



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Diseño y Construcción de un Sistema Para
Medición de Planitud de Mesas de Referencia.

T E S I S

Que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO

p r e s e n t a

CARLOS VALDES FRANCO

Director de tesis: Ing. Rigoberto Nava Sandoval

México, D. F.

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

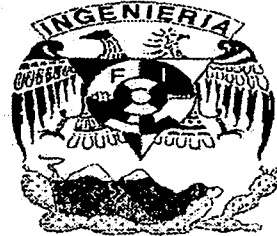


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y Construcción de un Sistema Para Medición de Planitud de Mesas de Referencia.

Por: Carlos Valdés Franco.

Objetivo.

Desarrollo de un sistema alternativo para calibración de mesas de referencia que simplifique el proceso de medición de planitud.

Agradecimientos.

Agradecimientos:

A mi familia.

A mi tutor.

A mis sinodales.

Tabla de Contenido.

Tabla de Contenido.

OBJETIVO.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
TABLA DE CONTENIDO.....	4
LISTA DE ILUSTRACIONES Y TABLAS.....	6
Capítulo 1. Introducción: Metrología, Calibración y Planitud.....	8
✓ METROLOGÍA.....	8
✓ CALIBRACIÓN.....	11
✓ PLANITUD.....	12
Capítulo 2. Mesas de referencia.....	14
✓ MESAS DE REFERENCIA.....	14
Capítulo 3. Métodos para la medición de planitud.....	20
✓ VERIFICACIÓN DE LA PLANITUD.....	20
✓ MARMOLEADO.....	20
✓ COMPARACIÓN RECÍPROCA.....	21
✓ UTILIZANDO UN PLANO DE REFERENCIA DE PLANITUD CONOCIDA.....	22
✓ MÉTODOS ÓPTICOS.....	23
✓ FRANJAS DE INTERFERENCIA LUMINOSA.....	25
✓ INTERFERÓMETROS ÓPTICOS.....	26
✓ REGLA Y BLOQUES PATRÓN.....	27
✓ COMPARADOR Y REGLA.....	28
✓ NIVEL DE BURBUJA.....	29
✓ EXAMINADORES DE SUPERFICIES PLANAS DEL TIPO INDICADOR.....	32
✓ INSPECCIÓN DE SUPERFICIES PLANAS UTILIZANDO AUTOCOLIMADOR.....	33
✓ EJEMPLO DE MEDICIÓN UTILIZANDO EL MÉTODO DE UNION JACK.....	35
Capítulo 4. Diseño y Construcción del Sistema.....	52
✓ COSTOS DE FABRICACIÓN.....	62
✓ PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	64
Capítulo 5. Algoritmo de Medición.....	70
✓ PRIMERA CORRECCIÓN DE LECTURAS.....	70
✓ SEGUNDA CORRECCIÓN DE LECTURAS.....	75
Capítulo 6. Validación del Método.....	84
Capítulo 7. Análisis de resultados.....	93
Conclusiones.....	95
REFERENCIAS.....	96

Tabla de Contenido.

BIBLIOGRAFÍA.....	97
ÍNDICE ALFABÉTICO.....	99
APÉNDICE.....	100

Lista de ilustraciones y tablas.

Lista de ilustraciones y tablas.

ILUSTRACIÓN 1: PLANITUD	13
ILUSTRACIÓN 2: NOMENCLATURA.....	14
ILUSTRACIÓN 3: MARMOLEADO.....	21
ILUSTRACIÓN 4: MÉTODO DE LOS TRES MÁRMOLES	22
ILUSTRACIÓN 5: ANTEOJO FIJO Y MIRA MÓVIL.....	24
ILUSTRACIÓN 6: FRANJAS DE INTERFERENCIA LUMINOSA.....	26
ILUSTRACIÓN 7: UTILIZANDO REGLA Y BLOQUES PATRÓN.....	28
ILUSTRACIÓN 8: UTILIZANDO COMPARADOR Y REGLA.....	29
ILUSTRACIÓN 9: UTILIZACIÓN DEL NIVEL DE BURBUJA.....	30
ILUSTRACIÓN 10: NIVELACIÓN.....	30
ILUSTRACIÓN 11: ALABEO.....	31
ILUSTRACIÓN 12: EXAMINADOR TIPO INDICADOR.....	33
ILUSTRACIÓN 13: MÉTODO DE UNION JACK.....	34
ILUSTRACIÓN 14: MAPA TOPOGRÁFICO GENERADO POR EL MÉTODO DE UNION JACK.....	35
ILUSTRACIÓN 15: MÉTODO DE UNION JACK CON LA DESIGNACIÓN DE LAS LETRAS QUE CONFORMAN LAS LÍNEAS O TRAYECTORIAS.....	36
ILUSTRACIÓN 16: CÁLCULO DE LAS ALTURAS.....	41
ILUSTRACIÓN 17: ACUMULADO.....	42
ILUSTRACIÓN 18: VISTA GENERAL.....	54
ILUSTRACIÓN 19: VISTA GENERAL SOBRE MESA DE GRANITO.....	55
ILUSTRACIÓN 20: PLACA MAYOR SECCIONADA.....	57
ILUSTRACIÓN 21: REACCIONES EN LOS APOYOS A, B Y C.....	58
ILUSTRACIÓN 22: EQUIPO NECESARIO.....	64
ILUSTRACIÓN 23: MESA DE REFERENCIA.....	65
ILUSTRACIÓN 24: DIVISIÓN DE LA SUPERFICIE EN MALLAS ORTOGONALES, UTILIZANDO LETRAS AUXILIARES.....	66
ILUSTRACIÓN 25: PRIMERA TRAYECTORIA.....	67
ILUSTRACIÓN 26: ÚLTIMA TRAYECTORIA.....	67
ILUSTRACIÓN 27: PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	68
ILUSTRACIÓN 28: BLOQUES PATRÓN AUXILIARES.....	68
ILUSTRACIÓN 29: MALLA SOBRE LA MESA DE GRANITO.....	73
ILUSTRACIÓN 30: MAPA DE COTAS.....	83
ILUSTRACIÓN 31: GRÁFICA DEL MÉTODO DE VALIDACIÓN.....	85
ILUSTRACIÓN 32: UTILIZANDO EL MÉTODO DE UNION JACK.....	91
ILUSTRACIÓN 33: VISTA SUPERIOR.....	92
TABLA 1: METROLOGÍA DIMENSIONAL	10
TABLA 2: DIMENSIONES DE MESAS.....	16
TABLA 3: TOLERANCIAS EN LA DESVIACIÓN GENERAL DE PLANITUD.....	17
TABLA 4: PERIMETRAL AB.....	37
TABLA 5: HF.....	38
TABLA 6: DC.....	38
TABLA 7: AD.....	39
TABLA 8: EG.....	39
TABLA 9: PERIMETRAL BC.....	39

Lista de ilustraciones y tablas.

TABLA 10: DIAGONAL AC	40
TABLA 11: DIAGONAL BD	40
TABLA 12: ACUMULADO AB	42
TABLA 13: ACUMULADO HF	43
TABLA 14: ACUMULADO DC	43
TABLA 15: ACUMULADO AD	44
TABLA 16: ACUMULADO EG	44
TABLA 17: ACUMULADO BC	44
TABLA 18: ACUMULADO AC	45
TABLA 19: ACUMULADO BD	45
TABLA 20: NUEVOS VALORES	49
TABLA 21: VOLUMEN Y MASA DE LAS PIEZAS	61
TABLA 22: NIVELES	74
TABLA 23: DATOS PALPADOR A	74
TABLA 24: DATOS PALPADOR B	75
TABLA 25: ALTURAS	76
TABLA 26: ALTURAS (CONTINUACIÓN)	77
TABLA 27: PUNTOS	78
TABLA 28: DISTANCIAS	82
TABLA 29: VALIDACIÓN, PERIMETRAL AB	86
TABLA 30: VALIDACIÓN, PERIMETRAL HF	87
TABLA 31: VALIDACIÓN, PERIMETRAL DC	88
TABLA 32: VALIDACIÓN, PERIMETRAL AD	88
TABLA 33: VALIDACIÓN, PERIMETRAL EG	89
TABLA 34: VALIDACIÓN, PERIMETRAL BC	89
TABLA 35: VALIDACIÓN, DIAGONAL AC	90
TABLA 36: VALIDACIÓN, DIAGONAL BD	91
TABLA 37: RESULTADOS OBTENIDOS	93

Capítulo 1.

Introducción: Metrología, Calibración y Planitud.

✓ Metrología.

Metrología proviene del griego μέτρον, medida y logia, estudio; es la ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de pesas y medidas[1]. *La metrología* es la ciencia de las mediciones y es la base para el desarrollo científico y tecnológico de la civilización, cada descubrimiento en la ciencia proporciona una nueva forma de ver las cosas, por lo que el campo de la metrología siempre está en expansión.

Durante mucho tiempo ha sido preocupación del hombre establecer un sistema único de unidades de medición (para el desarrollo de la ciencia y de la tecnología) que fuera aceptado internacionalmente en virtud de que en una norma no se pueden fijar especificaciones, dimensiones, tolerancias o condiciones específicas para un método de prueba, si no se cuenta con un sistema de referencia previamente establecido, como lo es el sistema de unidades de medición.

Originalmente el término metrología se refería específicamente a la medición de bases de referencia estándar, las cuales estaban a cargo de laboratorios nacionales de metrología. El efecto combinado de dos tendencias concurrentes, las cuales son: el incremento rápido en la necesidad industrial de medidas de alta exactitud¹ y la amplia gama de instrumentos de medida con un nivel de sensibilidad y de exactitud previamente requeridos por un reducido número de laboratorios, resultó en la expansión de las técnicas de metrología, así como en el más generalizado uso del término metrología.

Metrología, cuando designa medida dimensional en la industria, abarca un gran espectro de procesos de medición en la industria, los cuales se distinguen por un planeamiento más específico, ejecución y resultados, que aquellos aplicados en prácticas comunes de medición.

¹ Calidad de un resultado de medida que se aproxima al valor verdadero o considerado como verdadero.

Capítulo 1: Introducción.

Hoy en día, las responsabilidades de un gran número de ingenieros en las industrias de manufactura, usualmente requieren mucho más que un entendimiento superficial de medición, por ejemplo en el área dimensional, ya que ellos representan un vínculo esencial entre las dimensiones y tolerancias de un dibujo y el producto final.

La metrología se divide en varias ramas, dependiendo de sus funciones, entre ellas se encuentran las siguientes: legal, científica e industrial.

La metrología legal tiene como función, establecer el cumplimiento de la legislación metrológica oficial, es decir: la conservación y empleo de los patrones internacionales, primarios y secundarios, así como mantener laboratorios oficiales que conserven estos patrones de medida. Particularmente tiene gran importancia en las transacciones comerciales ya que se debe pagar un precio por unidad de medida. En México, la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, tiene la función, entre otras, de verificar los instrumentos de medición para transacciones comerciales, por ejemplo: las básculas de los comercios; las bombas de gasolina; los metros en los expendios de telas, cables o productos que se venden por unidad de longitud; etc.

La función de la metrología científica radica en la búsqueda y materialización de los patrones internacionales, para que éstos sean más fáciles de reproducir a escala internacional, encontrar los patrones más adecuados para los descubrimientos que se hagan en el futuro, seguir analizando el sistema internacional de medidas, etc... Estas funciones las realizan todos los laboratorios autorizados oficiales y privados, los cuales en esta forma también están colaborando en la elaboración de normas.

La metrología industrial compete a los laboratorios autorizados, su función es dar servicio de calibración de patrones y equipos a la industria y al comercio.

La metrología, también puede ser dividida por áreas de acuerdo a las magnitudes objeto de las mediciones, teniendo de esta manera, entre otras, las siguientes: dimensional o geométrica, eléctrica, térmica, química. El tema de éste trabajo se enfoca a resolver de manera diferente un problema del área dimensional o geométrica la cual se refiere a medición de longitud y ángulo.

Capítulo 1: Introducción.

El campo de aplicación de la metrología dimensional o geométrica es el siguiente:

Longitudes	Diámetros, radios y distancias relativas interiores y exteriores entre elementos geométricos tales como planos, aristas, centros de agujeros o ejes etc.; alturas y profundidades.	
Ángulos	Ángulos cualquiera entre elementos geométricos.	
Superficies	Rugosidad.	
Formas	Forma por elemento aislado.	Rectitud, <i>planitud</i> , circularidad, cilíndricidad, forma de una línea, forma de una superficie.
	Orientación por elementos asociados.	Paralelismo, perpendicularidad, inclinación.
	Posición por elementos asociados.	Localización de un elemento, concentricidad, coaxialidad.

Tabla 1: Metrología dimensional

Otro aspecto importante para tomar en cuenta es el sistema de unidades implementado para poder tener un control sobre las pesas y medidas que se utilizan a escala mundial, esto es el Sistema Internacional de Unidades, conocido como SI.

Un sistema de unidades de medida es un conjunto de unidades confiables, uniformes y definidas con precisión² y sirve para satisfacer las necesidades de la medición. El primer sistema de unidades de medida que se estableció fue el Sistema Métrico Decimal, en Francia, a fines del siglo XVIII. Este sistema presentaba un conjunto de unidades coherentes para las medidas de longitud, volumen, capacidad y masa, los cuales se basaban en dos unidades fundamentales: el metro y el kilogramo y con múltiplos y submúltiplos decimales.

El Comité Consultivo de Unidades, integrado por el Comité Internacional de la Conferencia General de Pesas y Medidas, se dedicó a la tarea de crear un sistema único internacional. Para ello, analizó los sistemas existentes: LT (longitud y tiempo); LFT (longitud, fuerza y tiempo) y

² La precisión de un instrumento de medida, es la mínima variación de magnitud que puede determinar dicho instrumento.

Capítulo 1: Introducción.

LMT (longitud masa y tiempo) aceptándose este último, cuyas unidades fundamentales son el metro, el kilogramo y el segundo, como el más apropiado, cuyas siglas son MKS.

Sin embargo tres unidades fundamentales no son suficientes para las mediciones caloríficas, por lo que se le agregó una cuarta magnitud: la temperatura, para las medidas eléctricas y magnéticas se eligió el Ampere, para las medidas fotométricas se eligió la intensidad luminosa, para las radiaciones ionizantes se puede emplear el sistema: metro-kilogramo-segundo-ampere.

