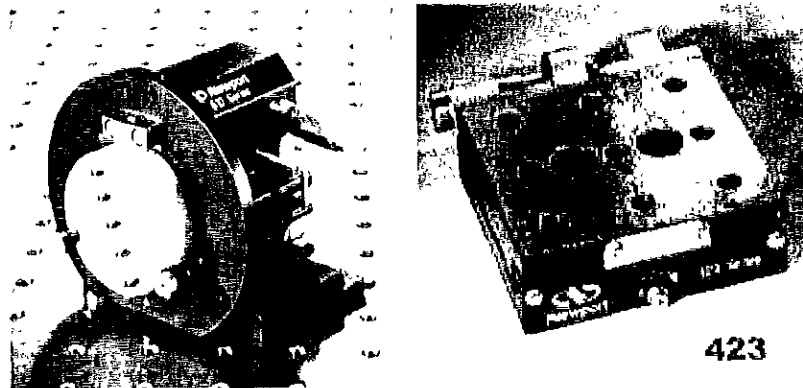


Figura 3.14. Montura de ultra resolución para espejo, modelo 610 (izquierda) y base de traslación micrométrica, modelo M-423 (derecha).

Adaptación de la Base Común

La placa superior de la Base Común soporta al elemento M-423, que necesita fijarse por medio de dos tornillos M6 separados por una distancia de 50 mm. La tolerancia de localización es ± 0.1 mm, de acuerdo con el cálculo efectuado en la Sección 3.2.5. La silueta de la placa superior se hace igual a la de la montura M-423: un cuadrado de 3 pulgadas de lado. De esta forma queda definida por completo esta pieza cuyo plano aparece en el Anexo C.

A partir de las alturas de los elementos M-BK-3 y M-423, se calcula que la altura de las columnas debe ser de 50 mm para situar el centro del espejo a una altura de 155 mm sobre la superficie de la plataforma. El ensamble de la Montura A se ilustra en la Figura 3.15.

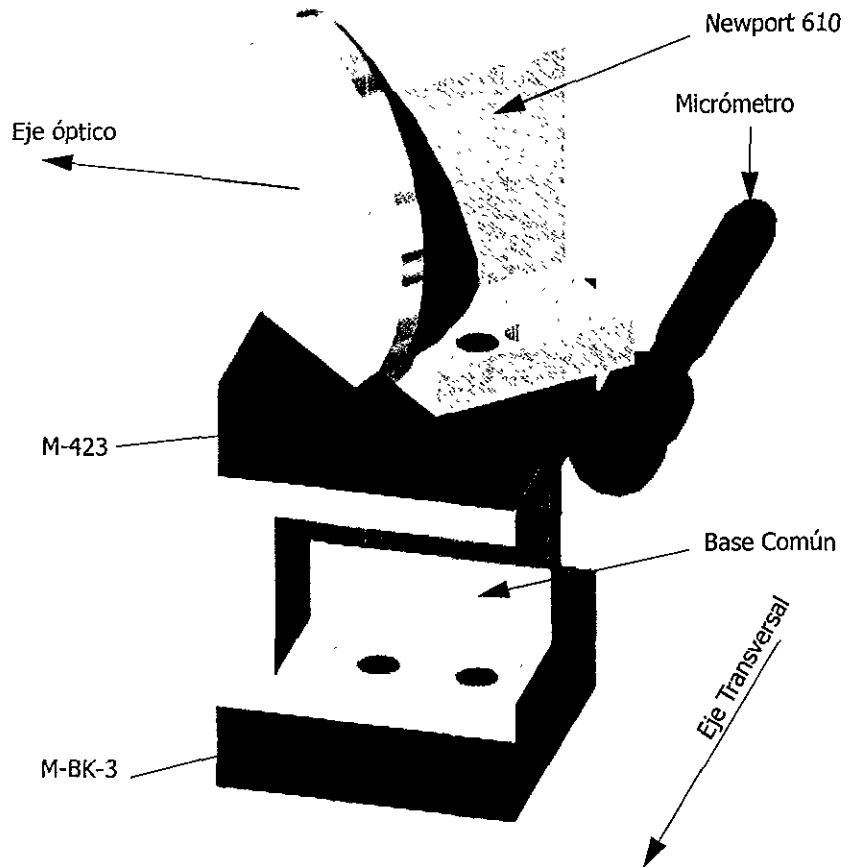


Figura 3.15. Ensamble de la Montura A. El rayo láser reflejado parte hacia la izquierda de la foto.

3.2.7. Montura B (para lentes)

Movimientos de ajuste

La Montura B soporta una lente que requiere ajustes fino y basto en las tres direcciones de traslación. Existe para ello un elemento Newport llamado Plataforma de Traslación Multi-eje (*Multi-Axis Stage*, modelo 460A-XYZ) que proporciona los tres grados de libertad en traslación requeridos, dentro de un intervalo de 13 mm, con una resolución de $1\mu\text{m}$ que le confieren tres micrómetros con escala *vernier*. Los dos grados de libertad en rotación se ejecutan utilizando una montura Newport especial para lentes, modelo M-MM-200-A, que tiene una resolución de 5 segundos de arco sobre un intervalo de 7.5° . La articulación que provee los dos movimientos de rotación en esta montura es una unión cinemática, lo que confiere alta repetibilidad en ambos ajustes. Estos elementos de Newport aparecen en la Figura 3.16.



Figura 3.16. Del lado izquierdo, la Plataforma de Traslación Multi-eje, que cumple con los ajustes finos en las tres direcciones de traslación. Del lado derecho, la Montura Cinemática para Lentes.

Adaptación de la Base Común

Para fijar el elemento 460A-XYZ, la placa superior de la Base Común se diseña con una geometría rectangular de 100 X 88.9 mm, coincidente con la silueta de la Plataforma de Traslación, y se agregan cuatro barrenos con cuerda M6. La definición completa de esta pieza aparece en el Anexo C. La altura calculada de las columnas es de 51 mm.

Brida

Para unir el elemento M-MM-200-A con la superficie vertical de la Plataforma de Traslación se diseña una pieza que se encarga también de los ajustes bastos en traslación longitudinal y vertical. Esta pieza, que se denomina brida, tiene perforaciones con caja para alojar los tornillos M4 que sujetan a la Montura Cinemática para Lentes. La sujeción de esta brida sobre el 460A-XYZ se hace a través de dos ranuras que permiten variar su posición verticalmente a modo de ajuste basto dentro de un intervalo de 25 mm. Por último, la posibilidad de atornillarla en tres perforaciones diferentes de la Plataforma de Traslación cumple con la función de ajuste basto en el sentido longitudinal dentro de un intervalo también de 25 mm. El dibujo detallado de la brida se encuentra en el Anexo C. El diseño de ensamble propuesto satisface todas las condiciones de precisión requeridas, y se ilustra en la Figura 3.17.

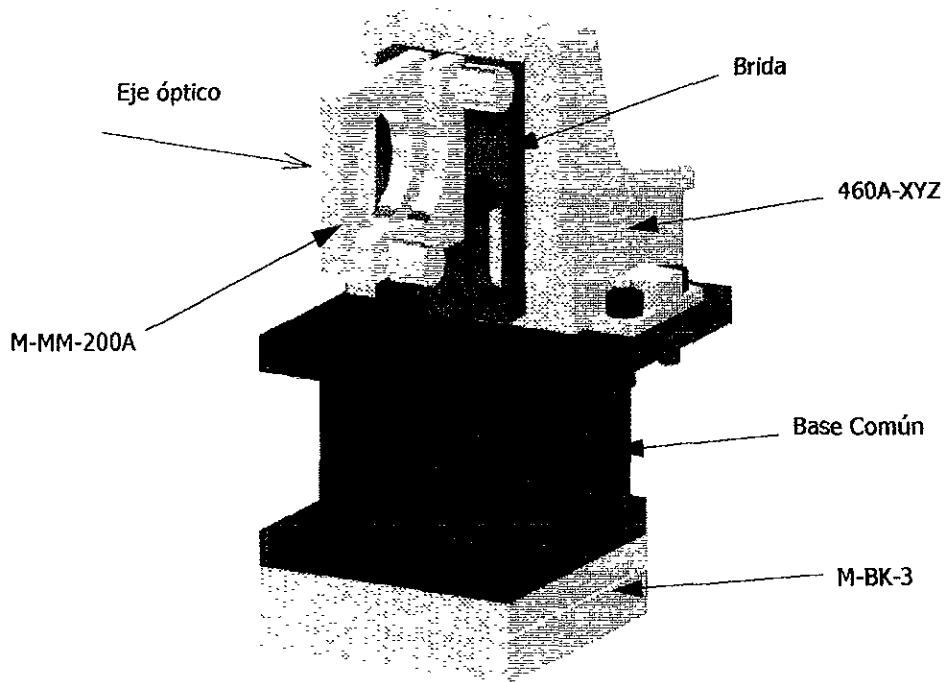


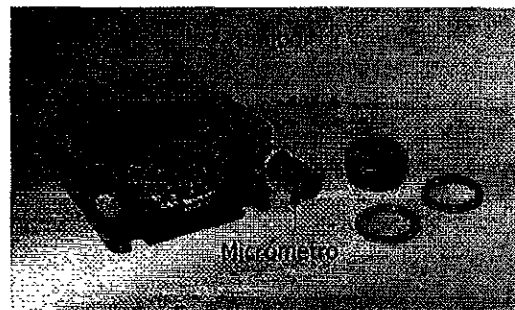
Figura 3.17. Ensamblaje de la Montura B. Los desplazamientos de la plataforma de traslación utilizan tres micrómetros que no aparecen y que generan los tres grados de libertad de traslación.

3.2.8. Montura C (polarizador azul)

Ajuste de rotación longitudinal

La Montura C proporciona el ajuste de rotación acimutal —alrededor del eje longitudinal— que necesita el polarizador azul. Para ello se utiliza un Dispositivo Rotatorio de Newport modelo M-481-A, que tiene una resolución de 30 segundos de arco (5 segundos utilizando la escala *vernier*) sobre un intervalo de 360 grados, y que permite al mismo tiempo un ajuste basto (véase la Figura 3.18).

Figura 3.18. Dispositivo de rotación M-481-A. El ajuste basto se obtiene girando manualmente el tambor, mientras que el ajuste fino se efectúa a través del micrómetro con escala vernier.



Adaptación de la Base Común

Para elevar el eje de rotación del M-481-A a 155 mm sobre la plataforma, se necesita una altura de 70 mm en las columnas de la Base Común. La placa superior de la Base Común cuenta con una ranura en la que se fija la montura cinemática que se describe a continuación.

Montura cinemática

El Dispositivo Rotatorio se fija a una placa vertical que forma parte de una montura cinemática, diseñada para realizar con exactitud y repetibilidad los dos grados de libertad en rotación en el plano transversal. Partiendo del modelo teórico de montura cinemática descrito en la Sección 2.3.2, el diseño consiste en una placa fija y una placa "flotante", ambas verticales y unidas entre sí por seis contactos equivalentes a los contactos puntuales teóricos. La montura cinemática se compone de los elementos descritos a continuación, cuyos planos se pueden consultar en el Anexo C.

Placa Fija. La Placa Fija, que es solidaria de la Base Común, tiene tres barrenos dispuestos en "L", como se observa en la Figura 3.19. En la perforación situada en el vértice de la "L" se aloja una esfera. Las otras dos perforaciones sostienen dos micrómetros de punta esférica, de tal forma que el desplazamiento de sus vástagos es perpendicular a la placa.

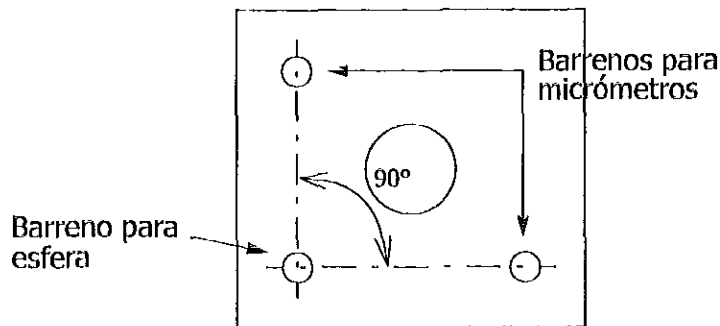


Figura 3.19. Croquis de las perforaciones en la Placa Fija. El ángulo de 90° indicado es importante para el funcionamiento de la montura cinemática, como se explica más adelante. El eje óptico es normal al plano de la figura y centrado sobre el círculo de diámetro mayor.

Placa Flotante. La Placa Flotante es solidaria del dispositivo M-481-A. Al modificar la orientación del plano medio de esta placa con respecto al plano medio de la Placa Fija se proporcionan al polarizador dos grados de libertad en rotación alrededor de los ejes transversal y vertical. La Placa Flotante está unida a la Placa Fija a través de seis con-

tactos teóricamente puntuales: tres entre la esfera y una superficie cónica que se maquina sobre la Placa Flotante, dos entre la punta esférica de un micrómetro y una ranura en V, y uno más entre la punta del otro micrómetro y un plano. De esta manera se obtienen los contactos establecidos para la montura cinemática: esfera-cono, esfera-ranura y esfera-plano.

Insertos. La ranura en V y el plano se materializan por medio de dos insertos de acero inoxidable templado. La función de estos insertos es proporcionar una superficie de contacto de mayor dureza que la del aluminio, para evitar indentaciones provocadas por las puntas esféricas de los micrómetros.

Estos insertos se colocan a presión dentro de cajas maquinadas en la Placa Flotante, y cuyas localizaciones corresponden a las de los micrómetros en la Placa Fija. El ajuste entre el diámetro de los insertos y el de las cajas debe ser del tipo H7m6 [24] para permitir un ensamble a presión¹. Es necesario que el eje de la ranura coincida con el eje que une al centro de este inserto con el centro de la perforación cónica.

Resortes. La fijación entre las placas se lleva a cabo por medio de resortes helicoidales que operan en tracción, enganchados a las superficies de las placas a través de pernos.

Esfera. Se utiliza una esfera de acero inoxidable templado, de 5/16" de diámetro, y esfericidad de 0.0001".

El funcionamiento del mecanismo compuesto por los elementos anteriores es el siguiente (ver Figura 3.20). Al desplazar el vástago de cada uno de los micrómetros se obtiene un movimiento de rotación, cuyo pivote es la esfera. Es importante que los ejes de las dos rotaciones sean ortogonales, de tal forma que al modificar una de las orientaciones, el eje de la otra se mantenga en el mismo plano. Para ello es necesario que los ejes que unen a los centros de cada micrómetro con el centro del barreno que aloja a la esfera, todo esto en la Placa Fija, formen un ángulo de 90° (ver Figura 3.19).

La resolución angular que proporciona esta montura es función de la resolución de los micrómetros y de la distancia que los separa del pivote (esfera). Se utilizan dos micrómetros con resolución de 0.01 mm (sin escala *vernier*), uno a 50 y el segundo a 75 mm del pivote. Con estos valores, la resolución obtenida es de 41 y 27 segundos de arco respectivamente.

1. Una posibilidad para fabricar estos insertos es a partir de clavijas de posicionamiento comerciales (en inglés *dowel pins*) que están maquinadas con una tolerancia diametral de [0, +0.0002"], adecuada para el ajuste H7m6.

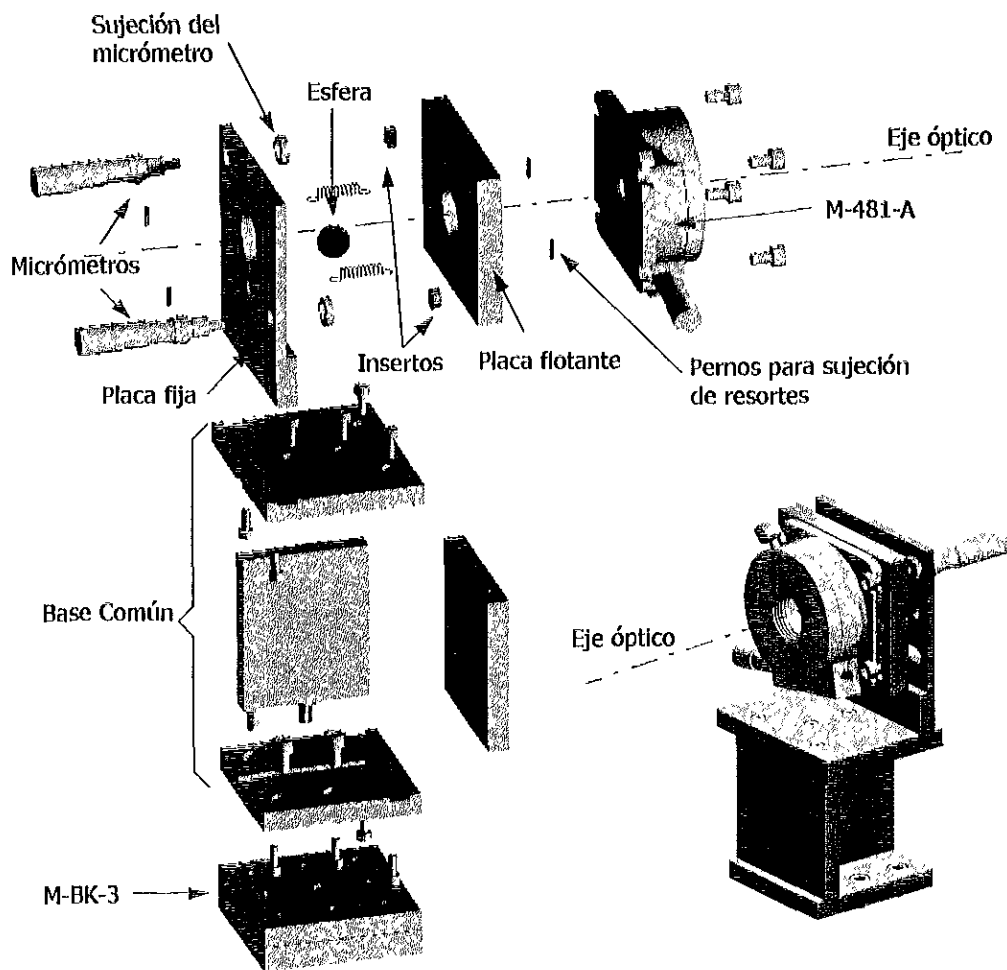


Figura 3.20. Explosión y dibujo de ensamble de la Montura C. La Placa Fija se atornilla a la placa superior de la Base Común. La Placa Flotante es atraída hacia la Placa Fija por medio de dos resortes de tracción, obligando así los contactos con la esfera y las puntas de los micrómetros, que están unidos solidariamente a la Placa Fija. Los insertos, construidos en acero inoxidable templado y revenido, se ensamblan a presión dentro de las cavidades maquinadas en la Placa Flotante.

La resolución angular requerida en estos movimientos (para polarizadores con paralelismo entre las caras de tres minutos de arco) queda ampliamente satisfecha.

Tolerancias. El ángulo de 90° en el arreglo de perforaciones de la Placa Fija debe cumplirse con una tolerancia de inclinación suficiente para no inducir errores mayores a la resolución angular obtenida¹. Al efectuar una rotación de 180° alrededor de uno de los ejes, cuando existe un error $\Delta\theta$ en el ángulo de 90 grados, el otro eje sufre una desviación

1. Esta tolerancia estricta no es necesaria en las perforaciones de la Placa Flotante, ya que uno de los micrómetros se apoya sobre el inserto plano que no necesita localización precisa.

máxima igual a $2\Delta\theta$, con respecto al plano que lo contenía inicialmente. Se propone que el error inducido sea menor a 50 segundos de arco, para que la resolución disponible permita su corrección. Entonces, el error máximo $\Delta\theta$ es de 25 segundos de arco, lo que significa que el desplazamiento de un orificio respecto de la línea ideal no puede ser mayor que 0.01 mm considerando que la distancia máxima entre barrenos es de 75 mm para (ver Figura 3.21).

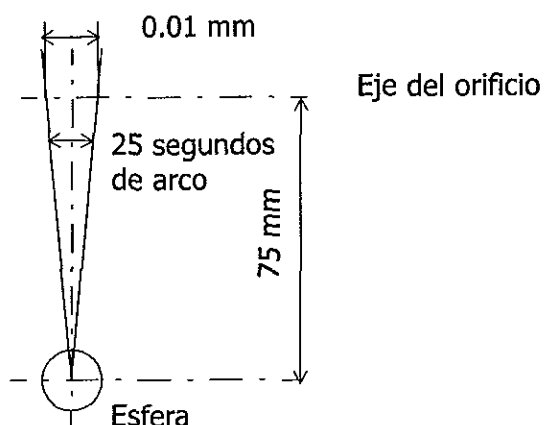


Figura 3.21. Tolerancia para el ángulo recto entre los ejes del arreglo de perforaciones de la Placa Fija.

3.2.9. Montura D (filtro azul)

Movimientos de ajuste fino

El filtro azul cumple dos funciones en el tren óptico: eliminar el haz verde proveniente del eje óptico principal, y reflejar el haz verde proveniente del eje óptico secundario hacia la celda de flujo. La Montura D proporciona los ajustes necesarios para estas dos funciones. La primera función requiere de un ajuste basto de rotación alrededor del eje longitudinal. Este ajuste se lleva a cabo utilizando un Sujetador de Filtro, cuyo diseño se explica más adelante (Sección 3.2.10). La segunda función necesita dos grados de libertad de rotación alrededor de los ejes vertical y transversal. Los ajustes finos de estos dos movimientos se realizan con una Montura Óptica Cinemática de Newport, modelo 600A-2R, cuya resolución depende del tipo de micrómetros utilizados (ver Figura 3.22).

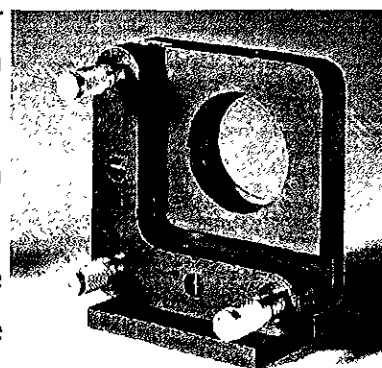


Figura 3.22. Montura Óptica Cinemática 600A-2R. Los dos micrómetros situados en los extremos de la "L" proporcionan dos movimientos de rotación. El tercero, opcional, se utiliza cuando es necesario agregar una traslación de $1\mu\text{m}$ de resolución sobre el eje longitudinal

Ajuste basto de rotación

La Montura D tiene un mecanismo adicional para un ajuste basto de rotación alrededor del eje vertical. Este ajuste permite modificar el ángulo de incidencia del eje óptico secundario dentro de un intervalo de 20° , manteniendo la Base Común de la montura alineada con el resto de ellas. El eje de rotación de este ajuste coincide con el centro de la superficie reflejante del filtro, de tal forma que este último no sea desplazado por el movimiento de rotación. Si no se cumple esta condición, sería necesario agregar un desplazamiento de ajuste en la dirección transversal.

El ajuste basto de rotación se obtiene a través del movimiento relativo de dos piezas: la placa superior de la Base Común y una Placa Deslizante. El giro se efectúa sobre una pieza llamada Pivote. La descripción de estas piezas se da a continuación (ver planos en el Anexo C).

Placa Superior (Base Común). La adaptación de la Placa Superior de la Base Común para esta montura, consiste en agregar un barreno en el que se coloca el eje de rotación (Pivote), y un segundo barreno con cuerda M4 para el tornillo de fijación. La distancia entre estas perforaciones es de 45 mm, y la línea que las une forma un ángulo de 25° con respecto al eje longitudinal. La tolerancia de localización del barreno M4 es de 0.2 mm, usando como referencia el eje del barreno para el Pivote.

Placa Deslizante. Esta pieza tiene un barreno con caja que aloja el cuerpo del Pivote. Una ranura en arco de radio 45 ± 0.1 mm, centrado en el barreno del Pivote, permite la rotación de la placa en un intervalo de 20° . En esta ranura se inserta el tornillo de presión que fija a la Placa Deslizante en una posición determinada. Se maquinan también dos barrenos con caja para atornillar la Placa Deslizante con la pieza en "L" del elemento 600A-2R. Los ejes de estos barrenos forman un plano que está inclinado a un ángulo de 8.5° con respecto al plano transversal. Este valor es igual a la mitad del ángulo que forman el eje óptico principal y secundario en la configuración del tren óptico, de tal manera que el filtro está orientado inicialmente con esta inclinación, y el ajuste basto permite variar el ángulo en 10° hacia los dos lados (ver Figura 3.23).

Se establece entre el plano de los barrenos y la localización del Pivote una distancia de 26.8 mm, de tal forma que la superficie reflejante del filtro coincide con el eje del Pivote. El valor de esta distancia ha sido medido directamente en la montura 600A-2R. Ahora bien, el error en la obtención de esta dimensión induce una variación en la posición transversal del centro del filtro al realizar la rotación. Se calcula que esta variación es menor al 1% del error en la distancia. Por tanto, una tolerancia de ± 0.1 mm en

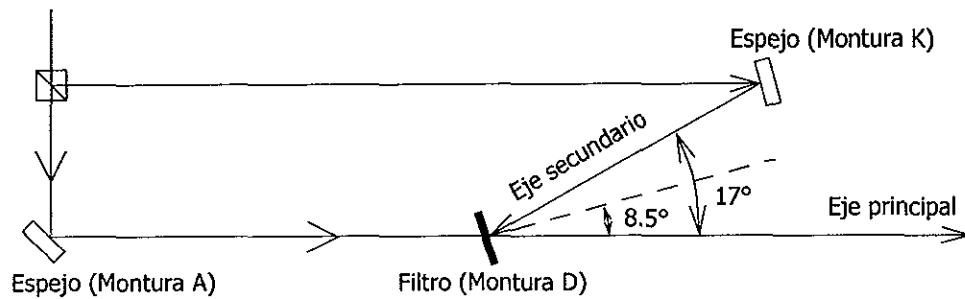


Figura 3.23. El filtro azul dirige el haz del eje secundario hacia la celda de flujo. La normal de la superficie reflejante forma un ángulo de 8.5° .

la distancia de 26.8 mm es suficiente. Las superficies de contacto de las placas Superior y Deslizante requieren una rugosidad de $Ra \approx 0.4 \mu\text{m}$ para que el movimiento relativo entre ellas pueda efectuarse con precisión.

Pivote. Esta pieza cilíndrica de acero inoxidable templado y revenido tiene un diámetro exterior de 6 mm, y una cabeza plana de 13 mm de diámetro. El ajuste entre la superficie cilíndrica del Pivote y las perforaciones que lo alojan en la Placa Superior y Placa Deslizante, es de tipo H7g6 [24] para guiar el movimiento con precisión. El Pivote se fija con un tornillo M4.

Rondana elástica "Belleville". Este elemento elástico de acero inoxidable proporciona una fuerza que oprime una placa contra la otra al apretar el tornillo M4 del pivote. Se elige una rondana de diámetro interior de $1/4''$, para poder introducirla en el pivote. El ensamble se muestra en la Figura 3.24.

Funcionamiento

Cuando los perímetros de las placas Superior y Deslizante coinciden, el elemento 600A-2R se encuentra con una orientación de 8.5° respecto del eje óptico y sobre el plano de los ejes primario y secundario, de tal forma que el haz verde es reflejado aproximadamente hacia la celda de flujo. En seguida se realiza un ajuste basto de orientación. Para ello, se desatornillan ligeramente los tornillos de Fijación y M4 para reducir la presión de contacto entre las placas. Se gira entonces la Placa Deslizante sobre el pivote hasta acercar el eje reflejado a la inclinación ideal, y se aprietan ambos tornillos. En seguida se actúa sobre los micrómetros para el ajuste fino de la orientación del filtro. Finalmente, con ayuda del Sujetador de Filtro, se hace girar el filtro alrededor del eje longitudinal para encontrar la orientación que presenta menor grado de birrefringencia residual. Estos dos pasos finales con frecuencia

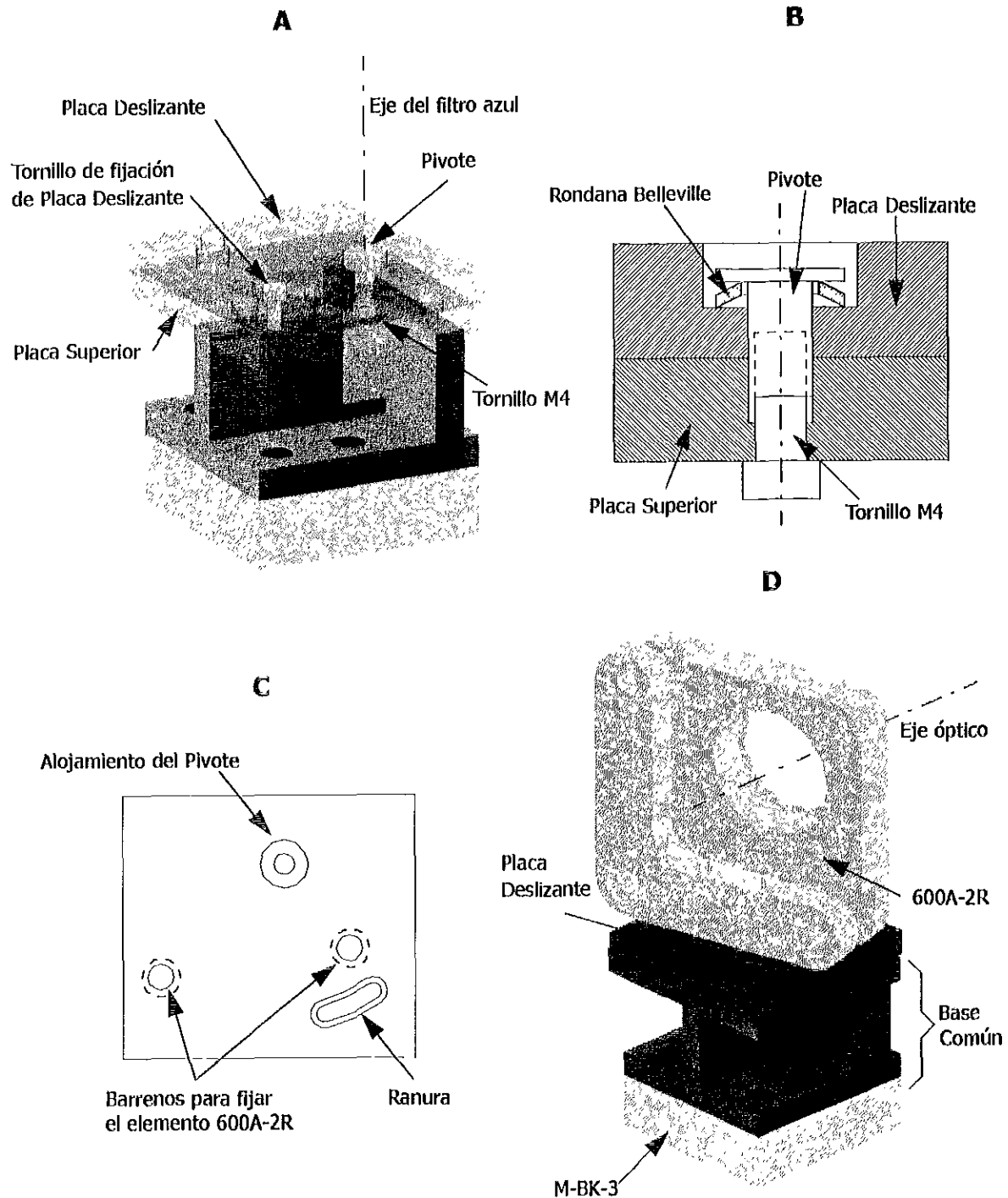


Figura 3.24. (A) La Placa Deslizante y Placa Superior se han dibujado transparentes para mostrar la localización del Pivote, y el maquinado que se debe practicar en la columna para tener acceso al tornillo M4 que sostiene al Pivote. (B) Corte que indica el ensamble del Pivote y rondana "Belleville" en la articulación de las placas. (C) Vista superior de la Placa Deslizante. (D) Ensamble de la Montura D. La Placa Deslizante se muestra inclinada con respecto a la Base Común.

requieren de un proceso iterativo para optimizar la dirección de salida de los haces verde y azul.

Resolución

La montura 600A-2R utiliza dos micrómetros de 1 μm de resolución (utilizando la escala *vernier*), que actúan a través de un brazo de palanca de 90 mm. Con esta configuración se obtiene una resolución angular de 2.3 segundos de arco.

Ahora bien, la resolución angular requerida para dirigir el haz verde es de 0.65 segundos de arco. Esto significa que la Montura D puede realizar la dirección del haz con una resolución 3.5 veces menos fina que la deseada. Sin embargo, esta insuficiencia puede compensarse con la resolución de la Montura K a través del siguiente procedimiento: se ajusta primeramente la dirección del filtro utilizando la resolución de la Montura D, y seguidamente se corrige la dirección del haz verde modificando la orientación del espejo K cuya resolución es menor a un segundo de arco.

3.2.10. Sujetador de filtro interferométrico azul

Este es un dispositivo que aloja al filtro y permite manipular su orientación acimutal alrededor del eje longitudinal. Una característica importante del Sujetador es que inmoviliza al filtro sin generar esfuerzos debidos a la fijación.

Las partes que componen este conjunto son: Receptáculo, Anillo, Abrazadera y Palanca (ver planos en el Anexo C). El ensamble se ilustra en la Figura 3.25. El receptáculo aloja al filtro en una cámara de diámetro igual al del elemento óptico y ajuste de tipo H7g6 [24] para lograr una guía precisa. Esta pieza se inserta en el barreno de la Montura Cinemática, también con un ajuste de tipo H7g6, hasta topar con la pestaña de retención. Un anillo con cuerda M30 en su superficie exterior se inserta en la cámara del receptáculo, que tiene rosca en su sección externa. Esta pieza se atornilla hasta entrar en contacto con la superficie del filtro. Para evitar el contacto directo entre el filtro y las superficies de metal, se utilizan juntas de Teflón de 0.5 mm de grosor en ambas caras del filtro.

La abrazadera se desliza sobre el árbol del receptáculo con un ajuste tipo H11d11 [24]. Esta pieza se hace solidaria del receptáculo al apretar el tornillo de presión. Nótese la presencia de una saliente en la cara de la abrazadera que mira hacia el receptáculo. La función de esta saliente es impedir el contacto entre la abrazadera y la montura 600A-2R. La palanca que se atornilla a la abrazadera facilita la rotación manual del conjunto.