Para englobar todo el campo de los fenómenos físicos en un solo sistema de unidades de medida, el sistema más racional es el sistema basado en las seis unidades fundamentales: longitud, masa, tiempo, temperatura termodinámica, intensidad o corriente eléctrica e intensidad luminosa. Las dimensiones y símbolos para las unidades fundamentales de este sistema son: metro (m), kilogramo (Kg), segundo (s), kelvin (K), amperio (A), y candela (cd) respectivamente. En el campo de los fenómenos químicos se aceptó como unidad fundamental la cantidad de materia cuya dimensión y símbolo es el mol (mol).

El sistema así formado fue denominado por la XI Conferencia General de Pesas y Medidas celebrada en París, Francia en 1960 como Sistema Internacional de Unidades con abreviación internacional SI.

✓ Calibración.

El término *calibración* debe entenderse, en el contexto de la metrología, como la determinación de las desviaciones de indicación de la medida de un instrumento o patrón respecto a la medida aceptada internacionalmente como verdadera. Los instrumentos de medición a pie de línea de producción de las industrias deben estar calibrados a través de la cadena de laboratorios primarios y secundarios para garantizar que las medidas efectuadas estén relacionadas con los patrones primarios internacionales. A esta relación se le conoce como trazabilidad. Debe tenerse especial cuidado en no emplear la palabra *calibración* como sinónimo de la palabra *ajuste*. Ajustar significa modificar ciertos elementos del instrumento o patrón para que la medida indicada en éstos esté más cercana al valor aceptado internacionalmente como verdadero, es

Capítulo 1: Introducción.

decir, el objetivo de una calibración es determinar las desviaciones respecto de un patrón mientras que el objetivo de un ajuste es minimizar tales desviaciones.

La calibración puede realizarse en comparación con:

- a) Un patrón primario.
- b) Un patrón secundario que sea de mayor exactitud que el instrumento o patrón a calibrar, ó
- c) Una fuente de señal de entrada conocida.

El primer paso en la graduación de la escala de un instrumento consiste en localizar determinados puntos fijos. La división de la escala en un número específico de intervalos se efectúa después con referencia a los puntos fijos.

Es esencial que, después de haber graduado un instrumento de medida, sea calibrado con el fin de determinar sus errores³ o desviaciones. Esta operación se conoce con el nombre de verificación cuando se emplea para averiguar si el aparato cumple efectivamente con una especificación prescrita.

✓ Planitud.

Una referencia fundamental en la metrología industrial la proporciona la superficie plana. La planitud se define como “la variación total admisible entre dos planos⁴ paralelos que están separados una distancia dada”[10].

Una superficie sólida real considerada a simple vista como plana, siempre presenta ondulaciones. Si tal superficie es confinada entre dos planos paralelos teóricamente perfectos, la distancia mínima entre ellos que puede contener al plano real se conoce como planitud.

³ Diferencia entre una estimación a^* de un número a y su valor exacto a . El error se designa por Δa ; $\Delta a = a^* - a$, según que a^* sea una estimación de a por exceso o por defecto, Δa será positivo o negativo. Diferencia entre el valor observado y el valor exacto o verdadero de una medición. El error absoluto, es la diferencia entre un número y su valor aproximado; diferencia entre el resultado de una medición de una magnitud y el valor exacto (frecuentemente desconocido) de dicha magnitud.

⁴ Del latín planum, dicese de las superficies sin relieves.

Capítulo 1: Introducción.

La definición de desviación de planitud de una superficie de trabajo, según la norma internacional ISO 8512-2 de 1990[3] es: la mínima distancia (d) que separa dos planos paralelos entre los cuales la superficie de trabajo puede ser contenida.

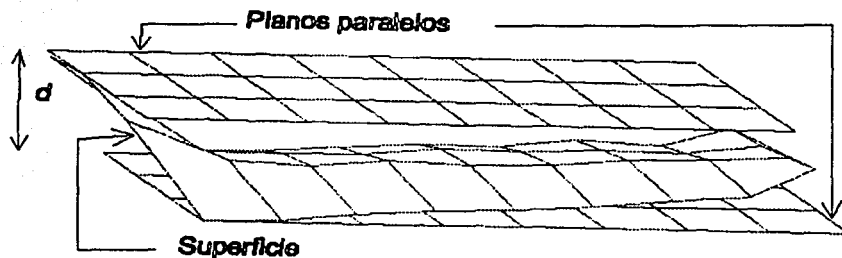


Ilustración 1: Planitud

Planitud representa el concepto geométrico del plano, la condición de ser plana una superficie, cuando se aplica a una superficie sólida la cual es sujeta de medirse por términos mecánicos, ya sea directamente o en combinación con medios ópticos. Se dice que se verifica la planitud, cuando se realiza una comparación de dicha superficie con un plano de referencia, el plano que se toma como referencia puede ser: un patrón de planitud o un plano imaginario determinado por tres puntos, por un nivel o por un instrumento óptico.

La Planitud es una condición primordial en diversas partes o piezas de ensamble, por razones relacionadas con el servicio para el cual ha sido diseñada dicha pieza, el control de la planitud es requerido para asegurar un contacto perfecto entre ciertas partes como lo son los sellos, o como condición de paralelismo de caras nominalmente planas, en el ensamble y ajuste de piezas de manufactura que van a ser unidas.

Considerando el papel que representa la planitud, la medida de esa condición en la operación de piezas de manufactura es generalmente una operación importante en el proceso de medición dimensional. La elección del mejor método para medir la planitud depende de varios factores, como lo es la medida y forma de la pieza, el área que va a ser inspeccionada, su accesibilidad y su relación con otras piezas, y el grado de exactitud deseado en la medición.

Capítulo 1: Introducción.

La definición de desviación de planitud de una superficie de trabajo, según la norma internacional ISO 8512-2 de 1990[3] es: la mínima distancia (d) que separa dos planos paralelos entre los cuales la superficie de trabajo puede ser contenida.

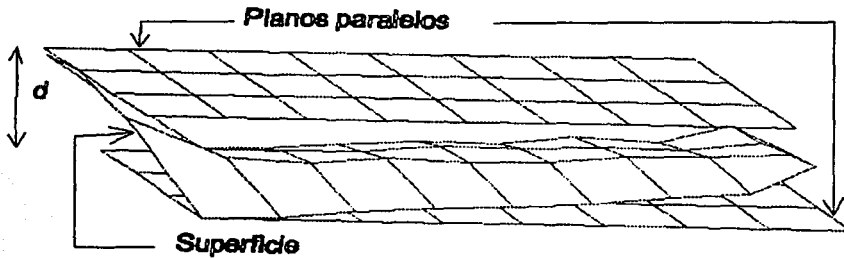


Ilustración 1: Planitud

Planitud representa el concepto geométrico del plano, la condición de ser plana una superficie, cuando se aplica a una superficie sólida la cual es sujeta de medirse por términos mecánicos, ya sea directamente o en combinación con medios ópticos. Se dice que se verifica la planitud, cuando se realiza una comparación de dicha superficie con un plano de referencia, el plano que se toma como referencia puede ser: un patrón de planitud o un plano imaginario determinado por tres puntos, por un nivel o por un instrumento óptico.

La Planitud es una condición primordial en diversas partes o piezas de ensamble, por razones relacionadas con el servicio para el cual ha sido diseñada dicha pieza, el control de la planitud es requerido para asegurar un contacto perfecto entre ciertas partes como lo son los sellos, o como condición de paralelismo de caras nominalmente planas, en el ensamble y ajuste de piezas de manufactura que van a ser unidas.

Considerando el papel que representa la planitud, la medida de esa condición en la operación de piezas de manufactura es generalmente una operación importante en el proceso de medición dimensional. La elección del mejor método para medir la planitud depende de varios factores, como lo es la medida y forma de la pieza, el área que va a ser inspeccionada, su accesibilidad y su relación con otras piezas, y el grado de exactitud deseado en la medición.

Capítulo 2.

Mesas de referencia.

✓ Mesas de referencia.

Se clasifican en dos tipos fundamentales dependiendo del material con que han sido construidas, éstos son: de roca o metal. Las de roca, deben de ser de textura uniforme, libre de grietas y de inclusiones de otros materiales, la reparación en la superficie de defectos no es permitida. El color del granito que depende de la composición del material, no es de importancia, pero el color de cualquier mesa debe ser uniforme.[3].

Las mesas de roca cuentan con rebordes y solo se emplean como opción en mesas rectangulares y cuadradas, las superficies laterales así como los rebordes deberán tener un acabado superficial similar a la de la superficie de trabajo. Las superficies laterales deben ser terminadas por pulido, todas las orillas y esquinas deben de ser redondeadas con un radio de por lo menos de 2 mm. Alternativamente, los lados y esquinas deben tener un chafán a un ángulo de aproximadamente 45 grados.

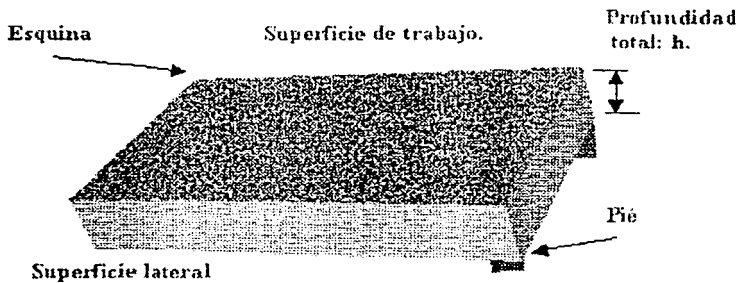


Ilustración 2: Nomenclatura.

Capítulo 2: Mesas de referencia.

Las superficies de granito poseen varias propiedades valiosas que justifican su preferencia en uso en diversas aplicaciones. Dichas propiedades son: alta dureza, gran resistencia al uso continuo, estabilidad dimensional, no se deterioran u oxidan bajo desenvolvimiento en condiciones comunes, aparte de que es difícil que la viruta se incruste en su superficie. El material es granito de diferentes tipos, que se distingue por sus propiedades físicas como su resistencia a la compresión y por sus componentes minerales (granito).

Propiedades físicas del granito: los mármoles empleados como mesas de referencia deben de poseer las siguientes características físicas:

Densidad⁵: desde $2,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ hasta $3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Esfuerzo⁶ a la tensión: desde 7 N/mm^2 hasta 35 N/mm^2 .

Esfuerzo a la compresión: desde 100 N/mm^2 hasta 300 N/mm^2 .

Coefficiente de porosidad⁷: desde 1% hasta 1.5%.

Coefficiente lineal de expansión térmica: desde $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ hasta $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Uno de los aspectos más importantes dentro de las propiedades físicas de las mesas de referencia es la rigidez que se relaciona con el espesor de la mesa, dicho espesor debe ser tal que cuando una carga concentrada se aplique aproximadamente en el centro de la mesa, el área bajo carga no se debe deflectar en dicha zona más allá de 1 micrómetro/200 N.

El uso de insertos puede causar distorsión⁸ en la superficie de trabajo, si se aplican presiones mayores al momento de ajustar algún elemento, y los insertos de metal en el granito causan distorsiones debido a la diferencia en expansión. De ser necesario algún inserto, éstos se deben de hacer antes de que se realice el acabado superficial en el área de trabajo.

⁵ Relación entre la masa del cuerpo y la masa de agua que ocupa el mismo volumen a la temperatura de 4° C.

⁶ La fuerza por unidad de área, o intensidad de las fuerzas distribuidas sobre una sección dada, se conoce como el esfuerzo en dicha sección y se designa por la letra griega σ (sigma). [12]

⁷ Propiedad de los cuerpos sólidos que presentan una estructura lagunar, en forma de poros, cuyas dimensiones son considerables con relación a los átomos, aunque muy pequeñas con respecto a la escala de nuestras observaciones ordinarias. La porosidad viene definida por la razón de volumen total de la muestra considerada.

⁸ Variación del ángulo formado por dos segmentos que, antes de la aplicación de una acción, eran perpendiculares entre sí, debido a las deformaciones producidas por esta acción.

Capítulo 2: Mesas de referencia.

Las formas de las mesas de planitud son de tres tipos principalmente: circulares, rectangulares y cuadradas. Las mesas circulares son de acero con diámetros desde 60 mm hasta 200 mm, o de fundición desde 250 mm hasta 400 mm y se pueden tener superficies de trabajo en una o ambas caras, de ser necesario se refuerza la superficie de trabajo con nervaduras que le confieren rigidez. Los tamaños ideales para las mesas de granito están dados por las siguientes tablas:

Ancho (pulgadas)	Longitud (pulgadas)	Ancho (pulgadas)	Longitud (pulgadas)
12	12	36	72
12	18	48	48
18	18	48	60
18	24	48	72
24	36	48	96
24	48	48	120
36	36	60	120
36	48	72	96
36	60	72	144

Tabla 2: Dimensiones de mesas. [3]

Capítulo 2: Mesas de referencia.

Tamaño (mm)	Longitud de la diagonal (mm). (Aprox.)	Zona de borde (mm)	Tolerancias en la desviación de la planitud general, para los grados (micrómetros):			
			0	1	2	3
Rectangular:						
160 x 100	188	2	3	6	12	25
250 x 160	296	3	3,5	7	14	27
400 x 250	471	5	4	8	16	32
630 x 400	745	8	5	10	20	39
1000 x 630	1180	13	6	12	24	49
1600 x 1000	1180	20	8	16	33	66
2000 x 1000	2236	20	9,5	19	38	75
2500 x 1600	2960	20	11,5	23	46	92
Cuadrada:						
250 x 250	354	5	3,5	7	15	30
400 x 400	566	8	4,5	9	17	34
630 x 630	891	13	5	10	21	42
1000 x 1000	1414	20	7	14	28	56

Tabla 3: Tolerancias en la desviación general de planitud[3].

Los mármoles se obtienen por mecanizado, rasquetado⁹ a mano o lapeado¹⁰, dependiendo del tipo de operación, del grado de precisión y acabado superficial requeridos. La parte superior de la mesa para los grados 0 y 1 deben ser terminados por lapeado, para los grados 2 y 3 deben ser terminados por lapeado o rasquetado burdo.