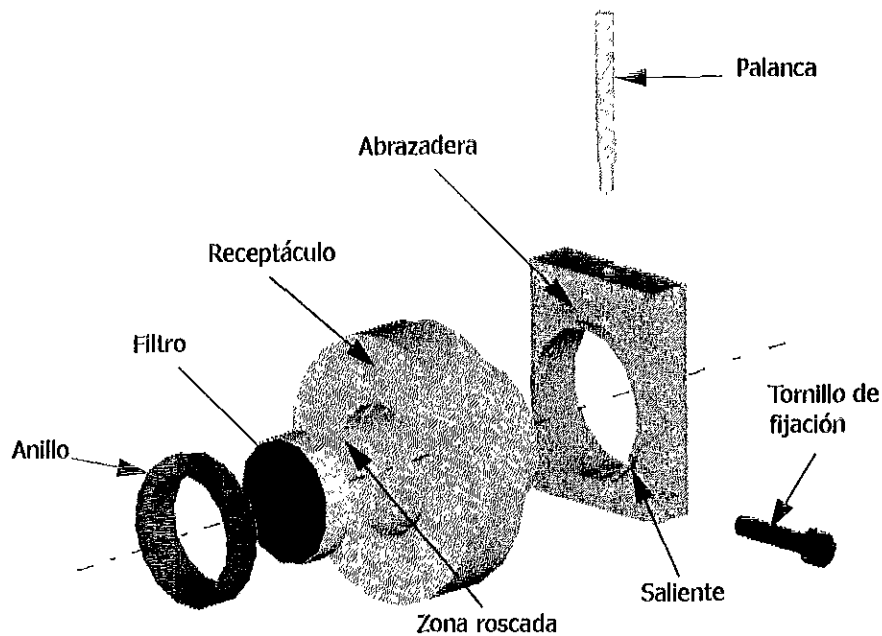


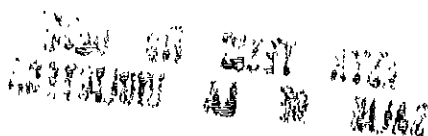
Figura 3.25. Dibujo de ensamble en explosión del Sujetador de Filtro. Entre la abrazadera y el Receptáculo se encuentra la pestaña de retención de la montura 600A-2R. La posición del conjunto se determina por el contacto de la superficie exterior del receptáculo y el barreno de la montura 600A-2R, en donde existe un ajuste H7g6.

3.2.11. Montura para *pinhole*: E y F

Esta montura se compone de tres elementos Newport que satisfacen la totalidad de ajustes necesarios para el *pinhole*. Una columna modelo M-VPT-3 que permite ajustar su altura en modo fino y basto. Una base Newport modelo M-AMB-1 que provee un movimiento basto de traslación transversal, sobre la que se coloca la columna. Un dispositivo de traslación de dos ejes, modelo LP-05-XY, que sostiene al *pinhole* y le proporciona dos ajustes de traslación finos en las direcciones vertical y transversal. El ajuste fino vertical de este elemento no es redundante, pues es de mejor resolución que el ajuste proporcionado por la columna. El ensamble final se representa en la Figura 3.26.

3.2.12. Montura G (lente objetivo)

Esta montura puede ser idéntica a la Montura B, pues ambas soportan una lente y por lo tanto los requerimientos de ajuste son los mismos. Sin embargo, la lente que se coloca en la Montura G necesita situarse en la posición más cercana posible de la celda de flujo. Para ello, se ha decidido crear un diseño de montura diferente que permita mayores intervalos de



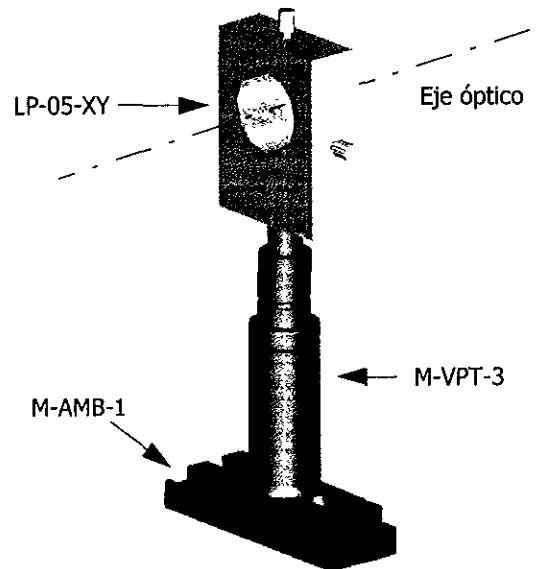


Figura 3.26. Ensamble de la montura para pinhole. La base puede fijarse en cualquier punto de la mesa, lo que permite colocar el pinhole en diferentes puntos dentro del tren óptico.

desplazamiento, y que coloque la lente en un plano desplazado con respecto al punto sobre el que se fija la montura. En este diseño, los ajustes de traslación en las direcciones vertical y transversal se obtienen utilizando bases de traslación M-423, con micrómetros de $1\ \mu\text{m}$ de resolución e intervalo de 50 mm; el ajuste de traslación longitudinal se obtiene con una base TSX-1D, que tiene resolución de $4\ \mu\text{m}$ (menor que la resolución de M-423), pero que en cambio permite hacer ajustes más rápidos. Dos de estas bases se acoplan para formar un arreglo que proporcione la traslación en las direcciones longitudinal y transversal. Para la traslación vertical se necesita diseñar un soporte en escuadra que una la base M-423 en posición perpendicular al apilamiento anterior. Este conjunto se coloca sobre una base cinemática M-BK-3. Véase la Figura 3.27.

Soporte en escuadra

Este soporte consiste en una placa horizontal, dos columnas y un placa vertical. Los planos de estas piezas se encuentran en el Anexo C. La placa horizontal, que se fija a la base M-423 correspondiente al movimiento transversal, tiene dos ranuras para fijar las columnas. Las columnas tienen dos caras maquinadas perpendicularmente con una tolerancia de inclinación de 45 segundos de arco. Con esta tolerancia, el error inducido en la posición transversal de la lente alcanza un máximo de 0.01 mm sobre la carrera de 50 mm del desplazamiento vertical;

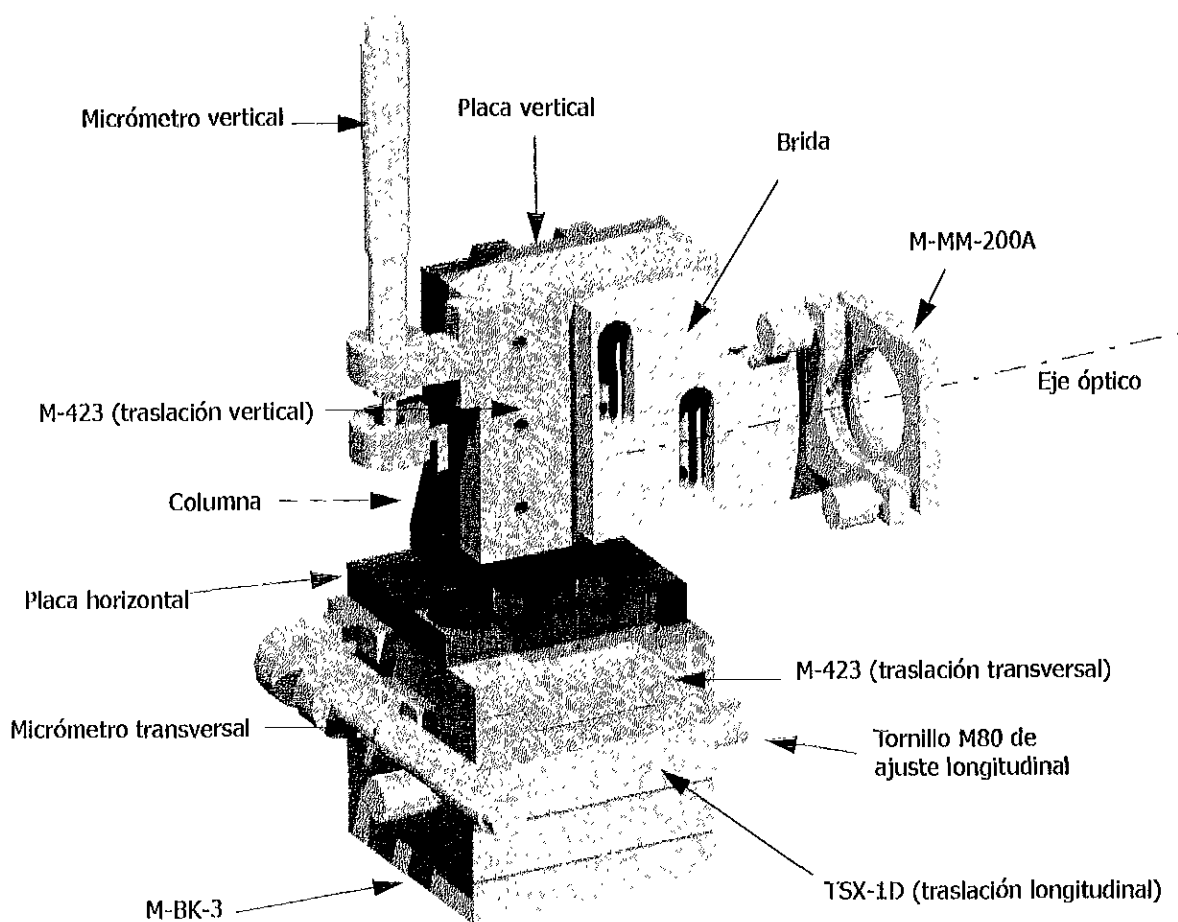


Figura 3.27. Ensamblaje de la Montura G. El soporte en escuadra se compone de las piezas: Placa Vertical, Placa Horizontal, y Columna (2). La Montura Cinemática para Lentes (M-MM-200A) se sitúa en un plano exterior a la Montura G, con el fin de acercarla a la celda de flujo cuya posición es a la derecha del conjunto.

de esta forma el error no rebasa la resolución del micrómetro transversal. Finalmente, la placa vertical tiene dos barrenos para atornillar la base M-423 vertical.

Brida

Se diseña una segunda versión de la brida utilizada en la Montura B, con una única variante: la superficie se extiende longitudinalmente para colocar el plano de la lente fuera del espacio que ocupa la montura.

3.2.13. Montura H (divisor de haces)

La Montura H se encarga de dirigir el haz reflejado por el Divisor de Haces hacia el espejo del eje óptico secundario. Para ello se necesita controlar su orientación alrededor de los ejes vertical y transversal, con respecto al eje óptico secundario. Los ajustes de rotación efectuados por la Montura H no necesitan una resolución alta, pues el haz reflejado por el Divisor de Haces se considera como referencia del eje óptico secundario. La dirección del eje secundario es manipulada posteriormente por el espejo colocado en la Montura K.

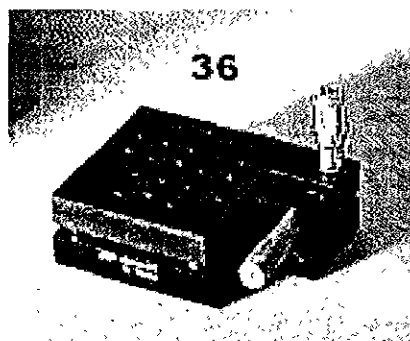


Figura 3.28. Plataforma de Inclinación Multi-Eje. Este elemento proporciona los dos grados de libertad necesarios para dirigir el eje óptico secundario.

Para los movimientos de la Montura H se utiliza una Plataforma de Inclinación Multi-Eje de Newport, modelo M-36 (Figura 3.28), que proporciona una resolución de 2 segundos de arco en cada eje, utilizando micrómetros de 1 μm de resolución (escala *vernier*).

Tres columnas M-VPT-3 sostienen la plataforma M-36, permitiendo modificar la elevación del elemento óptico. El objetivo es obtener una plataforma con rigidez torsional respecto de los ejes que definen el plano de haces principal y secundario. Todo el conjunto se coloca sobre una base cinemática M-BK-3. Es importante mencionar que la elevación de los ejes ópticos principal y secundario (155 mm) queda determinada por la altura mínima que puede tener esta montura, y que se establece por las columnas M-VPT-3.

3.2.14. Montura I (filtro verde)

Esta montura se compone de una columna M-VPT-3 que permite regular la altura del filtro verde, una base M-AMB-1 que soporta la columna y provee un ajuste basto de traslación transversal, y un M-MM-200A para corregir posibles desviaciones del haz debido a la orientación de las caras del filtro.

3.2.15. Montura J (haz verde)

Se propone un sistema compuesto por dos subensambles que se encargan cada uno de los grados de libertad de un elemento óptico. Debido a que la posición del polarizador con respecto a la lente no requiere ningún ajuste, es factible entonces colocar los dos subensam-

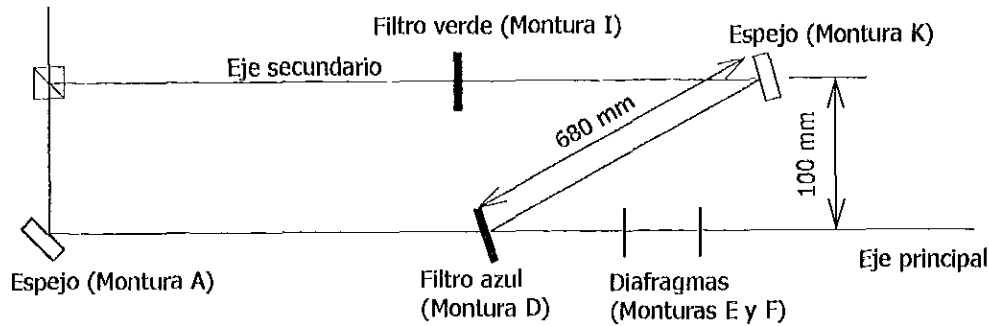


Figura 3.29. Croquis que muestra las limitaciones de espacio para la Montura J, que debe situarse en la línea oblicua emergente del espejo del eje secundario.

bles sobre una misma base cinemática M-BK-3 que permite localizarlos en la posición adecuada sobre el eje óptico secundario, y orientarlos aproximadamente con el ángulo que se forma entre el eje secundario y el principal.

La Montura J se diseña con base en las siguientes restricciones:

- Satisfacer de forma independiente los grados de libertad de dos elementos ópticos: un polarizador (tres grados de libertad de rotación) y una lente (tres de traslación y dos de rotación, vertical y transversal).
- Respetar el espacio reducido de que se dispone para esta montura, que está acotado por los planos verticales que contienen a los ejes ópticos principal y secundario (ver Figura 3.29).
- Permitir con gran precisión el ajuste de orientación acimutal relativa de 45° respecto al polarizador del haz azul.
- Tener un fácil acceso hacia sus instrumentos de ajuste (micrómetros, tornillos, etc.).
- No obstruir el funcionamiento de las monturas cercanas, ni el acceso a sus elementos.

Es importante mencionar que no existe una versión comercial que cumpla con estas condiciones simultáneamente. En particular, es difícil obtener a partir de elementos comerciales una montura que permita ocho grados de libertad dentro del reducido volumen disponible en este caso. Además, tal número de grados de libertad en un mismo conjunto requiere de una elevada estabilidad en la montura.

Subensamble de Polarizador

El diseño de este subensamble se basa en la estructura de la Montura C. Se utiliza la articulación de montura cinemática para obtener los grados de libertad de rotación sobre los ejes vertical y transversal, con dimensiones modificadas para lograr un conjunto de volumen

pequeño. Las piezas que se utilizan en la articulación cinemática de este subensamble son: Soporte Fijo, Soporte Flotante, Insertos (plano y ranura V), 2 micrómetros de 0.01 mm de resolución (sin escala *vernier*) y 13 mm de intervalo de desplazamiento, Esfera y Resortes. El funcionamiento de este conjunto es idéntico a la montura cinemática propuesta en la Montura C, salvo algunas particularidades que se describen a continuación (ver planos correspondientes en el Anexo C).

Soporte fijo. Esta pieza tiene un diseño robusto pues se utiliza a la vez como columna para elevar el centro del polarizador a la altura del eje óptico. Se coloca directamente sobre la base que comparten los dos subensambles. Las distancias entre cada uno de los micrómetros y el punto de pivote son de 40 mm para la rotación sobre el eje vertical y 50 mm para el eje transversal. En consecuencia, las resoluciones angulares son de 51 y 41 segundos de arco respectivamente.

Soporte flotante. Se agrega una protuberancia en el diseño de esta pieza, para alojar el cilindro porta-polarizador.

Los ajustes basto y fino de rotación acimutal se efectúan por medio de un mecanismo compacto que reemplaza al Dispositivo Rotatorio M-481. Este mecanismo, equivalente al utilizado en el Sujetador de Filtro, consta de las siguientes partes: Abrazadera, Perilla, dos Cojinetes, Palanca, Sujetador de Micrómetro, y Micrómetro. Ver Figura 3.30.

Abrazadera. Esta pieza tiene dos funciones: frenar el desplazamiento longitudinal del porta-polarizador, y unirle solidariamente la Palanca. La unión entre ambas piezas puede liberarse al aflojar la Perilla, lo cual permite modificar la orientación del polarizador con respecto a la abrazadera, a modo de ajuste basto.

Cojinetes. Estos anillos fabricados en bronce se utilizan para reducir la fricción en las dos superficies de contacto que presentan movimiento relativo: entre la abrazadera y el Soporte Flotante, y entre el collarín del porta-polarizador y la protuberancia del Soporte Flotante. La rugosidad en las superficies de contacto es de $Ra=0.4 \mu\text{m}$.

Palanca. Esta pieza se utiliza para realizar el ajuste fino de la orientación del polarizador. Consiste en un tubo sobre el que se efectúan dos maquinados: un plano que sirve de superficie de apoyo para la punta esférica de un micrómetro, y una garganta para amarrar un resorte. El tubo se inserta en una perforación en la abrazadera, y se fija por medio de un tornillo M4 de 70 mm de longitud.

Sujetador de micrómetro. Bloque que se atornilla sobre el Soporte Flotante, y cuya función es sujetar tanto el micrómetro que se utiliza para el ajuste fino como el resorte que mantiene en contacto la punta del micrómetro con el plano de la palanca.

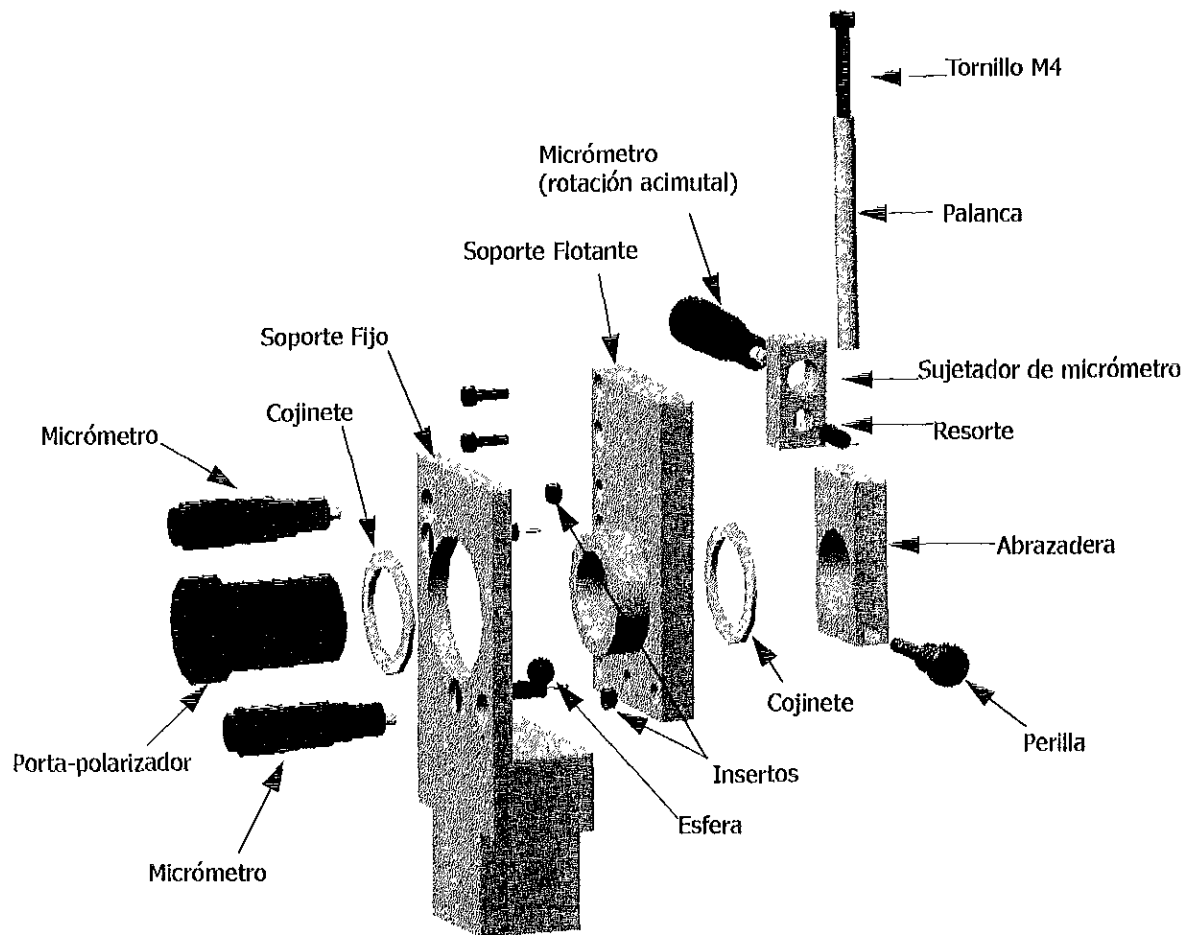


Figura 3.30. Dibujo en explosión del subensamble de polarizador. Los dos micrómetros del lado izquierdo junto con los Soportes Fijo y Flotante, la Esfera y los Insertos constituyen la montura cinemática que proporciona dos grados de libertad de rotación. Las partes Porta-polarizador, Cojinetes, Abrazadera, Perilla, Sujetador de micrómetro, Palanca, Tornillo M4, Resorte y Micrómetro forman el mecanismo que produce los ajustes basto y fino de la orientación acimutal.

Funcionamiento

Al aflojar la Perilla, la Abrazadera y el porta-polarizador se liberan, permitiendo ajustar manualmente la orientación acimutal del elemento óptico. Después de apretar nuevamente la Perilla, el ajuste fino se realiza sobre el micrómetro de 0.01 mm de resolución (se utiliza un micrómetro que no posee escala *vernier*). Este ajuste fino tiene una resolución angular de 40 segundos de arco en un intervalo de $\pm 7^\circ$, resolución comparable a la proporcionada por el Dispositivo Rotatorio M-481 (30 segundos de arco) en la Montura C para el polarizador del haz azul.

Subensamble de Lente

Para la lente ocular verde, se requieren tres ajustes de traslación, siendo ajustes finos los correspondientes al plano transversal. Para el movimiento de traslación longitudinal se utilizan dos bases de traslación con desplazamientos colineales. El ajuste basto se realiza por medio de una Base Móvil compuesta por dos placas horizontales que deslizan la superior con respecto a la inferior. Para el ajuste fino se usa una base M-423. La Base Móvil, que sostiene tanto al Subensamble de Polarizador como al resto del Subensamble de Lente, se coloca sobre la M-423, y ésta a su vez sobre la base cinemática M-BK-3. De esta forma todo el conjunto se desplaza al ajustar la posición longitudinal. El movimiento de traslación transversal sólo cuenta con un ajuste fino. Se utiliza una Solera, que desliza sobre una ranura tallada en la superficie de la Base Móvil. El desplazamiento se efectúa a través de un micrómetro y la fijación se hace con un tornillo M6, que se aloja en una ranura de la Solera. La traslación vertical es efectuada con un mecanismo elevador, que se compone de un Apoyo y una Plataforma Móvil. El movimiento se guía sobre dos Postes, y se controla por medio de un micrómetro. Este mecanismo se coloca sobre la Solera del desplazamiento transversal. Finalmente, sobre la Plataforma Móvil se coloca una Montura Cinemática para Lentes M-MM-200A que se encarga de los dos grados de libertad de rotación. Todas las superficies de deslizamiento deben cumplir con una condición de rugosidad $Ra=0.4 \mu\text{m}$. La descripción funcional de las piezas enunciadas, cuyos planos aparecen en el Anexo C, se da a continuación.

Base Móvil, Placa Inferior. Esta pieza se atornilla en la M-423. Para proveer de una guía precisa en el movimiento de traslación, se maquinan dos escalones laterales en la dirección del desplazamiento.

Base Móvil, Placa Superior. En la superficie de contacto de deslizamiento de esta pieza con la anterior, se maquina una amplia ranura de tal forma que los perfiles de ambas piezas son complementarios. El ajuste en esta articulación es de tipo H7g6 [24]. El desplazamiento es más preciso si la superficie de contacto se reduce: para tal efecto se elimina material en la parte interna de la ranura (ver Figura 3.31). Es necesario calcular un juego equivalente al ajuste de tipo H9e9 para evitar un contacto hiperestático. Dos ranuras oblongas longitudinales alojan los tornillos de fijación. Por último, se maquina en la superficie una guía para la Solera. El ajuste en este maquinado es igualmente de tipo H7g6.

Solera. Esta pieza se desliza sobre la guía de la Placa Superior. Al igual que en el desplazamiento longitudinal, se desaloja material de la parte inferior de la solera para

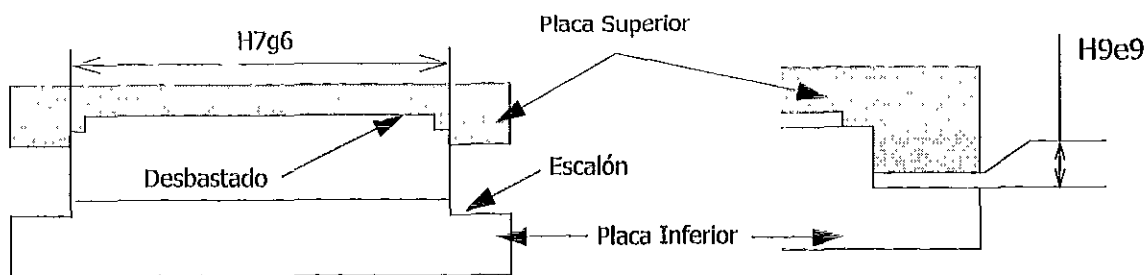


Figura 3.31. Articulación para movimiento de traslación longitudinal del Subensamblado de Lente. Para reducir la superficie de contacto, se maquinan dos escalones en la Placa Inferior y un desbastado en la parte interior de la ranura en la Placa Superior.

reducir la superficie de contacto. La punta del micrómetro se apoya sobre un costado de esta pieza. Se agrega un inserto plano para evitar que esta superficie se dañe debido a este contacto puntual. El movimiento de la Solera necesita un resorte para mantener el contacto entre la punta del micrómetro y el inserto. Este resorte se une a la solera por medio de un perno, que se incrusta en una perforación. El resorte se aloja en una cavidad tallada en la parte inferior de la solera. La fijación de la Solera se hace con un tornillo alojado en una ranura, y que se atornilla en la Placa Superior. Ver Figura 3.32.

Sujetador de Micrómetro. Este bloque se atornilla a la Placa Superior de la Base Móvil. En él se fijan tanto el cuerpo del micrómetro, como el extremo del resorte.

Apoyo. Este elemento se atornilla sobre la Solera. En su cara superior se maquinan dos perforaciones en las que se alojan los Postes guía con un ajuste apretado de tipo $H7h6$ [24]. Estas perforaciones deben cumplir con dos tolerancias. La primera, de perpendicularidad de sus ejes con respecto a la superficie horizontal inferior del Apoyo, y cuyo intervalo de tolerancia se establece igual a la mitad del juego mínimo entre los postes y los barrenos de la Plataforma Móvil —para permitir el deslizamiento—, es decir, $16 \mu\text{m}$ (ver párrafo siguiente). La segunda, de localización entre los centros de estas dos perforaciones, y cuyo intervalo de tolerancia es también igual a la mitad del juego mínimo de deslizamiento, $16 \mu\text{m}$.

En el Apoyo se incrusta un inserto plano para el contacto de la punta del micrómetro vertical. Se maquina también una perforación que aloja el resorte y un barreno para insertar el perno que lo sostiene.

Plataforma Móvil. Esta pieza tiene esencialmente dos perforaciones precisas en las que deslizan los Postes. El ajuste es de tipo $H7e7$ [24]. Se tienen las mismas dos con-

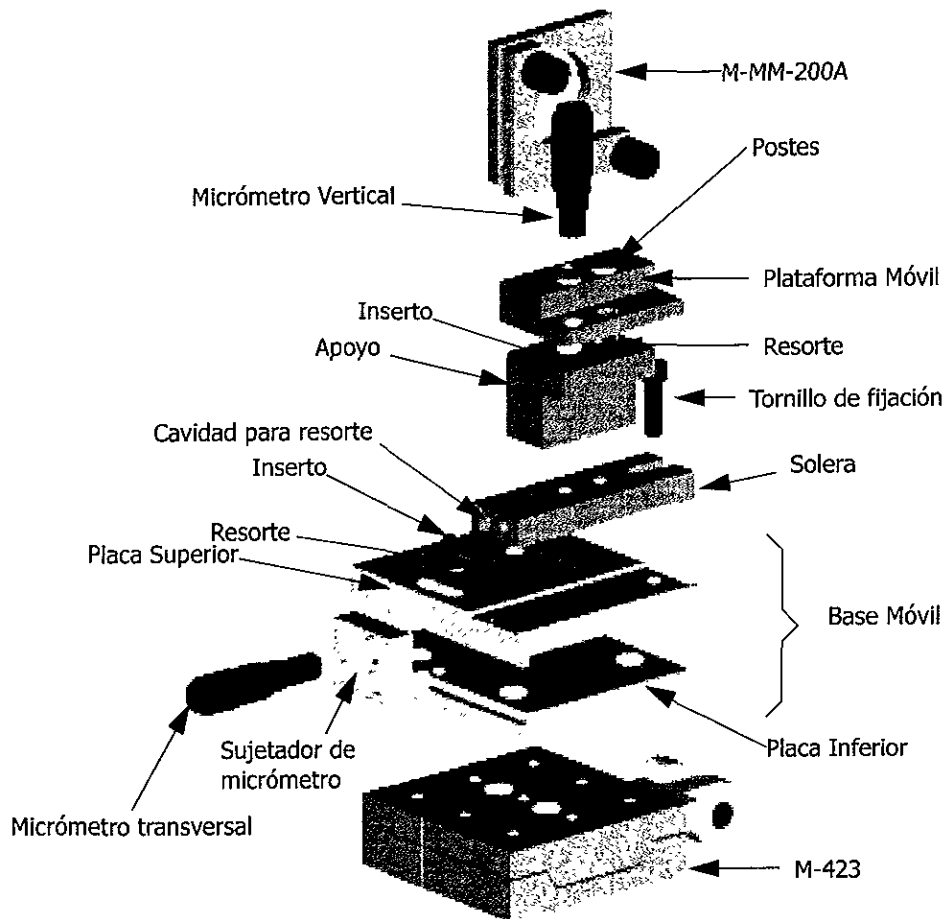


Figura 3.32. Dibujo en explosión del Subensamble de Lente. Para mejor visibilidad, se han eliminado de la figura los tornillos de fijación, los pernos que sujetan a los resortes, y el micrómetro longitudinal. El Subensamble de Polarizador se coloca sobre la Placa Superior, detrás del conjunto del mecanismo elevador.

diciones que se definieron para las perforaciones del Apoyo, con iguales intervalos de tolerancia: de perpendicularidad entre los ejes de los barrenos y la superficie superior de la Plataforma Móvil, y de localización entre ambos ejes. En una saliente se realizan dos maquinados adicionales: una perforación para fijar el micrómetro vertical, y otra que sostiene al resorte.

Postes. Los postes son piezas cilíndricas de acero inoxidable templado y revenido maquinadas con diámetro preciso. El ajuste del poste con el barreno del Apoyo es de tipo H7h6, mientras que el ajuste con la Plataforma Móvil es de tipo H7e7. Dado que los barrenos se realizan con una misma rima, es necesario maquinar el poste con diferentes tolerancias en sus extremos para cumplir con ambos ajustes (ver Figura 3.33). Asimismo, la superficie de los Postes debe satisfacer una condición de cilindricidad, con un intervalo de tolerancia inferior al intervalo de la clase 6 que se utiliza en la tolerancia h6, y que es igual a $11 \mu\text{m}$.

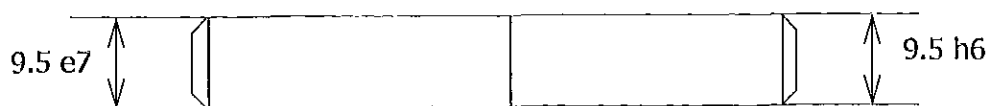


Figura 3.33. El Poste se maquina en dos secciones, con tolerancias diferentes: una de tipo h6 para el ajuste apretado con las perforaciones del Apoyo, y la otra de tipo e7 para el deslizamiento dentro de las perforaciones de la Plataforma Móvil.

Funcionamiento

Para llevar a cabo el movimiento de ajuste longitudinal del Subensamble de Lente, se liberan los tornillos de fijación de la Base Móvil y se desplaza la Placa Superior hasta la posición conveniente. Se aprietan nuevamente los tornillos de fijación y se realiza el ajuste fino con el micrómetro de la base M-423. El ajuste transversal se efectúa con el micrómetro correspondiente, pero es muy importante liberar el tornillo de fijación de la Solera antes de hacerlo o de lo contrario se dañará el micrómetro. Finalmente, el movimiento vertical se realiza con el micrómetro de la Plataforma Móvil. En cuanto a los ajustes de rotación, ambos se hacen con los tornillos de precisión de la base M-MM-200. Véase la Figura 3.32. El ensamble completo de la Montura J se muestra en la Figura 3.34.

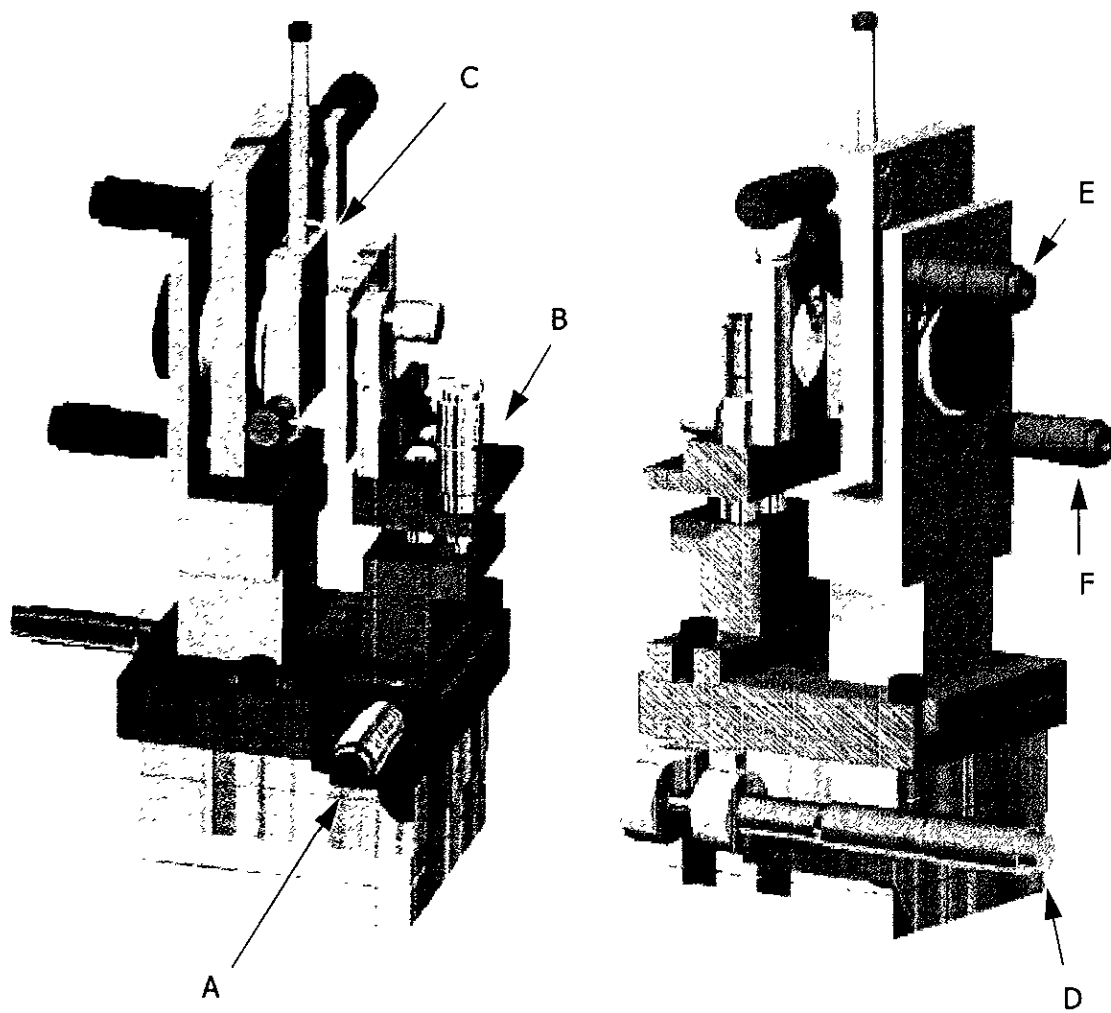


Figura 3.34. El ensamble de la Montura J se presenta desde dos ángulos: la imagen de la izquierda muestra el micrómetro transversal (A), el mecanismo de elevación con su micrómetro vertical para la lente (B), y el conjunto de abrazadera, perilla y palanca para el ajuste de rotación del polarizador (C). En la imagen de la derecha se observa la montura vista por atrás, y se aprecia el micrómetro de traslación longitudinal (D) y los micrómetros de la montura cinemática del polarizador (E y F).

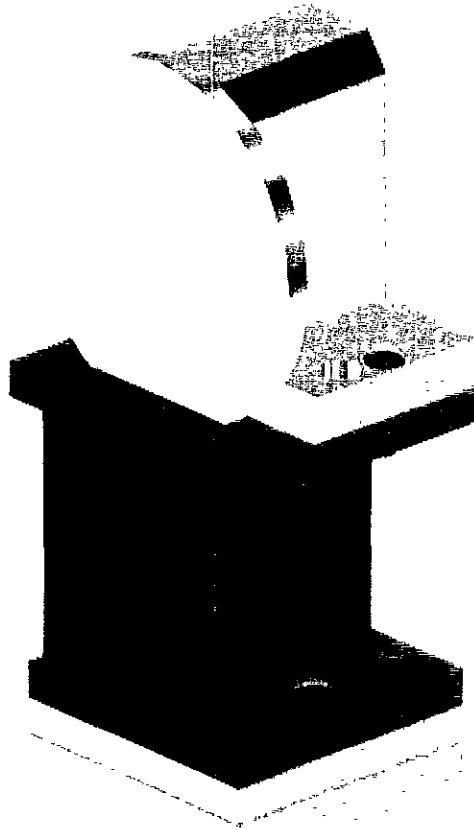


Figura 3.35. La Montura K es retomada del diseño de la Montura A. Las modificaciones se encuentran en la placa superior de la Base Común, y la altura de las columnas. La base de traslación M-423 se ha eliminado.

3.2.16. Montura K (espejo secundario)

Esta montura sostiene a un espejo cuya función es dirigir el haz del eje óptico secundario hacia la celda de flujo. El ensamble de la montura K se muestra en Figura 3.35. La resolución necesaria en los ajustes de rotación vertical y transversal es de 0.75 segundos de arco. Estas características hacen que la Montura K y la Montura A sean prácticamente idénticas, con únicamente dos diferencias:

- La Montura K no requiere desplazamiento transversal, por lo que se elimina la base M-423.
- La Montura de Ultra-resolución para Espejos se alinea con respecto a la Base Común, en vez de colocarse a 45°.

3.3. Calibración del Tren Óptico

En esta Sección final se expone el procedimiento de calibración a seguir para ajustar uno a uno todos los elementos ópticos que conforman al tren. Este proceso de calibración ilustra el funcionamiento de los mecanismos de ajuste previstos en las monturas diseñadas, y la justificación tanto de los grados de libertad como de las condiciones de precisión propuestos para alcanzar las exigencias del experimento de Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución. El objetivo final del procedimiento que a continuación se detalla es *garantizar que los haces azul y verde —con su polarización correspondiente— coincidan en un mismo eje óptico para la celda de flujo y para el goniómetro.*

La necesidad de alinear, no solo un número grande de elementos ópticos sino también el goniómetro y la celda de flujo, es resultado de la búsqueda de una alta precisión, así como un gran número de no-idealidades de los componentes que afectan las mediciones y sus limitaciones mecánicas.

El eje óptico debe colocar dos haces con diferente polarización sobre un mismo eje y en el mismo punto. Esto es, se requiere establecer la *dirección de polarización* del haz azul y verde con 45° de diferencia y cerca de 22.5° de la vertical. Esta separación es crítica para el análisis de las señales y por tanto se requiere la mayor precisión posible en definir los 45° entre las direcciones. Asimismo, el eje óptico debe mantener un alto grado de paralelismo entre el haz azul y verde así como cruzar el mismo punto. Esta necesidad es resultado de las variaciones de las propiedades del fluido inducidas a su vez por un flujo no-homogéneo. Con frecuencia es posible detectar variaciones en la anisotropía del fluido para desplazamientos menores a $10\ \mu\text{m}$ dentro del mismo: si se requiere reproductibilidad en las mediciones de anisotropía y el fluido muestra variaciones locales en distancias tan cortas, entonces además del paralelismo de los haces se requiere que recorran una misma trayectoria en el flujo.

Dado que la celda de flujo es esencialmente bidimensional, entonces es crítico que el plano del flujo esté perfectamente normal al eje óptico. Por ello, el sistema molino-goniómetro debe alinearse cuidadosamente de manera que el flujo bidimensional esté perpendicular a los haces y que el haz cruce el centro de la celda. Puesto que el goniómetro puede girar el brazo con los detectores así como la celda de flujo misma, entonces el eje vertical del goniómetro debe coincidir con el centro del molino y éstos a su vez deben poder girar manteniendo el centro del molino sobre el eje óptico.

Con el propósito de lograr cumplir con las restricciones anteriores, se requiere establecer referencias de:

- posición y dirección del tren óptico
- orientación de los polarizadores
- los puntos focales de los haces y del centro de la celda de flujo

Todas las referencias anteriores deben establecerse de forma absoluta, y para ello se toman la vertical y el plano horizontal como las referencias base. Nótese que la superficie de la mesa es también una buena referencia secundaria y es respecto de ésta que muchas mediciones se dan. Sin embargo, la mesa "flotada" debe estar perfectamente horizontal para que la referencia vertical pueda ser útil.

3.3.1. Posición de los ejes ópticos y del goniómetro

La alineación de los haces toma como referencia la superficie de la mesa, y con respecto a ella se alinea la plataforma. La alineación del goniómetro requiere de la vertical, y para ello se flotará la mesa, se pondrá a nivel (horizontal) y entonces se establecerá el eje de giro del goniómetro con la vertical. A continuación supóngase que la mesa está perfectamente horizontal con un intervalo de error de ± 0.010 mm en 300 mm.

A. Ejes ópticos de los haces azul y verde

El haz emergente del láser se alinea inicialmente ajustando:

- el paralelismo de la plataforma con respecto a la mesa utilizando un nivel.
- la verticalidad del haz reflejado por el espejo inferior del dispositivo de dirección (DD)
- el haz (azul y verde) reflejado por el espejo superior del DD en dirección aproximadamente horizontal hacia el espejo principal (Montura A).

Una vez que el haz bicolor alcanza el espejo principal (Montura A) entonces se requiere trazar el eje óptico principal que recorre la totalidad del tren óptico, incluyendo el goniómetro y la sección de detectores. Este eje es conveniente que recorra la longitud completa del laboratorio, lo que se logra marcando en las paredes los puntos luminosos del haz. Además de estos puntos se utilizan *pinholes* para definir referencias del eje óptico principal en varios puntos:

- justo a la salida del haz de la Montura A,
- justo antes del molino de dos rodillos, y
- justo en la cintura de los haces después de los polarizadores.

Estos diafragmas representan los puntos de referencia que definen al eje óptico principal. El primero se usa como referencia de inicio del proceso; el segundo y tercero así como la referencia sobre el muro son de gran utilidad durante las etapas de calibración posteriores y

especial cuidado debe tenerse en ajustar y mantener fijas sus posiciones. La altura de los *pinholes* con respecto a la plataforma debe ser idéntica. Para ello, es posible utilizar un mismo diafragma colocado en una montura (Montura E) y localizarlo alternativamente en las primeras dos posiciones de referencia (a la salida de la Montura A y antes del molino) durante los pasos siguientes. La tercera referencia (en la cintura de los haces) se coloca en un dispositivo que se monta en el sujetador de la celda de flujo, como se explicará más adelante. Para determinar la posición del centro de un *pinhole* con respecto al eje vertical de su montura, se gira 180 grados alrededor de dicho eje; si la posición transversal del *pinhole* varía como consecuencia de la rotación, se corrige para devolver el centro del *pinhole* al eje vertical y se repite la operación. (ver Figura 3.36). Una vez definidas las localizaciones de ambos *pinholes*, se fijan definitivamente sus monturas sobre la plataforma para establecer la referencia.

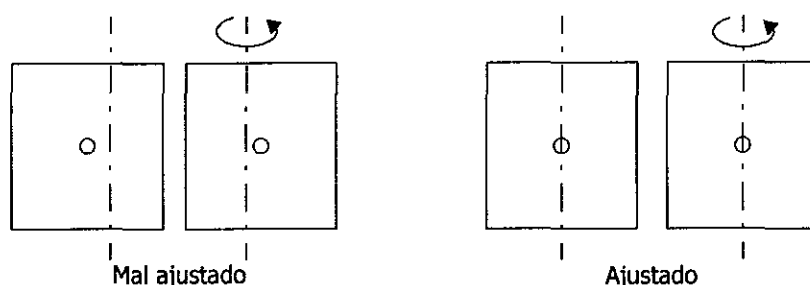


Figura 3.36. Corrección de la posición del centro del *pinhole* para hacerlo coincidir con el eje vertical de la montura.

Ahora que se han establecido los puntos de referencia para el eje óptico principal, se ajusta la orientación y orientación del espejo principal utilizando los instrumentos de la Montura A de tal forma que se cumplan dos condiciones para el haz:

- (1) debe ser paralelo a la Plataforma
- (2) debe ser paralelo al eje óptico principal del tren

Para alcanzar estas dos condiciones se manipula la orientación del espejo principal (rotación alrededor de los ejes vertical y transversal) y su traslación sobre el eje transversal, siguiendo los pasos que se indican en la Figura 3.37.

B. Posición del goniómetro

El goniómetro es esencialmente la base de la celda de flujo y contiene además un brazo giratorio sobre el cual están montados los elementos ópticos para la detección de los haces polarizados una vez que han atravesado el fluido anisotrópico. Al utilizar un brazo que gira (con centro en la celda de flujo) y barriendo el plano horizontal se facilitan otras técnicas de dis-

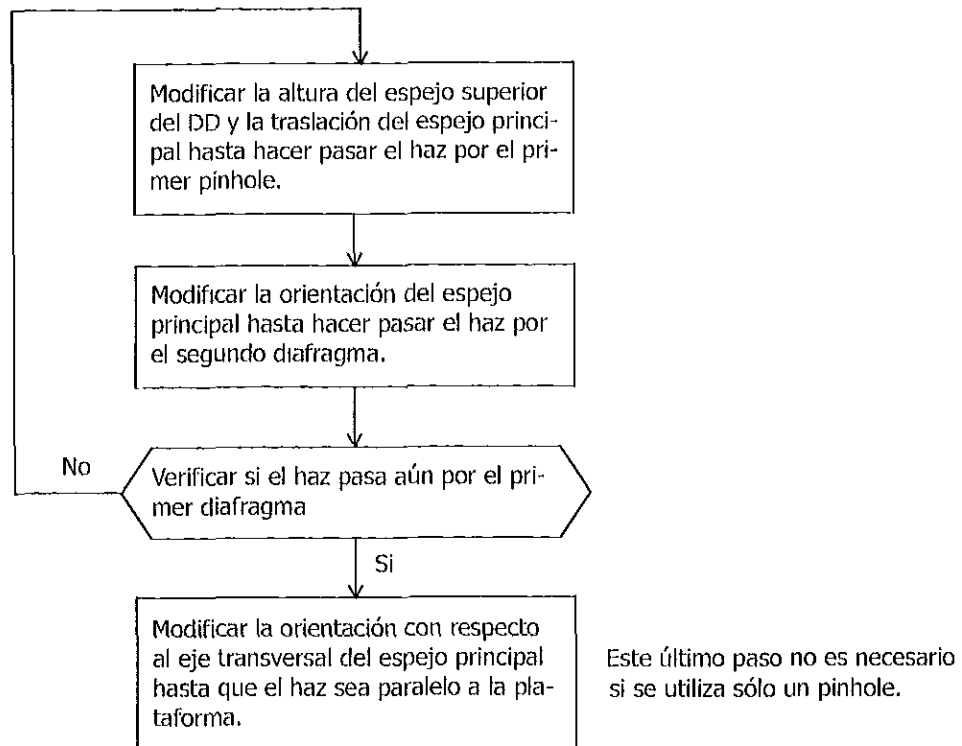


Figura 3.37. Procedimiento iterativo para ajustar el haz reflejado por el espejo principal en dirección paralela a la plataforma y al eje óptico principal definido por los pinholes.

persión de luz que son complementarias a la de BBIF. Puesto que para experimentos de dispersión los ángulos de incidencia y dispersión son críticos, surge la necesidad de un goniómetro cuyas características son estrictas y prácticamente requiere de su construcción. Además la alineación del mismo respecto del tren óptico es sin duda muy importante.

El goniómetro tiene 5 grados de libertad. Se requiere que:

- (i) el plano del goniómetro coincida con la mesa óptica
- (ii) su eje vertical y el eje óptico principal se intersequen
- (iii) la altura del sistema goniómetro-celda coloque el centro de la celda sobre el eje óptico principal

En una primera etapa se busca satisfacer las condiciones (i) y (ii) siguiendo un procedimiento iterativo que consiste en los siguientes pasos:

- Nivelar el goniómetro. Usando un nivel de alta resolución, se ajustan las patas (tornillos) de la base del goniómetro hasta que su eje de rotación sea perpendicular a la mesa. En realidad, lo que se obtiene en este paso es llevar un plano de la base del goniómetro hasta una posición horizontal, y asumiendo que el eje de rotación del

goniómetro es perpendicular a dicho plano, entonces se puede considerar que el eje es perpendicular a la mesa.

- Alinear el eje del goniómetro. Para este ajuste se sustrae el sujetador de la celda de flujo y se reemplaza por un dispositivo de calibración de filamento. Este dispositivo, que consiste en un cable delgado estirado entre dos puntas, permite materializar el eje teórico de rotación del goniómetro. Esta referencia permite desplazar el goniómetro hasta una posición transversal adecuada. La posición del goniómetro es correcta cuando el haz y el filamento se cortan, hecho que produce un patrón de difracción que se proyecta en la pared. Cuando este patrón es simétrico, se sabe que el filamento y el haz se cruzan. La precisión posible es cercana a 0.05 mm.
- Ajustar la perpendicularidad del eje de rotación. En este paso se afina la nivelación del goniómetro iniciada en el primer paso de esta etapa. Para ello se reemplaza el dispositivo de calibración de filamento por el sujetador de la celda de flujo, y se coloca en su interior un espejo plano perpendicular al plano de referencia perteneciente a la base del goniómetro. Se ajusta la altura de la pata que es colineal con el eje óptico¹ hasta que el láser sea reflejado sobre su misma trayectoria, lo que garantiza que el eje óptico es perpendicular al espejo. En seguida, el goniómetro se gira 30° y la superficie del espejo es ahora colineal con una de las otras dos patas de la base triangular. Se ajusta la altura de dicha pata hasta que el haz reflejado es paralelo a la mesa.
- Repetir los ajustes de alineación del eje del goniómetro, y después el de perpendicularidad, de forma iterativa. Dado que al modificar la altura de las patas durante el ajuste de perpendicularidad se pierde la alineación del eje, es necesario regresar al ajuste de alineación que a su vez alterará el ajuste de perpendicularidad. Por esta razón es necesario efectuar los dos ajustes en forma iterativa hasta que ambos criterios queden satisfechos.

C. Alineación del eje óptico principal con el centro de la celda

Una vez que se han establecido tanto la dirección del eje óptico principal como la posición del goniómetro, se busca que la posición de la celda con respecto al goniómetro sea tal que el centro de la celda se sitúe sobre el eje óptico. Para efectos de tal ajuste, el goniómetro sujeta la celda de flujo manteniendo dos grados de libertad de traslación en las direcciones longitudinal y transversal. En realidad, sólo se dispone en el goniómetro del grado de libertad de

1. La base tiene forma triangular, y por tanto tres patas a 120°.

traslación transversal y longitudinal, pues la traslación vertical se lleva a cabo modificando la altura de la plataforma con respecto a la mesa. Es importante mencionar que el desplazamiento transversal de la celda de flujo con respecto al cuerpo del goniómetro se utiliza también para llevar a cabo el barrido en el plano horizontal que, junto con la rotación del brazo que soporta los detectores, permite el estudio de dispersión que se mencionó anteriormente. Por ello, este movimiento de traslación transversal es efectuado por un motor de pasos controlado a través de una computadora.

Para obtener la coincidencia del centro de la celda con el eje óptico principal se reemplaza el sujetador de la celda de flujo por un dispositivo de calibración de tipo *pinhole*. Este *pinhole*, montado sobre el goniómetro, representa el centro teórico de la celda de flujo que debe coincidir con el eje óptico. Para ello es necesario variar la posición de la celda con respecto a la base del goniómetro en sus direcciones vertical y transversal. Es importante aclarar que el ajuste realizado anteriormente con el dispositivo de filamento consiste en localizar el goniómetro con respecto a la mesa y al eje óptico principal, mientras que el ajuste actual trata de alinear la celda de flujo con respecto al goniómetro. Se utiliza primeramente un *pinhole* calibrado de 500 μm de diámetro, y se desplaza la celda hasta que un máximo de intensidad del haz atraviesa el diafragma. Esta operación se repite disminuyendo progresivamente el diámetro del *pinhole* hasta llegar a 50 μm .

Ahora es posible definir una nueva referencia. Una vez que el eje de rotación del goniómetro interseca al eje óptico, se hace una marca sobre la pared en el punto en que se proyecta el rayo láser. A partir de este momento, esta marca y el *pinhole* adyacente a la celda de flujo son las referencias del eje óptico principal. Ahora, los diferentes elementos se colocan secuencialmente comenzando por aquellos que están más cercanos a la celda de flujo.

D. Pre-ajuste del Objetivo

Este elemento óptico se coloca justo antes de la celda de flujo y desempeña la función de enfocar la cintura de los haces en el centro de la celda. Para ello, la lente debe ajustarse con respecto a cinco grados de libertad: cuatro de ellos correspondientes a la posición del centro de la lente y la orientación de su plano medio, ambas con respecto al plano transversal del arreglo óptico, y el quinto correspondiente a la posición longitudinal del punto focal sobre el eje óptico. Es conveniente llevar a cabo en este momento los ajustes de los primeros cuatro grados de libertad, aprovechando que la dirección del eje óptico principal y la posición y orientación del sistema goniómetro-celda de flujo se han determinado, y que las referencias actuales del eje óptico principal facilitan esta operación gracias a su diámetro pequeño (50

μm de diámetro para el *pinhole* colocado en la celda de flujo). El ajuste de la posición longitudinal del punto focal de la lente se efectuará más adelante, después de haber acondicionado cada uno de los dos haces.

El procedimiento de pre-ajuste debe satisfacer las condiciones siguientes:

- coincidencia del centro de la lente con el eje óptico
- colinealidad del eje de la lente con el eje óptico

Para ello, se manipulan los instrumentos de la Montura G (excepto el micrómetro responsable del ajuste de traslación longitudinal) usando como referencia el patrón de difracción proyectado por la lente: la posición y orientación adecuadas cuando el patrón de difracción es simétrico con respecto al eje óptico.

Una vez que se ha realizado el ajuste previo de la lente, se registran las posiciones de los cuatro micrómetros involucrados, y temporalmente se sustrae la lente del tren óptico para proceder con el acondicionamiento de los haces por separado. Dada la corta distancia focal del Objetivo, resulta que después de ese elemento el haz es claramente divergente formando una enorme mácula sobre cualquier punto posterior a la celda de flujo. Es por ello que para facilitar la alineación de los siguientes elementos ópticos resulta conveniente remover el Objetivo y usar como referencia un pincel brillante y delgado del haz luminoso.

3.3.2. Acondicionamiento del haz azul

Dado que el haz emitido por la fuente de luz contiene los colores azul y verde, es necesario agregar filtros para separar los haces y manipularlos de forma independiente, de tal forma que el acondicionamiento del haz azul se lleva a cabo en el eje óptico principal y el del haz verde en un eje óptico secundario que se definirá más adelante. Las no-idealidades de los elementos ópticos utilizados en el acondicionamiento del haz (filtro, polarizador y lente) inducen desviaciones en la dirección del haz respecto del eje óptico previamente establecido, mismas que deberán ser corregidas durante esta misma etapa.

El acondicionamiento de un haz para este experimento consiste en definir:

- la dirección del vector de polarización (asociada a la rotación acimutal del polarizador) a un ángulo de 45° respecto del vector de polarización del otro haz
- la posición de la cintura del haz producida por una lente plano-convexa

A. Filtro y polarizador azules

Primeramente se establece la orientación de la polarización del haz azul con un ángulo de 22.5° respecto de la vertical. Se utiliza para tal fin un eje óptico auxiliar en donde se colocan el polarizador y el filtro azules (monturas C y D respectivamente) así como un polarizador de referencia cuya orientación de $\pm 22.5^\circ$ respecto del plano horizontal se obtiene a través de un sujetador que no tiene grados de libertad de ajuste y que fue maquinado para que las caras del polarizador tengan el ángulo antes prescrito. La precisión en el maquinado de este sujetador es la de una cabeza divisora y de sólo unos cuantos segundos de arco. Estando colocados estos tres elementos sobre el eje óptico auxiliar se varían las orientaciones acimutales tanto del polarizador como del filtro azules hasta obtener un coeficiente de extinción máximo, lo que significa que la orientación del polarizador azul es perpendicular a la del polarizador de referencia —y por tanto forma un ángulo de 22.5° con respecto a la vertical— y que la orientación del filtro es la que presenta un mínimo de birrefringencia. Se corrigen también las orientaciones de ambos elementos en las direcciones vertical y transversal, de tal forma que el haz incida perpendicularmente en sus caras.

Hecho lo anterior se coloca el polarizador y filtro azules sobre el eje óptico principal. Al agregar estos dos elementos al tren óptico el haz pierde su alineación debido a que las caras de los elementos ópticos en cuestión presentan errores de paralelismo en sus caras de incidencia y salida. Se debe ajustar nuevamente la traslación vertical del espejo superior del DD así como la traslación transversal y la orientación del espejo principal hasta que el haz pase a través de las referencias previamente establecidas, a saber: el *pinhole* adyacente a la celda de flujo y la marca en la pared (ver Figura 3.38). Se verifica que la incidencia en las caras del polarizador y filtro sea perpendicular, de lo contrario es necesario corregir la orientación de los elementos.

Antes de dar por terminado el ajuste de la orientación del polarizador y filtro, es conveniente colocar el polarizador de referencia sobre el tren óptico para verificar las orientaciones acimutales del polarizador y filtro azules que producen máxima extinción. Una vez terminado este ajuste, se registran todas las posiciones de los micrómetros y se procede al paso siguiente.

B. Lente Azul

La posición de la lente para el haz azul en el eje óptico principal se calcula para que la cintura del haz se dé en la misma posición que para el haz verde. Conociendo la distancia recorrida por el haz azul desde la parte trasera de la cabeza del láser, se puede calcular la distancia

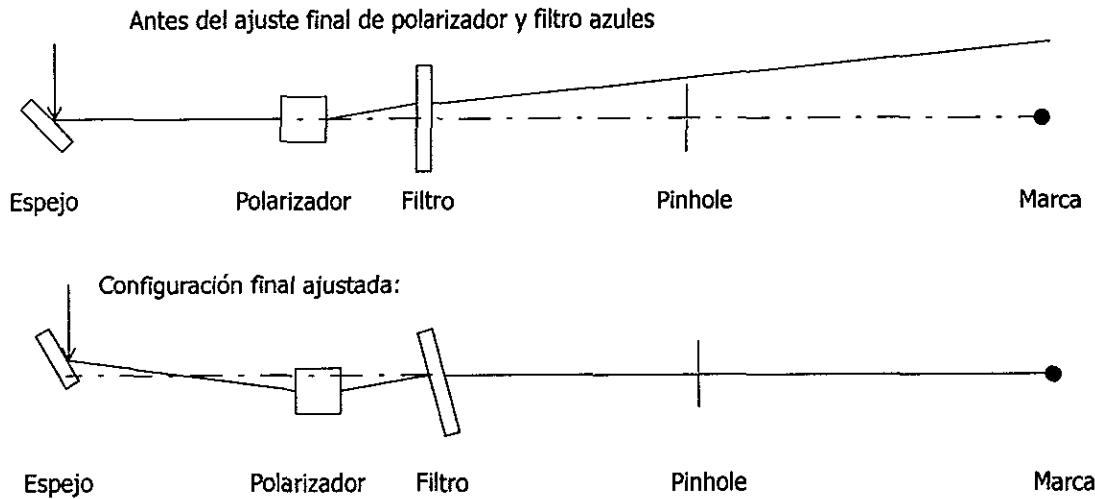


Figura 3.38. Al colocar los elementos polarizador y filtro azules es necesario corregir sus orientaciones alrededor de los ejes vertical y transversal así como la posición transversal del espejo principal para que el haz pase nuevamente por las referencias previamente establecidas: el pinhole y la marca en el muro.

focal de la lente azul (así como la del verde) de modo que la cintura del haz se dé en un punto conocido y que se establece como referencia utilizando un *pinhole* adicional. Este *pinhole* se alinea sobre el eje óptico aproximadamente en el plano de imagen de la lente. Estando definida la referencia para la cintura de ambos haces, se coloca la lente azul (montura B) en el eje óptico principal y se ajusta su orientación y la posición de su centro con respecto al eje óptico hasta cumplir dos condiciones: que el haz pase a través de las referencias establecidas para el eje óptico principal, y que el haz reflejado hacia atrás coincida con el rayo incidente. Finalmente se ajusta la posición longitudinal de la lente azul buscando que la cintura del haz coincida con la posición del *pinhole* situado en el plano de imagen de la lente, condición que se alcanza cuando se un máximo de intensidad atraviesa el *pinhole*. Ver Figura 3.39.

C. Inclinación del Filtro Azul

Este elemento óptico refleja el haz verde proveniente del espejo secundario hacia la celda de flujo. La inclinación inicial de 8.5° que la Montura D impone al filtro debe ajustarse aproximadamente —girando la Placa Deslizante de la Montura D— a un ángulo igual a la mitad del ángulo existente entre el eje óptico primario y la línea que une al centro del espejo secundario con el centro de la superficie reflectora del filtro azul, línea que definirá más adelante el eje óptico secundario. Es importante recordar que dicho ángulo debe ser lo más pequeño posible para no afectar el funcionamiento del filtro interferométrico. Al girar el filtro

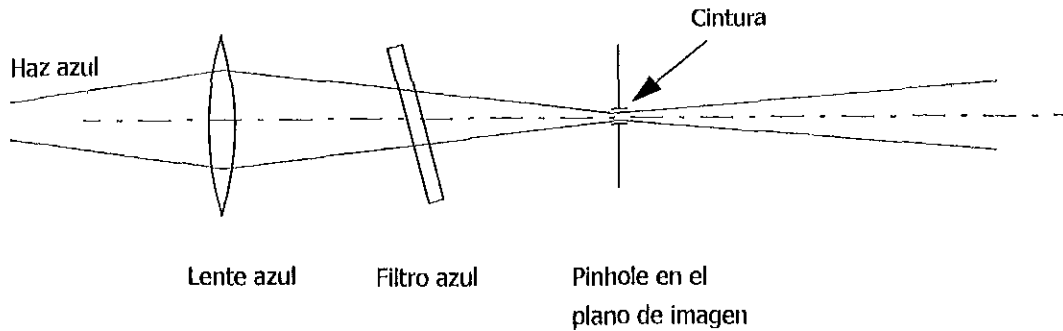


Figura 3.39. Para determinar la localización de la cintura del haz se coloca un pinhole adicional en el plano de imagen de la lente. Se sabe que la cintura y el centro del pinhole coinciden cuando un máximo de intensidad pasa a través del pinhole.

se produce una traslación transversal del haz azul, por lo que es necesario corregir la posición transversal del espejo principal para que el haz azul pase nuevamente por las referencias del eje óptico principal.

3.3.3. Acondicionamiento del Haz Verde

Para el haz verde es necesario establecer primeramente las referencias que definen el eje óptico secundario que inicia en el divisor de haces y termina en la superficie reflectora del filtro azul. En seguida, el acondicionamiento del haz verde se lleva a cabo tomando como referencias de orientación de polarización y de posición longitudinal de la cintura las correspondientes al haz azul.

A. Orientación del eje secundario

El haz emergente del divisor de haces se alinea en una primera aproximación ajustando la orientación alrededor de los ejes vertical y transversal del divisor (montura H), para dirigir el haz hacia el espejo secundario. Dado que los haces azul y verde deben ser colineales al llegar a la celda de flujo, el eje óptico secundario se define utilizando las mismas referencias establecidas en el eje óptico principal: el *pinhole* situado en el plano de imagen de la lente azul, el *pinhole* adyacente a la celda de flujo, y la marca en la pared. La colinealidad de los haces azul y verde se obtiene ajustando la orientación del espejo secundario (montura K) hasta que el haz proveniente del divisor pase a través de los pinholes de referencia, y coincida con la marca en la pared.

B. Polarizador y Lente

En este paso se busca obtener dos condiciones para el haz verde: la orientación del vector de polarización y la posición de la cintura del haz, ambas con respecto al haz azul que se ha acondicionado anteriormente. Estas dos condiciones conciernen los elementos ópticos polarizador y lente verdes, que se colocan en la misma Montura J.

Para la primera condición se requiere que la dirección de polarización del haz verde forme un ángulo de 45° con respecto a la dirección de polarización del haz azul. Para ello se coloca en el eje óptico auxiliar la Montura J y el polarizador de referencia con el que se definió la dirección de polarización del haz azul, girando su montura 180° alrededor del eje vertical con respecto a la posición de calibración del haz azul. Se coloca el polarizador verde en la montura y se ajusta su orientación acimutal hasta obtener una extinción máxima, lo cual indica que la dirección del polarizador verde es perpendicular a la dirección del polarizador de referencia, y por tanto, forma un ángulo de 22.5° con respecto a la vertical. En seguida se ajusta la orientación alrededor de los ejes vertical y transversal buscando que la incidencia del haz sea perpendicular a la cara de entrada del polarizador. Se procede a colocar la Montura J sobre el eje secundario, y se corrige la orientación del espejo secundario (Montura K) para que el haz verde pase nuevamente por los puntos de referencia.

Una vez terminado el ajuste el polarizador se agrega la lente en la Montura J y se ajusta su orientación y la posición de su centro con respecto al eje óptico hasta que el haz pase a través de las referencias establecidas para el eje óptico principal, y que el haz reflejado hacia atrás coincida con el rayo incidente. Finalmente se ajusta la posición longitudinal de la Montura J hasta verificar que la cintura del haz verde coincida con el *pinhole* situado en el plano de imagen de la lente azul.

C. Filtro verde

El eje óptico secundario se utiliza para acondicionar el haz verde, por lo que es necesario eliminar el haz azul emergente del divisor de haces. Para ello se coloca un filtro interferométrico verde (montura I) en el eje óptico secundario. Es necesario ajustar nuevamente la orientación del espejo secundario (Montura K) para corregir la dirección del haz, y hacerlo pasar por las referencias en el eje óptico principal.

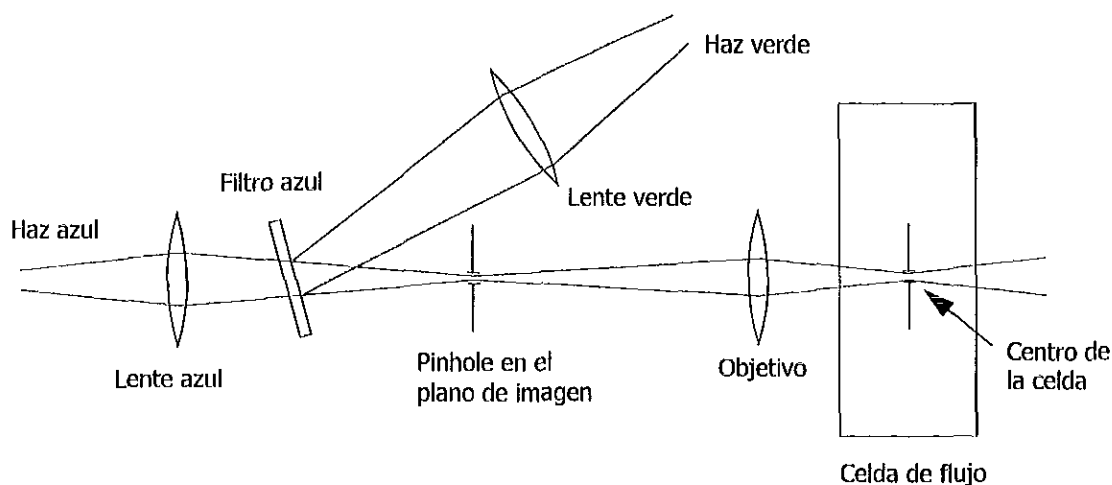


Figura 3.40. Configuración final de los puntos de convergencia de los colores azul y verde. La convergencia de los dos haces se da en un mismo punto representado por un pinhole en el plano de imagen de las lentes. El objetivo produce la convergencia de los dos colores en el centro de la celda, materializado a su vez por otro pinhole.

3.3.4. Lente Objetivo

Esta lente tiene como objetivo hacer converger los haces azul y verde en el centro de la celda del flujo. Recuérdese que la posición del centro de esta lente en el plano transversal, así como su orientación, ya se han ajustado anteriormente. Ahora resta ajustar la posición longitudinal de la lente. Se coloca la Montura G que sostiene a la lente en una posición lo más cercana posible a la celda de flujo. Se realiza el ajuste focal de la lente actuando sobre el micrómetro de desplazamiento longitudinal hasta que se obtenga un máximo de intensidad a través de un *pinhole* colocado en el centro geométrico de la celda. Ver la Figura 3.40.

3.3.5. Detectores y analizadores

Una vez que el tren óptico previo a su paso por la celda de flujo se ha calibrado, lo que resta es orientar los analizadores para máxima extinción. Esta etapa se realiza sin la celda de flujo y resulta obvia de realizarse.