Las superficies rasqueteadas y lapeadas se obtienen en juegos de tres por el método de Whitworth de generación de superficies¹¹, el cual no requiere el uso de una superficie patrón. Se emplea una gran cantidad de materiales, tales como: fundición, acero, vidrio y granito,

⁹ Operación de acabado sacando virutas de superficies previamente mecanizadas, para conferirles cierto grado de calidad y lisura.

¹⁰ Operación de acabado de superficies metálicas o granito, en la que se utilizan fragmentos sueltos de abrasivo y pulimento.

¹¹ Se explica en el capítulo 3.

Capítulo 2: Mesas de referencia.

pudiéndose disponer de mármoles en una amplia gama de medidas para satisfacer todos los requerimientos. Los materiales más extensamente utilizados son el hierro fundido y el acero, aunque el granito está adquiriendo cada vez más popularidad, debido, en parte, a que no produce rebordes cuando sufre algún daño [5].

La mínima dureza varía según la clase, que está relacionada con la homogeneidad del material; la clase 1 debe tener como mínimo una dureza de 90 Rockwell C, que es igual al valor del grado A, mientras la clase 2 debe tener un mínimo de 64 Rockwell C. El término clase se refiere a las propiedades del material, tales como la resistencia al uso, y el grado designa los niveles de exactitud.

La resistencia al uso es otra de las propiedades significativas del granito como material, el examen recomendado consiste en trazar una línea o senda de esfuerzo de no menos de 1 pulgada de longitud en la superficie con un penetrador Rockwell C¹² de diamante bajo una carga de 3 libras, de forma que se causen movimientos recíprocos en un periodo de tres horas para completar 1238 ciclos de golpeo. El resultado es medido; para la clase 1 su profundidad no debe exceder de 0,0071 pulgadas en cualquier marca y 0,0035 pulgadas en la medición.

La mesa de referencia debe ser soportada por tres pies, las mesas más grandes que 1000 mm x 630 mm deben aparte poseer pies de seguridad adicionales. Los pies se deben de colocar de tal forma que se minimicen los efectos de la deflexión debida al peso de la mesa, para los casos de las mesas que tienen pies adicionales de apoyo, la medición de planitud puede variar, por lo que primero se debe nivelar la mesa como se explicará en el capítulo 3, para la verificación de la planitud con el nivel de burbuja, y posteriormente se ajustan a roce los pies de apoyo, y se debe verificar periódicamente que dichos pies no soporten a la mesa.

La planitud cerca del perímetro no es generalmente igual a la medida de planitud en el resto de la superficie. Ese defecto de planitud, no es tomado en cuenta en las prácticas estándar de inspección de planitud de dichas mesas. Con respecto a la exactitud en las mediciones se dice que ningún punto en la superficie de trabajo puede variar con respecto a un plano principal más de la cantidad especificada, pueden existir formaciones sobre la superficie en forma de

¹² El ensayo de dureza Rockwell utiliza una bola de acero de diámetro pequeño para materiales suaves, y un cono de diamante para materiales más duros. La profundidad de la penetración la mide automáticamente el instrumento de prueba, y es convertida a un índice de dureza Rockwell.[6]

Capítulo 2: Mesas de referencia.

protuberancias o valles, que pueden afectar las mediciones, pero generalmente los valles no afectan de una manera determinante dichas mediciones, ya que los elementos que entran en contacto con dicha superficie pueden hacer de puente que salva el inconveniente, por lo que es práctica común en la industria requerir que ningún punto deba desviarse de los límites a partir de un nivel preestablecido. La inspección de las mesas de granito, es necesaria para determinar el grado de planitud y debe realizarse de forma regular. Las mesas de grado 0, y 1 deben de ser protegidas con una cubierta para proteger el área de trabajo y los lados de dicha mesa.

Dos tolerancias de planitud son aplicadas para las mesas de granito, una para el área de trabajo en general y una para área local de 250 mm x 250 mm dentro del área de trabajo. Una zona de borde, de ancho tal que no exceda 2% del lado más angosto con un máximo de 20 mm, se debe excluir del área de medición. Para el caso de la tolerancia general, éstas no deben exceder aquellas indicadas en la tabla 3. Para el caso de áreas locales la desviación de planitud no debe exceder:

- 3,5 micrómetros para mesas de grado 0,
- 7 micrómetros para mesas de grado 1,
- 15 micrómetros para mesas de grado 2,
- 30 micrómetros para mesas de grado 3.

Mesas con diagonal menor que 354 mm no permiten áreas de 250 mm x 250 mm, y en éstos casos la medición de planitud general sirve para sustituir este punto.

Cada mesa tiene una designación particular, que se localiza a un costado, la información, en caracteres no menores a 3 mm de altura, debe incluir:

- Marca del fabricante.
- Norma adoptada como referencia.
- Fecha última de calibración.
- Centro u operario que realizó la calibración.
- Número de serie.
- Grado.
- Tamaño.

Capítulo 3.

Métodos para la medición de planitud.

✓ Verificación de la planitud.

Los métodos de verificación que utilizan un plano ideal de referencia, son preferentemente utilizados para la comprobación de superficies de dimensiones grandes y cuando se quieren determinar cuantitativamente las diferencias entre la superficie que se comprueba y un plano geométrico.

Los métodos de verificación por comparación con un plano patrón, utilizan como tal un mármol o un vidrio óptico de caras planas y paralelas. Se emplean estos métodos preferentemente para la comprobación de superficies planas no muy extensas, para verificar su estado de planitud durante o después del trabajo de ajuste por rasquetado o de operaciones de superacabado. A continuación se describen varios métodos existentes para medir la planitud:

✓ Marmoleado.

Este método, que es el más sencillo de verificación de la planitud, se aplica a la comprobación de superficies en curso de ajuste por rasquetado o pulido.

Consiste en embadumar la superficie de un mármol, utilizado como plano patrón, con una capa fina y uniforme de un líquido o pasta coloreada y colocarla en coincidencia con la superficie a verificar haciendo deslizar una de las superficies con relación a la otra en distintas direcciones, el colorante es expulsado de las zonas de apoyo o contacto a causa de la mayor presión que hay en ellas. Después de separar las superficies, los puntos de apoyo aparecen brillantes por el frotamiento y rodeados del colorante empleado. Estos puntos de apoyo son los más altos de la superficie que se comprueba y los que deben de reducirse por rasquetado o por pulido para ir aumentando la planitud de la superficie por sucesivas aproximaciones.

La presentación de las superficies puede hacerse de dos maneras. Las piezas pequeñas y medianas se presentan sobre un mármol patrón, mientras que para las piezas más grandes, tales como bancadas, es el patrón el que se coloca sobre la superficie a verificar.

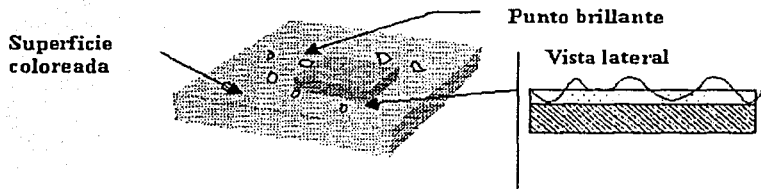


Ilustración 3: Marmoleado.

El colorante empleado es tinte negro, la tinta azul ó azul de Prusia está formada por una mezcla de colores de aceite mineral. La tinta se aplica en película fina y uniforme, con una gamuza, debido a que los trapos dejan pelusa. El colorante debe ser de grano muy fino y uniforme y libre de granos duros de sustancias extrañas, que podrían producir rayas en la superficie del mármol y de la pieza que se verifica. La precisión de la verificación está limitada por la del mármol patrón, por la rigidez del mismo y de la pieza y por el espesor de la capa colorante, que debe ser muy fina y uniforme. Por otra parte debe tenerse en cuenta que la verificación por éste procedimiento no indica el espesor del metal a quitar y el trabajo de acabado del plano se realiza por aproximaciones sucesivas.

✓ **Comparación recíproca.**

Los mármoles se obtienen por mecanizado, rasqueteado a mano o lapeado, dependiendo del tipo de operación, del grado de precisión y acabado superficial requeridos. Las superficies rasqueteadas y lapeadas se obtienen en juegos de tres por el método de Whitworth de generación de superficies, el cual no requiere el uso de una superficie patrón.

Este procedimiento, conocido también con la denominación de *método de los tres mármoles*, es empleado también en la verificación de las operaciones de rasqueteado. Para ello es necesario el ajuste simultáneo de tres mármoles y su aplicación queda limitada a la fabricación de reglas y mármoles de pequeñas dimensiones, hasta de un metro de lado para éstos últimos.

Capítulo 3: Métodos.

Después de haber cepillado finamente los tres mármoles se escoge uno como patrón, por ejemplo A y se ajustan a él los otros dos, B y C, si A es cóncavo, por ejemplo B y C resultan entonces convexos y cuando se confronten entre sí, su apoyo tendrá lugar sobre una superficie central que se reducirá de altura en la misma cantidad entre los dos mármoles, hasta que éstos se apoyen correctamente.

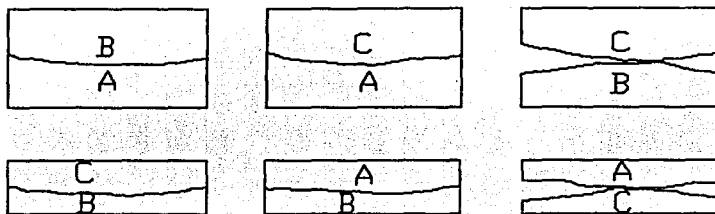


Ilustración 4: Método de los tres mármoles

En este estado las superficies de los mármoles B y C continuarán siendo probablemente el uno cóncavo y el otro convexo, pero más cerca de la superficie plana deseada.

El mármol B se toma como patrón para ajustar A, la presentación de A sobre C manifestará el doble de error de planitud de B. Se retocarán entonces A y C, como anteriormente se hizo con B y C, y este último mármol se escogerá seguidamente como nuevo patrón.

Se ve que cuando los tres mármoles, aparejados dos a dos en todas las posiciones y en cada una de las tres combinaciones posibles, muestran un apoyo perfecto, cada uno de los tres será plano patrón. Para poner de relieve un posible alabeo helicoidal de los mármoles deben hacerse dos presentaciones por cada combinación. La precisión obtenida está influida por la rigidez de los mármoles que se ajustan.

✓ Utilizando un plano de referencia de planitud conocida.

Los mármoles de acero de espesor uniforme, de hasta 200 mm de diámetro, se denominan mármoles de matricero o platinas. Permiten que los bloques de calibrado queden bien adaptados a su superficie y muestran franjas de interferencia rectas cuando se observan bajo un plano óptico. También se obtienen mármoles de fundición, de hasta 450 mm de diámetro. Los

Capítulo 3: Métodos.

mármoles de hierro fundido cuadrados o rectangulares obtenidos por rasqueteado manual poseen una planitud que puede ser de pocos micrómetros; están provistos de fuertes nervaduras¹³ y de una gran sección para reducir al mínimo las flexiones. El mismo grado de precisión puede alcanzarse en los mármoles de granito cuadrados o rectangulares y de espesor uniforme. Para finalidades como el trazado, también se usan los mármoles y las mesas planas, aunque el grado de precisión es inferior.

✓ Métodos ópticos.

El método más simple es el llamado de anteojo fijo y la mira móvil. El eje óptico del anteojo define una recta patrón y por medio de una mira graduada, que puede situarse en los distintos puntos de la superficie que se comprueba, se miden las distancias de estos puntos a la recta de referencia. Este método tiene la ventaja de no acumular los errores de las distintas mediciones pero para distancias grandes de la mira al anteojo la precisión disminuye, la precisión media de lectura es del orden de 0,1 mm. En general el anteojo está provisto de un retículo en cruz cuya imagen se enfoca por medio del ocular ajustable a la visión del observador, otra lente permite enfocar la imagen de la mira formada por el retículo, este enfoque no necesita cambio mientras la distancia del anteojo a la mira permanezca superior a 1,10 m. En su extremo anterior el anteojo está provisto de una lámina de vidrio de caras paralelas, que gira de un eje horizontal con un movimiento controlado por un micrómetro con el que se miden los desplazamientos paralelos del eje óptico que corresponden a las distintas inclinaciones de la lámina de caras paralelas [2].

¹³ Las mesas metálicas cuentan con extensiones metálicas en forma de paredes delgadas, que se entretejen, en la parte inferior de la mesa, las cuales sirven para dar la mayor rigidez posible con un peso mínimo

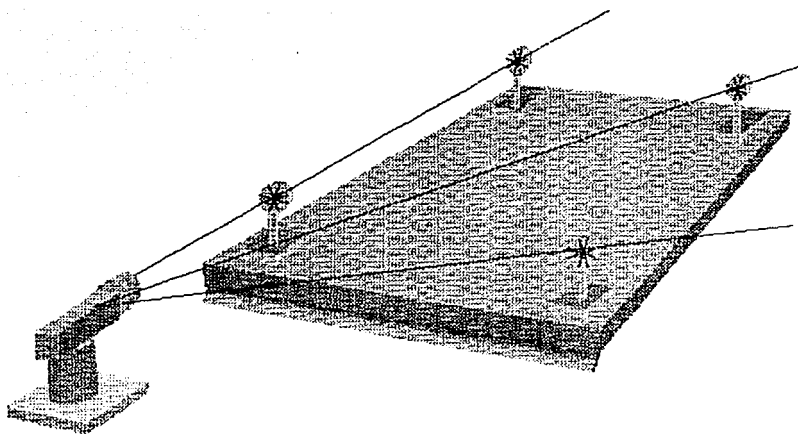


Ilustración 5: Anteojo fijo y mira móvil.

Para su uso, el anteojo se sitúa en un soporte firme a una distancia de 1 m del punto más próximo a comprobar. La posición del anteojo se ajusta de forma que se localice el centro de la mira en coincidencia con el retículo, en dos posiciones extremas de la mira, en esta forma queda determinado el eje óptico que servirá de referencia. Para cualquier otra posición de la mira cuya altura no coincida con el eje óptico de referencia, se ajusta la coincidencia del centro del retículo y el de la mira inclinando la lámina de caras paralelas, la cual produce un desplazamiento del eje óptico manteniéndose paralelo al de referencia. El desplazamiento en sentido vertical es directamente medido en el micrómetro de mando.