Conclusiones

En este trabajo de tesis se realizan los diseños de monturas ópticas para los componentes del tren óptico del experimento de Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución del Laboratorio de Reología Óptica del IIM, UNAM.

La característica más importante del conjunto de monturas ópticas diseñadas en esta tesis es que cumple con todas las condiciones de precisión requeridas por el experimento: colinealidad de los haces, coincidencia de los centros de convergencia de los dos colores, y precisión en la orientación acimutal relativa de la polarización. Gracias a ello, y utilizando elementos ópticos de la más alta calidad, el equipo experimental permite obtener coeficientes de extinción de los haces polarizados de al menos 10^{-7} , lo que se traduce en una alta capacidad del equipo para efectuar mediciones de birrefringencia. Otra ventaja es que las monturas diseñadas agregan, cada vez que es necesario, movimientos de ajuste basto que facilitan al experimentalista la labor de calibración del tren, operación compleja que requiere de varios días de trabajo para llevarse a cabo. Además, la utilización de estructuras robustas confiere estabilidad al sistema por lo que es posible operarlo durante varios meses sin necesidad de repetir el procedimiento de calibración. Una bondad más de estos diseños estriba en la utilización de micrómetros con graduación de 0.01 mm en algunos casos y 0.001 mm en otros (utilizando la escala *vernier*), lo que permite registrar las posiciones y orientaciones de los elementos una vez calibrados, de tal forma que al reemplazar o sustraer temporalmente un elemento óptico y devolverlo más tarde a su posición en el tren óptico, es posible llevarlo a su posición anterior calibrada con muy buena aproximación.

Los conceptos de diseño de precisión estudiados en esta tesis, así como los diseños detallados propuestos, pueden utilizarse en otros experimentos de óptica. En particular, el diseño de monturas que no existen comercialmente, como es el caso de la Montura J que aporta ocho grados de libertad para dos elementos ópticos en un mismo bloque, o la montura D que permite el ajuste basto y fino de orientación de un elemento reflejante sin inducir ningún desplazamiento de su superficie, resultan muy útiles en el desarrollo de equipos experimentales de óptica.

En el proceso de diseño realizado en esta tesis se utiliza un software de diseño de la firma *Autodesk* llamado *Mechanical Desktop*. Este software está destinado específicamente al diseño de partes mecánicas y permite modelar con detalle figuras en tres dimensiones, simular los ensambles de las partes que componen un mecanismo, generar los planos de fabricación de partes y de ensambles así como imágenes ilustrativas de calidad fotográfica que incluyen texturas de materiales.

La etapa posterior al diseño es la fabricación. La realización de los diseños a partir de un software como el *Mechanical Desktop* permite utilizar en la elaboración de los códigos de control numérico para el maquinado de las partes, los mismos dibujos que se utilizaron para la concepción de las monturas. Se planea realizar la traducción de los dibujos en códigos de control numérico utilizando el software *Mastercam 7.0*, y la fabricación de los elementos mecánicos utilizando una fresadora marca *Fadal* modelo *VMC15*. De esta forma, la experiencia adquirida durante la elaboración de esta tesis y el posterior proceso de maquinado por control numérico servirá de ahora en adelante para el diseño y construcción de sistemas experimentales aún más complejos para los proyectos de investigación del Laboratorio de Reología Óptica, como lo son el goniómetro y la celda de flujo (molino de dos rodillos) que pertenecen también al experimento de Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución.

Bibliografía

- [1] BIRD, R. Byron, "Nonlinear Viscoelastic Behavior", en *Comprehensive Polymer Science*, ALLEN, GEOFFREY, volumen 2, Pergamon Press, UK, 1a. edición, 1988.
- [2] GRAESSLEY, William W., "Viscoelasticity and Flow Polymer Melts and Concentrated Solutions", en *Physical Properties of Polymers*, MARK, James E., *et al.*, American Chemical Society, 2a. edición, 1993.
- [3] YOUNG, R. J., LOVELL, P. A., *Introduction to Polymers*, Chapman & Hall, 2a. edición, Londres, UK, 1991.
- [4] JOANNY, J. F., CANDAU, S. J., "Hydrodynamic Properties", en *Comprehensive Polymer Science*, ALLEN, GEOFFREY, volumen 2, Pergamon Press, UK, 1a. edición, 1988.
- [5] QUIRK, R. P., *et al.*, "Block Copolymers", en *Comprehensive Polymer Science*, ALLEN, GEOFFREY, volumen 2, Pergamon Press, UK, 1a. edición, 1988.
- [6] WALSH, D. J., "Polymer Blends", en *Comprehensive Polymer Science*, ALLEN, GEOFFREY, volumen 2, Pergamon Press, UK, 1a. edición, 1988.
- [7] NOMURA, Shunji, "Oriented Polymers", en *Comprehensive Polymer Science*, ALLEN, GEOFFREY, volumen 2, Pergamon Press, UK, 1a. edición, 1988.
- [8] REYES, M. A., GEFFROY, E., *Study of low Reynolds number hydrodynamics generated by symmetric corotating two-roll mills*, Revista Mexicana de Física (2000).
- [9] REYES, M. A., GEFFROY, E., *A corotating two-roll mill for studies of two-dimensional, elongational flows with vorticity*, aceptado en J. Physics Fluids (2000).
- [10] JANESCHITZ-KRIEGL, Hermann, *Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1983.
- [11] CORONA, Carlos A., *Medición de señales luminosas de alta resolución para estudios de anisotropía inducida por flujos en sistemas poliméricos*, Tesis de Físico, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1997.
- [12] AZZAM, R. M. A. y BASHARA, N. M., *Ellipsometry and Polarized Light*, Elsevier Science B. V., Amsterdam, The Netherlands, 1987.
- [13] KLIEGER, David S., *Polarized Light in Optics and Spectroscopy*, Academic Press, San Diego, USA, 1990.
- [14] COLLET, Edward, *Polarized Light, Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker, Nueva York, USA, 1993.
- [15] GEFFROY, Enrique, *Birefringence of Polymer Solutions in Time Dependent Flows*, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, USA, 1990.

- [16] OROPEZA, Laura, y VIDAL, Teresa, *Sistema de control de alta resolución para un motor de pasos*, Tesis de Ingeniera Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2000.
- [17] HOCHSTEIN, Mónica, *Birrefringencia Bicolor de Alta Resolución*, Tesis de Físico, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1997.
- [18] Newport Catalog, "Optics", 1997/98 catalog, Newport Corporation, USA.
- [19] KOGELNIK, H., LI, T., *Applied Optics* **5**, 1550-1567 (1966).
- [20] BECKWITH, Thomas G., *Mechanical Measurements*, Addison-Wesley, 5a. edición, 1993.
- [21] SMITH, S. T. y D. G. CHETWIND, *Foundations of ultraprecision mechanism design*, Gordon and Breach Science Publishers, 1992.
- [22] SLOCUM, Alexander, *Precision Machine Design*, Prentice-Hall, 1997.
- [23] The Newport Catalog, Scientific & Laboratory Products.
- [24] CHEVALIER, A., *Guide du Dessinateur Industriel*, Hachette, Ed. 1989-1990, France.
- [25] OBERG, Erik, *Machinery's handbook*, Industrial Press, ed. 24, Nueva York, USA, 1992.

Anexo A

Definiciones

A.1. Intervalo (range)

Indica el intervalo de valores dentro del cual un instrumento funciona debidamente, según sus especificaciones.

A.2. Resolución (resolution)

Es el incremento mínimo de la variable observada que el instrumento puede registrar (o permite registrar).

A.3. Repetibilidad (repeatability)

Es la medida de la dispersión de los resultados obtenidos cuando se intenta reproducir varias veces una misma operación. No existe una definición generalizada para la medición de la repetibilidad; en ocasiones se considera la desviación estándar de los valores medidos y en otros casos la mitad de la banda recorrida por la dispersión.

La repetibilidad depende directamente del principio de funcionamiento del instrumento, ya que se ve afectada por la presencia de histéresis y por los errores de lectura. Por lo tanto, un diseño cuidadoso mejora significativamente esta característica. Un diseño que en teoría excluye por completo errores inherentes a su funcionamiento tiene una repetibilidad ideal, en cuyo caso las variaciones en las mediciones no son apreciables por ser del mismo orden de magnitud que la resolución.

A.4. Exactitud (accuracy)

La exactitud se define como la desviación del valor medido con respecto al valor real. Ahora bien, dado que el valor real no se conoce, no es posible aplicar esta definición directamente. Por lo general, lo que se entiende por exactitud de un instrumento es la distancia esperada estadísticamente entre el valor medido y el valor real. Entonces, un instrumento es exacto cuando proporciona una lectura muy cercana al valor real. La exactitud puede mejorarse a través de la calibración del instrumento.

A.5. Precisión (precision)

No existe una definición establecida para este concepto. En algunos casos es considerada como un sinónimo de *repetibilidad*, tal y como se definió anteriormente. También se puede considerar como el cociente de la resolución entre el intervalo, o incluso el cociente de la exactitud entre el intervalo. En la práctica, se usa inadecuadamente el término "preciso" para indicar que un instrumento opera con niveles de exactitud muy altos, concepto ambiguo que no puede cuantificarse. Para evitar confusiones, lo más conveniente es adoptar como concepto de precisión el mismo que se definió para repetibilidad, y utilizar ambos términos como sinónimos. Los conceptos de resolución, exactitud y repetibilidad se esquematizan como se muestra en la Figura A.1.

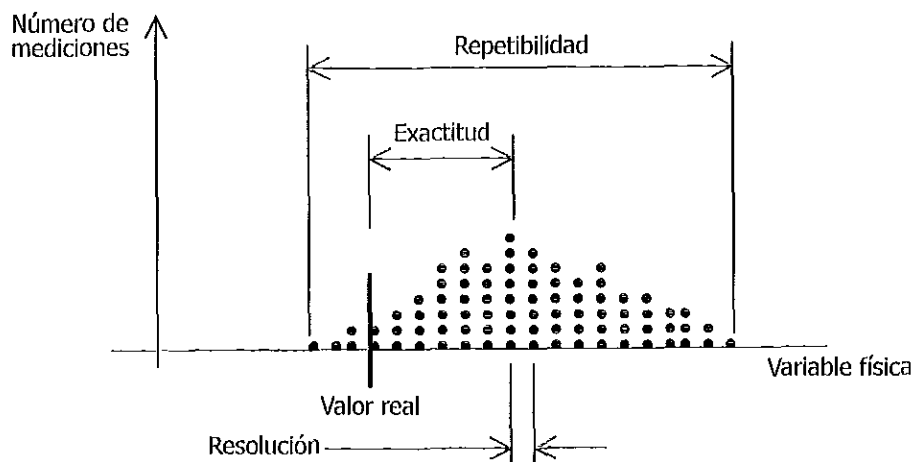


Figura A.1. Definición de exactitud, precisión y repetibilidad.

Anexo B

Aluminio 6061

Este aluminio pertenece a la Serie 6000 de aluminios aleados, lo que significa que se trata de una aleación de magnesio y silicio. Este material se puede tratar térmicamente. Aunque es menos resistente que los aluminios de la Serie 2000 (aleaciones de cobre) o de la Serie 7000 (aleaciones de zinc), tiene como ventajas una buena formabilidad, resistencia a la corrosión, y facilidad de maquinado. La composición nominal del aluminio 6061 es 0.6% Si, 1.0% Mg, 0.28% Cu, 0.20% Cr. Generalmente está disponible en las siguientes presentaciones: recocido y recristalizado (designación 6061-0), tratamiento de solución y envejecido naturalmente (6061-T4), tratamiento de solución y envejecido artificialmente (6061-T6)

En los diseños de monturas ópticas se elige el aluminio 6061-T6 para fabricar las placas, columnas, bridas, bujes, abrazaderas, receptáculo para sujetador de filtro, soportes para micrómetros. Este material es adecuado para la fabricación de estas partes por su bajo peso (con respecto a los materiales ferrosos), su gran facilidad de maquinado que permite obtener buenos acabados de superficie, su resistencia a la corrosión y su estabilidad dimensional debida al tratamiento de envejecimiento. Para mejorar el aspecto de las partes, aumentar su resistencia a la corrosión y reducir las reflexiones especulares de las superficies (condición importante en los equipos experimentales de óptica) se especifica un anodizado color negro mate para todas las partes fabricadas en aluminio.

Acero inoxidable templado

Para las piezas que requieren una dureza mayor que la del aluminio, como en el caso de los insertos, el pivote de la Montura D, y los postes del sistema elevador de la Montura J, se utiliza acero inoxidable AISI 416. Se trata de un acero inoxidable martensítico, templable, con una excelente maquinabilidad y buena resistencia a la corrosión. La composición nominal de este acero es 12-14% Cr, 0.15% C, 1.25% Mn, 1.0% Si, 0.060%P, 0.15% S, 0.060% Mo.

Bronce

Los cojinetes utilizados para reducir la fricción en la Montura J se fabrican a partir de bujes de bronce fosforado

Anexo C

Índice de Planos

Ref.	Parte	Montura	Cant.	Material	Bruto	Long.
C-17	Abrazadera	FH	1	6061	Solera 3 X 1.5	2
C-17	Abrazadera	J	1	6061	Solera 3 X 1.5	5
C-16	Anillo	FH	1	6061	Barra D=2.5	0,5
C-30	Apoyo	J	1	6061	Solera 3 X 1.5	2
C-7	Brida	B	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-22	Brida larga	G	1	6061	Solera 3 X 0,5	4
C-4	Buje		20	AISI 416	Barra D=0,5	0,25
C-25	Cojinetes	J	2	BRONCE	Barra D=2.5	0,5
C-21	Columna	G	2	6061	Solera 3 X 0,5	5
C-2	Columna long	A	1	6061	Solera 3 X 0,5	2
C-2	Columna long	B	1	6061	Solera 3 X 0,5	2
C-2	Columna long	C	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-2	Columna long	D	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-2	Columna long	K	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-3	Columna trans	A	1	6061	Solera 3 X 0,5	2
C-3	Columna trans	B	1	6061	Solera 3 X 0,5	2
C-3	Columna trans	C	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-3	Columna trans	D	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-3	Columna trans	K	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-11	Insertos	C	2	AISI 416	Barra D=0,5	0,5
C-11	Insertos	J	2	AISI 416	Barra D=0,5	0,5
C-18	Palanca	FH	1	6061	Barra D=0,5	2
C-18	Palanca	J	1	6061	Barra D=0,5	2
C-14	Pivote	D	1	AISI 416	Barra D=5/8	2
C-13	Placa deslizante	D	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-9	Placa Fija	C	1	6061	Solera 3 X 0,5	4
C-10	Placa Flotante	C	1	6061	Solera 3 X 0,5	4
C-19	Placa horizontal	G	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-1	Placa inferior	A	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-1	Placa inferior	B	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-1	Placa inferior	C	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-1	Placa inferior	D	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-28	Placa inferior	J	1	6061	Solera 3 X 0,5	4
C-1	Placa inferior	K	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-5	Placa superior	A	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-6	Placa superior	B	1	6061	Solera 4 X 0,5	
C-8	Placa superior	C	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-12	Placa superior	D	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-27	Placa superior	J	1	6061	Solera 3 X 0,5	4
C-6	Placa superior	K	1	6061	Solera 3 X 0,5	3
C-20	Placa vertical	G	1	6061	Solera 3 X 0,5	5
C-31	Plataforma movil	J	1	6061	Solera 3 X 1.5	1
C-32	Poste	J	2	AISI 416	Barra D=0,5	4
C-15	Receptáculo	FH	1	6061	Barra D=2.5	1,5
C-29	Solera	J	1	6061	Solera 3 X 0,5	1,5
C-23	Soporte fijo	J	1	6061	Solera 3 X 1.5	5
C-24	Soporte flotante	J	1	6061	Solera 3 X 1.5	4
C-26	Sujetador micro	J	1	6061	Solera 3 X 1.5	1
C-26	Sujetador micro elev	J	1	6061	Solera 3 X 1.5	1

Lista de Componentes por ensamble

MONTURA A			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
M-BK-3	1	Newport	
610	1	Newport	
M-423	1	Newport	
Tornillo M4	8		
Tornillo M6	8		
Micrómetro SM-13	1	Mitutoyo	
MONTURA B			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
Brida	1		6061-T6
M-BK-3	1	Newport	
460A-XYZ	1	Newport	
M-MM-200A	1	Newport	
Tornillo M4	9		
Tornillo M6	10		
Micrómetro SM-50	3	Mitutoyo	
MONTURA C			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
Placa fija	1		6061-T6
Placa flotante	1		6061-T6
Inserto plano	1		AISI 416
Inserto V	1		AISI 416
M-481-A	1	Newport	
M-BK-3	1	Newport	
Micrómetro SM-13	2	Mitutoyo	
Esfera D=5/16"	1	Small Parts	AISI 416
Resorte	2	Small Parts	
Perno (spring pin)	4	Travers Tool	
Tornillo M4	10		
Tornillo M6	8		
MONTURA D			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
Placa deslizante	1		6061-T6
Pivote	1		AISI 416
M-BK-3	1	Newport	
600A-2R	1	Newport	

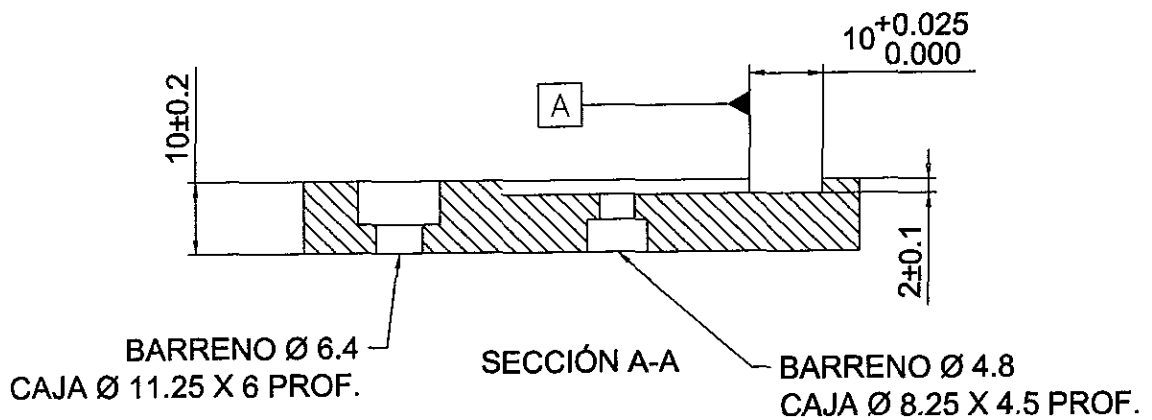
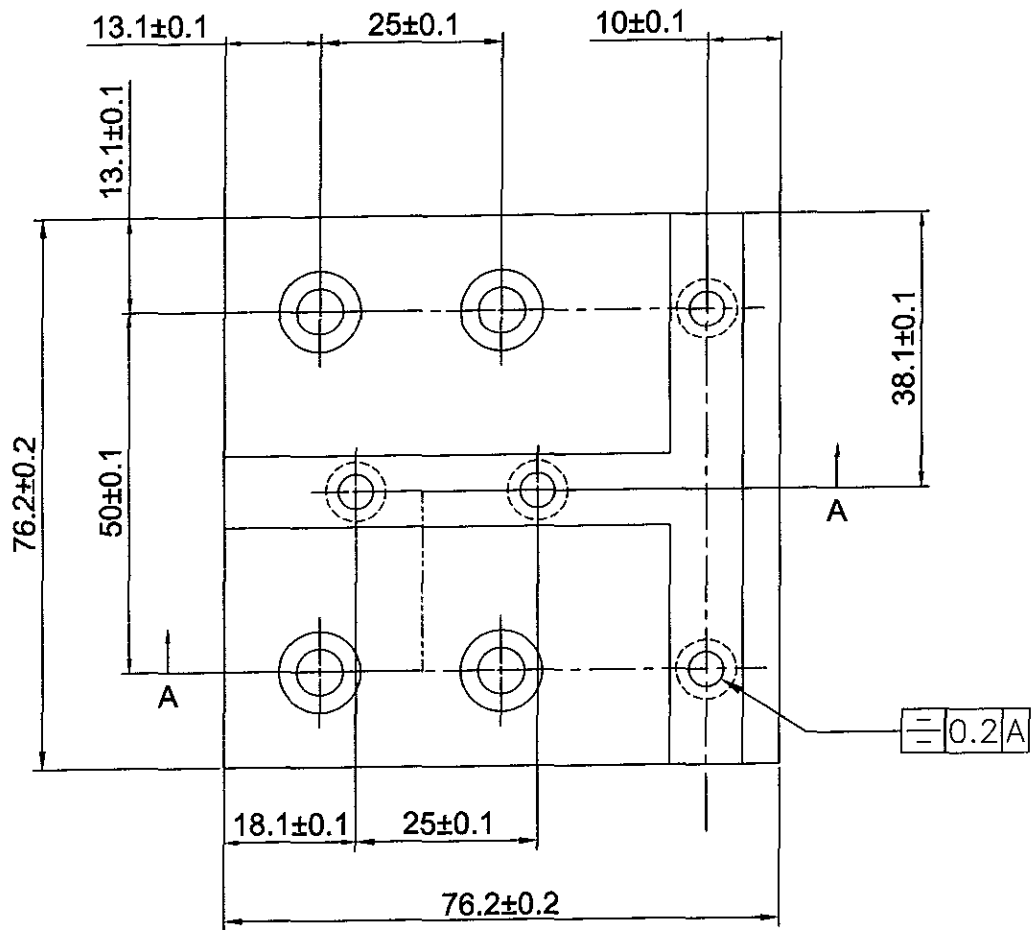
Lista de Componentes por ensamble

MONTURA A			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
M-BK-3	1	Newport	
610	1	Newport	
M-423	1	Newport	
Tornillo M4	8		
Tornillo M6	8		
Micrómetro SM-13	1	Mitutoyo	
MONTURA B			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
Brida	1		6061-T6
M-BK-3	1	Newport	
460A-XYZ	1	Newport	
M-MM-200A	1	Newport	
Tornillo M4	9		
Tornillo M6	10		
Micrómetro SM-50	3	Mitutoyo	
MONTURA C			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
Placa fija	1		6061-T6
Placa flotante	1		6061-T6
Inserto plano	1		AISI 416
Inserto V	1		AISI 416
M-481-A	1	Newport	
M-BK-3	1	Newport	
Micrómetro SM-13	2	Mitutoyo	
Esfera D=5/16"	1	Small Parts	AISI 416
Resorte	2	Small Parts	
Perno (spring pin)	4	Travers Tool	
Tornillo M4	10		
Tornillo M6	8		
MONTURA D			
Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
Placa deslizante	1		6061-T6
Pivote	1		AISI 416
M-BK-3	1	Newport	
600A-2R	1	Newport	

Micrómetro SM-50	1	Mitutoyo	
Micrómetro 154-58	5	Mitutoyo	
Resorte	3	Small Parts	
Perno (spring pin)	5	Small Parts	
Inserto plano	3		AISI 416
Inserto V	1		AISI 416
Esfera D=5/16"	1	Small Parts	
Porta-polarizador	1	Newport	
Tornillo M3	2		
Tornillo M4	5		
Tornillo M6	9		
Tornillo M4 X 80	1		

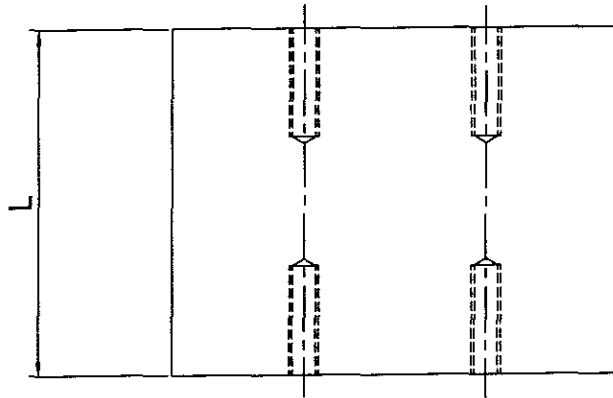
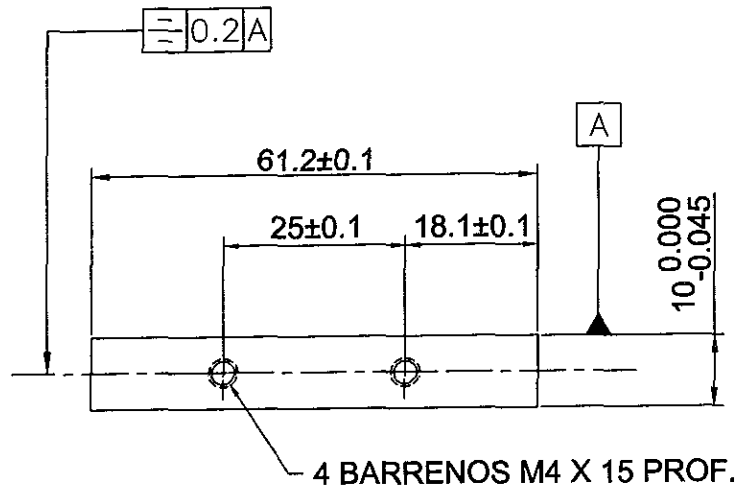
MONTURA K

Elemento	Cant.	Fabricante	Material
Placa inferior	1		6061-T6
Columna longitudinal	1		6061-T6
Columna transversal	1		6061-T6
Placa superior	1		6061-T6
M-BK-3	1	Newport	
610	1	Newport	
Tornillo M4	8		
Tornillo M6	8		



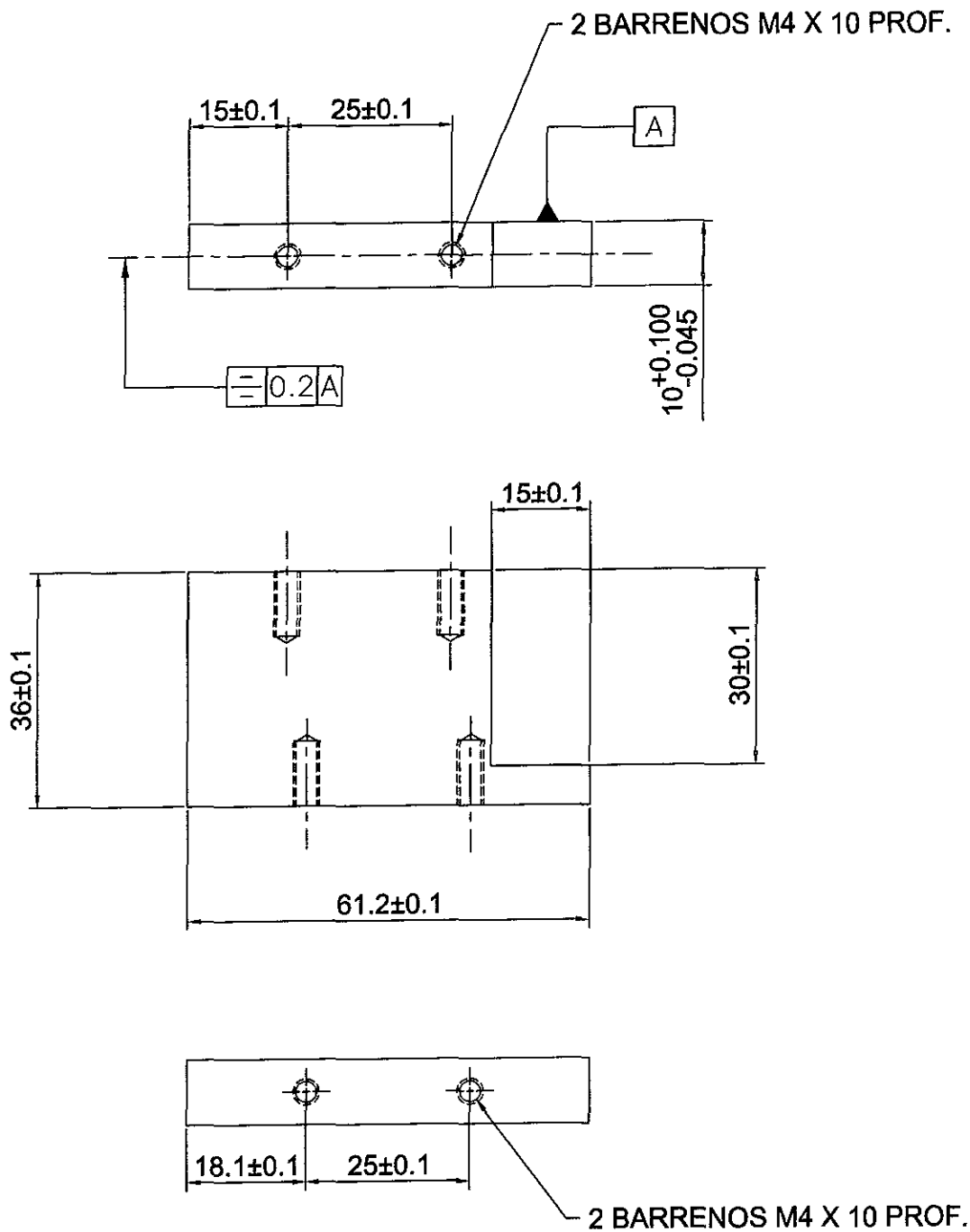
NOTA: LA MISMA TOLERANCIA DE SIMETRÍA SE APLICA PARA LOS BARRENOS DE AMBAS RANURAS

	Material: Aluminio 6061-T6			Dimensiones: mm	
Dibujó: J.P. Jiménez		Archivo: base comun.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Inferior			Conjunto: Base Común (Monturas A, B, C, D, K)		
			IIM - UNAM		Ref: C-1

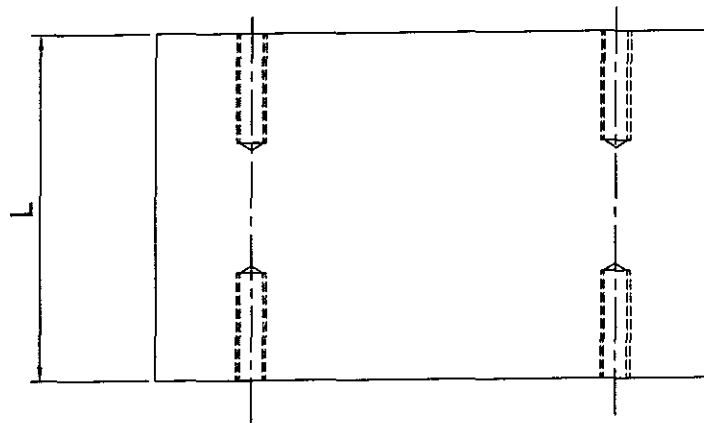
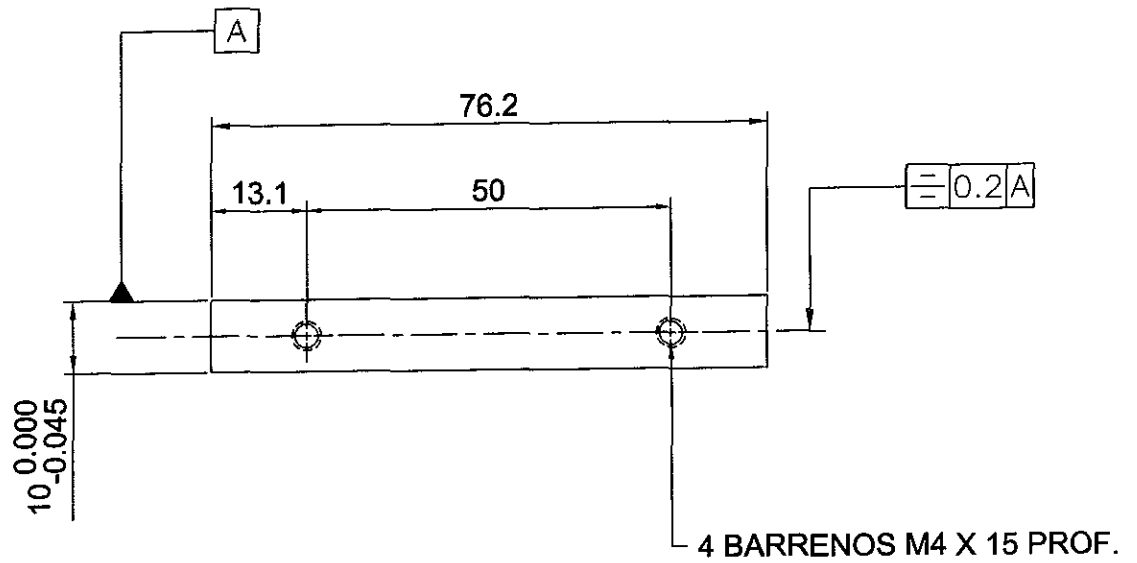


Montura	A	B	C	K
L	48	50	68	73

	Material: Aluminio 6061-T6			Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: columnlong.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Columna Longitudinal			Conjunto: Base Común (Monturas A, B, C, K)		
			IIM - UNAM		Ref: C-2

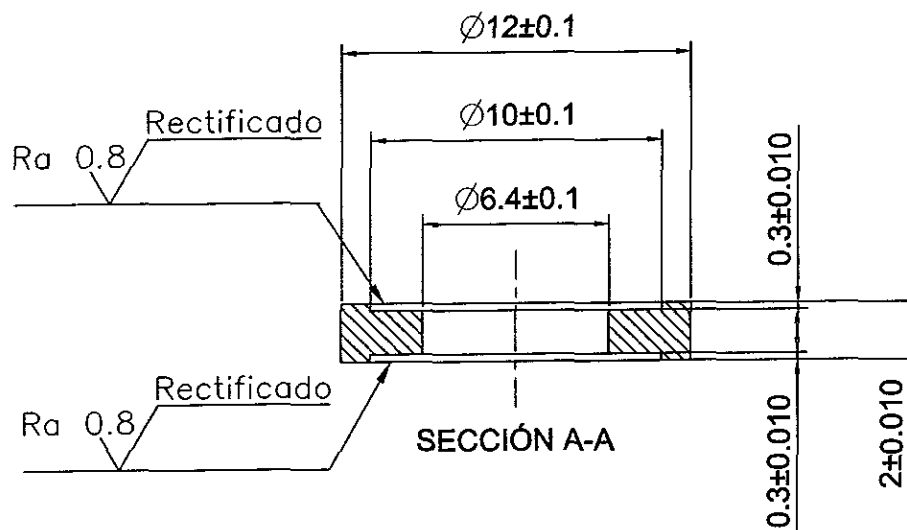
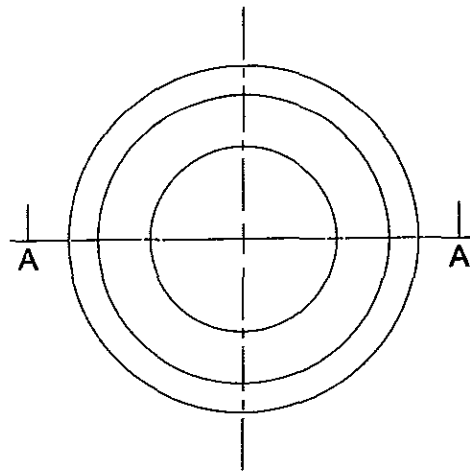


	Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: D_ensamble.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Columna Longitudinal		Conjunto: Montura D		
		IIM - UNAM	Ref: C-2	Hoja 2/2