Montado sobre un eje de giro vertical el anteojo de alineación (por ejemplo el de la marca Zeiss) permite la comprobación de la planitud, cuadrículando la superficie a comprobar, y visando la mira en los distintos puntos de la cuadrícula.

✓ **Franjas de interferencia luminosa.**

Este método solo se aplica a pequeñas superficies planas lapeadas que tengan pulido superficial tales como: caras de referencia de bloques patrón, topes planos de calibres, indicadores de medida, platinas de aparatos de medición, etc.

La superficie a comprobar se pone en contacto con un plano óptico, que es una superficie de un disco de vidrio perfectamente plano (los planos ópticos usados para aplicaciones metrológicas son generalmente hechos de cuarzo libre de tensiones o pìrex) de unos 5 cm de diámetro, aunque pueden alcanzar los 30 cm, el espesor es el suficiente para evitar una flexión significativa en virtud de su propio peso, las superficies superior e inferior se rectifican hasta ser ópticamente planas, de modo que se conviertan en planos de referencia. Se ilumina con luz monocromática, que es luz de un solo color (las radiaciones monocromáticas se aíslan para utilizarlas mediante las interferencias luminosas), la luz de una lámpara de sodio, por ejemplo, que incide normalmente sobre una lámina delgada de aire que existe sobre un plano óptico (disco de vidrio perfectamente plano). En esta forma aparecen una serie de líneas oscuras, alternando con líneas claras, correspondientes a las líneas de la superficie a comprobar que se encuentran a igual distancia de la superficie de referencia del vidrio, es decir, a las distintas líneas de nivel con respecto al plano óptico.

La forma y disposición de las franjas de interferencia, líneas oscuras, nos dan una idea de la forma de la superficie que se verifica. Estos métodos permiten mediciones cuantitativas de las diferencias de la superficie a comprobar con respecto al plano óptico que se toma como patrón. En efecto, las franjas de interferencia corresponden a líneas de nivel de la superficie controlada y las diferencias de nivel entre dos franjas es una longitud determinada, función de la longitud de onda de la luz empleada, precisamente igual a la mitad de esta longitud de onda. Así, por ejemplo, si se utiliza luz monocromática de longitud de onda de 0,6 micrómetros, la diferencia de nivel entre los puntos correspondientes a dos líneas de interferencia inmediatas será de 0,3 micrómetros.

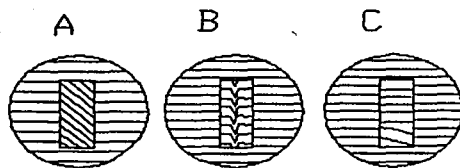


Ilustración 6: franjas de interferencia luminosa.

Los planos ópticos son hechos en un amplio rango de medidas, comúnmente desde 1 hasta 12 pulgadas de diámetro, o largo, y en espesores adaptados a los diferentes diámetros, variando desde $\frac{1}{4}$ hasta 2 pulgadas, existen varios grados de calidad, teniendo diferentes grados de planitud, expresados en micro-pulgadas de máxima desviación del plano perfecto. El intervalo adoptado por la industria es de 1 micro-pulgada, en ocasiones de 2 micro-pulgadas y en los trabajos de taller de 4 micro-pulgadas. También se hallan planos ópticos comerciales cuya exactitud es comúnmente de alrededor de la mitad de aquella encontrada en un grado de trabajo industrial, esto es de 8 micro-pulgadas. Dependiendo del uso al que van a ser encomendados, los planos ópticos están disponibles con una o dos caras de medición. Los de dos caras sirven así mismo para la medición de paralelismo, aparte de que tienen un alto grado de planitud.

✓ **Interferómetros ópticos.**

Los interferómetros vencen la dificultad que existe al usar planos ópticos, por la bolsa de aire que queda atrapada entre las superficies, por lo que también se utilizan para medir el paralelismo de las caras opuestas de los bloques patrón y sus longitudes. El interferómetro para medición de planitud consta de un haz de luz procedente de una lámpara de vapor de mercurio que al llegar a las lentes de condensación pasa después a través de un filtro de color verde hacia un objetivo donde se convierte en una intensa fuente luminosa concentrada en un punto. Toda la luz excepto la verde (de longitud de onda conocida) queda excluida, dicha luz diverge pasando a través del vidrio semi-reflector para llegar a las lentes colimadoras que la transforman en un haz paralelo. Este pasa a través de un plano óptico que está montado

independientemente sobre tres patas ajustables de modo que su ángulo puede variarse para obtener franjas y orientarlas a voluntad, la placa de la base es giratoria y es sobre la cual se apoya el bloque a medir, el cual mostrará también un modelo de franjas cuando el plano y la base estén precisamente cerca uno de otra. Un vidrio semi-reflector permite obtener una vista vertical de la franjas a obtener cuando se efectúa la observación desde un lado del instrumento. El desplazamiento de las franjas del bloque medido con relación a las franjas de la base es por entero función de la longitud del bloque y de la longitud de onda de la luz empleada, no afectando al ensayo de planitud.

La diferencia entre el número de franjas del bloque a medir y de la base multiplicada por $1/2\lambda$ dará el valor de la conicidad o inclinación existente [5].

✓ Regla y bloques patrón.

Este procedimiento es aplicable a superficies planas de gran extensión, como por ejemplo la de los mármoles de gran tamaño y se emplea para la comprobación de las operaciones de rasquetado o lapidado de tales superficies.

Se requiere una regla de control cuya longitud debe ser la de la longitud del plano a comprobar, tres bloques patrón de igual altura y un juego de bloques patrón.

La superficie a controlar se divide por medio de un trazador a lápiz, dividiendo en distancias iguales tanto el largo como el ancho, teniendo los lados a algunos centímetros del borde exterior y con las divisiones de 100 a 150 mm de longitud. Se toman tres ángulos de la cuadrícula (A, B y C), como puntos que determinarán el plano de referencia y sobre ellos se colocan los tres bloques patrón de igual altura cuyas superficies superiores determinarán un plano de referencia paralelo al primero. Situando la regla sobre los bloques patrón de los puntos A y C, se busca la combinación de bloques patrón que pasa a roce suave bajo la regla en el punto central del mármol D, la medida de esta combinación nos dará la distancia del punto D al plano de referencia constituido por la parte superior de las bloques patrón en A, B, y C, y la parte superior de esta combinación estará situada en este plano de referencia. Colocando ahora la regla sobre los bloques patrón de los puntos B y D, se determina la posición del punto

E, o cuarto punto del mármol con respecto al plano de referencia, con lo cual quedará determinado el alabeo del mármol.

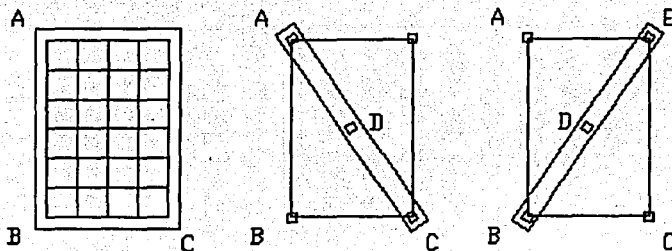


Ilustración 7: Utilizando regla y bloques patrón.

La determinación de los distintos puntos de la cuadrícula se realiza por el mismo procedimiento de introducir combinaciones de bloques patrón bajo la regla apoyada en dos bloques patrón o combinaciones, cuyas caras superiores se hallen situadas previamente en el plano determinado por las caras superiores de los bloques patrón de referencia.

✓ **Comparador y regla.**

Se basa en el procedimiento anterior, utilizándose una regla de caras paralelas y un comparador, dispuesto sobre un soporte, se determina el alabeo del mármol, se traza una cuadrícula donde las mediciones de los distintos puntos se realiza deslizando el comparador a lo largo de la regla, resultando así, más rápido el trabajo y siendo posible determinar las diferencias de nivel de todos los puntos de cada una de las líneas.

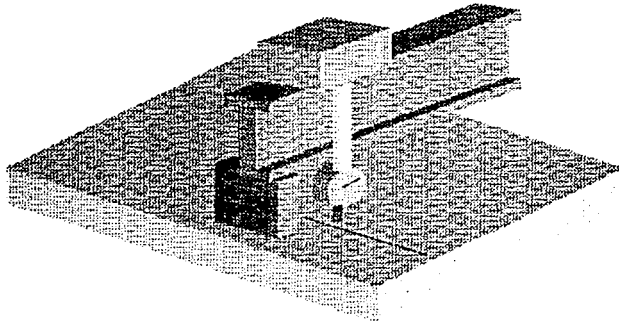


Ilustración 8: Utilizando comparador y regla.

✓ Nivel de burbuja.

La verificación de la planitud con el nivel de burbuja es aplicable al control de superficies planas de cualquier dimensión, siempre que se encuentren en posición sensiblemente horizontal. Es ampliamente utilizada por suprimir los errores de medición a que puede dar lugar el empleo de una regla debido a errores de rectitud o a flexión de ésta. Por otra parte el empleo de nivel permite verificar simultáneamente la planitud y la nivelación de la superficie que se comprueba. Sobre esta particular debe tenerse en cuenta, que aún cuando una máquina herramienta puede ser en teoría geoméricamente correcta, aún sin que la bancada se encuentre horizontal, la experiencia demuestra que es preferible que el plano de referencia de las guías de la bancada sea horizontal; con esto, además de lograrse mejores resultados en el empleo de la máquina, se simplifican muchas de sus verificaciones geométricas, empleando el nivel.

El procedimiento de verificar la planitud con el nivel puede considerarse constituido por tres fases:

- Nivelación general.
- Medición de alabeo.
- Comprobación de la planitud de la superficie en sus diversos puntos.

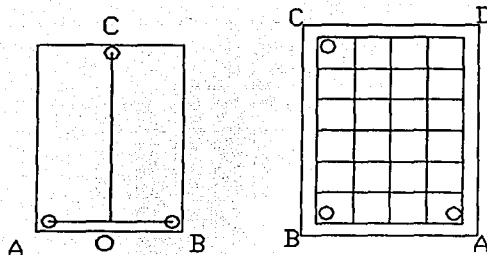


Ilustración 9: Utilización del nivel de burbuja

Para proceder a la nivelación general se apoya la pieza cuya planitud se trata de verificar, sobre tres gatos o puntos de altura regulable, se traza una cuadrícula. Se procede entonces a la nivelación según la dirección AB, actuando sobre los apoyos regulables de estos puntos y utilizando el nivel de burbuja como elemento de comprobación de la horizontalidad. A continuación se nivela el mármol según CO sensiblemente perpendicular a la anterior, actuando exclusivamente sobre el apoyo regulable de C, con lo cual no se destruirá la nivelación previa según la dirección AB.

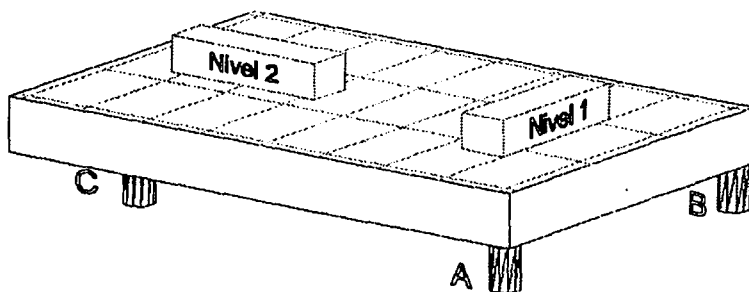


Ilustración 10: Nivelación.

Capítulo 3: Métodos.

Esta operación tiene como objeto lograr una nivelación aproximada del mármol antes de proceder a la comprobación del alabeo de uno de los ángulos del mármol. Efectuada la nivelación general puede procederse a la medición del alabeo. Para ello y como se trata de una primera operación para la comprobación de la planitud, se comienza por trazar una cuadrícula dividida en longitudes iguales tanto en su longitud como en su ancho, se procede después a la nivelación precisa de los puntos A y B, para ello se utiliza una regla de caras paralelas apoyada sobre dos bloques patrón de igual altura situadas en los puntos A y B, el nivel se sitúa en el centro de la regla, con lo que se elimina un posible error debido a la flexión de la regla. Se nivela seguidamente el punto C con respecto a B, procediendo en la misma forma que para la nivelación de A y B, con esto se logra la fijación de un plano horizontal de referencia, determinado por los puntos, A, B y C. Midiendo el desnivel entre el punto D y el C, se obtiene el valor del alabeo del mármol. El alabeo puede medirse con el nivel sin establecer la horizontalidad del plano A B C cuando esto no sea necesario para ulteriores trabajos; el valor del alabeo vendrá dado por la diferencia entre los desniveles de D con respecto a C y de A con respecto a B.

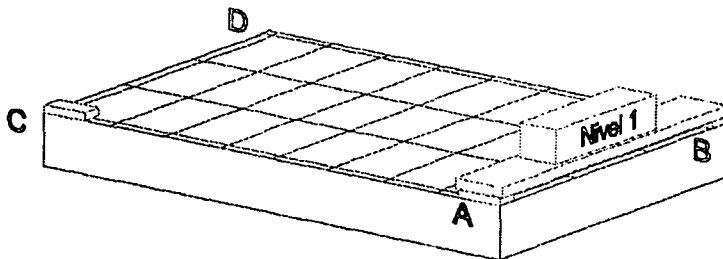


Ilustración 11: Alabeo.

La comprobación de la planitud de la superficie con el nivel, se realiza por último, hallando los desniveles de los distintos puntos de la cuadrícula por el método de las pendientes. La nivelación de los distintos puntos a lo largo de cada línea tiene el inconveniente de acumular los errores de cada medición, sin embargo, operando el local isotérmico con niveles micrométricos

Capítulo 3: Métodos.

de alta precisión, pueden lograrse resultados con errores inferiores a $\pm 0,5$ micrómetros por metro.

✓ **Examinadores de superficies planas del tipo indicador.**

Estos instrumentos se emplean únicamente para hacer verificaciones de planitud local de la superficie en una serie de porciones pequeñas sin llegar a ser una medición de planitud formal. Operan en principio, seleccionando una parte de la superficie a inspeccionar como un plano que es tomado como de referencia, así como de soporte para uno de los instrumentos de medición. Otro de dichos instrumentos sirve de yunque de un indicador mecánico sensitivo con graduaciones de por lo menos de 50 ó 20 micro-pulgadas.

El sensor del indicador es puesto en contacto, directamente o través de un elemento intermedio, con una porción de la superficie que uniéndose a la que sirve de yunque, se forma un plano de referencia. Las desviaciones detectadas entre la última medición y la que sirve de referencia, indican inmediatamente la uniformidad en planitud de la superficie inspeccionada.

El miembro de soporte debe ser de granito de bordes rectos, ofreciendo una brecha sobre el elemento seleccionado para ser medido por el indicador; un bloque de acero descansando sobre una base de carburo, y un brazo extensible donde es montado un indicador, al momento de ir tocando el indicador la superficie a ser analizada, el indicador va detectando las pequeñas diferencias en el nivel, con respecto a su referencia, y lo indica en la carátula, un valor lineal. Estos instrumentos no son recomendados para una medición de gran exactitud para condiciones de planitud sobre una superficie completa, pero puede ser útil para una medición rápida, y así decidir si es necesario utilizar un método más exacto.

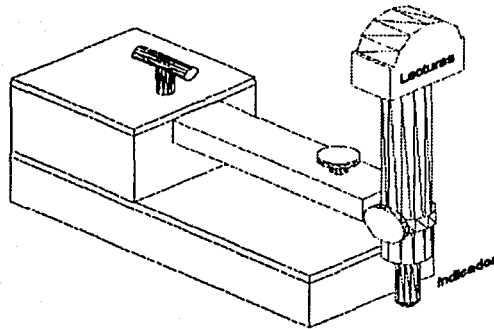


Ilustración 12: Examinador tipo indicador.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

✓ **Inspección de superficies planas utilizando autocolimador.**

En este método se utilizan reflectores y autocolimadores, la desviación angular de secciones adjuntas es medida a lo largo de líneas específicas sobre la superficie, y los resultados son evaluados con relación a un plano de referencia seleccionado. Sobre la superficie se trazan ocho líneas, estas son cuatro perimetrales, dos diagonales y dos centrales. El instrumento utilizado para la deflexión angular es el autocolimador¹⁴, el cual es utilizado para observar un reflector puesto en diferentes posiciones consecutivas a lo largo de cada uno de los trazos realizados en la superficie, el autocolimador no es apuntado directamente al reflector, sino a un espejo intermedio colocado cerca de la esquina de la mesa, por ello se habla frecuentemente de la esquina-espejo.

Este arreglo de dos reflectores tiene la ventaja de que el autocolimador debe ser puesto en la posición particular sobre la mesa donde el instrumento puede ser más convenientemente operado, pero sin interferencia con la exploración a lo largo de todo el trazo sobre la mesa por el subsiguiente posicionamiento del reflector. La longitud trazada se divide en segmentos iguales, dependiendo del tamaño de reflector que se desplaza. Para guiar al reflector durante el proceso de medición sobre un borde recto, el autocolimador se fija a la mesa en un extremo del

¹⁴ Instrumento óptico provisto de un retículo, que mediante la reflexión de rayos luminosos sobre una superficie plana, se puede orientar perpendicularmente a dicha superficie. El anteojo autocolimador sirve para medir ángulos, se utiliza particularmente en el goniómetro (instrumento que sirve para medir ángulos) para determinar los índices de refracción.

Capítulo 3: Métodos.

trazo que va a ser inspeccionado, y el reflector es posicionado paso a paso, en puntos adyacentes, procurando que el punto de apoyo coincida con uno de los puntos de apoyo de la medición anterior.

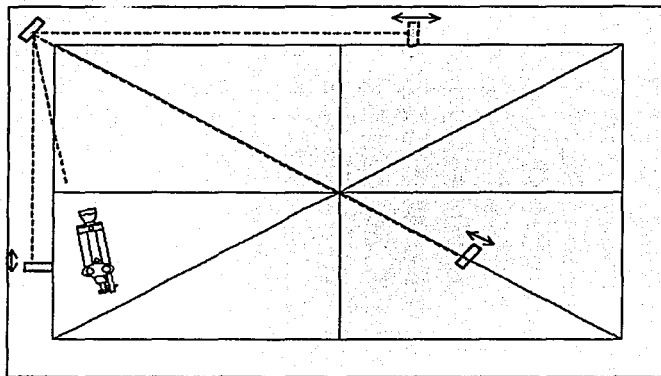


Ilustración 13: Método de Union Jack

Existen varios métodos, que funcionan con principios parecidos, que han sido desarrollados para la evaluación de planitud, utilizando un autocolimador. Los resultados obtenidos a lo largo de los trazos individuales son correlacionados a un plano de referencia, que abarca tres puntos importantes de la superficie, tales como tres esquinas de la mesa, o el centro y dos esquinas al final de uno de los lados más largos de la mesa. Finalmente la relación de los valores obtenidos es hecha a través del uso de una función aritmética, tomando en cuenta la diferencia en valor, de los datos obtenidos en cada medición, en unidades lineales, representando elevaciones diferentes. Se realiza una distribución de líneas de medición conocida como Union Jack, las diferentes elevaciones con respecto al plano de referencia se expresan en micrómetros o bien en unidades de $1/100,000$ de pulgada, sin puntos decimales logrando una representación topográfica de la superficie con la cual, también se logra determinar que parte de la mesa cuenta con las mejores condiciones de planitud, para ser usada en mediciones que requieren de mayor exactitud.

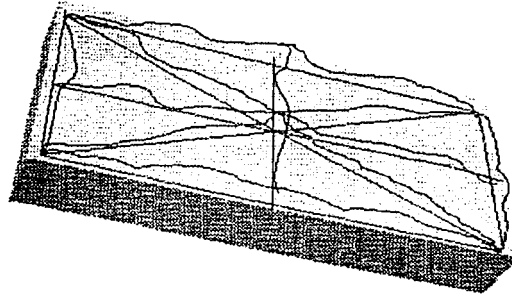


Ilustración 14: Mapa topográfico generado por el método de Union Jack.

Existe un método basado en el anterior, con la única diferencia, de que el posicionamiento del reflector a lo largo de los trazos no se hace manualmente, sino por medio de un motor y un dispositivo que funciona por medio de cable y cadena, las desviaciones del reflector durante el trayecto causan señales que son detectadas por un autocolimador electrónico, complementado con un sistema de captación de datos. Las señales enviadas se van imprimiendo en una hoja, cuya velocidad está en relación constante con el movimiento traslacional del reflector. La línea resultante trazada con los datos representa el desnivel a lo largo de cada trazo, se calibra para dar resultado del orden de segundos de arco. Este método requiere menor cantidad de tiempo para realizar las mediciones y obtener resultados, pero su costo es prohibitivo para muchos casos.

✓ **Ejemplo de Medición utilizando el Método de Union Jack.**

En este ejemplo de medición se utilizó un nivel electrónico en lugar de un autocolimador para medir los desniveles en cada punto de medición a lo largo de las líneas que conforman la distribución Union Jack. Las dimensiones de la mesa de granito son: 36 x 72 x 8 pulgadas, (914,4 x 1829 x 203 mm) marca Minutoyo Graphplate, grado B. La mesa pertenece a una empresa ubicada en Tlalnepantla Estado de México.

Capítulo 3: Métodos.

Lo primero que se hace es limpiar la superficie de la mesa, para que las partículas de polvo o grasa no afecten las mediciones, posteriormente se coloca el nivel en el centro de la mesa y se toman las lecturas tanto en la dirección de la perimetral larga, como de la perimetral corta. La perimetral larga es aquella de los lados de la mesa de referencia que tiene la longitud mayor, y la perimetral corta, es el lado respectivo que tiene la longitud menor. Después de hacer un cero manual por medio del amplificador digital, con lo que se determina la inclinación de la mesa, se realiza un ajuste por medio de los tornillos destinados para ello, que se encuentran en la base sobre la que se encuentra la mesa, se trata de nivelar lo más posible la mesa antes de realizar las mediciones.

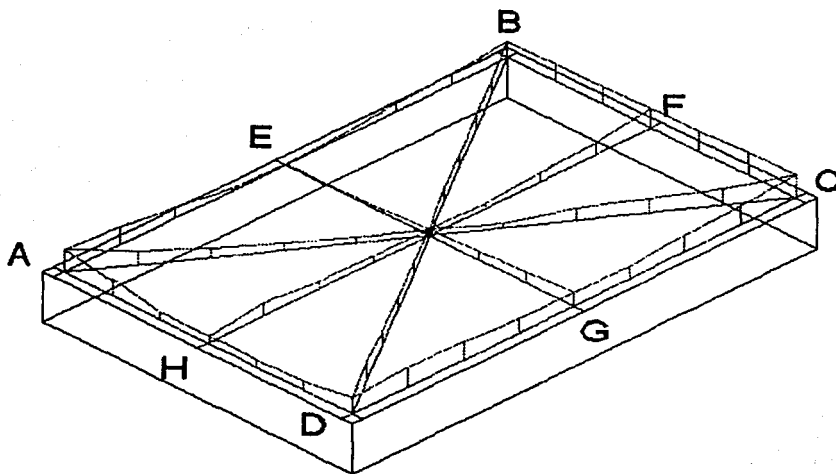


Ilustración 15: Método de Union Jack con la designación de las letras que conforman las líneas o trayectorias.

Se hacen divisiones a lo largo de las perimetrales y diagonales, tratando de que se ajuste a un número par, de tal forma que el nivel electrónico ajuste a estas divisiones. Haciendo lo anterior, se hicieron divisiones de la siguiente forma:

Capítulo 3: Métodos.

Paso perimetral largo: 11,17 (cm).

Divisiones perimetrales largas: 16

Paso perimetral corto: 10,92 (cm).

Divisiones perimetrales cortas: 8

Paso diagonal: 11,05 (cm).

Divisiones diagonales: 18

Se hacen tres mediciones de cada división, se calcula la media, y con dicho valor se calcula la altura "h", a la cual se encuentra dicho punto, dicho valor se expresa en micrómetros, por facilidad en el manejo de datos.

#	Perimetral AB (seg.)			Promedio AB
1	0	0	0	0,0
2	28	31	32	30,3
3	22	23	23	22,7
4	27	28	28	27,7
5	18	19,5	20	19,2
6	11,5	12	12	11,8
7	5	7	6	6,0
8	-6,5	-1	-1	-2,8
9	-5,5	-5	-5	-5,2
10	-9	-8	-9	-8,7
11	-4	-9	-9	-7,3
12	-7	-8	-7	-7,3
13	-8	-7	-7,5	-7,5
14	-10	-10	-10	-10,0
15	-13	-12	-13	-12,7
16	-16	-17	-16	-16,3
17	-24	-24	-25	-24,3

Tabla 4: Perimetral AB

Capítulo 3: Métodos.

#	Central HF (seg.)			Promedio HF
1	0	0	0	0,0
2	16	17	16	16,3
3	18	19	18	18,3
4	22	22	22	22,0
5	21	21	21	21,0
6	17	19	17	17,7
7	19	12	19	16,7
8	13	4	13	10,0
9	15	1	1	5,7
10	2	1	-2	0,3
11	1	-3	2	0,0
12	1	-3	-3	-1,7
13	-2	-4	-5	-3,7
14	-6	-10	-7	-7,7
15	-9	-15	-16	-13,3
16	-15	-17	-19	-17,0
17	-21	-20	-21	-20,7

Tabla 5: HF

#	Perimetral DC (seg.)			Promedio DC
1	0	0	0	0,0
2	20	20	20	20,0
3	10	9	10	9,7
4	11	11	11	11,0
5	11	11	11	11,0
6	12	12	12	12,0
7	12	10	12	11,3
8	13	12	13	12,7
9	16	11	16	14,3
10	12	11	12	11,7
11	12	7	12	10,3
12	2	1	2	1,7
13	-4	-3	-4	-3,7
14	-11	-12	-11	-11,3
15	-14	-12	-14	-13,3
16	-10	-10	-10	-10,0
17	-22	-23	-22	-22,3

Tabla 6: DC

Capítulo 3: Métodos.

#	Perimetral AD (seg.)			Promedio AD
1	0	0	0	0,0
2	7	7	7	7,0
3	-7	-7	-7	-7,0
4	-6	-7	-6	-6,3
5	-8	-8	-8	-8,0
6	-10	-11	-10	-10,3
7	-11	-11	-11	-11,0
8	-13	-15	-14	-14,0
9	-31	-29	-31	-30,3

Tabla 7: AD

#	Central EG (seg.)			Promedio EG
1	0	0	0	0
2	-11	-11	-11	-11,0
3	-6	-5	-4	-5,0
4	5	5	5	5,0
5	5	6	5	5,3
6	-9	-8	-8	-8,3
7	-21	-22	-21	-21,3
8	-25	-26	-26	-25,7
9	-31	-28	-29	-29,3

Tabla 8: EG

#	Perimetral BC (seg.)			Promedio BC
1	0	0	0	0,0
2	4	5	4	4,3
3	3	4	3	3,3
4	9	8	8	8,3
5	6	6	6	6,0
6	2	2	1	1,7
7	-4	-4	-5	-4,3
8	-14	-15	-15	-14,7
9	-34	-34	-34	-34,0

Tabla 9: Perimetral BC

Capítulo 3: Métodos.