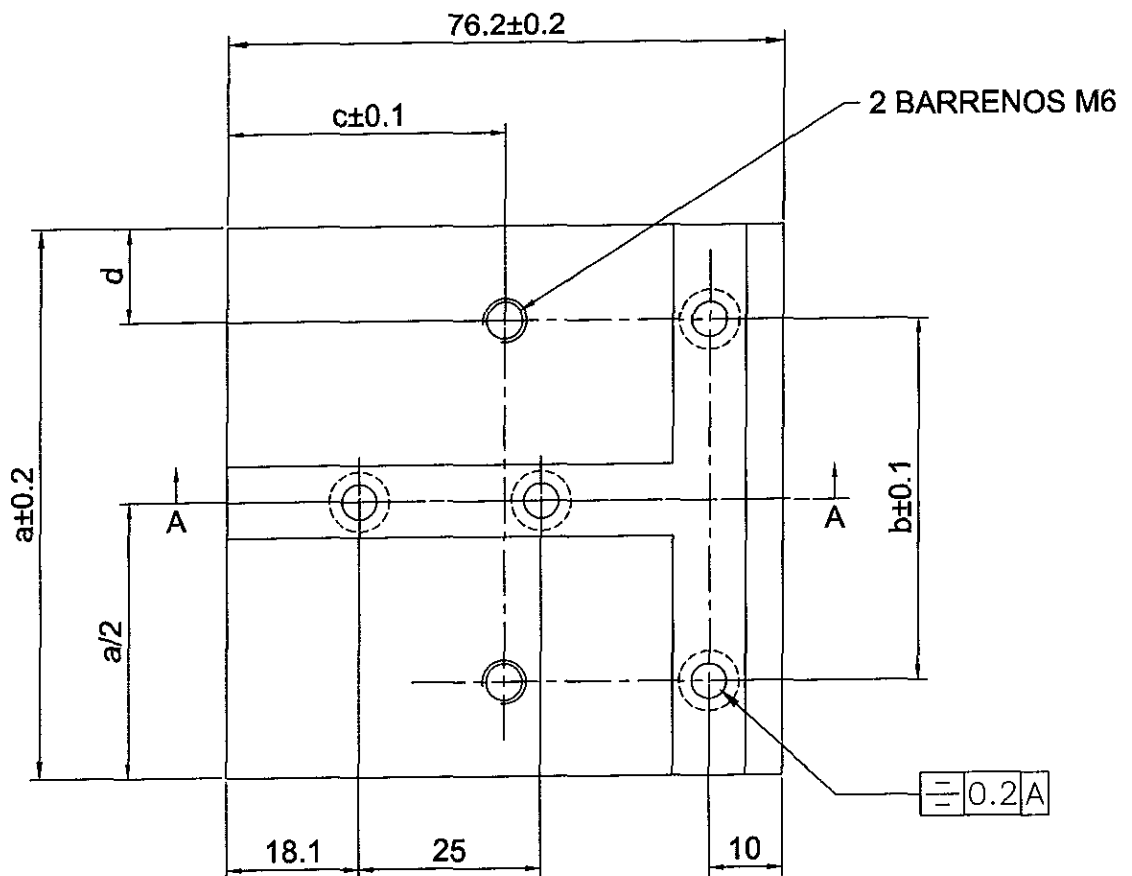
Montura	A	B	C	D	K
L	48	50	68	36	73

	Material: Aluminio 6061-T6			Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: columntrans.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Columna Transversal			Conjunto: Base Común (Monturas A, B, C, D, K)		
			IIM - UNAM		Ref: C-3

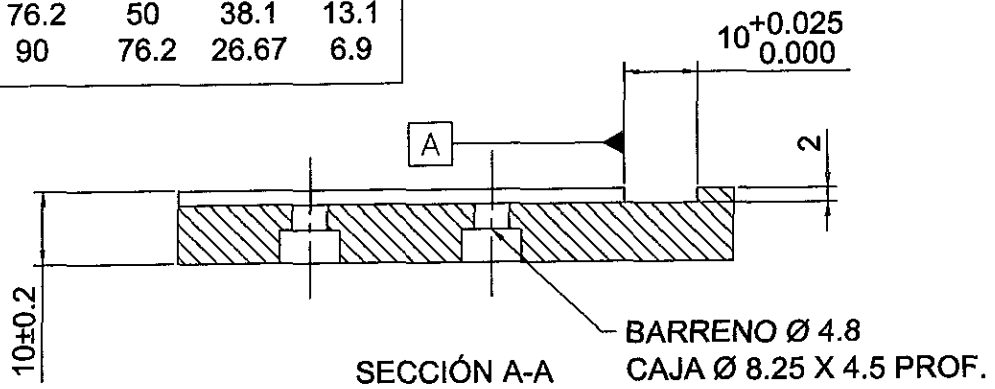


Nota: la rugosidad se especifica en μm

	Material: Acero inox. AISI 416			Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: buje.dwg		Fecha: 01/05/2000	Escala: 4:1
Buje			Conjunto: Base Común		
			IIM - UNAM		Ref: C-4

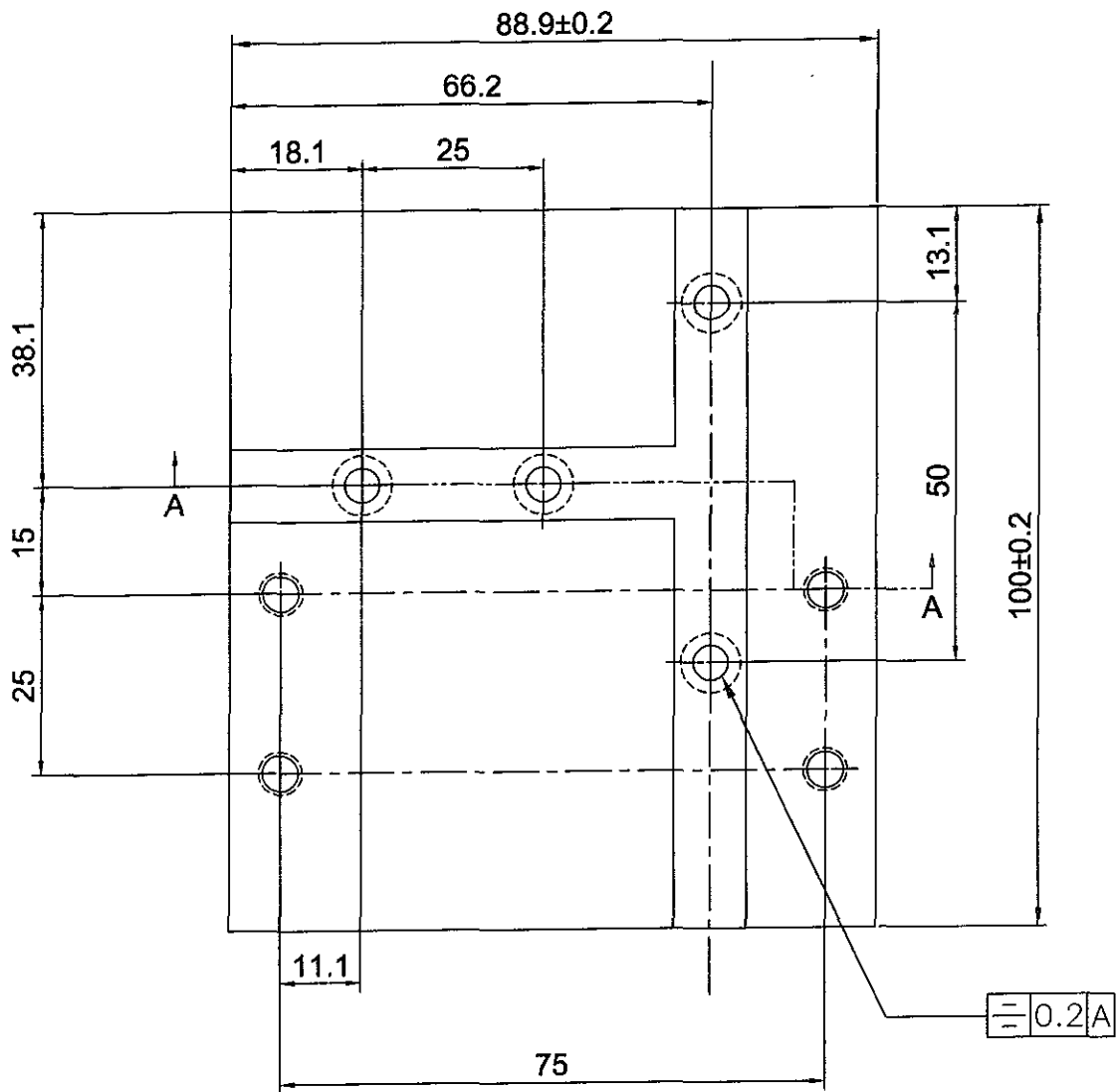


	a	b	c	d
Montura A	76.2	50	38.1	13.1
Montura K	90	76.2	26.67	6.9

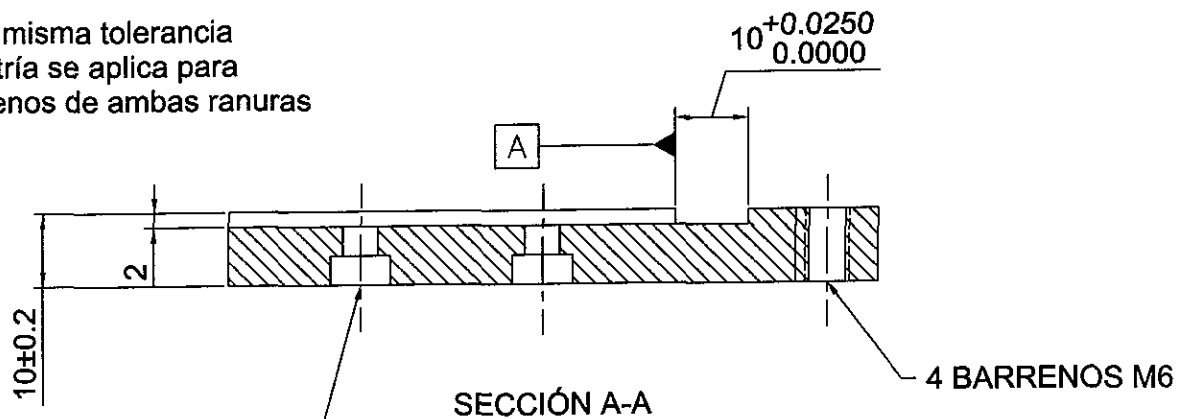


NOTA: LA MISMA TOLERANCIA DE SIMETRÍA SE APLICA PARA LOS BARRENOS DE AMBAS RANURAS

	Material: Aluminio 6061-T6			Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: A_top.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Superior			Conjunto: Monturas A y K		
			IIM - UNAM	Ref: C-5	Hoja 1/1

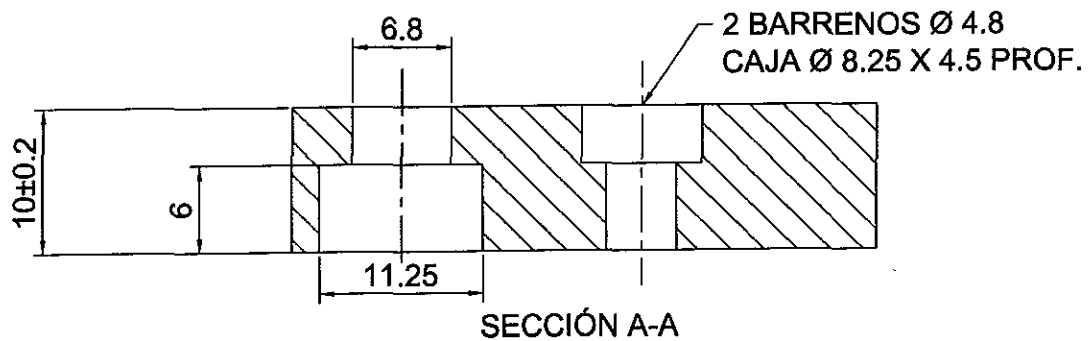
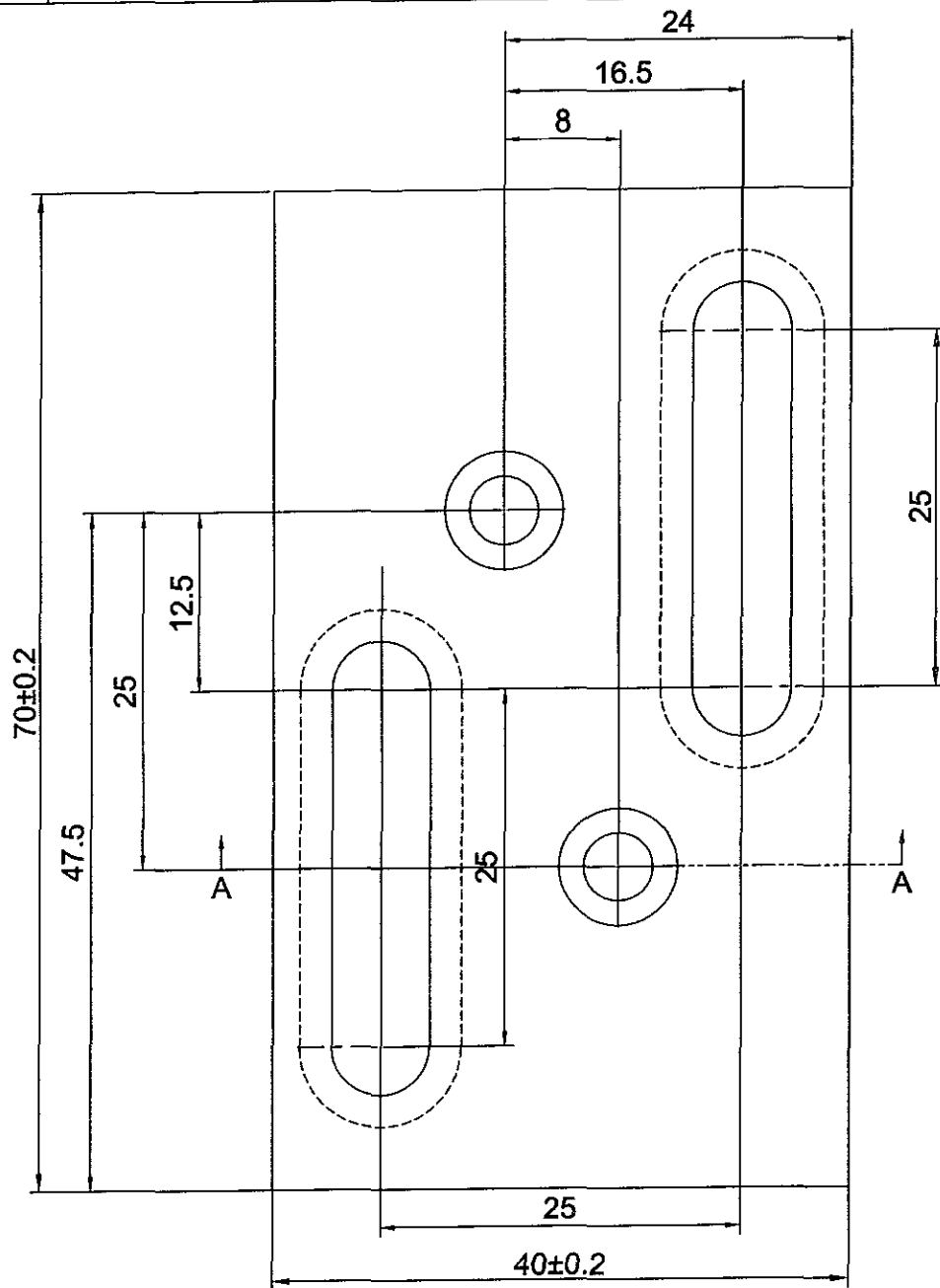


Nota: la misma tolerancia de simetría se aplica para los barrenos de ambas ranuras

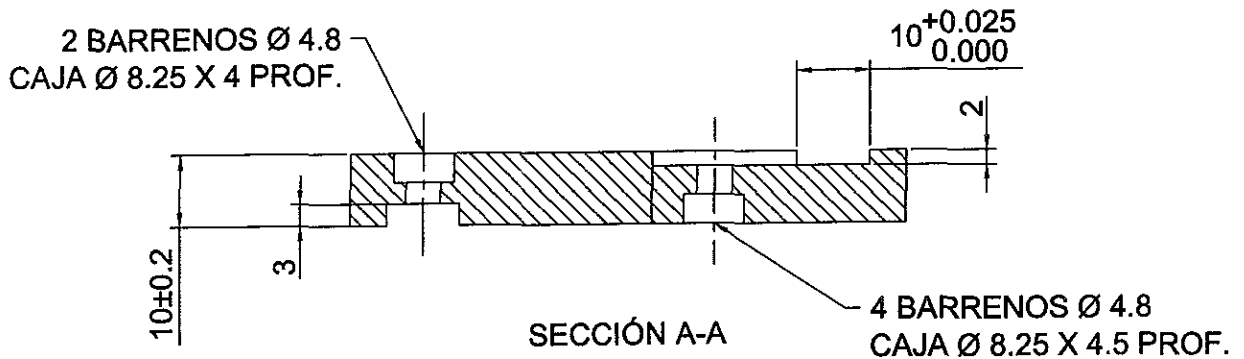
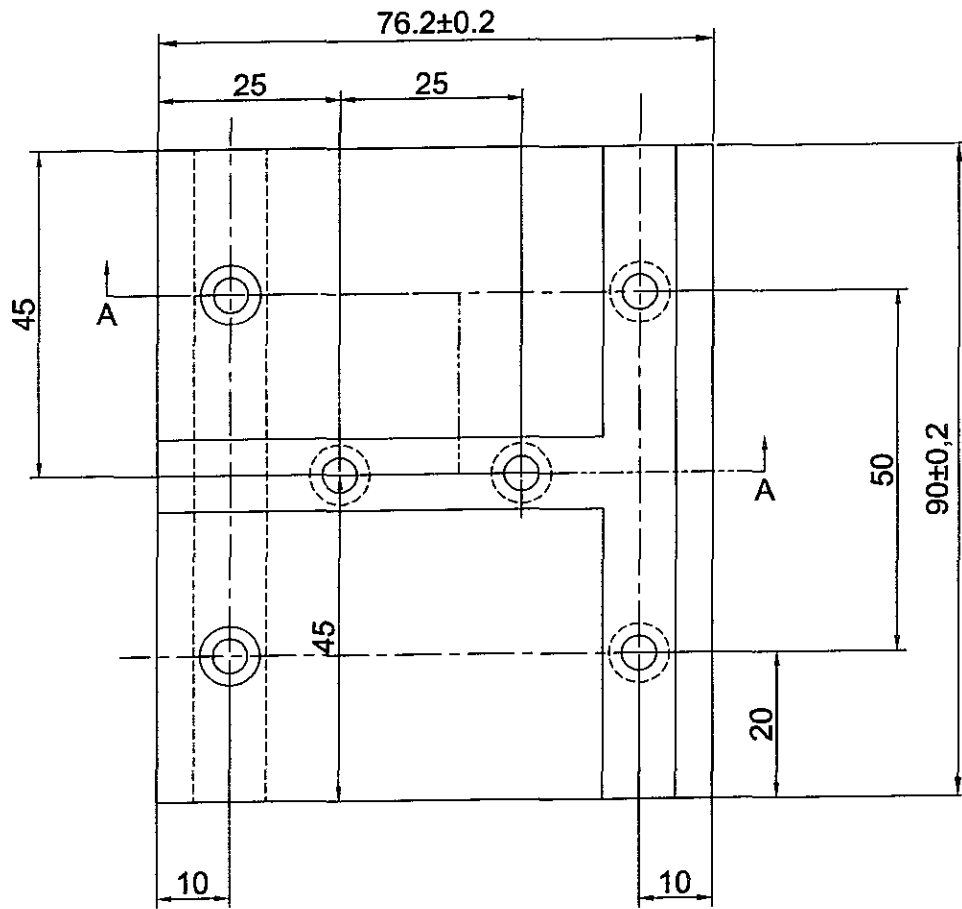


4 BARRENOS Ø 4.8
CAJA Ø 8.25 X 4.5 PROF.

		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: B_top.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Superior			Conjunto: Montura B		
			IIM - UNAM	Ref: C-6	Hoja 1/1

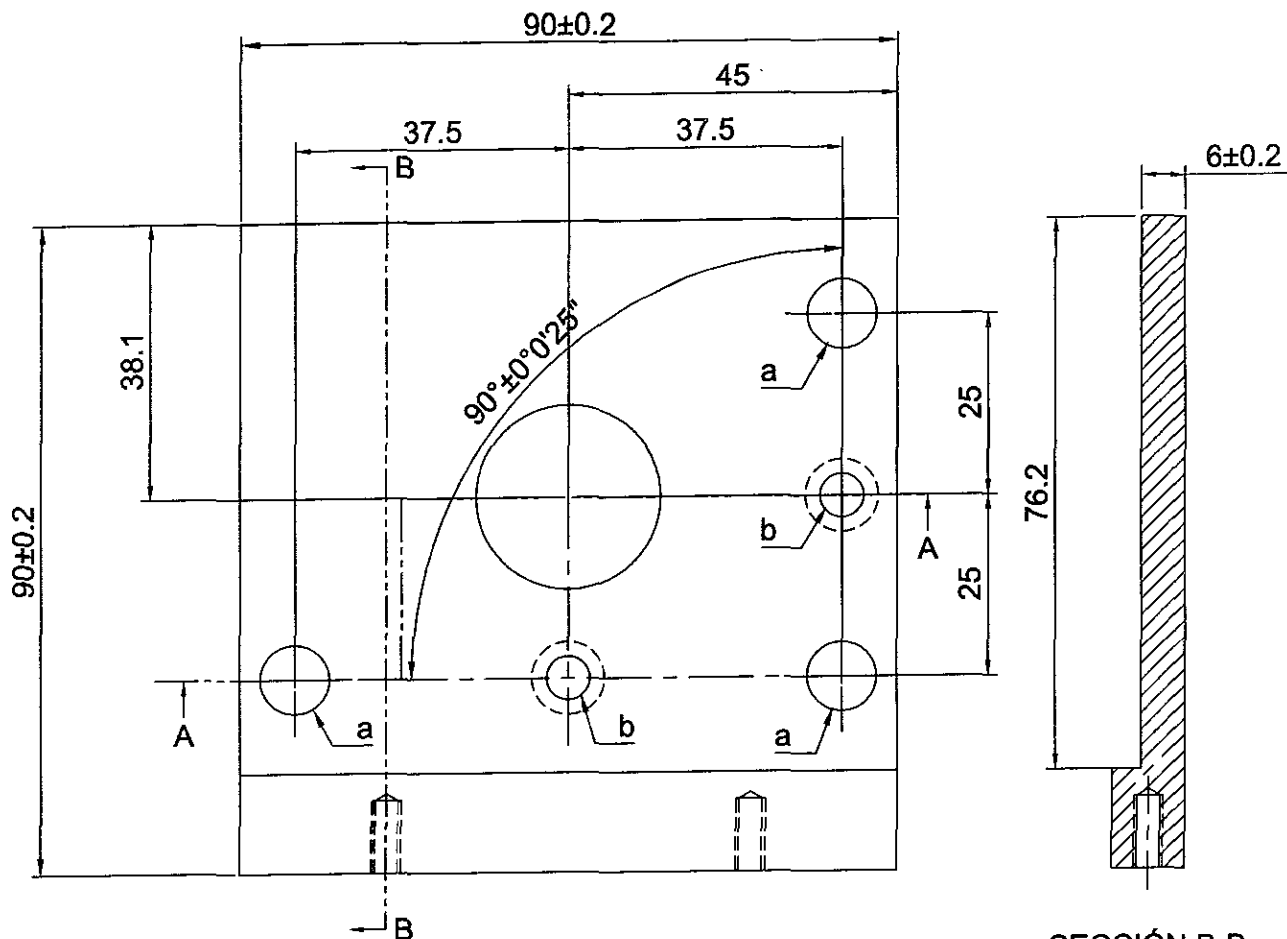


		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: brida.dwg		Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000
				Escala: 2:1	
Brida			Conjunto: Montura B		
			IIM - UNAM		Ref: C-7

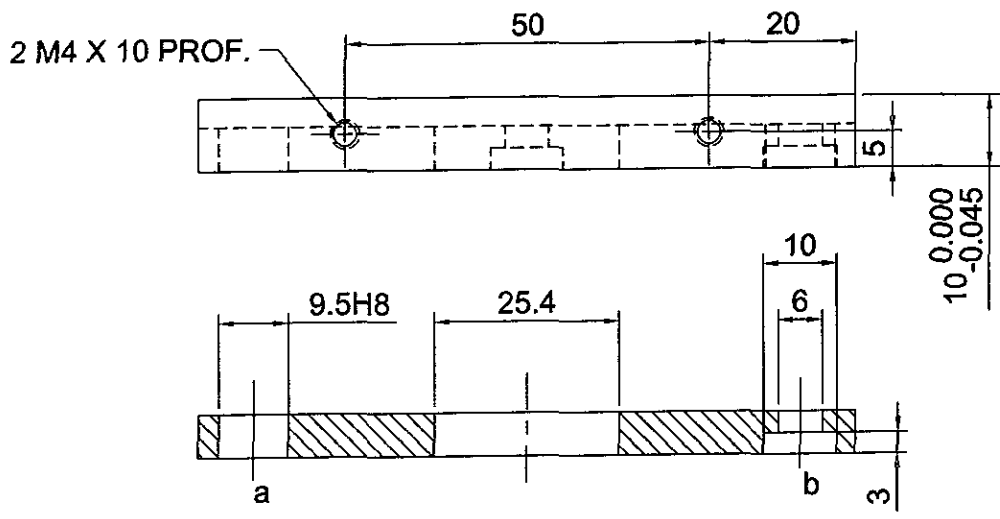


NOTA: TODOS LOS BARRENOS TIENEN UNA TOLERANCIA DE SIMETRÍA DE 0.2 CON RESPECTO A LA RANURA RESPECTIVA

		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: C_top.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Superior			Conjunto: Montura C		
			IIM - UNAM	Ref: C-8	Hoja 1/1

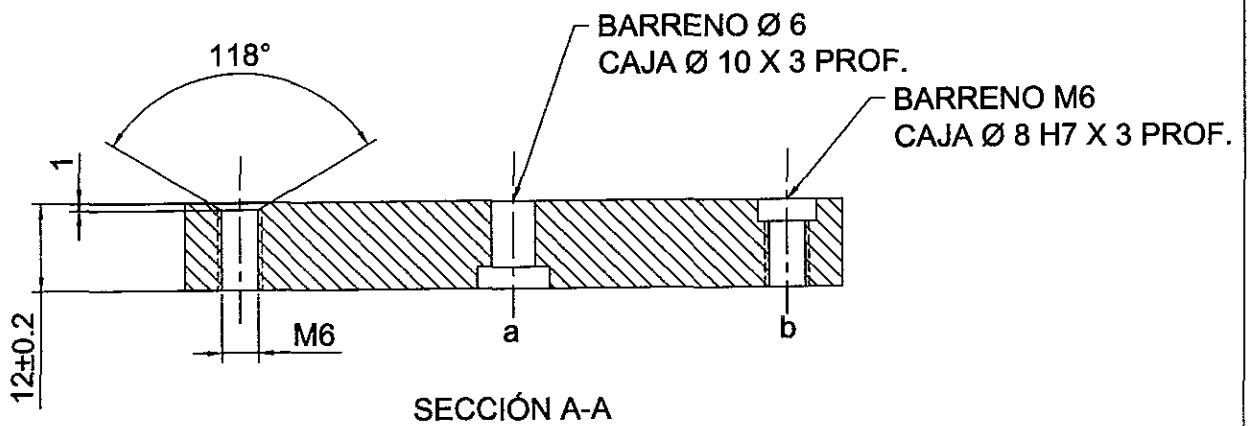
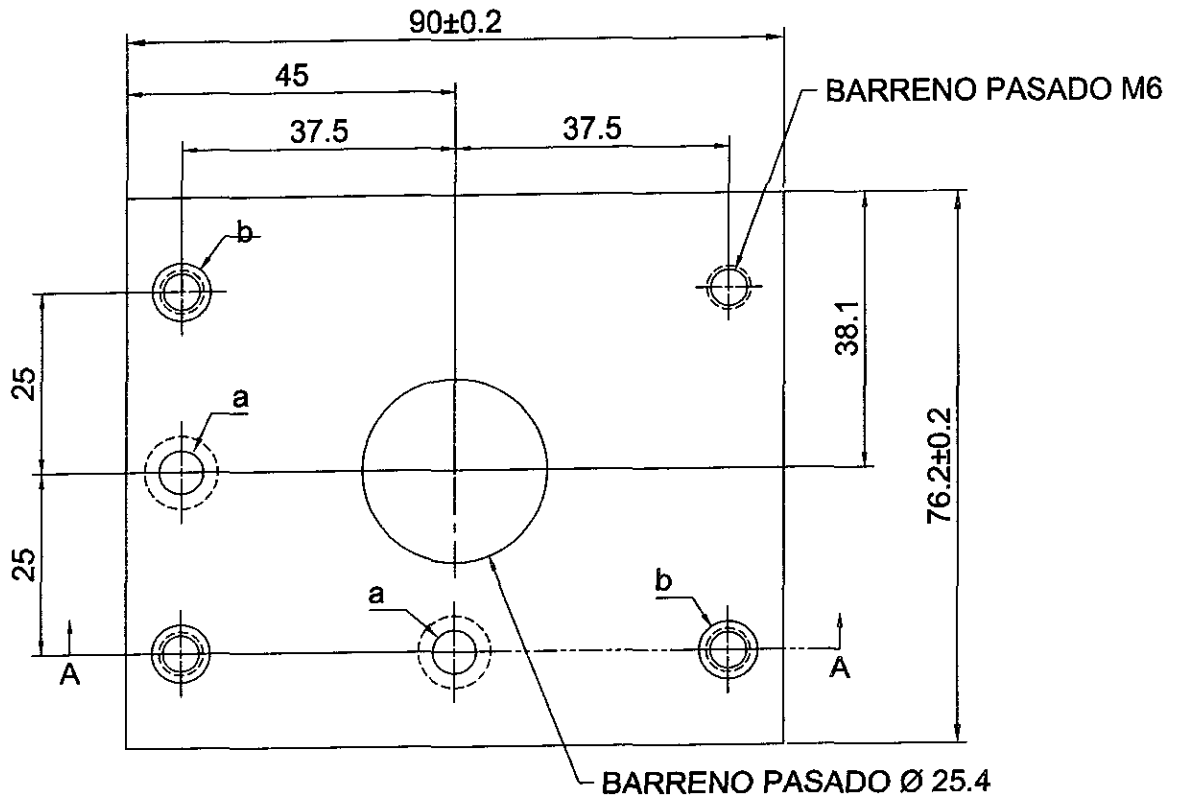


SECCIÓN B-B

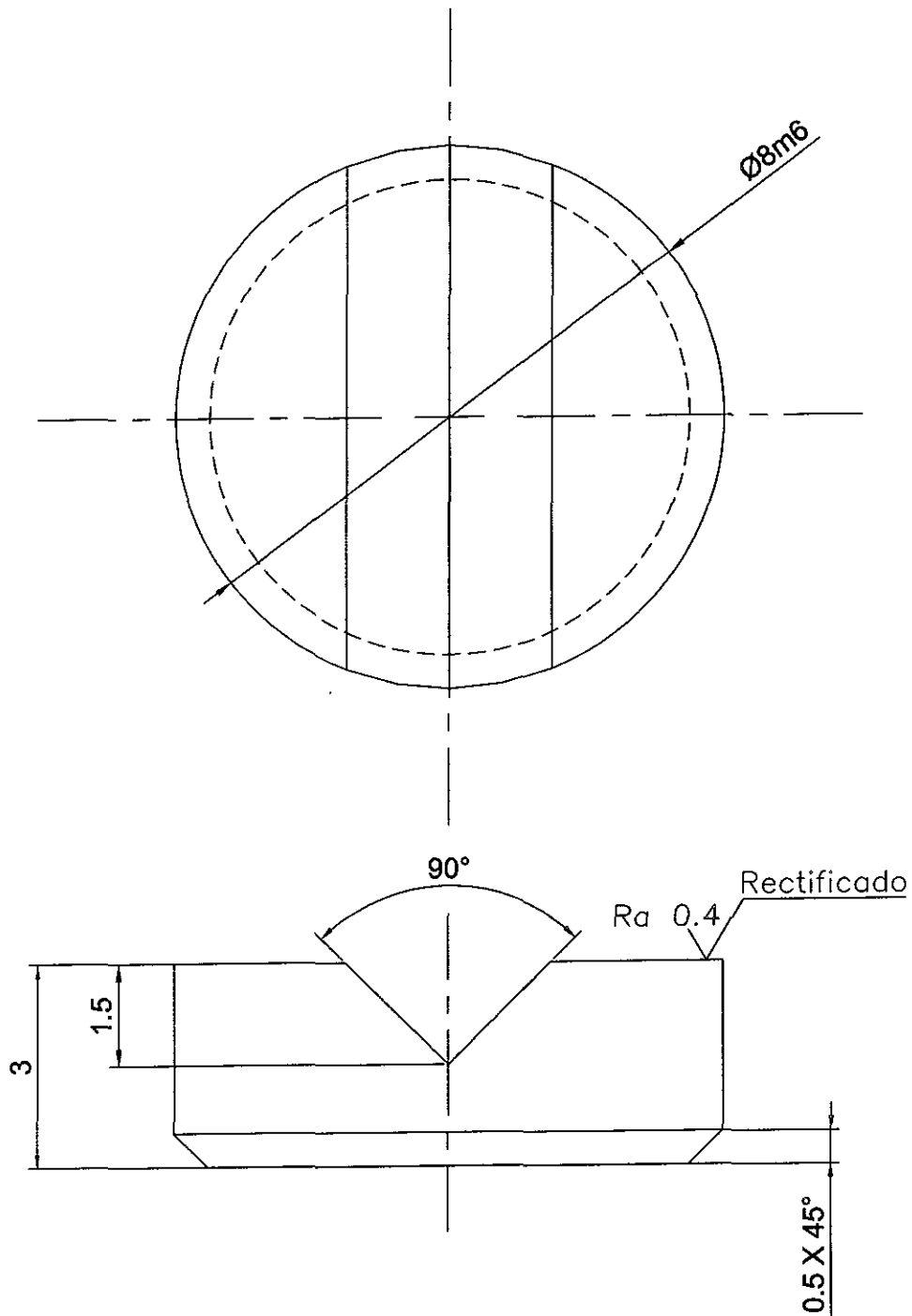


SECCIÓN A-A

	Material: Aluminio 6061-T6			Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: fixed_support.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1	
Placa Fija			Conjunto: Montura C		
			IIM - UNAM	Ref: C-9	Hoja 1/1