#	Diagonal AC (seg.)			Promedio AC
1	0	0	0	0,0
2	26	26	27	26,3
3	17	16	17	16,7
4	17	18	18	17,7
5	11	12	12	11,7
6	10	10	11	10,3
7	10	11	11	10,7
8	4	5	4	4,3
9	1	1	1	1,0
10	-1	-1	-1	-1,0
11	-2	-2	-1	-1,7
12	-2	-2	-3	-2,3
13	-6	-5	-5	-5,3
14	-12	-15	-11	-12,7
15	-15	-15	-15	-15,0
16	-22	-21	-20	-21,0
17	-22	-22	-22	-22,0
18	-27	-26	-26	-26,3
19	-38	-37	-38	-37,7

Tabla 10: Diagonal AC

#	Diagonal BD (seg.)			Promedio BD
1	0	0	0	0,0
2	29	29	29	29,0
3	19	18	18	18,3
4	15	15	15	15,0
5	13	12	13	12,7
6	13	14	14	13,7
7	15	12	12	13,0
8	8	8	8	8,0
9	9	9	9	9,0
10	5	6	5	5,3
11	-3	-3	-4	-3,3
12	-13	-13	-13	-13,0
13	-26	-32	-26	-28,0
14	-30	-24	-31	-28,3
15	-25	-26	-21	-24,0
16	-18	-17	-19	-18,0
17	-11	-11	-11	-11,0
18	-12	-12	-13	-12,3
19	-28	-28	-29	-28,3

Tabla 11: Diagonal BD

Capítulo 3: Métodos.

El nivel electrónico, mide segundos de arco, lo cual se muestra en la pantalla del dispositivo de salida de datos, dicho valor se transforma en radianes, para calcular la altura a la cual se encuentra cada punto, por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{altura} = (\text{Paso}) * \text{sen } \alpha$$

El paso cambia de acuerdo a si se trata de la perimetral larga, corta o diagonal, los valores se hayan indicados antes de las tablas precedentes. Aquí es importante resaltar la forma en que se deben hacer los cálculos para determinar las alturas de cada punto, ya que es fácil cometer el error de no ir calculando el valor acumulativo. Sobre cada trayectoria de medición se deben ir tomando en cuenta los resultados inmediatos anteriores al ir calculando cada altura, para ejemplificar lo anterior, consideremos una trayectoria aleatoria como la siguiente:

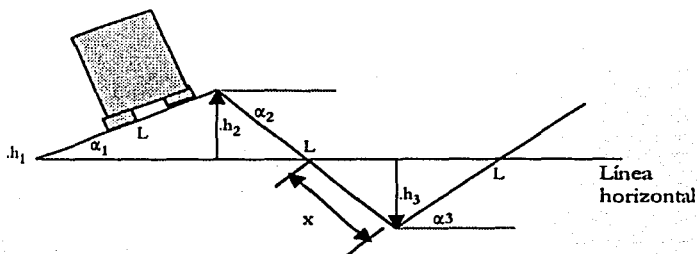


Ilustración 16: Cálculo de las alturas.

Para calcular h_2 se procede de la forma siguiente:

$$\text{sen } \alpha_1 = h_1/L,$$

$$h_2 = L \text{ sen } \alpha + h_1$$

Para obtener el valor de la altura h_3 , se necesita conocer la distancia x , esto es:

$$h_3 = x \text{ sen } \alpha_2.$$

Dado que la distancia conocida es L , se puede calcular la altura en h_3 utilizando la altura anterior que es conocida, y este procedimiento se aplica para el resto de las mediciones:

Capítulo 3: Métodos.

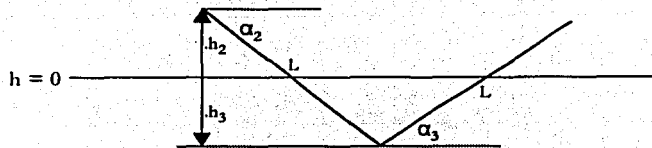


Ilustración 17: Acumulado.

Vectorialmente:

$$h_3 - h_2 = L \operatorname{sen} \alpha_2$$

$$h_3 = h_2 + L \operatorname{sen} \alpha_2$$

Hecho lo anterior se obtienen los valores en micrómetros de todas las alturas en cada una de las perimetrales y diagonales:

Promedio AB	Grados	Radianes	Sen	mm	micrómetros	acumulado
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
30,3	0,0084	0,0001	0,0001	0,0164	16,43	16,43
22,7	0,0063	0,0001	0,0001	0,0123	12,27	28,70
27,7	0,0077	0,0001	0,0001	0,0150	14,98	43,68
19,2	0,0053	0,0001	0,0001	0,0104	10,38	54,06
11,8	0,0033	0,0001	0,0001	0,0064	6,41	60,47
6,0	0,0017	0,0000	0,0000	0,0032	3,25	63,72
-2,8	-0,0008	-0,0000	-0,0000	-0,0015	-1,53	62,19
-5,2	-0,0014	-0,0000	-0,0000	-0,0028	-2,80	59,39
-8,7	-0,0024	-0,0000	-0,0000	-0,0047	-4,69	54,70
-7,3	-0,0020	-0,0000	-0,0000	-0,0040	-3,97	50,72
-7,3	-0,0020	-0,0000	-0,0000	-0,0040	-3,97	46,75
-7,5	-0,0021	-0,0000	-0,0000	-0,0041	-4,06	42,69
-10,0	-0,0028	-0,0000	-0,0000	-0,0054	-5,42	37,28
-12,7	-0,0035	-0,0001	-0,0001	-0,0069	-6,86	30,42
-16,3	-0,0045	-0,0001	-0,0001	-0,0088	-8,85	21,57
-24,3	-0,0068	-0,0001	-0,0001	-0,0132	-13,18	8,39

Tabla 12: Acumulado AB

Capítulo 3: Métodos.

Promedio HF	Grados	Radianes	Sen	mm	micrómetros	acumulado
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
16,3	0,0045	0,0001	0,0001	0,0088	8,85	8,85
18,3	0,0051	0,0001	0,0001	0,0099	9,93	18,77
22,0	0,0061	0,0001	0,0001	0,0119	11,91	30,69
21,0	0,0058	0,0001	0,0001	0,0114	11,37	42,06
17,7	0,0049	0,0001	0,0001	0,0096	9,57	51,63
16,7	0,0046	0,0001	0,0001	0,0090	9,03	60,65
10,0	0,0028	0,0000	0,0000	0,0054	5,42	66,07
5,7	0,0016	0,0000	0,0000	0,0031	3,07	69,14
0,3	0,0001	0,0000	0,0000	0,0002	0,18	69,32
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	69,32
-1,7	-0,0005	-0,0000	-0,0000	-0,0009	-0,90	68,41
-3,7	-0,0010	-0,0000	-0,0000	-0,0020	-1,99	66,43
-7,7	-0,0021	-0,0000	-0,0000	-0,0042	-4,15	62,28
-13,3	-0,0037	-0,0001	-0,0001	-0,0072	-7,22	55,06
-17,0	-0,0047	-0,0001	-0,0001	-0,0092	-9,21	45,85
-20,7	-0,0057	-0,0001	-0,0001	-0,0112	-11,19	34,66

Tabla 13: Acumulado HF

Promedio DC	Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	Acumulado
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
20,0	0,0056	0,0001	0,0001	0,0108	10,83	10,83
9,7	0,0027	0,0000	0,0000	0,0052	5,23	16,07
11,0	0,0031	0,0001	0,0001	0,0060	5,96	22,02
11,0	0,0031	0,0001	0,0001	0,0060	5,96	27,98
12,0	0,0033	0,0001	0,0001	0,0065	6,50	34,48
11,3	0,0031	0,0001	0,0001	0,0061	6,14	40,62
12,7	0,0035	0,0001	0,0001	0,0069	6,86	47,47
14,3	0,0040	0,0001	0,0001	0,0078	7,76	55,24
11,7	0,0032	0,0001	0,0001	0,0063	6,32	61,55
10,3	0,0029	0,0001	0,0001	0,0056	5,60	67,15
1,7	0,0005	0,0000	0,0000	0,0009	0,90	68,05
-3,7	-0,0010	-0,0000	-0,0000	-0,0020	-1,99	66,07
-11,3	-0,0031	-0,0001	-0,0001	-0,0061	-6,14	59,93
-13,3	-0,0037	-0,0001	-0,0001	-0,0072	-7,22	52,71
-10,0	-0,0028	-0,0000	-0,0000	-0,0054	-5,42	47,29
-22,3	-0,0062	-0,0001	-0,0001	-0,0121	-12,09	35,20

Tabla 14: Acumulado DC

Capítulo 3: Métodos.

Promedio AD	Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	Acumulado
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
7,0	0,0019	0,0000	0,0000	0,0037	3,71	3,71
-7,0	-0,0019	-0,0000	-0,0000	-0,0037	-3,71	0,00
-6,3	-0,0018	-0,0000	-0,0000	-0,0034	-3,35	-3,35
-8,0	-0,0022	-0,0000	-0,0000	-0,0042	-4,24	-7,59
-10,3	-0,0029	-0,0001	-0,0001	-0,0055	-5,47	-13,06
-11,0	-0,0031	-0,0001	-0,0001	-0,0058	-5,82	-18,88
-14,0	-0,0039	-0,0001	-0,0001	-0,0074	-7,41	-26,29
-30,3	-0,0084	-0,0001	-0,0001	-0,0161	-16,06	-42,35

Tabla 15: Acumulado AD

Promedio EG	Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	acumulado
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
-11,0	-0,0031	-0,0001	-0,0001	-0,0058	-5,82	-5,82
-5,0	-0,0014	-0,0000	-0,0000	-0,0026	-2,65	-8,47
5,0	0,0014	0,0000	0,0000	0,0026	2,65	-5,82
5,3	0,0015	0,0000	0,0000	0,0028	2,82	-3,00
-8,3	-0,0023	-0,0000	-0,0000	-0,0044	-4,41	-7,41
-21,3	-0,0059	-0,0001	-0,0001	-0,0113	-11,29	-18,71
-25,7	-0,0071	-0,0001	-0,0001	-0,0136	-13,59	-32,29
-29,3	-0,0081	-0,0001	-0,0001	-0,0155	-15,53	-47,82

Tabla 16: Acumulado EG

Promedio BC	Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	Acumulado
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
4,3	0,0012	0,0000	0,0000	0,0023	2,29	2,29
3,3	0,0009	0,0000	0,0000	0,0018	1,76	4,06
8,3	0,0023	0,0000	0,0000	0,0044	4,41	8,47
6,0	0,0017	0,0000	0,0000	0,0032	3,18	11,65
1,7	0,0005	0,0000	0,0000	0,0009	0,88	12,53
-4,3	-0,0012	-0,0000	-0,0000	-0,0023	-2,29	10,24
-14,7	-0,0041	-0,0001	-0,0001	-0,0078	-7,76	2,47
-34,0	-0,0094	-0,0002	-0,0002	-0,0180	-18,00	-15,53

Tabla 17: Acumulado BC.

Capítulo 3: Métodos.

Promedio AC	Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	Acumulado
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
26,3	0,0073	0,0001	0,0001	0,0141	14,11	14,11
16,7	0,0046	0,0001	0,0001	0,0089	8,93	23,04
17,7	0,0049	0,0001	0,0001	0,0095	9,46	32,50
11,7	0,0032	0,0001	0,0001	0,0063	6,25	38,75
10,3	0,0029	0,0001	0,0001	0,0055	5,54	44,29
10,7	0,0030	0,0001	0,0001	0,0057	5,71	50,00
4,3	0,0012	0,0000	0,0000	0,0023	2,32	52,32
1,0	0,0003	0,0000	0,0000	0,0005	0,54	52,86
-1,0	-0,0003	-0,0000	-0,0000	-0,0005	-0,54	52,32
-1,7	-0,0005	-0,0000	-0,0000	-0,0009	-0,89	51,43
-2,3	-0,0006	-0,0000	-0,0000	-0,0013	-1,25	50,18
-5,3	-0,0015	-0,0000	-0,0000	-0,0029	-2,86	47,32
-12,7	-0,0035	-0,0001	-0,0001	-0,0068	-6,79	40,54
-15,0	-0,0042	-0,0001	-0,0001	-0,0080	-8,04	32,50
-21,0	-0,0058	-0,0001	-0,0001	-0,0113	-11,25	21,25
-22,0	-0,0061	-0,0001	-0,0001	-0,0118	-11,79	9,46
-26,3	-0,0073	-0,0001	-0,0001	-0,0141	-14,11	-4,64
-37,7	-0,0105	-0,0002	-0,0002	-0,0202	-20,18	-24,82

Tabla 18: Acumulado AC

Promedio BD	Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	acumulado
0,0	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00
29,0	29,0	0,0081	0,0001	0,0001	0,0155	15,54
18,3	18,3	0,0051	0,0001	0,0001	0,0098	9,82
15,0	15,0	0,0042	0,0001	0,0001	0,0080	8,04
12,7	12,7	0,0035	0,0001	0,0001	0,0068	6,79
13,7	13,7	0,0038	0,0001	0,0001	0,0073	7,32
13,0	13,0	0,0036	0,0001	0,0001	0,0070	6,96
8,0	8,0	0,0022	0,0000	0,0000	0,0043	4,29
9,0	9,0	0,0025	0,0000	0,0000	0,0048	4,82
5,3	5,3	0,0015	0,0000	0,0000	0,0029	2,86
-3,3	-3,3	-0,0009	-0,0000	-0,0000	-0,0018	-1,79
-13,0	-13,0	-0,0036	-0,0001	-0,0001	-0,0070	-6,96
-28,0	-28,0	-0,0078	-0,0001	-0,0001	-0,0150	-15,00
-28,3	-28,3	-0,0079	-0,0001	-0,0001	-0,0152	-15,18
-24,0	-24,0	-0,0067	-0,0001	-0,0001	-0,0129	-12,86
-18,0	-18,0	-0,0050	-0,0001	-0,0001	-0,0096	-9,54
-11,0	-11,0	-0,0031	-0,0001	-0,0001	-0,0059	-5,89
-12,3	-12,3	-0,0034	-0,0001	-0,0001	-0,0066	-6,61
-28,3	-28,3	-0,0079	-0,0001	-0,0001	-0,0152	-15,18

Tabla 19: Acumulado BD

Como puede observarse, cada línea del arreglo Union Jack ha sido medida independientemente de las demás, sin embargo mediante un algoritmo matemático para rotación y traslación de las líneas consideradas rígidas, se puede lograr un “amarre” en los puntos donde dos o más de éstas coinciden.

Teniendo los valores acumulados de cada línea o “recta”, se hacen los cálculos necesarios como sigue:

Se rota la diagonal AC empleando al punto A como eje de giro hasta que C adquiera el valor de A, de la misma manera se ajusta la diagonal BD, igualando el valor de su extremo en D con el valor correspondiente en el punto B y posteriormente se traslada ésta última a fin de hacer coincidir los puntos medios de ambas diagonales.

Utilizando esta misma técnica, los extremos de las rectas perimetrales AB, BC, CD y AD se “amarran” con los correspondientes puntos de las diagonales previamente ajustadas.

Finalmente, las rectas centrales EG y HF se “amarran” a los correspondientes puntos medios de las rectas perimetrales.

Con todo lo anterior se obtienen nuevos valores en el centro geométrico de la mesa, la diferencia entre el valor mayor y el menor es la incertidumbre¹⁵ debida a lo que se le denomina error de cerradura de la medición, que es una de las fuentes de error que componen la incertidumbre total.

✓ CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE

Modelo matemático para el cálculo de la incertidumbre:

$$u = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (1).$$

Para el cálculo de la incertidumbre se consideran las siguientes fuentes de error

¹⁵ La incertidumbre de un número a se escribe ϵa y es igual $a : \epsilon a = |\Delta a| = |a^* - a|$, donde a^* es la aproximación de a . Se verifica $a^* - \epsilon a < a < a^* + \epsilon a$.

Capítulo 3: Métodos.

- u_p incertidumbre del nivel (patrón).
- u_{re} resolución del patrón.
- u_{ce} incertidumbre de cerradura.
- u_{ze} incertidumbre de origen (retorno a cero).
- u_d incertidumbre debida a la dispersión de los datos.

La incertidumbre del nivel es proporcionada por su certificado de calibración. Para un nivel electrónico con valor de una división 0,1 seg. (0,0005 mm /m) para un nivel de confianza de 95%.

$$u_1 = u_p / 2 = 0,0005/2 = 0,0003 \text{ mm /m}$$

La resolución del indicador digital es 0,1 seg. (0,0005 mm /m),

$$u_2 = u_{re} = 0,0005/\sqrt{3} = 0,0003 \text{ mm /m}$$

El error de cerradura es función de las condiciones en que las mediciones fueron realizadas, del estado de desgaste de la superficie plana y de la resolución del nivel es determinado por la diferencia entre la cota vertical de las diagonales y de las rectas EG y HF. Valores orientativos son 0,001 a 0,006 mm (amplitud).

$$u_3 = u_{ce} = 0,003/\sqrt{3} = 0,002 \text{ mm /m}$$

Error de retorno, generalmente es equivalente a la resolución, en el presente caso se tiene:

$$u_4 = u_{ze} = 0,0005/\sqrt{3} = 0,0003 \text{ mm /m}$$

La dispersión de los resultados es determinada por la media de las desviaciones estándar de todas las 8 rectas con 3 repeticiones. Valores típicos son 0,0005 mm /m.

$$u_5 = u_d = \sigma/\sqrt{3}$$

Obtenidos los datos anteriores se sustituyen, en la expresión (1) para obtener el valor de la incertidumbre total:

$$u = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

Capítulo 3: Métodos.

donde k es el nivel de confianza de la incertidumbre expandida presentada, que es la incertidumbre estándar de medición multiplicada por el factor de cobertura $k = 2$, que para una distribución normal corresponde a una probabilidad de aproximadamente 95%.

Cada término de la sumatoria corresponde a una fuente de incertidumbre para el presente caso. El resultado se expresa posteriormente en micrómetros, para que las unidades sean compatibles con las del error de planitud.

A continuación se deben de ajustar los valores de los puntos medios de aquellas rectas que no coincidieron con el valor correspondiente al que poseen las rectas AC y BD, que es el mismo, dichas rectas son la HF y la EG.

El proceso para ajustar estas rectas varía sensiblemente al proceso antes descrito, ya que cada recta se divide en dos partes, a partir de su punto medio con lo cual se deben abatir dos rectas en lugar de una, abatiéndose de sus extremos hacia el punto medio, con lo cual se asegura que todas las rectas que pasan por el centro geométrico de la mesa coinciden en sus puntos medios.

Con lo anterior, se busca el punto negativo más alejado de cero, y ese valor se suma a todos los puntos de todas las rectas con lo que se asegura que todos sean positivos y se sabe que el menor es de valor cero. El error de planitud corresponde al mayor valor. A continuación se listan los resultados de los cálculos que se acaban de mencionar así como los valores de la incertidumbre y el error de planitud para el ejemplo descrito:

Capítulo 3: Métodos.

Nuevos Valores [micrómetros, μm]

AC:	BD:	AB:	DC:	AD:	BC:	HF:	EG:
0,0	-13,0	0,0	-13,0	0,0	-13,0	7,1	48,7
15,5	3,8	15,1	-3,6	7,4	-7,2	15,1	46,6
25,8	14,8	26,0	0,3	7,3	-1,8	22,2	47,8
36,6	24,1	39,7	4,8	7,6	6,1	32,4	54,2
44,3	32,2	48,7	9,4	7,1	12,9	41,9	60,8
51,2	40,8	53,8	14,5	5,3	17,3	49,7	60,2
58,3	49,0	55,7	19,3	3,1	18,6	56,9	52,7
62,0	54,5	52,8	24,7	-0,6	14,4	60,5	42,9
63,9	60,6	48,7	31,1	-13,0	0,0	61,8	31,1
64,7	64,7	42,6	36,1	60,2			
65,2	64,2	37,3	40,3	58,4			
65,3	58,5	32,0	39,8	5,7			
63,9	44,8	26,6	36,4	51,9			
58,5	30,8	19,9	28,9	45,9			
51,8	19,2	11,7	20,3	36,9			
41,9	10,9	1,5	13,5	25,9			
31,5	6,2	-13,0	0	12,9			
18,8	0,9						
0,0	-13,0						

Tabla 20: Nuevos valores

Los valores en el centro geométrico de la mesa son:

Punto medio de AC:	64,7
Punto medio de BD:	64,7
Punto medio de HF:	61,8
Punto medio de EG:	60,8

Valor mayor:	64,7
Valor menor:	60,8

Error de cerradura:	Micrómetros	Milímetros
	3,92	0,004

La media de las desviaciones estándar de las mediciones es 0,88 se divide entre la raíz de tres, que es el número de las mediciones, se obtiene el error debido a la dispersión de los datos. El

Capítulo 3: Métodos.

nivel utilizado tiene una resolución mínima de 0,1 segundos de arco que es igual 0,00048 mm, este dato nos sirve para determinar el error de retorno. La siguiente tabla muestra los resultados de las fuentes de error, sustituyendo en las ecuaciones antes mencionadas, los resultados tienen unidades de segundos de arco.

$u_p =$	0,0015
$u_{\text{dispersión}} =$	0,0002
$u_{re} =$	0,0009
$u_{ce} =$	0,0023
$u_{ze} =$	0,00004

Cuadro de incertidumbres:

Magnitud	Estimación	Incertidumbre estándar	Distribución de prob.
$u_p =$	0	0,0015	normal
$u_{\text{dispersión}} =$	78,4	0,0002	normal
$u_{re} =$	0	0,0009	rectangular
$u_{ce} =$	0	0,0023	rectangular
$u_{ze} =$	0	0,0000	rectangular

La incertidumbre total es:

$$u = k * \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

donde: u_i es cada una de las fuentes de incertidumbre y $k = 2$. La incertidumbre expandida es igual a 0,00573 mm = 5,73 micrómetros.

Capítulo 3: Métodos.

Después de ajustar los valores de las rectas HF y EG en sus puntos medios:

Nuevos valores de HF:	Nuevos valores de EG:
7,1	48,7
15,5	47,6
23,0	49,7
33,5	57,1
43,4	64,7
51,5	63,1
59,1	54,6
63,1	43,8
64,7	31,1
62,7	
60,6	
57,5	
53,3	
47,0	
37,6	
26,3	
12,9	

De todos los resultados de las rectas se determinan los valores máximo y mínimo en micrómetros:

Valor Máximo de entre todas las rectas:	78,4
Valor Mínimo de entre todas las rectas:	0,0

Error de planitud $\pm 5,80$ micrómetros

Capítulo 4.

Diseño y Construcción del Sistema.

La secuencia de diseño utilizada se basa en la caracterización del diseño total según Stuart Pugh [11], investigador de la Universidad de Strathclyde, Inglaterra.

□ Detección de la necesidad en el mercado.

En el presente caso, el cliente es el Laboratorio de Metrología del Centro de Instrumentos de la UNAM (CIUNAM), el cual ha detectado la necesidad de desarrollar un algoritmo de medición alternativo que simplifique la toma de datos durante el proceso de calibración de mesas de referencia, específicamente aquellas de dimensiones de 600 x 900 mm, ya que son las que tienen mayor número de solicitudes de calibración y el CIUNAM cuenta con una mesa de estas dimensiones, con la cual se pueden realizar las mediciones necesarias. El algoritmo a utilizar debe estar basado en la utilización de mallas ortogonales, y estar en ambiente Windows (Excel).

□ Especificaciones.

Una consideración de importancia es que ha de emplearse únicamente el instrumental con el que cuenta el Laboratorio de Metrología del CIUNAM, es decir, no adquirir nuevos instrumentos.

Los aspectos que se deben cumplir son: que el sistema sea portátil, esto es, que una sola persona pueda cargarlo; que sus dimensiones permitan llevarlo en un automóvil pequeño al sitio donde se encuentre la mesa a calibrar; que la distribución de puntos de toma de lecturas sobre la superficie de la mesa de referencia sea uniforme.

Las piezas del sistema se deben de fabricar en el taller del Centro de Instrumentos, utilizando los materiales disponibles en el almacén (no comprar material ó fabricar piezas fuera del Centro de Instrumentos).

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

□ Diseño conceptual.

Dado que se contaba con una sección tubular rectangular de aluminio en el almacén, se decidió utilizarla, de tal forma que el resto de las piezas se unieran a esta, posteriormente se buscó la forma de colocar los niveles electrónicos en el sistema, para ello se unió la sección rectangular a dos placas, una de las cuales soporta a los niveles electrónicos, las dimensiones de dicha placa dependen directamente de las restricciones que se presentan por el espacio que ocupan los niveles electrónicos y la orientación en que se deben colocar para poder obtener lecturas, ya que deben estar alineados con la dirección en la cual miden. Los indicadores electrónicos se deben fijar por medio de tornillos a un soporte, se deben considerar sus dimensiones y tomar en cuenta que la envolvente del palpador debe tocar la superficie a medir sin utilizar la punta o extremo.

Se pensó en dividir la superficie en longitudes iguales a lo largo de cada uno de sus lados, con lo que se obtiene una distribución uniforme de puntos de medición. Dado que el principal objetivo del presente trabajo es lograr obtener un algoritmo alternativo para determinar el error de planitud de mesas de referencia basado en la utilización de mallas ortogonales, el sistema físico a utilizar puede ser fabricado de diversos materiales, que puedan cargar el equipo de medición, se encuentren en el almacén y sean baratos.

□ Diseño de detalle.

Se optó por una estructura soportada por tres apoyos, dos de los cuales coinciden con dos puntos de medición adyacentes de una de las perimetrales largas de la mesa a ser calibrada, el tercer apoyo coincide con un punto de la perimetral corta, de manera que los tres apoyos se encuentran formando dos rectas perpendiculares. Dos niveles dispuestos en la dirección de tales rectas detectan las variaciones de la posición relativa entre los tres puntos de apoyo. Las placas son perforadas con la broca BS6 (disponible en el taller) de tal forma que perfora lo necesario para crear un agujero cónico, donde se colocan las esferas utilizando pegamento especial para acero. Adicionalmente, se han colocado dos indicadores electrónicos para detectar variaciones en los puntos de medición intermedios tal como se muestra en la ilustración 19 y en la siguiente:

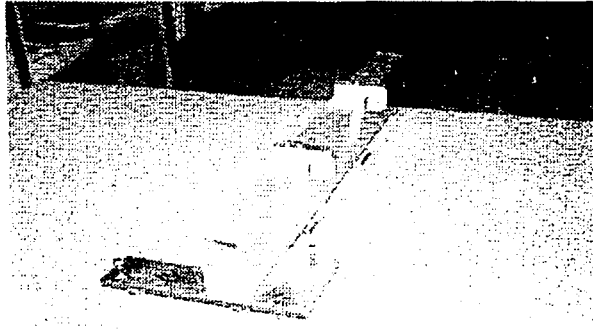


Ilustración 18: Vista general.

La estructura consta de un conjunto de piezas unidas que van a servir de soporte a instrumentos electrónicos de medición, los dispositivos electrónicos utilizados son: dos indicadores marca Federal, dos niveles de la misma marca y sus respectivas pantallas digitales.

Una característica esencial de la estructura es el plano ideal de referencia formado por medio de los tres apoyos, los cuales entran en contacto con la superficie a medir. Para ello se han dispuesto tres esferas rectificadas a manera de formar tres superficies circulares en el mismo plano para soportar al sistema. No es conveniente tener contactos puntuales como sería el contacto entre esfera y superficie plana ya que si la mesa tiene alguna melladura podría ser que la esfera cayera en ella, aunque es una situación poco probable esto alteraría los resultados de la medición, por ello se decidió utilizar dichas esferas rectificadas con el fin de evitar un contacto puntual.

La superficie a ser medida se divide en secciones equidistantes, tanto en el sentido de las perimetrales largas, como en las cortas. Para la longitud menor se hizo una división de tres secciones de igual longitud y para la longitud mayor de ocho secciones iguales, dejando una distancia de 20 mm a partir del borde de la mesa, en ambos casos, como lo indica la norma internacional ISO 8512-2 de 1990[3] con lo que se obtiene una malla, en la cual los nodos son los puntos en los cuales se toman las lecturas de los indicadores. Las lecturas de los demás puntos se obtienen al recorrer la estructura o sistema, las lecturas de los indicadores son tomadas al mismo tiempo que la de los

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

niveles, los cuales van indicando las lecturas correspondientes al desnivel de la superficie, tanto en la dirección de la perimetral larga, como de la perimetral corta.

Para lograr lo anterior, los niveles se colocan a lo largo de dichas direcciones, sobre las placas de acero destinadas a tal fin. Asimismo los indicadores se colocan de tal forma para que al avanzar toda la estructura sobre la superficie, tomen las lecturas en los nodos centrales de la malla.