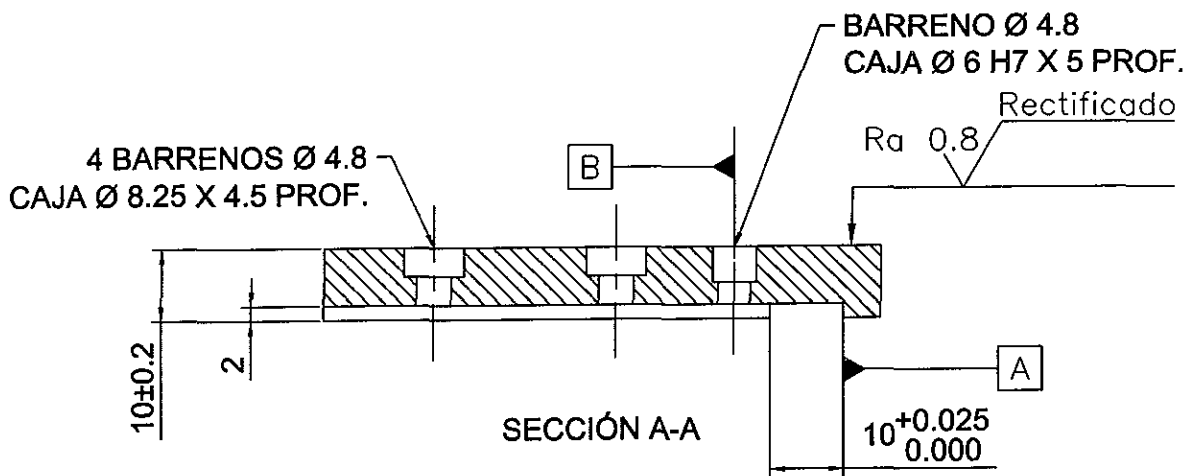
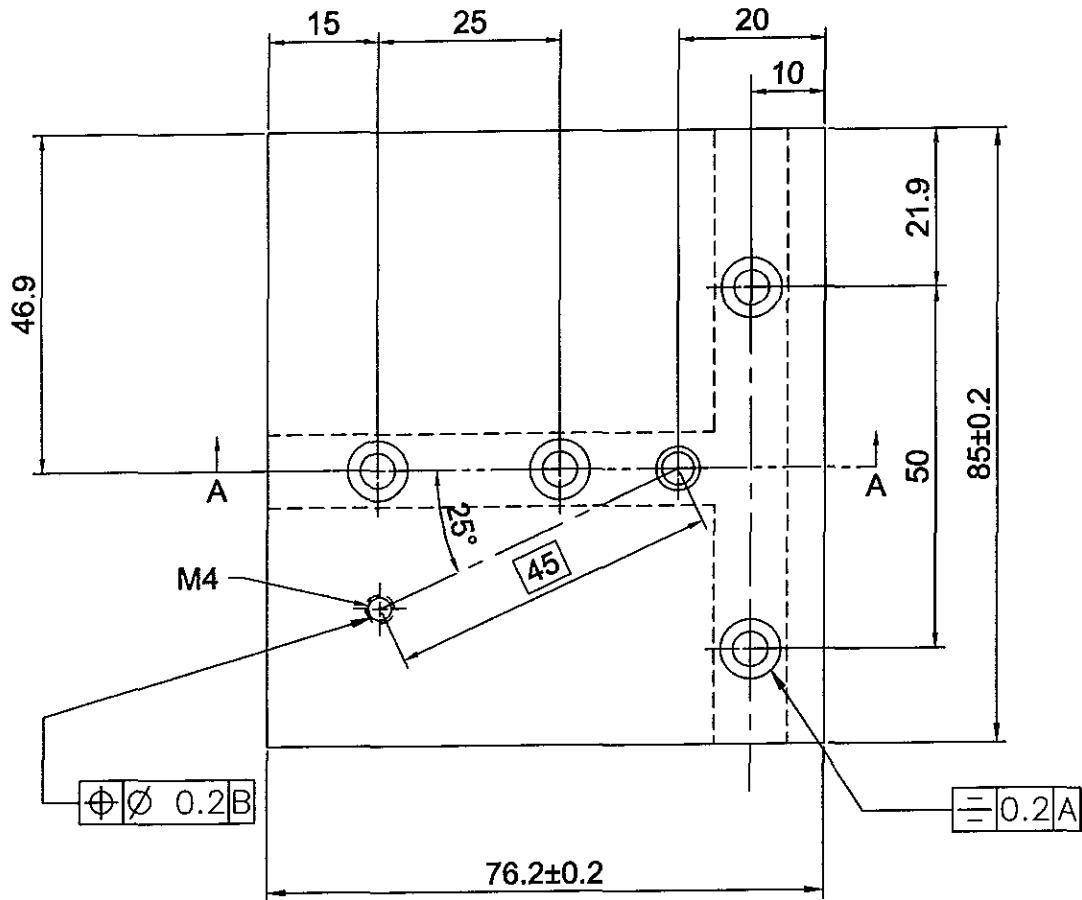


		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: flying_support.dwg		Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000
				Escala: 1:1	
Placa Flotante			Conjunto: Montura C		
			IIM - UNAM		Ref: C-10



NOTA: ELIMINAR LA RANURA V
PARA EL INSERTO PLANO

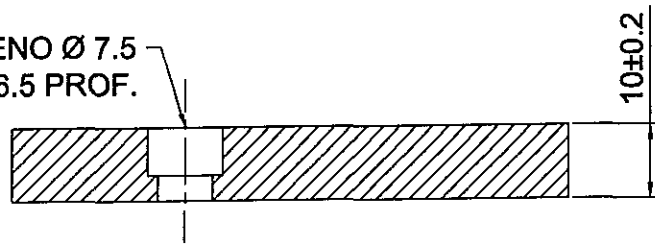
		Material: Acero Inox. AISI 416	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: inserto_2pl.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 10:1
Insertos Plano y en V		Conjunto: Montura C, J			
		IIM - UNAM		Ref: C-11	Hoja 1/1



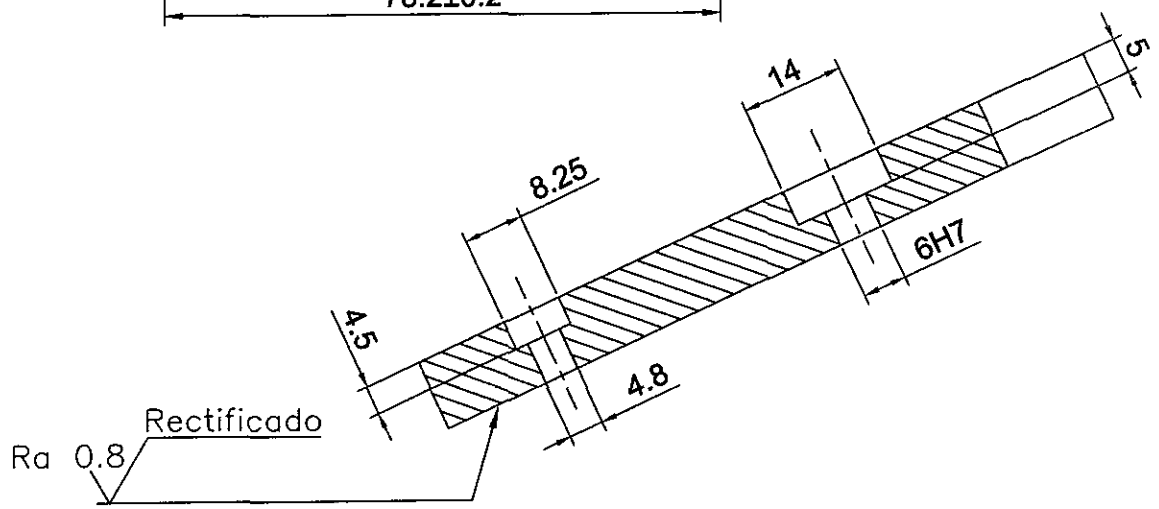
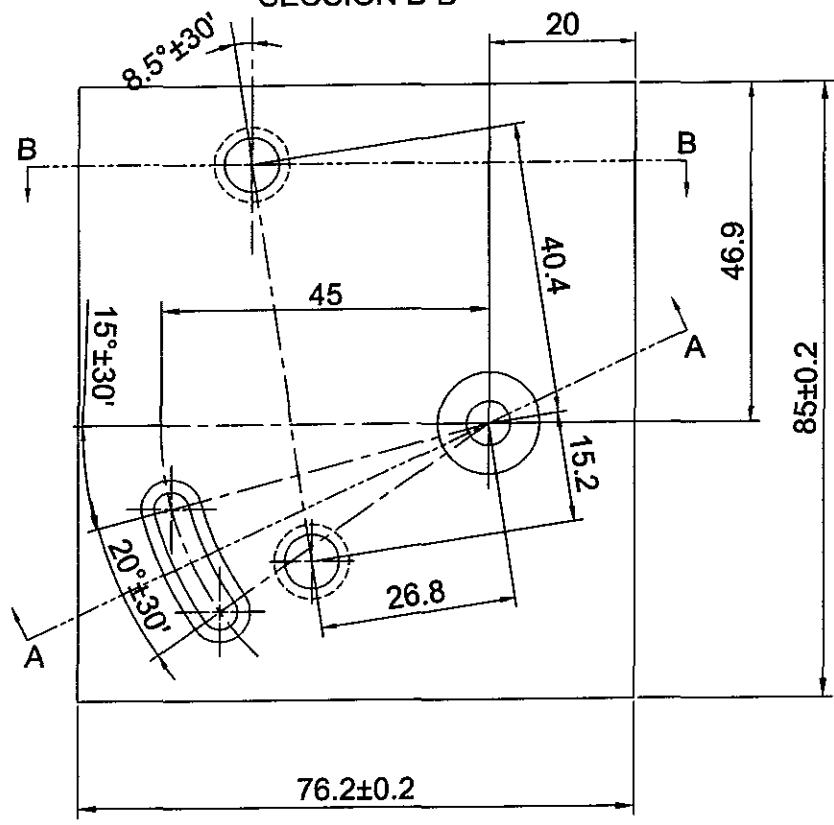
NOTA: LA MISMA TOLERANCIA DE SIMETRÍA SE APLICA PARA LOS BARRENOS DE AMBAS RANURAS

		Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: D_top.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Superior			Conjunto: Montura D		
			IIM - UNAM	Ref: C-12	Hoja 1/1

BARRENO Ø 7.5
CAJA Ø 10.3 X 6.5 PROF.

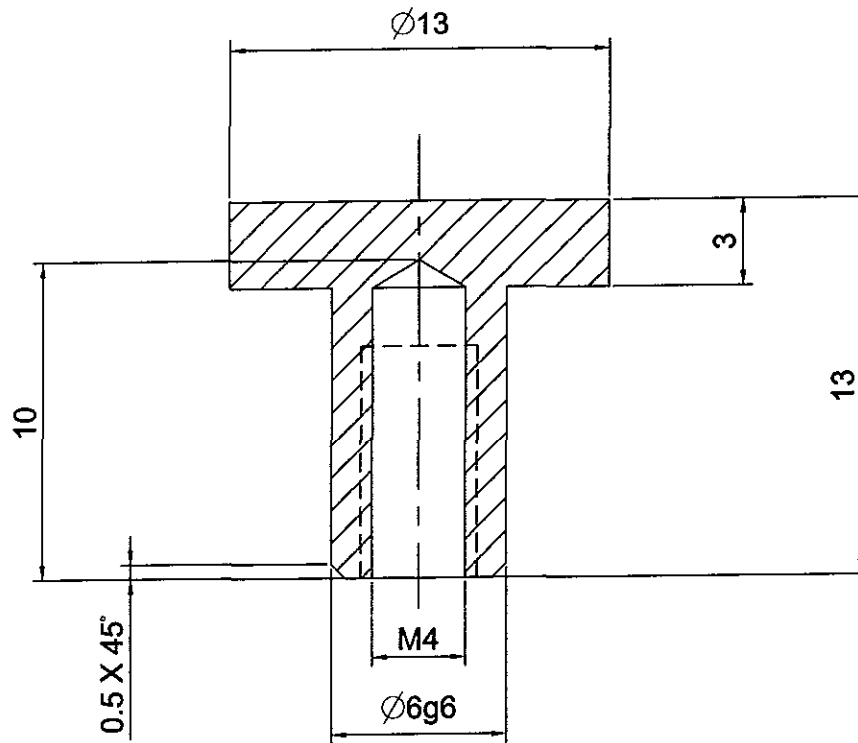


SECCIÓN B-B

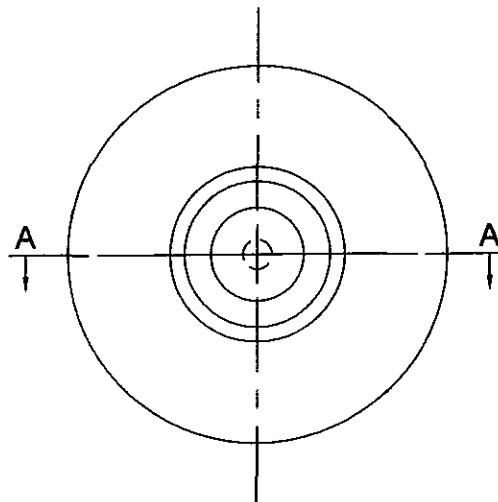


SECCIÓN A-A

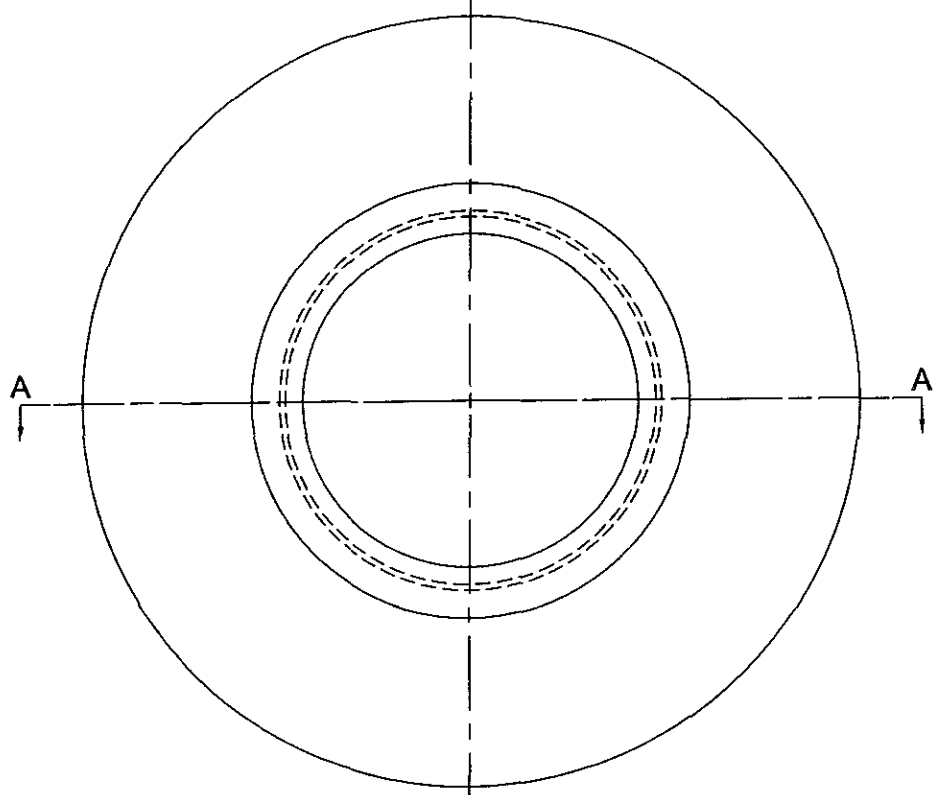
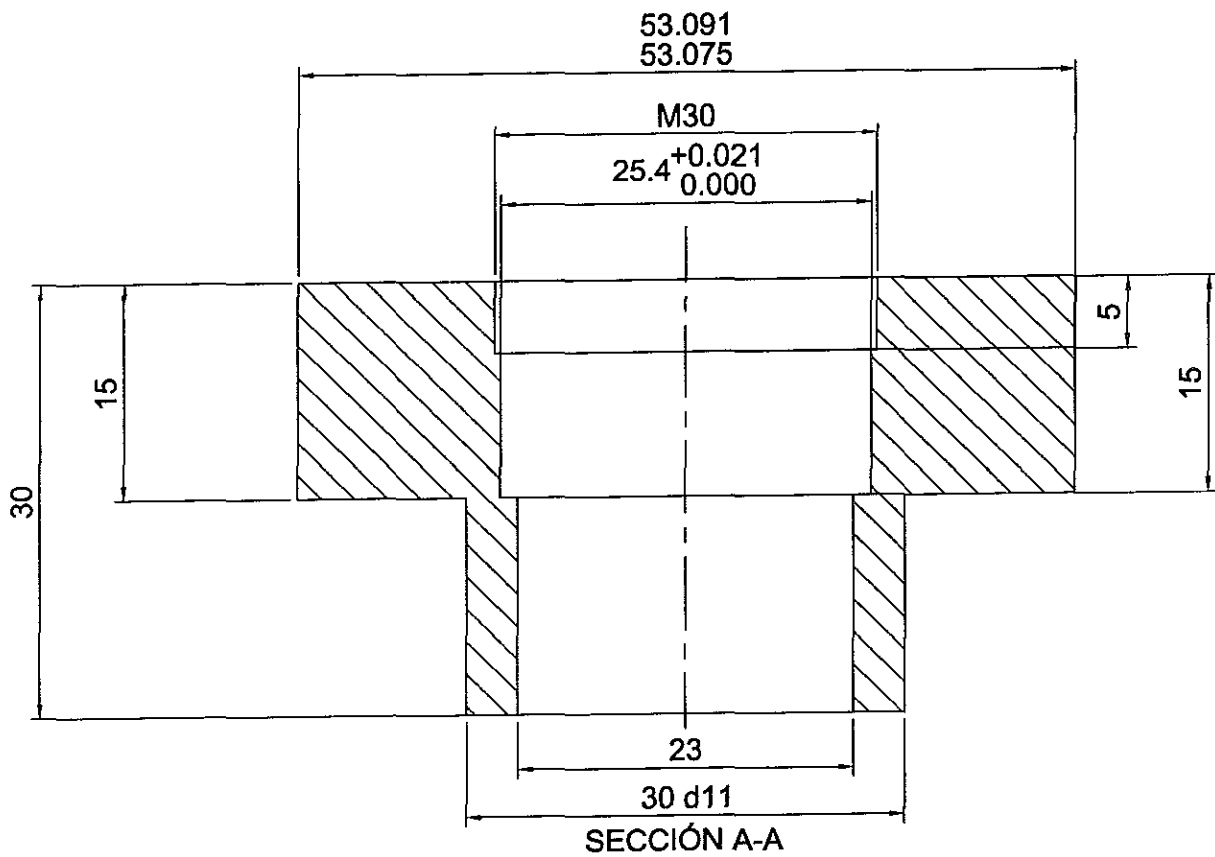
		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: D_desliz.dwg		Tolerancias: ±0.1	Fecha: 01/05/2000
Placa Deslizante			Conjunto: Montura D		
			IIM - UNAM		Ref: C-13
					Escala: 1:1
					Hoja 1/1



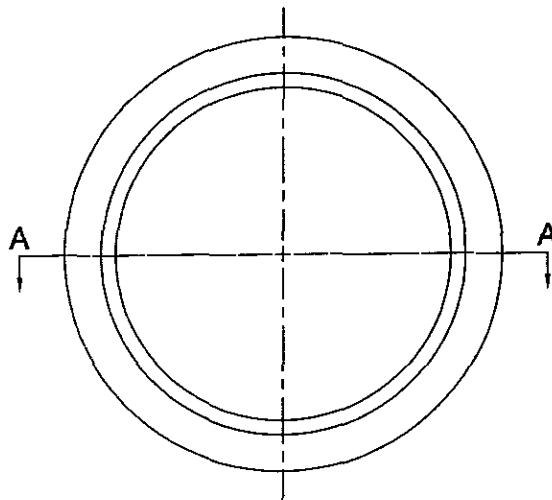
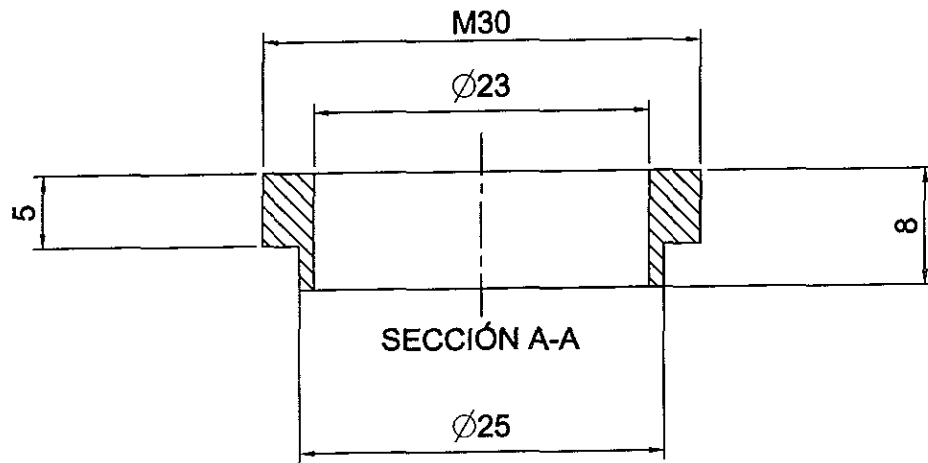
SECCIÓN A-A



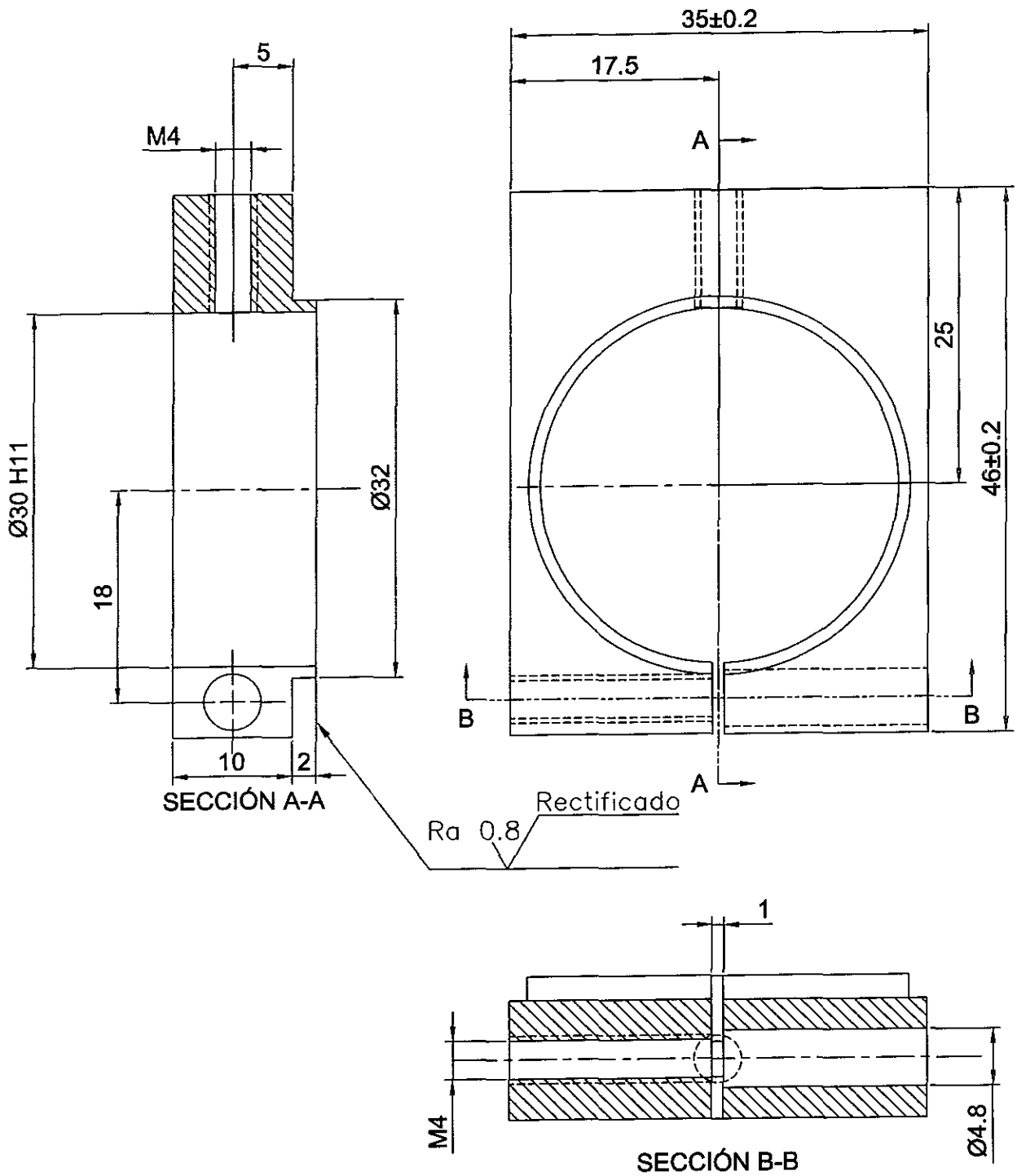
		Material: Acero Inox. AISI 416	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: Pivote.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 4:1
Pivote			Conjunto: Montura D		
			IIM - UNAM		Ref: C-14



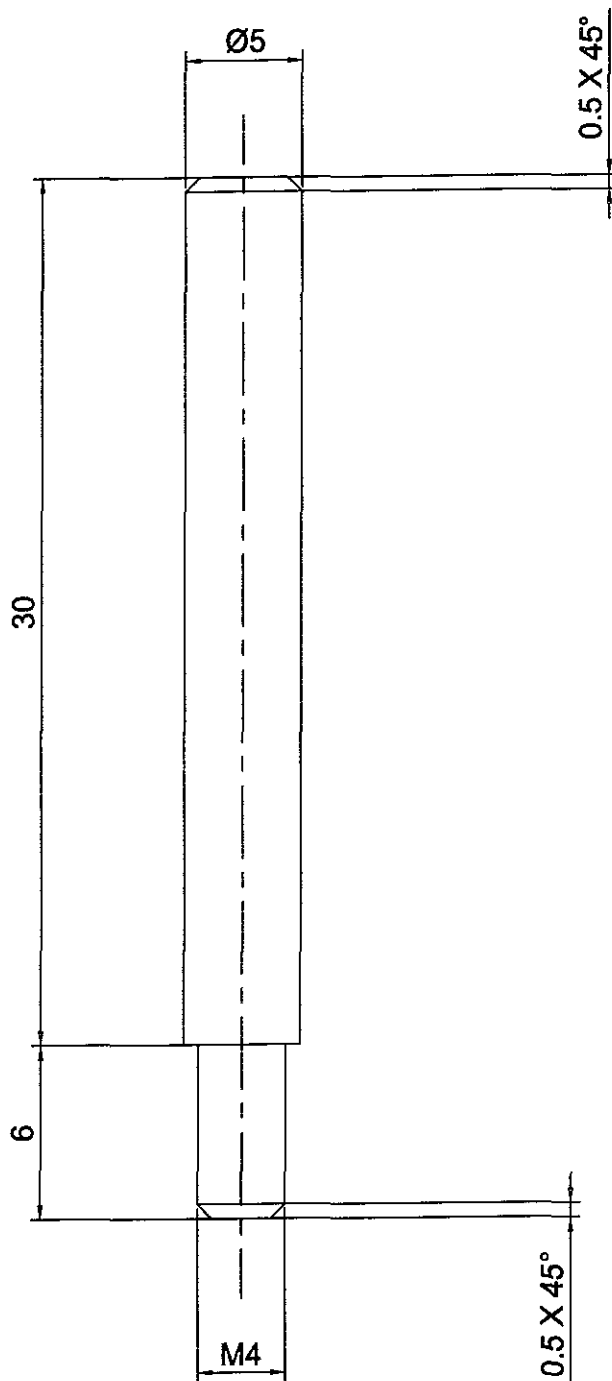
		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: receptaculo.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 2:1
Receptáculo			Conjunto: Sujetador de filtro		
			IIM - UNAM		Ref: C-15



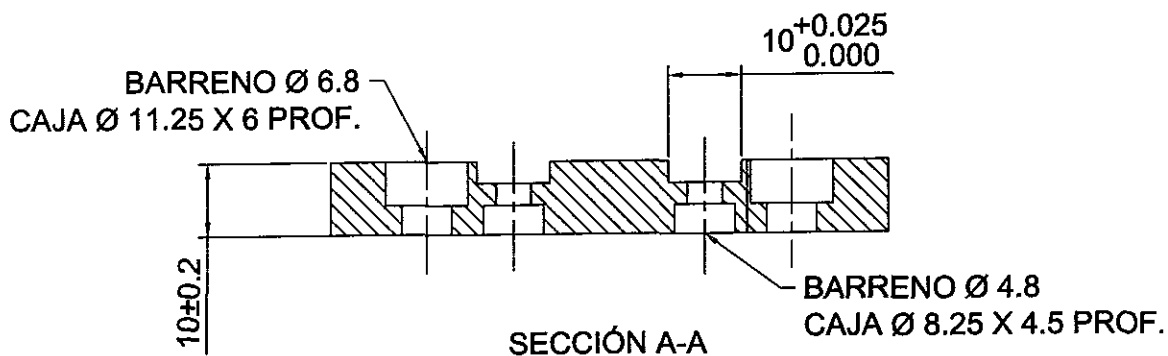
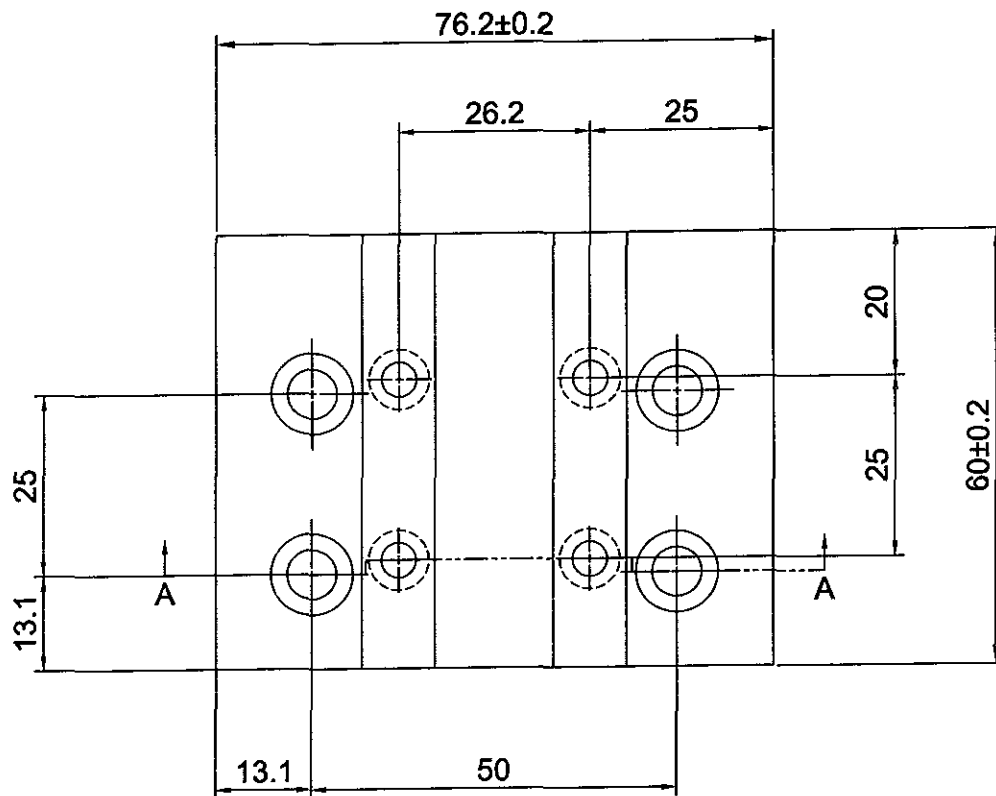
		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: anillo.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 2:1
Anillo			Conjunto: Sujetador de filtro		
			IIM - UNAM		Ref: C-16



	Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: c_clamp.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 2:1
Abrazadera	Conjunto: Sujetador de filtro			
	IIM - UNAM	Ref: C-17	Hoja 1/1	

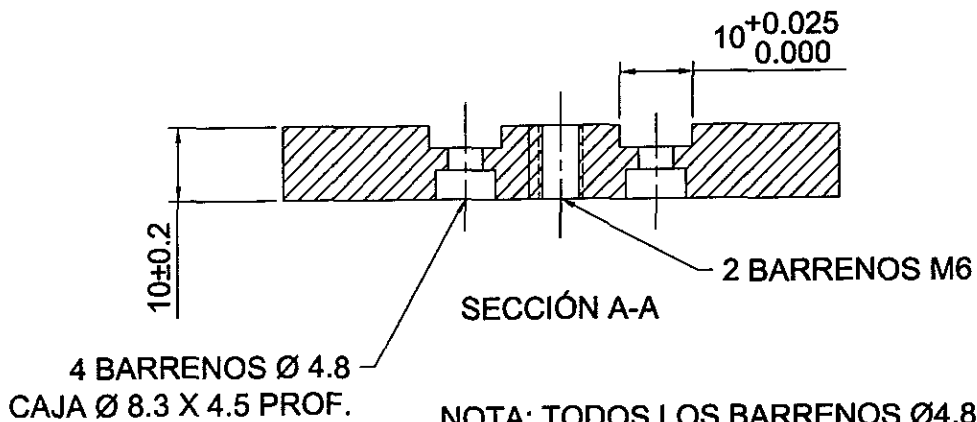
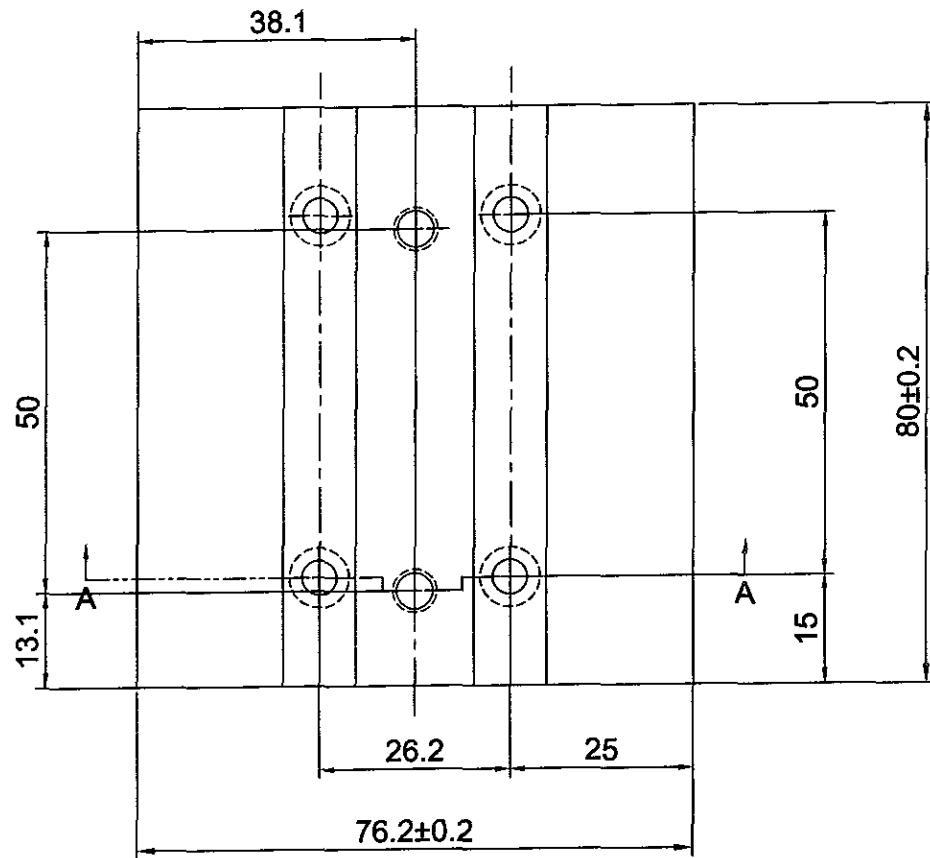


		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: levier.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 4:1
Palanca			Conjunto: Sujetador de filtro		
			IIM - UNAM		Ref: C-18



NOTA: TODOS LOS BARRENOS $\varnothing 4.8$
TIENEN UNA TOLERANCIA DE SIMETRÍA
DE 0.2 CON RESPECTO A LAS RANURAS

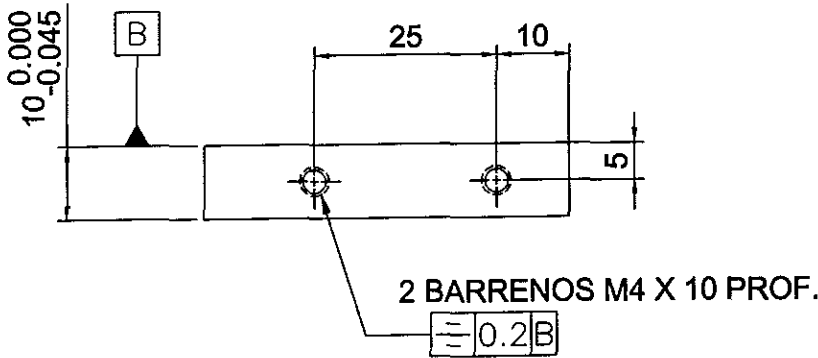
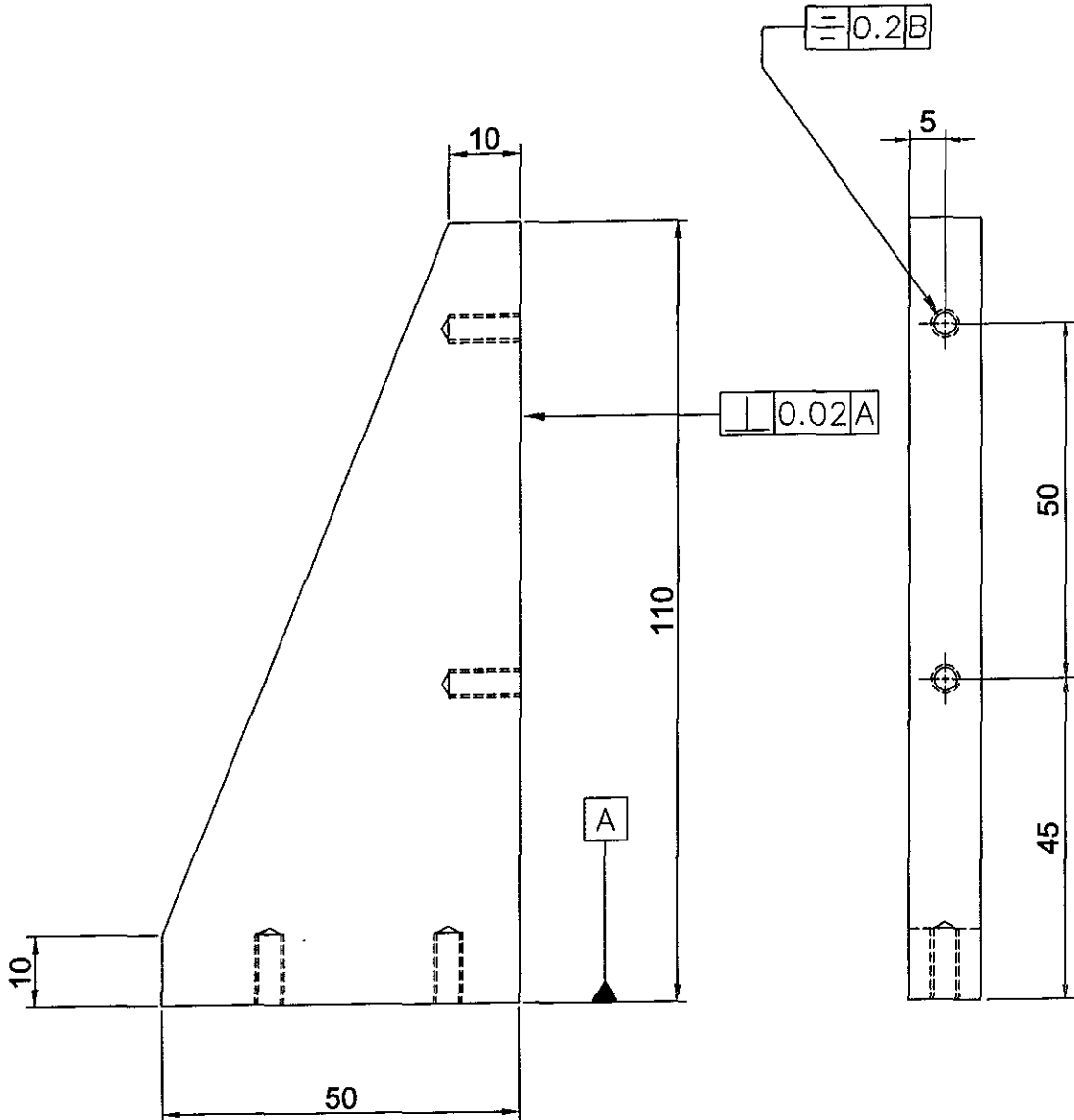
		Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: G_base.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Horizontal			Conjunto: Montura G		
			IIM - UNAM	Ref: C-19	Hoja 1/1



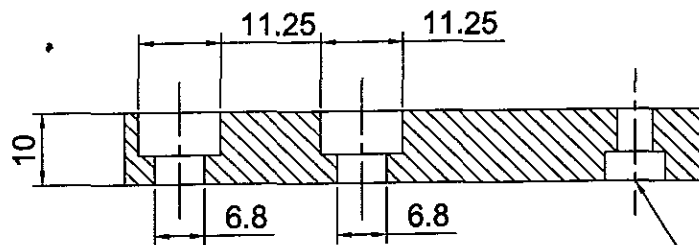
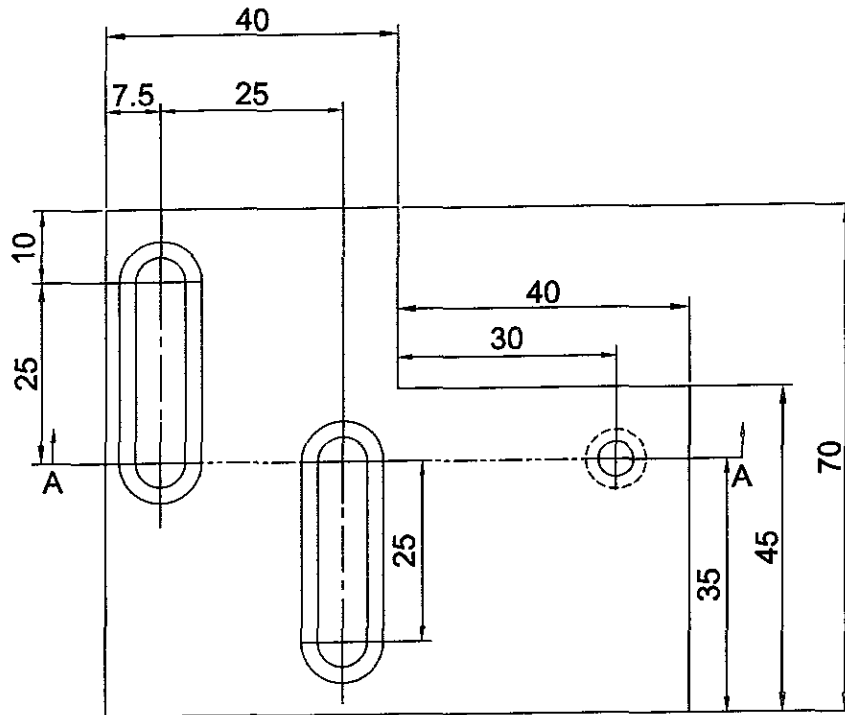
NOTA: TODOS LOS BARRENOS Ø4.8
TIENEN UNA TOLERANCIA DE SIMETRÍA
DE 0.2 CON RESPECTO A LAS RANURAS

		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: G_vertical.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Vertical			Conjunto: Montura G		
			IIM - UNAM	Ref: C-20	Hoja 1/1

2 BARRENOS M4 X 10 PROF.



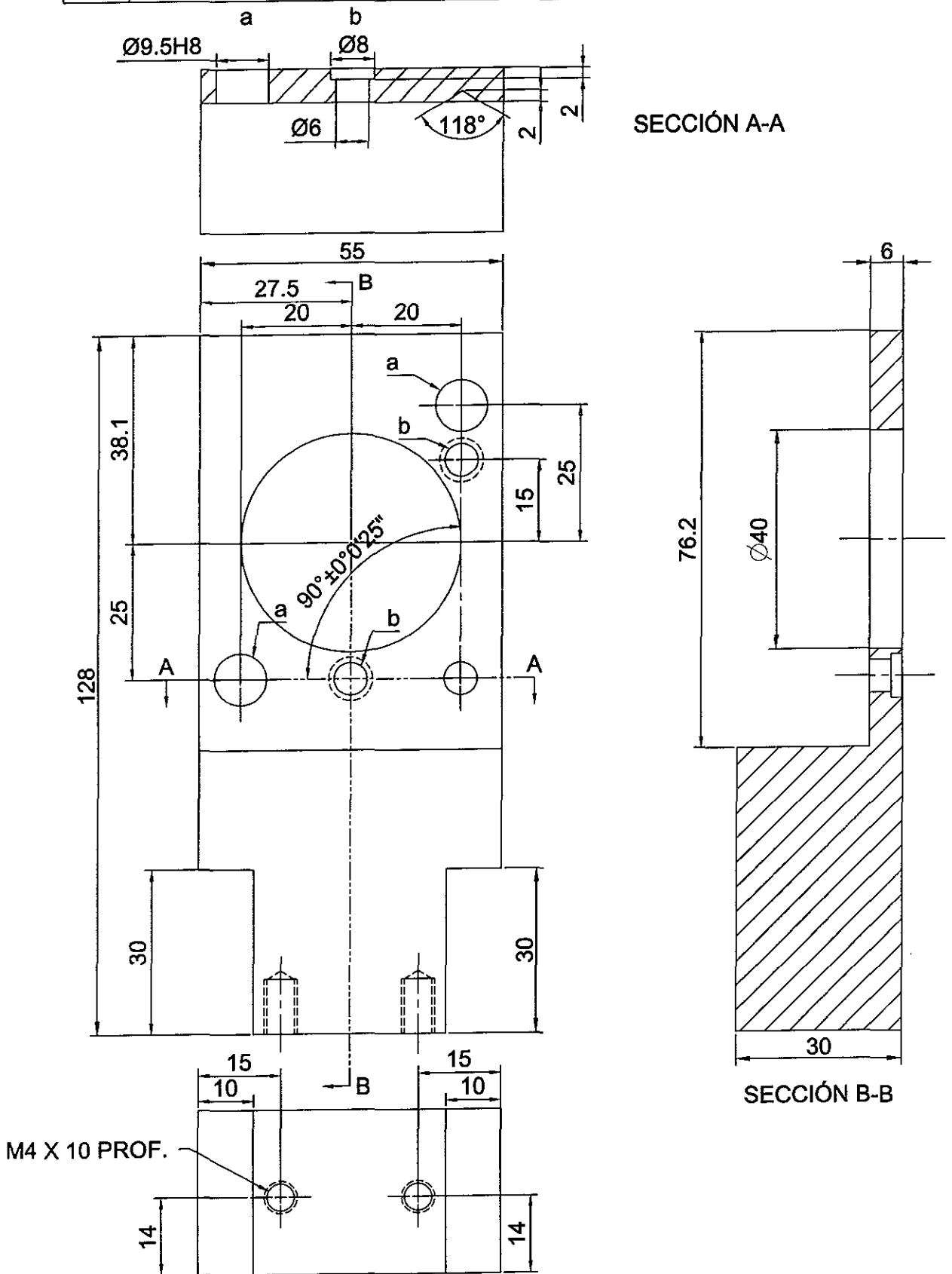
		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: escuadra.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Escuadra			Conjunto: Montura G		
			IIM - UNAM	Ref: C-21	Hoja 1/1



SECCIÓN A-A

BARRENO Ø 4.8
CAJA Ø 8.25 X 4.5 PROF.

		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: Brida_larga.dwg		Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000
				Escala: 1:1	
Brida Larga			Conjunto: Montura G		
			IIM - UNAM		Ref: C-22

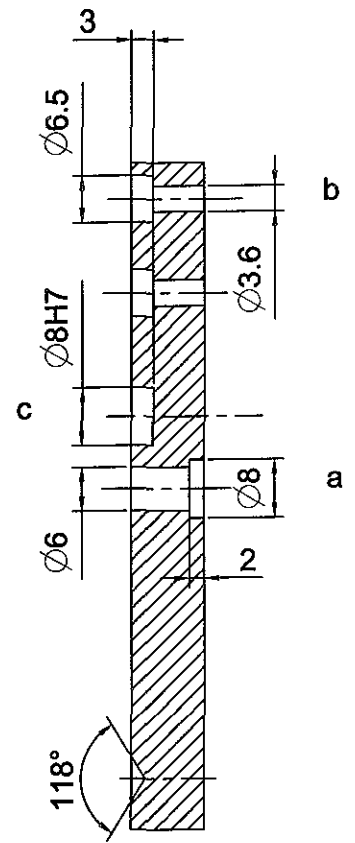
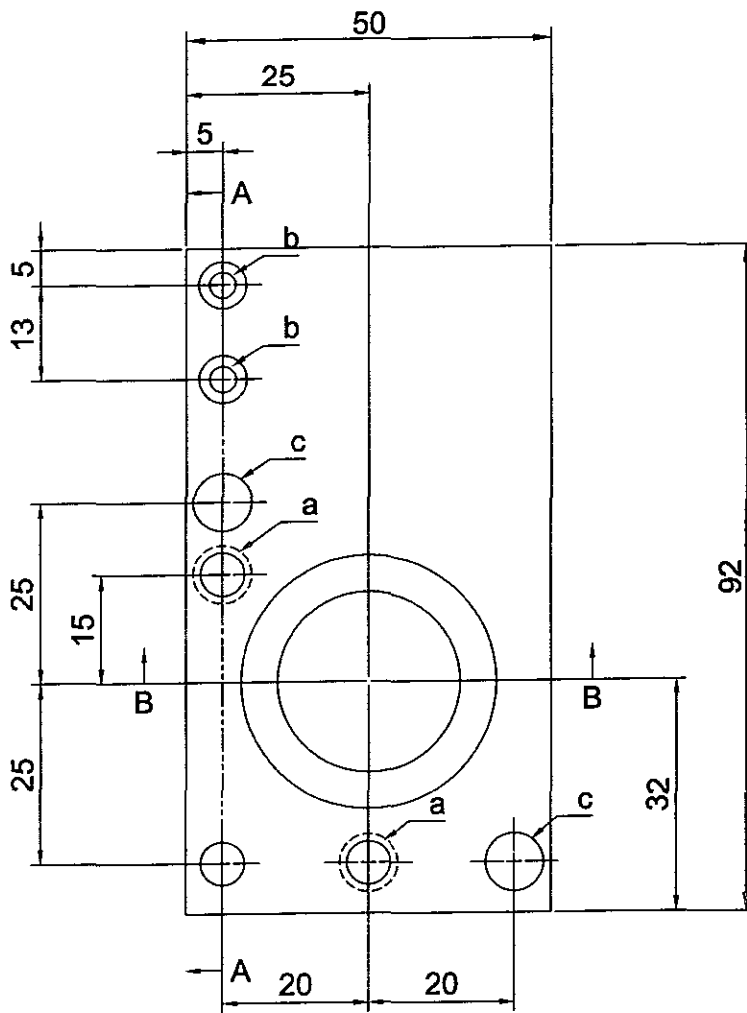


SECCIÓN A-A

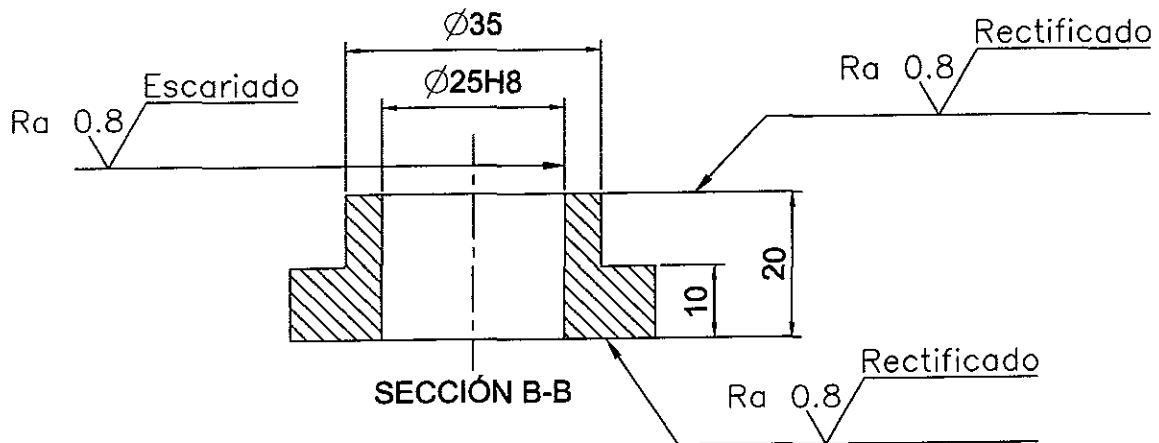
SECCIÓN B-B

M4 X 10 PROF.

Material: Aluminio 6061-T6			Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: fixed_support.dwg	Tolerancias ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1	
Soporte Fijo			Conjunto: Montura J		
			IIM - UNAM	Ref: C-23	Hoja 1/1

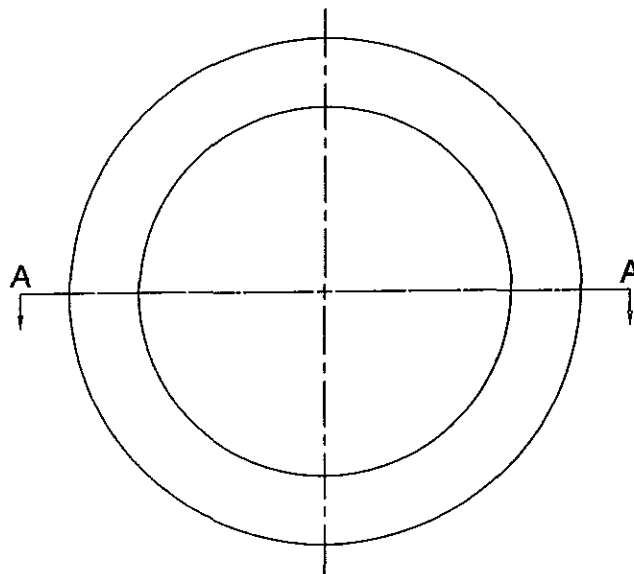
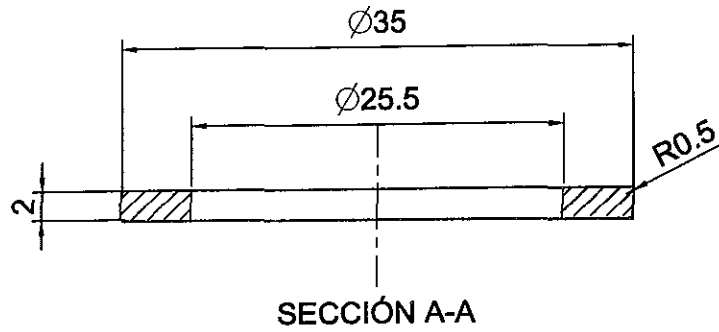


SECCIÓN A-A

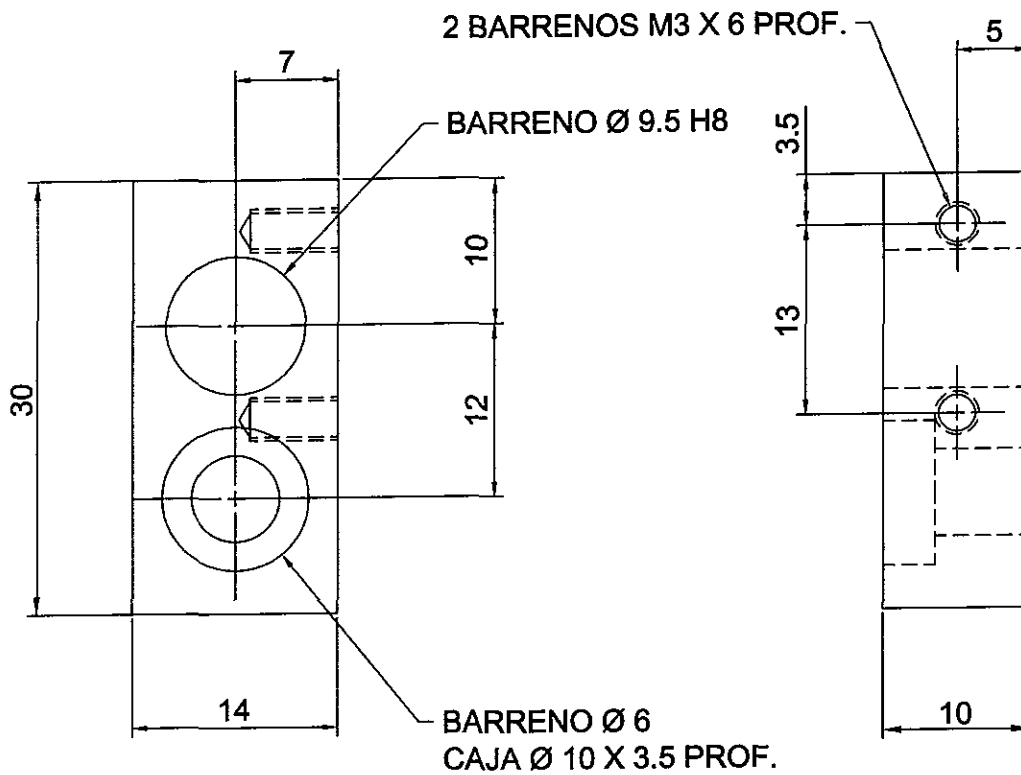


SECCIÓN B-B

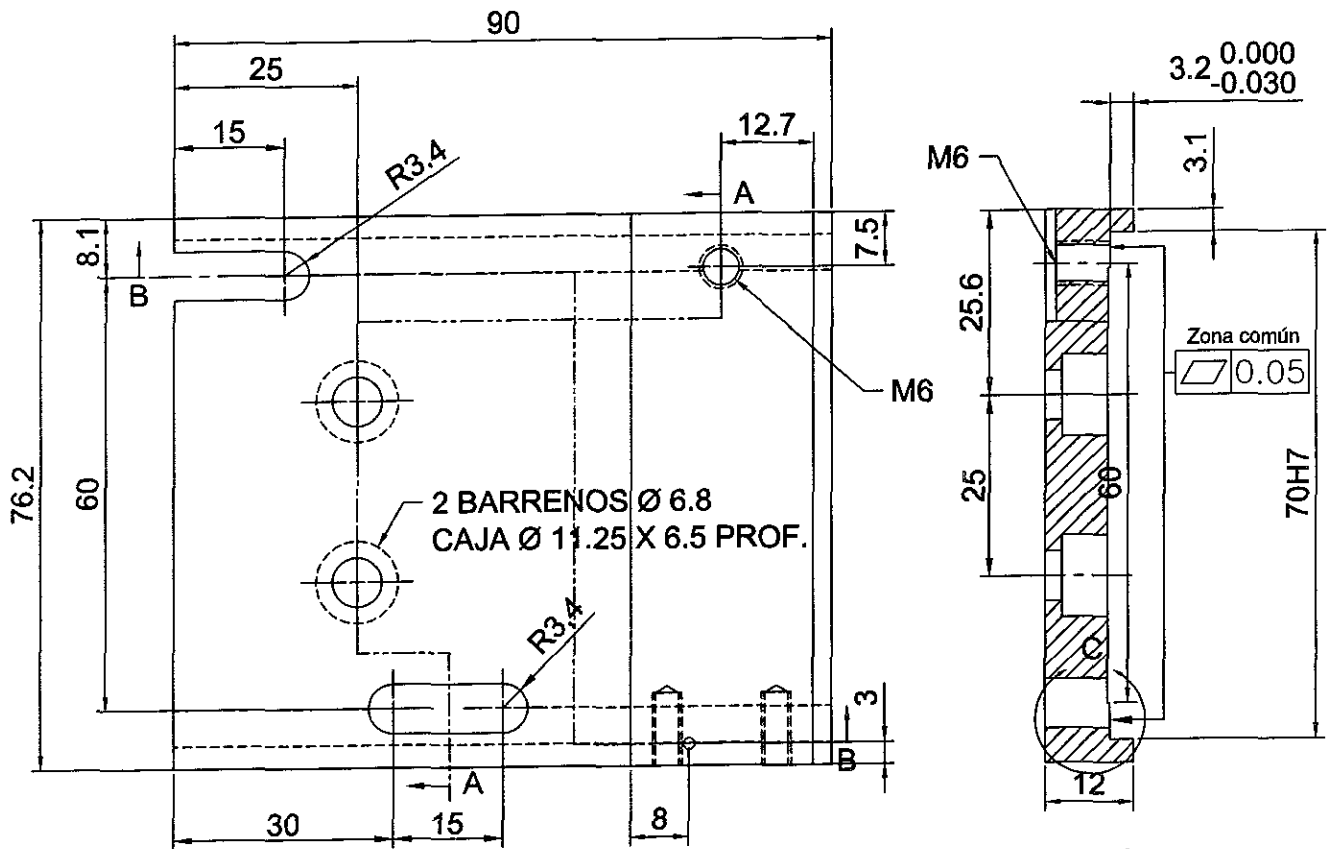
Material: Aluminio 6061-T6			Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: flying_support.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1	
Soporte Flotante			Conjunto: Montura J		
			IIM - UNAM	Ref: C-24	Hoja 1/1



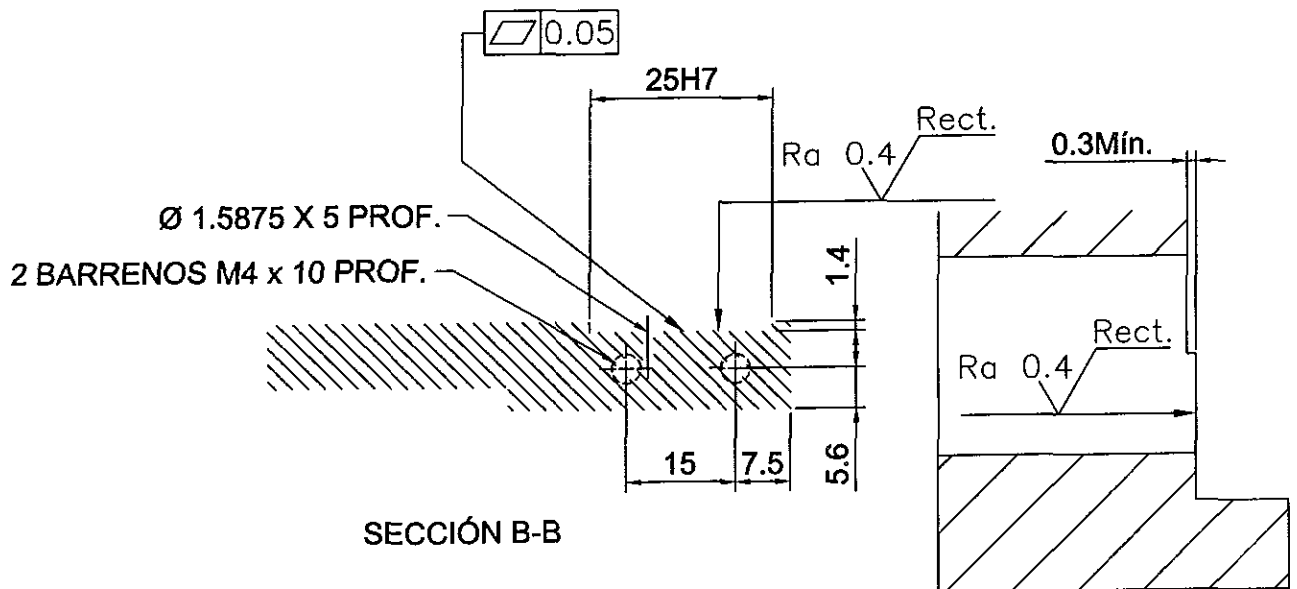
		Material: Bronce fosforado	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: Bronze_ring.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Cojinete			Conjunto: Montura J		
			IIM - UNAM		Ref: C-25



		Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: soporte_micro.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1	
Soporte para Micrómetro		Conjunto: Montura J			
		IIM - UNAM	Ref: C-26	Hoja 1/1	



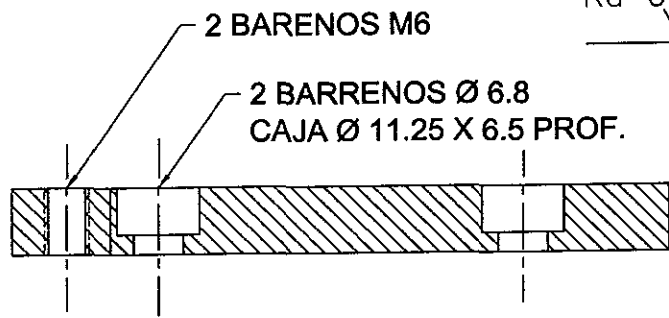
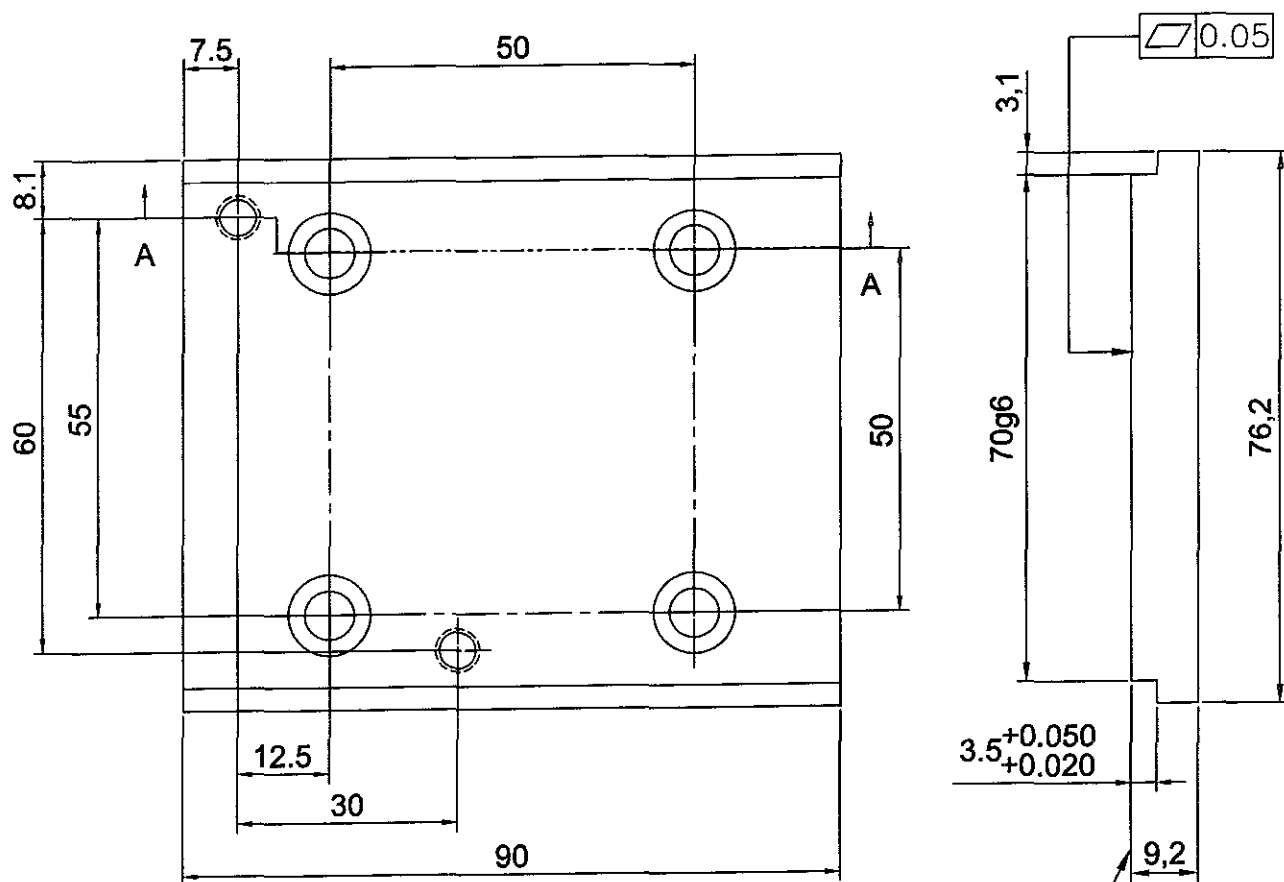
SECCIÓN A-A



SECCIÓN B-B

VISTA C

Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: patin_x.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Placa Superior		Conjunto: Montura J, base móvil		
		IIM - UNAM	Ref: C-27	Hoja 1/1

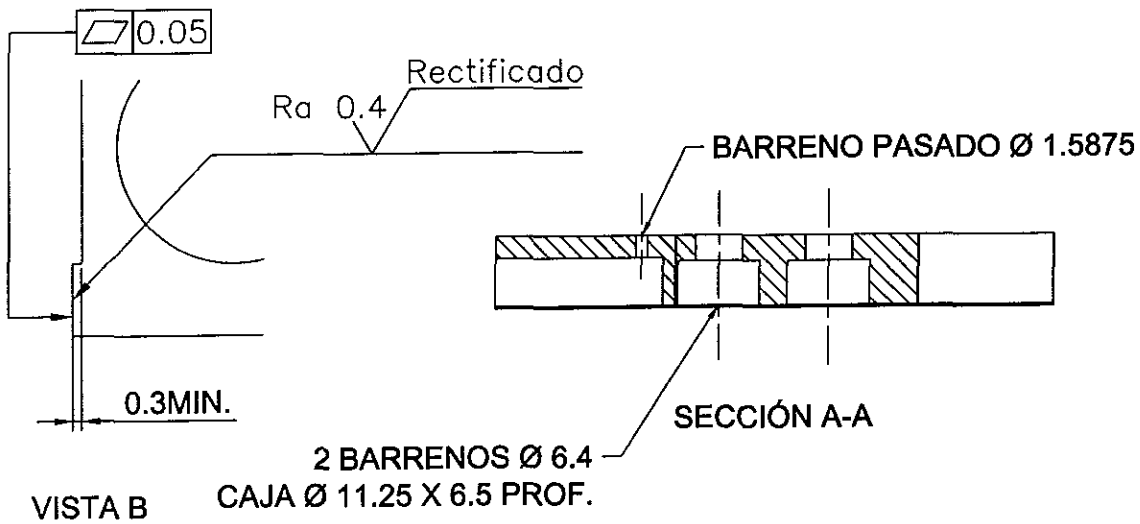
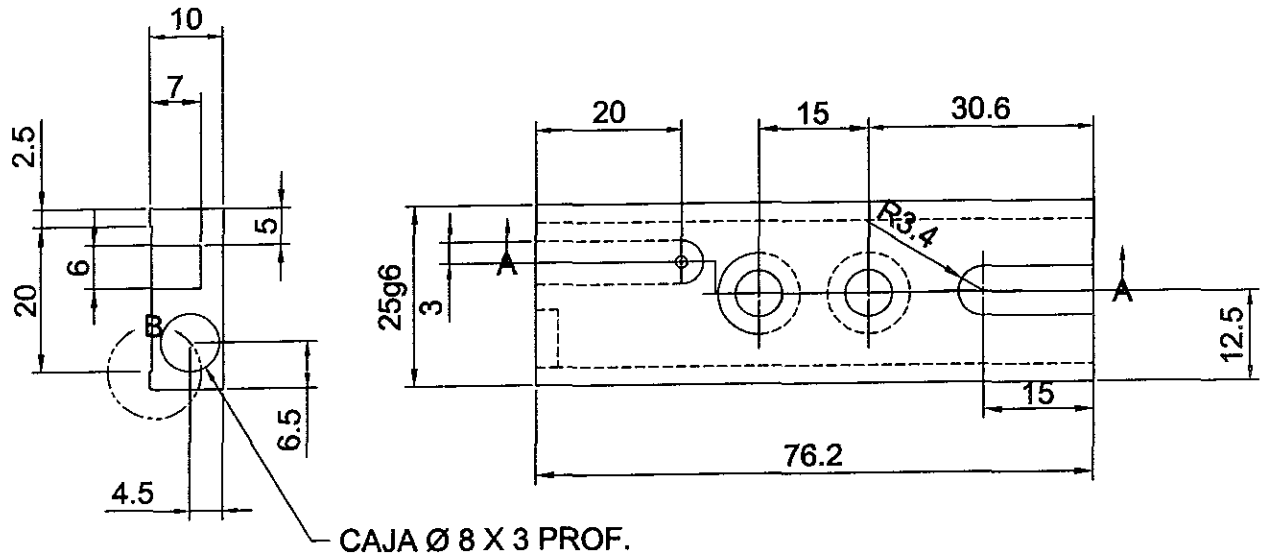


SECCIÓN A-A

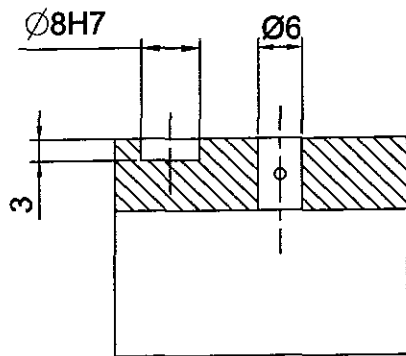
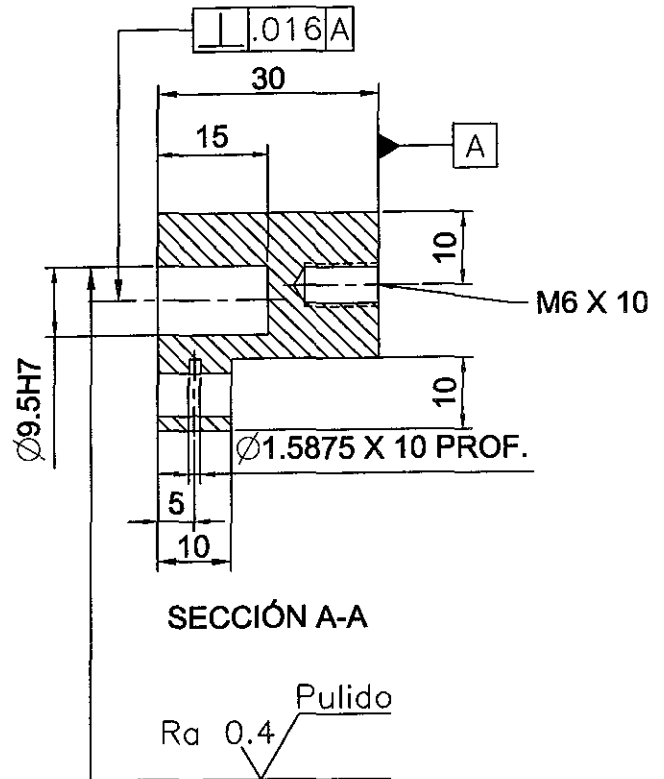
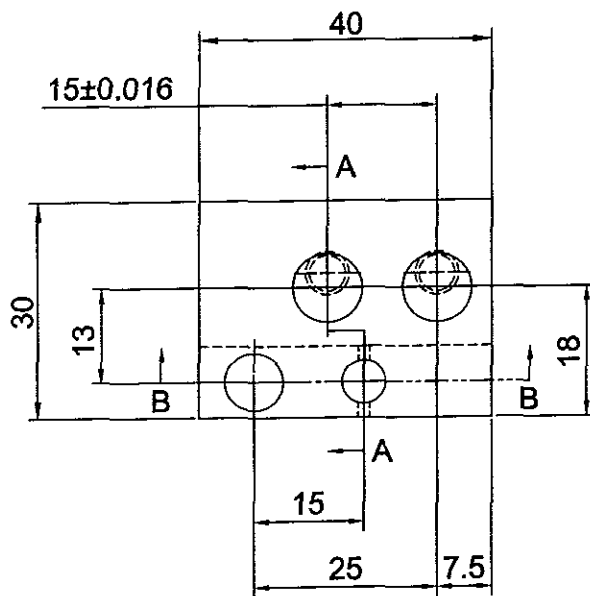
2 BARENOS M6
 2 BARRENOS Ø 6.8
 CAJA Ø 11.25 X 6.5 PROF.

Ra 0.4 Rectificado

		Material: Aluminio 6061-T6		Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: base_fija.dwg		Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000
Placa Inferior		Conjunto: Montura J, base móvil			
		IIM - UNAM		Ref: C-28	Hoja 1/1

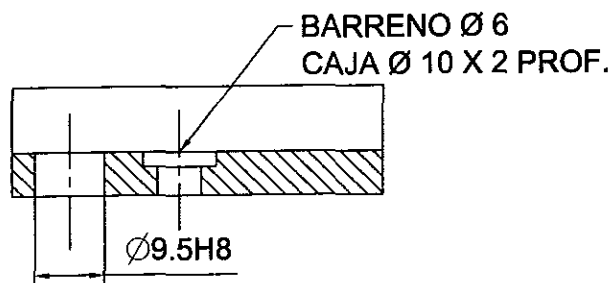
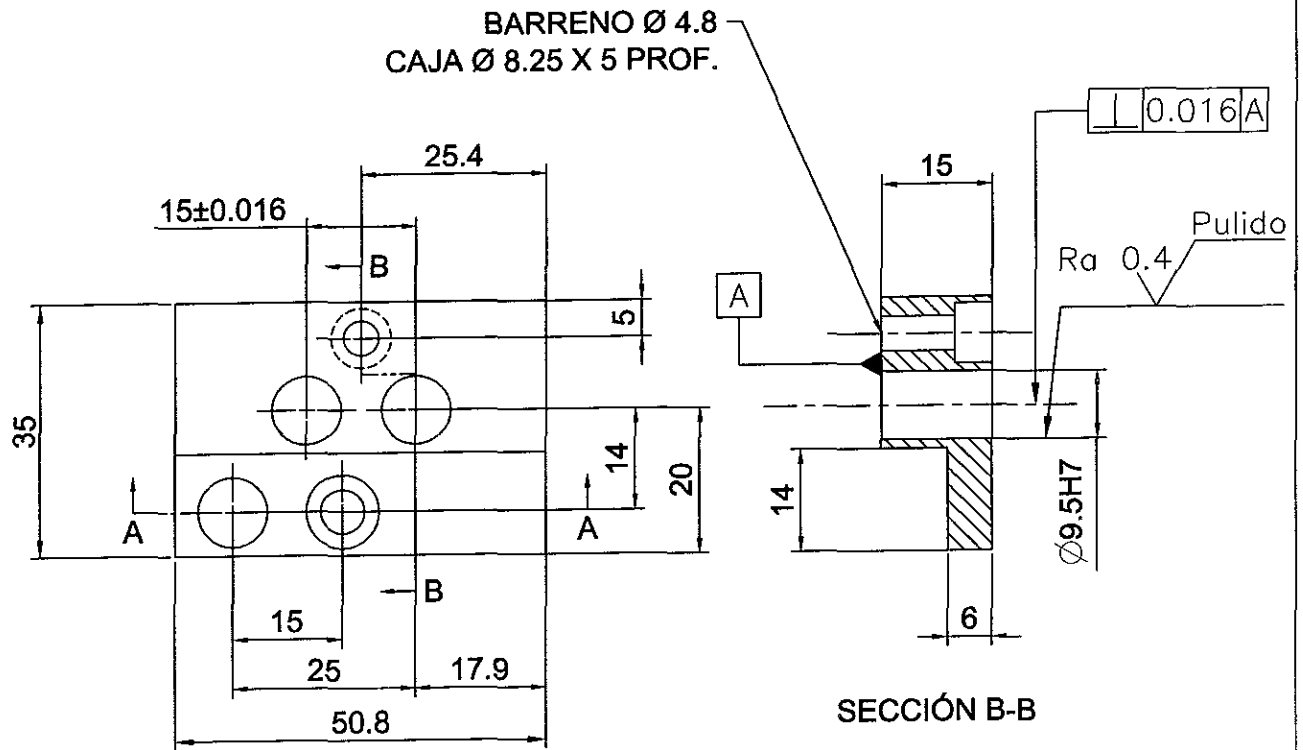


		Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez		Archivo: patin_y.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1
Solera			Conjunto: Montura J, base móvil		
			IIM - UNAM		Ref: C-29

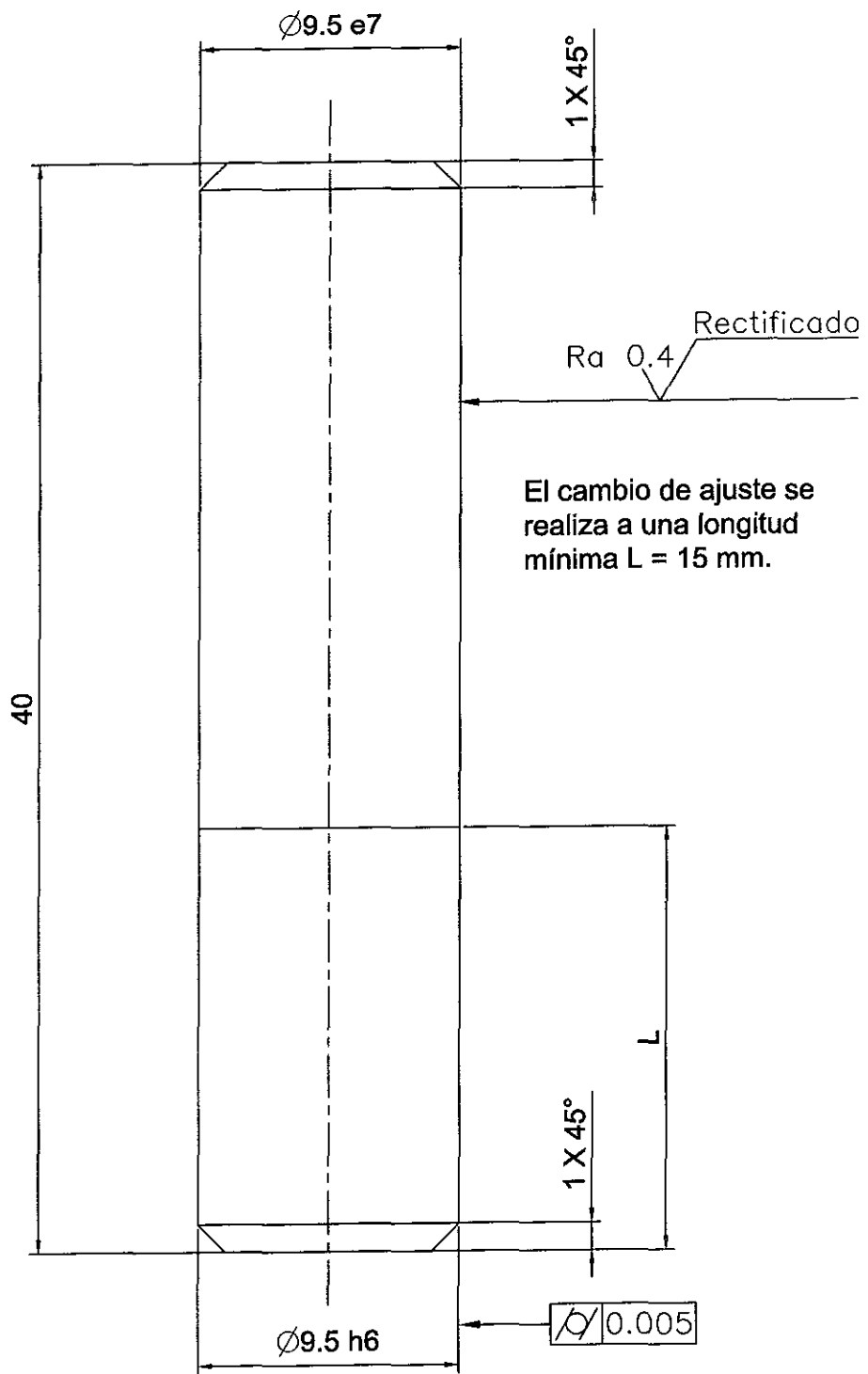


SECCIÓN B-B

		Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: base_elev.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1	
Apoyo		Conjunto: Montura J, elevador			
		IIM - UNAM	Ref: C-30	Hoja 1/1	



		Material: Aluminio 6061-T6	Dimensiones: mm		
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: elevador.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1	
Plataforma		Conjunto: Montura J, elevador			
		IIM - UNAM	Ref: C-31	Hoja 1/1	



	Material: AISI 416			Dimensiones: mm	
Dibujó: J. P. Jiménez	Archivo: Poste.dwg	Tolerancias: ± 0.1	Fecha: 01/05/2000	Escala: 1:1	
Poste			Conjunto: Montura J, elevador		
			IIM - UNAM		Ref: C-32

Anexo D

D.1. Elementos de óptica de luz polarizada

D.1.1. El modelo ondulatorio

La luz se representa como una onda electromagnética compuesta por dos campos oscilatorios, uno eléctrico y uno magnético, con igual frecuencia pero orientados perpendicularmente entre sí y transversales a la dirección de propagación.

Así, la amplitud del vector de campo eléctrico de un rayo de luz que se propaga en la dirección z de un marco de referencia cartesiano está dada por

$$\mathbf{E}(z,t) = \mathbf{E}_{0,x} \sin(\omega t - kz + \phi_0), \quad (\text{D.1})$$

donde ω es la frecuencia angular, k es el número de onda y ϕ_0 es el ángulo de fase. La relación entre la frecuencia ν del campo oscilatorio y su frecuencia angular es $\omega = 2\pi\nu$. El número de onda k está asociado a la longitud de onda λ por la relación: $k=2\pi/\lambda$. El campo magnético y el campo eléctrico que describen el haz oscilan en fase. La amplitud del vector de campo magnético es entonces

$$\mathbf{H}(z,t) = \mathbf{H}_{0,y} \sin(\omega t - kz + \phi_0). \quad (\text{D.2})$$

D.1.2. Luz linealmente polarizada

Se denomina luz linealmente polarizada aquella caracterizada por un campo eléctrico de magnitud variable en el tiempo que está siempre orientado en una misma dirección, y un campo magnético orientado en la dirección perpendicular a la del campo eléctrico. Al situar una onda de luz polarizada dentro de un sistema de referencia cartesiano, es posible descomponer tanto el campo eléctrico como el magnético en dos componentes ortogonales asociados a las direcciones del sistema de referencia. Por ejemplo, para luz linealmente polarizada que se propaga en la dirección z del sistema de referencia, el campo eléctrico \mathbf{E} puede representarse como la suma de los componentes ortogonales \mathbf{E}_x y \mathbf{E}_y correspondientes respectivamente a un haz de luz linealmente polarizada en el eje x , y otro haz de luz linealmente polarizada en el eje y :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y = (E_{0,x}\mathbf{i} + E_{0,y}\mathbf{j})\sin(\omega t - kz + \phi_0). \quad (\text{D.3})$$

De esta forma, luz linealmente polarizada cuyo eje de polarización está orientado en cualquier dirección dentro del plano xy puede considerarse como compuesta por dos oscilaciones transversales. La magnitud relativa de estos dos componentes determina la orientación del eje de polarización del haz con respecto a los ejes x y y . Es importante recordar que los dos componentes tienen la misma frecuencia, la misma longitud de onda, y se encuentran en fase.

D.1.3. Luz circularmente polarizada y elípticamente polarizada

La luz de polarización lineal tiene componentes x y y cuyas magnitudes pueden diferir, pero se encuentran en fase. Si consideramos ahora otro caso en el que las magnitudes de los dos componentes del campo eléctrico son idénticas, pero existe una diferencia de fase de 90° entre ambos componentes, el vector de campo eléctrico de la luz tiene magnitud constante pero su dirección cambia a través del tiempo, de tal manera que el extremo del vector, visto desde el eje z , describe una trayectoria circular. Esta trayectoria generada por el vector de campo eléctrico se denomina *patrón de sección*. La onda de luz circularmente polarizada vista en un instante de tiempo se observa como una curva helicoidal.

Cuando los componentes del campo eléctrico de un haz de luz tienen magnitudes diferentes, y se encuentran fuera de fase, se trata de un haz de polarización elíptica. Este tipo de polarización es una generalización de las polarizaciones lineales y circulares. El campo eléctrico de la luz polarizada elípticamente puede representarse por medio del vector \mathbf{E} cuya expresión es

$$\mathbf{E} = E_{0,x}\sin(\omega t - kz)\mathbf{i} + E_{0,y}\sin(\omega t - kz + \delta)\mathbf{j}, \quad (\text{D.4})$$

donde δ es la fase del componente lineal orientado en la dirección y relativa al componente en la dirección x .

D.1.4. Representación gráfica de la polarización.

Una representación muy útil en el análisis de las características de la polarización de la luz es simplemente el patrón de sección, es decir, la trayectoria trazada por el extremo del vector de campo eléctrico a través del tiempo, vista desde la dirección de propagación. Así, la luz polarizada linealmente se representa por un segmento de línea cuya dirección es la misma que el eje de polarización de la luz. La luz polarizada circularmente se representa por un cír-

culo en el que se indica el sentido en que gira el vector, y en general la luz polarizada elípticamente se representa por una elipse cuyos parámetros son: el acimut, o ángulo entre el eje mayor de la elipse y la horizontal; la elipticidad, o la relación entre el semieje mayor y el semieje menor; y el sentido, que se define como trigonométrico para la polarización izquierda, y antitrigonométrico para la polarización derecha. Ver Figura D.1.

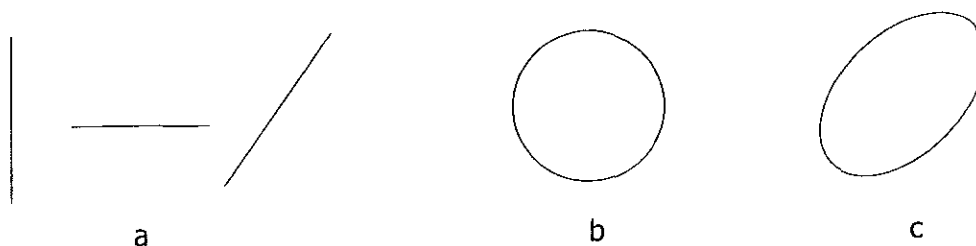


Figura D.1. Representación gráfica de (a) luz linealmente polarizada, (b) circularmente polarizada, (c) elípticamente polarizada, que corresponde al patrón de sección.

D.1.5. Elementos para el control de la polarización

Polarizadores lineales

Los polarizadores lineales transmiten la luz cuyo campo eléctrico oscila en un plano específico que contiene al eje de propagación, por lo que se les llama también polarizadores planos. La orientación de este plano alrededor del eje de propagación puede variarse girando el polarizador alrededor del eje del haz. Si la luz incidente tiene un campo eléctrico que posee un componente perpendicular a la dirección de transmisión del polarizador, este componente será absorbido, reflejado o deflectado, según el tipo de polarizador. De esta forma, si se colocan en serie dos polarizadores ideales cuyos ejes de transmisión son perpendiculares (cruzados), la luz incidente se extingue por completo. En realidad, dos polarizadores en esta configuración no logran extinguir por completo la luz incidente y transmiten una fracción de la intensidad incidente. El cociente entre la intensidad I_{\perp} transmitida cuando los ejes de los polarizadores son perpendiculares, y la intensidad I_{\parallel} transmitida cuando son paralelos, define el *coeficiente de extinción* de dichos polarizadores.

Es importante mencionar que los polarizadores no son homogéneos a través del eje de propagación. Por lo general, la luz se despolariza al pasar por la cara de salida del polarizador. Por esto, para cada cara del polarizador se puede calcular un coeficiente de extinción, y la cara que presenta el mejor coeficiente se denomina *cara principal*.

Existen diferentes tipos de polarizadores, algunos de los cuales se describen a continuación.

Polarizadores dicroicos. Los polarizadores dicroicos funcionan con base en el fenómeno de dicroísmo lineal. Un material dicroico absorbe la luz que se encuentra polarizada en una dirección particular, y transmite la luz polarizada en la dirección perpendicular:

Polarizadores birrefringentes. Los polarizadores birrefringentes, como los llamados polarizadores prismáticos, se basan en la doble refracción, fenómeno observado en algunos materiales cristalinos y debido a la birrefringencia del material. La diferencia en los índices de refracción produce reflexión total interna que defleca los rayos polarizados en una dirección, mientras que los otros son transmitidos. Estos polarizadores proporcionan altos coeficientes de extinción, que alcanzan valores del orden de 10^{-6} . Sin embargo, los polarizadores prismáticos presentan una resolución espacial muy limitada, ya que la reflexión total interna funciona para un intervalo pequeño de ángulos. De esta forma, una parte de los rayos incidentes fuera del cono de aceptación del prisma y que tienen la polarización deseada es reflejada, y una proporción de los rayos con la polarización no deseada es transmitida. Esta es una condición importante para el diseño de las monturas ópticas que soportan polarizadores.

D.2. El cálculo de Mueller

En los párrafos anteriores se mencionaron las descripciones de la luz polarizada a través de las ecuaciones de onda y de la representación gráfica. Existen además otras herramientas de cálculo que permiten estudiar el efecto de los elementos ópticos tales como polarizadores y retardadores. Los métodos de Jones y de Mueller son métodos matriciales [1D, 2D], en los que la luz se representa por un vector (el vector de Jones o el vector de Stokes respectivamente) y el elemento óptico por una matriz. La multiplicación del vector por la matriz da como resultado otro vector que representa el estado de polarización de la luz después de haber atravesado el elemento óptico. En particular, el cálculo de Jones sólo sirve para luz totalmente polarizada, mientras que el de Mueller puede utilizarse también para luz parcialmente polarizada. Por otra parte, el cálculo de Mueller está expresado en términos de intensidades, que son directamente observables en el laboratorio, mientras que el cálculo de Jones está expresado en términos de la amplitud y la fase del campo eléctrico.

D.2.1. El vector de Stokes

En el cálculo de Mueller, el vector de Stokes se compone de cuatro elementos. Estos parámetros son números reales pues corresponden a intensidades luminosas.

Una notación común para vector de Stokes es

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (\text{D.5})$$

donde:

I = intensidad total

$Q = I_0 - I_{90}$ = diferencia de intensidades entre los componentes de polarización lineal horizontal y vertical

$U = I_{+45} - I_{-45}$ = diferencia de intensidades entre los componentes de polarización lineal orientados a $+45^\circ$ y -45°

$V = I_{rcp} - I_{lcp}$ = diferencia de intensidades entre los componentes de polarización circular derecha e izquierda¹

Por ejemplo, se puede demostrar que para luz totalmente polarizada que se propaga a lo largo del eje z , como la descrita por la ecuación 9, los parámetros de Stokes son [2D, p. 34]

$$\begin{aligned} I &= E_{0,x}^2 + E_{0,y}^2 \\ Q &= E_{0,x}^2 - E_{0,y}^2 \\ U &= 2E_{0,x}E_{0,y}\cos\delta \\ V &= 2E_{0,x}E_{0,y}\sin\delta \end{aligned}, \quad (\text{D.6})$$

donde δ es la fase del componente lineal orientado en la dirección y relativa al componente en la dirección x y su valor se encuentra en el intervalo $-180^\circ < \delta \leq 180^\circ$.

La luz parcialmente polarizada puede describirse como un vector de campo eléctrico que en cualquier instante presenta un estado de polarización bien definido pero que fluctúa aleatoriamente entre diferentes formas de polarización en una escala de tiempo pequeña comparada con la frecuencia de la luz. Entonces, en un periodo de tiempo relativamente corto, todas las formas de polarización son promediadas, y la luz se muestra como no polari-

1. Los subíndices *rcp* y *lcp* significan *right circularly polarized* y *left circularly polarized* respectivamente.

zada. Esto se representa en el vector de Stokes tomando un promedio a través del tiempo de los elementos que conforman al vector [2D, p.34].

Para luz no polarizada los términos dependientes de la polarización Q , U y V desaparecen, mientras que para luz parcialmente polarizada se cumple que $0 < (Q^2 + U^2 + V^2) < I$. Esta última relación puede entenderse si se considera la luz parcialmente polarizada como compuesta por dos haces, uno totalmente polarizado y el otro no polarizado. La magnitud de la contribución de cada uno de estos rayos determina el grado de polarización del haz total.

Para luz completamente polarizada los parámetros de Stokes definen una esfera de radio igual a la intensidad total, ya que $Q^2 + U^2 + V^2 = I$. Un punto sobre la esfera tiene como coordenadas (Q, U, V) y corresponde a un estado particular de polarización. Esta es la base para un método de estudio de la polarización denominado *Esfera de Poincaré* [1D, p. 92].

Ejemplos del vector de Stokes

El procedimiento para encontrar los parámetros del vector de Stokes consiste en representar el vector de campo eléctrico como una suma de polarizaciones ortogonales apropiada. Por ejemplo, el parámetro $Q = I_0 - I_{90}$ se obtiene usando la descomposición $\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$, pues los componentes ortogonales elevados al cuadrado permiten calcular la diferencia para Q . De la misma manera, se puede describir el mismo vector en términos de sus componentes orientados a $+45^\circ$ y -45° y obtener el parámetro U . Finalmente, si se describe el vector a través de la suma de sus componentes de polarización circular derecha e izquierda, se puede calcular el último parámetro. El parámetro I es obviamente la intensidad total de la luz. Sin embargo, en general no es trivial encontrar los valores de las amplitudes y fases de cada componente ortogonal que sumados dan el vector total. Existe para ello el método analítico descrito a continuación que permite obtener un par de vectores ortogonales que equivalen al vector inicial.

Polarización lineal horizontal o vertical. La luz de polarización horizontal o vertical puede descomponerse en vectores $+45^\circ$ y -45° de igual amplitud, o en componentes circulares derecho e izquierdo también de igual amplitud, por lo que los parámetros U y V se cancelan. Para la luz horizontal, la intensidad del componente vertical es cero, y viceversa para la luz vertical. La intensidad total es igual a la intensidad del componente horizontal o vertical, según el caso. Los vectores normalizados de Stokes (es decir, considerando que la intensidad total es igual a la unidad) para luz de polarización lineal horizontal y vertical son: $\mathbf{S}_0 = \{1, 1, 0, 0\}$ y $\mathbf{S}_{90} = \{1, -1, 0, 0\}$.

Polarización lineal de orientación θ . Para obtener el vector de Stokes de la luz con una polarización lineal orientada a un ángulo cualquiera θ se toma en cuenta que cualquier polarización lineal puede representarse por medio de dos componentes de polarización circular, uno izquierdo y uno derecho, de igual amplitud. El ángulo de orientación de la polarización lineal depende sólo de la fase absoluta de los componentes circulares, pero esto no tiene ninguna influencia en los valores de las intensidades. De esta forma se obtiene que $V = 0$. Las intensidades de los componentes vertical y horizontal, así como de los componentes a $+45^\circ$ y -45° se obtienen proyectando el vector sobre esos ejes. Después de un desarrollo algebraico, se encuentra que el vector correspondiente de Stokes es: $\mathbf{S}_\theta = \{1, \cos 2\theta, \sin 2\theta, 0\}$.

Polarización circular. La luz de polarización circular puede descomponerse en dos vectores de misma amplitud, uno horizontal y el otro vertical, y con una fase relativa igual a 90° . La igualdad de amplitudes implica directamente que $Q = U = 0$. El vector de Stokes para este tipo de polarización es $\mathbf{S}_{rcp} = \{1, 0, 0, 1\}$ para polarización derecha y $\mathbf{S}_{lcp} = \{1, 0, 0, -1\}$.

Polarización elíptica. El vector de Stokes para la polarización elíptica está expresado en términos del acimut ψ , o inclinación de la elipse, y la elipticidad χ (parámetros definidos en la Sección D.1.4.): $S = \{1, \cos 2\chi \cos 2\psi, \cos 2\chi \sin 2\psi, \sin 2\chi\}$.

Luz parcialmente polarizada. El vector de Stokes para luz parcialmente polarizada es simplemente el que tiene por componentes los definidos en la ecuación D.7. Ahora bien, es posible expresarlo como la suma de dos vectores, el primero correspondiente a un componente totalmente polarizado, y el segundo asociado a un componente no polarizado descrito por un vector de Stokes $\{1, 0, 0, 0\}$. En esta notación se debe agregar un grado de polarización P . Este factor indica la fracción de la intensidad total que presenta una polarización definida a lo largo de un tiempo relativamente largo con respecto a la frecuencia de la luz. Esta suma de vectores se escribe:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\chi \cdot \cos 2\Psi \\ \cos 2\chi \cdot \sin 2\Psi \\ \sin 2\chi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-P \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (D.8)$$

D.2.2. Definición de la matriz de Mueller

Se considera que el vector final después de que la luz ha pasado a través de un elemento óptico está linealmente relacionado con el vector inicial. Es decir:

$$\begin{cases} I' = m_{11}I + m_{12}Q + m_{13}U + m_{14}V \\ I' = m_{21}I + m_{22}Q + m_{23}U + m_{24}V \\ I' = m_{31}I + m_{32}Q + m_{33}U + m_{34}V \\ I' = m_{41}I + m_{42}Q + m_{43}U + m_{44}V \end{cases}, \quad (\text{D.9})$$

donde I, Q, U, V son los elementos del vector de Stokes inicial e I', Q', U', V' son los elementos del vector asociado al rayo después de haber pasado por el elemento óptico. m_{ij} son coeficientes determinados por las propiedades ópticas del elemento óptico. La ecuación anterior puede escribirse en forma matricial: $\mathbf{S}' = \mathbf{M} \mathbf{S}$ en donde \mathbf{M} es la matriz de Mueller del elemento óptico, formada por los elementos m_{ij} .

Si la luz debe pasar por una serie de elementos ópticos, el cálculo de Mueller permite obtener el vector final multiplicando el vector de entrada por una matriz \mathbf{M}_T (matriz del tren de elementos):

$$\mathbf{M}_T = \prod_{i=1}^n \mathbf{M}_i \quad (\text{D.10})$$

donde \mathbf{M}_i es la matriz de Mueller del *iésimo* elemento del tren óptico.

D.2.3. Cálculo del elipsómetro de nulos

La matriz de Mueller para un polarizador con orientación acimutal α medido a partir del eje Ox es:

$$P(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{D.11})$$

Para un medio birrefringente, con retardo δ y orientación β con respecto al eje Ox la matriz de Mueller correspondiente es:

$$B(\beta, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\beta^2 + \cos \delta \sin 2\beta^2 & \cos 2\beta \sin 2\beta (1 - \cos \delta) & \sin 2\beta \sin 2\delta \\ 0 & \cos 2\beta \sin 2\beta (1 - \cos \delta) & \sin 2\beta^2 + \cos \delta \cos 2\beta^2 & -\cos 2\beta \sin \delta \\ 0 & -\sin 2\beta \sin 2\delta & \cos 2\beta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (D.12)$$

De acuerdo con la ecuación D.10, el arreglo óptico del elipsómetro de nulos se representa por una matriz igual al producto de las tres matrices correspondientes al analizador, al medio birrefringente y al polarizador. Entonces, el vector de Stokes \mathbf{S}^0 del haz de luz al salir del analizador es:

$$\mathbf{S}^0 = \mathbf{A}(\alpha_A) \mathbf{B}(\beta, \delta) \mathbf{P}(\alpha_P) \mathbf{S}^i \quad (D.13)$$

donde \mathbf{S}^i es el vector de Stokes del haz de luz proveniente de la fuente, que se considera linealmente polarizada. Así: $\mathbf{S}^i = \{E_y^2, -E_y^2, 0, 0\}$. Los valores de los ángulos α_A y α_P son $\pi/8$ y $3\pi/8$ respectivamente.

De esta forma, la intensidad del haz de luz que llega al fotodetector, proveniente del analizador, cumple con la ecuación

$$I = \frac{E_y^2}{2 \sin^2 \alpha_P} [1 - 2 \cos 2\beta \sin 2\beta (1 - \cos \delta)] \quad (D.14)$$

En la técnica de Birrefringencia Bicolor se utilizan dos haces de diferente longitud de onda, lo que permite realizar dos mediciones simultáneas y escribir el sistema de dos ecuaciones siguientes. En estas ecuaciones se ha reemplazado el ángulo de orientación de la birrefringencia β por otro ángulo contado a partir de las orientaciones principales de los polarizadores: $\beta = \alpha - \chi$. Para distinguir las variables se utilizan los subíndices:

$$\begin{aligned} I_{azul} &= E_{y,azul}^2 \text{sen}(\delta_{azul}/2) \text{sen}^2(2\chi) \\ I_{verde} &= E_{y,verde}^2 \text{sen}(\delta_{verde}/2) \text{sen}^2(2\chi) \end{aligned} \quad (D.15)$$

Este sistema de ecuaciones permitirá calcular la orientación de la anisotropía y su magnitud al efectuar simultáneamente las mediciones de I_{azul} e I_{verde}

Recientemente se ha realizado un trabajo en el que se plantea un formalismo adecuado para el estudio y caracterización de medios anisotrópicos no-homogéneos que considera los efectos de borde al llevar a cabo mediciones de birrefringencia bicolor dentro de una celda de flujos [D3].

Referencias:

- [1D] KLIEGER, David S., *Polarized Light in Optics and Spectroscopy*, Academic Press, San Diego, 1990.
- [2D] COLLET, Edward, *Polarized Light, Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker, New York, 1993.
- [3D] MARIN, María del Carmen, *Formalismo unificado de anisotropía óptica para la descripción de materiales no-homogéneos*, Tesis de Físico, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1999.