Para evitar el riesgo de que el palpador del indicador caiga sobre un orificio, se utilizan bloques patrón debajo de cada palpador, esto es: la envolvente del palpador no entra en contacto directo con la superficie sino que toca la cara superior del bloque patrón, permitiendo que se asiente mucho mejor el bloque que el palpador debido a sus dimensiones, ya que podría suceder que el palpador caiga en orificios y variar las lecturas sensiblemente.

Los bloques se recorren junto con la estructura por medio de unas laminillas que los arrastran sin sujetarlos para que no se vean afectadas las mediciones de los indicadores por la sujeción ó presión que pudiese existir, dichos indicadores están sostenidos por la estructura, que a su vez se apoya sobre las placas que también soportan a los niveles electrónicos, y todo ello soportado por las esferas, que forman el plano ideal de referencia. El arreglo se muestra en la ilustración siguiente:

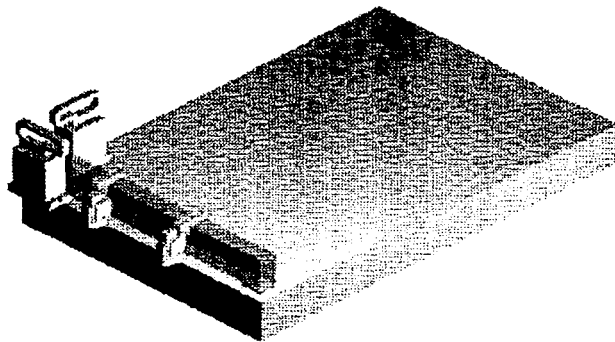


Ilustración 19: Vista general sobre mesa de granito.

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

Los materiales utilizados para la construcción de las piezas fueron seleccionados tomando en cuenta la disponibilidad y bajo costo, el desglose de los costos para la fabricación de este sistema, considerando costos de mercado reales se detalla más adelante. La sección rectangular es de perfil tubular rectangular de aluminio, de la que se decidió que fuese la parte central a partir de las cuales se unieran el resto de las piezas, las placas son de acero 1018¹⁶, se decidió seleccionar este material dado que se contaba con solera de dimensiones suficientes para fabricar las dos placas y el acero posee resistencia adecuada para nuestros propósitos, así mismo las esferas que soportan todo el sistema son de acero, que como se ve más adelante no sufren ningún daño por la carga a la que se someten, los soportes son de latón (latón amarillo, aleación 65% cobre, 35% zinc), ya que se contaba con barras pequeñas de este material que satisfacían las dimensiones buscadas y las laminillas destinadas a contener a los bloques patrón son de lámina negra calibre 18, todos estos materiales son económicos y de fácil adquisición en el mercado nacional. Todas las piezas se encuentran recubiertas con una capa de laca protectora para retrasar la oxidación, aunque se cuenta con una atmósfera controlada en el laboratorio del Centro de Instrumentos.

En el apéndice se presenta los planos de fabricación de cada una de las piezas necesarias para la construcción de la estructura, estas son: placa menor (una pieza), placa mayor (una pieza), soportes (dos piezas), laminillas para bloques patrón (dos piezas) y estructura (una pieza) así como un aditamento de seguridad para mantener en lo posible la horizontal del sistema en todo momento, principalmente cuando se atornillan ó retiran los niveles electrónicos.

□ Manufactura.

Las piezas fueron fabricadas en el taller del Centro de Instrumentos, dado que cuenta con las máquinas necesarias, como son fresadora, rectificadora, sierra cierra y herramientas apropiadas para tal fin, los planos de fabricación se muestran en el apéndice.

¹⁶ Aceros al carbono y baja aleación AISI-SAE (American Iron and Steel Institute-Society of Automotive Engineers). Las letras XX y XXX representan el contenido de carbono en centésimas de porcentaje en peso (Acero 10XX, para el presente caso XX=18, que representa un 0,18% de Carbono).

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

□ Análisis de cargas.

La placa grande se secciona en tres partes, para facilitar el análisis de las fuerzas y momentos en cada sección, y para localizar con mayor facilidad los centros de aplicación de las cargas en cada parte del sistema. El origen del sistema coordenado rectangular se localiza en el apoyo A, que es el que se encuentra en la placa mayor debajo de la sección rectangular 2, como se muestra en las siguientes ilustraciones:

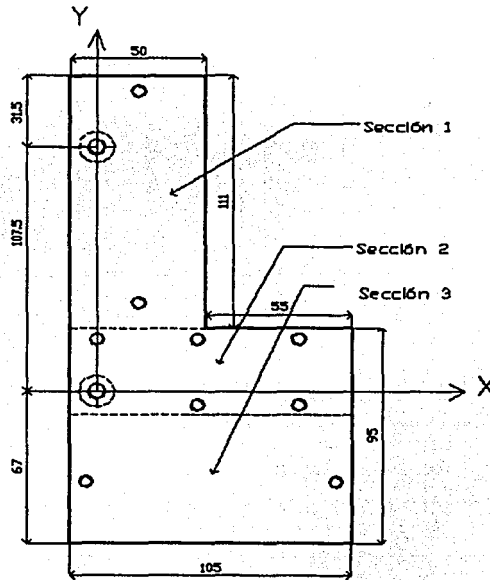


Ilustración 20: Placa mayor seccionada.

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

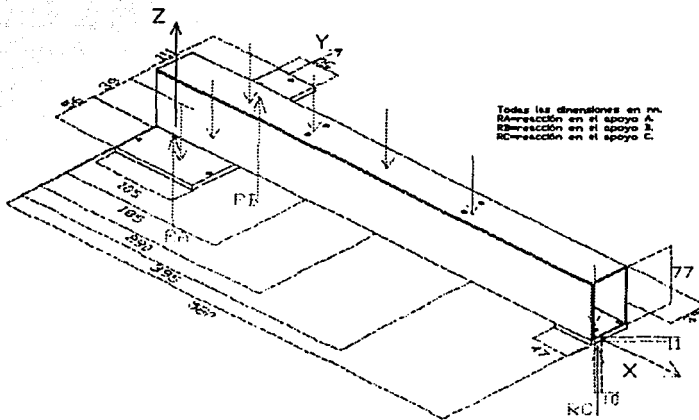


Ilustración 21: Reacciones en los apoyos A, B y C.

Se lleva a cabo un análisis para determinar si el sistema soporta sin problemas los instrumentos empleados, es decir, si no existe la posibilidad de falla en alguna o varias de las partes que componen el sistema debido a las cargas a las que se somete. Las cargas que se muestran en la ilustración anterior son producidas por los pesos siguientes:

W_1 = Peso de la placa grande, sección 1.

W_2 = Peso de la placa grande, sección 2.

W_3 = Peso de la placa grande, sección 3.

W_4 = Peso del soporte A e indicador A.

W_5 = Peso del soporte B e indicador B.

W_6 = Peso de la placa chica.

W_{N1} = Peso del nivel 1.

W_{N2} = Peso del nivel 2.

W_{ST} = Peso de la sección tubular.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

Tomando en cuenta que el origen coordenado se encuentra en el soporte A, se obtiene la ubicación de los centros de aplicación de cada una de las cargas involucradas, estos son los que a continuación se listan:

Las dimensiones están en [mm].

Para W_1 : (42,5 , -39).

W_2 : (42,5 , 8.5)

W_3 : (15 , 83,5)

Los centros de aplicación de las cargas para los niveles electrónicos, coinciden con los de las secciones 1 y 3 de la placa mayor:

Para W_{N1} : (42,5 , -39)

W_{N2} : (15 , 83,5)

Para la sección rectangular: W_{ST} : (280 , 8,5)

Para la placa chica: W_6 : (546,5 , 8,5)

Para los soportes A y B: W_4 : (175 ,8,5)

W_5 : (385 , 4,5)

Para las reacciones: R_A : (0 , 0)

R_B : (0 , 107,5)

R_C : (560 , 0)

Tomando en cuenta que se utiliza un sistema de mano derecha, para el presente caso se tiene lo siguiente:

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum M_z = 0.$$

Debido a que no existen fuerzas a lo largo de los ejes x e y del sistema coordenado, y las fuerzas y reacciones existentes no crean momentos respecto al eje z.

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

Para la sumatoria de fuerzas a lo largo del eje z, tenemos lo siguiente:

$$\sum F_z = 0;$$
$$-W_1 - W_2 - W_3 - W_{N1} - W_{N2} - W_4 - W_5 - W_6 - W_{ST} + R_A + R_B + R_C = 0. \quad (a)$$

$$\sum M_x = 0;$$
$$39W_1 - 8,5W_2 - 83,5W_3 + 39W_{N1} - 83,5W_{N2} - 8,5W_{ST} - 8,5W_4 - 8,5W_5 - 8,5W_6 + 107,5R_B = 0 \quad (b)$$

$$\sum M_y = 0;$$
$$42,5W_1 + 42,5W_2 + 15W_3 + 42,5W_{N1} + 15W_{N2} + 280W_{ST} + 175W_4 + 385W_5 + 546W_6 - 560R_C = 0 \quad (c)$$

Por lo que se obtiene un sistema estáticamente determinado, ya que se tienen 3 ecuaciones y 3 incógnitas que son: R_A , R_B y R_C .

Para determinar los pesos y masas de los componentes del sistema y poder con ello resolver el sistema de ecuaciones obtenido, se utilizarán las siguientes fórmulas y densidades correspondientes a los materiales de los cuales están fabricadas las diferentes piezas que componen el sistema.

$$W = mg. \text{ [N]}$$

$$\delta = \frac{M}{Vol.} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

donde W es el peso, δ es la densidad, $Vol.$ es el volumen y M es la masa.

Las densidades requeridas son las siguientes:

$$\delta_{Aluminio} = 2710 \frac{kg}{m^3}$$

$$\delta_{Acero} = 7860 \frac{kg}{m^3}$$

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

$$\delta_{\text{Latón}} = 8470 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dado que se conocen las dimensiones de las diversas piezas (ver planos en el apéndice) se puede calcular el volumen y masa de cada una de ellas, lo cual se muestra resumido en la siguiente tabla:

Pieza	Volumen [m ³]	Masa [kg]
Placa mayor, sección 1	0,000037632	0,295787
Placa mayor, sección 2	0,000026208	0,205995
Placa mayor, sección 3	0,00003552	0,279187
Placa menor	0,000011731	0,092198
Sección rectangular	0,0002655	0,719505
Soportes	0,000015906	0,134729 (2 soportes)

Tabla 21: Volumen y masa de las piezas.

La masa del nivel electrónico aproximadamente es igual a 0,8 kg y para el indicador es de 0,3 kg. Al multiplicar la masa por la gravedad (9,81 m/s²), se obtienen los pesos (W) correspondientes, para el caso del nivel es de 7,8480 [N] y para el indicador es de 2,9430 [N]. Para cada uno de los pesos considerados se obtuvieron los resultados siguientes, tomando en cuenta que para W₄ y W₅ se deben de sumar los pesos de los soportes y los indicadores:

$$W_1 = 2,9017 \text{ [N]}$$

$$W_2 = 2,0208 \text{ [N]}$$

$$W_3 = 2,7388 \text{ [N]}$$

$$W_4 = 4,2647 \text{ [N]}$$

$$W_5 = 4,2647 \text{ [N]}$$

$$W_{N1} = 7,8480 \text{ [N]}$$

$$W_{N2} = 7,8480 \text{ [N]}$$

$$W_{S1} = 7,0583 \text{ [N]}$$

$$W_6 = 0,9044 \text{ [N]}$$

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

Sustituyendo todos estos valores en las ecuaciones (a), (b) y (c) anteriormente obtenidas, se tienen las tres siguientes ecuaciones:

$$-39,8494 + R_A + R_B + R_C = 0$$

$$-622,119 + 107,5 R_B = 0$$

$$5560,3589 - 560 R_C = 0,$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior se llega a lo siguiente:

$$R_A = 24,133 \text{ [N]}$$

$$R_B = 5,7872 \text{ [N]}$$

$$R_C = 9,9292 \text{ [N]}$$

Por lo que se observa que la reacción de mayor magnitud se localiza en el apoyo A, se debe determinar el esfuerzo al que se somete dicho apoyo, esto se logra determinando el área sobre la que actúa dicha reacción, que es aproximadamente de $0,00000113 \text{ m}^2$ (se mide el diámetro de la superficie rectificadora, con ello se calcula el área), se utiliza la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{R_A}{A} = \frac{24,133}{0,00000113} = 21,3566 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} = 21,36 \text{ MPa}$$

Tomando en cuenta, para llevar a cabo una comparación, el esfuerzo último para un acero de resistencia media que es de 480 MPa, se ve claramente que no se presenta ningún problema debido a las cargas a las que se somete el sistema.

✓ Costos de fabricación.

Los costos para la fabricación del presente sistema se resumen en la siguiente tabla, todos los valores monetarios están en pesos mexicanos:

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

Costo por material y accesorios	\$324,79
Costo por mano de obra ¹⁷ . Horas hombre: 11	\$301,97
Costo por uso de máquina ¹⁸ . Horas máquina: 09	\$92,17
Costo total:	\$718,93

Costos de material y accesorios:

Cantidad	Especificaciones	Precio
1.8 m	Barra maciza rectangular de latón de 1 ½ in x ½ in y longitud de 1.8 m..	\$69,00 ¹⁹
0.10 Kg	Lámina negra calibre 28 de 200 x 25 mm.	\$6,00
1 m	Perfil tubular de aluminio de sección rectangular de 39 x 77 mm y longitud de 1m, con 2 mm de espesor de pared.	\$62,66 ²⁰
1	Buril punta de tungsteno de 3/8".	\$26,05
1 Kg	Solera cold rolled de 5 in x 8.5 in y de ¼ in de espesor.	\$40,00 ²¹
1	Broca BS6 de centros	\$34,73
1	Broca de centros del #2	\$33,31
14	Tornillos allen diversas medidas.	\$23,04
3	Esferas de acero	\$30,00
		\$324,79

¹⁷ Información proporcionada por el taller del Centro de Instrumentos.

¹⁸ Igual que la nota anterior.

¹⁹ Fuente: Metales Díaz, S.A. de C.V.

²⁰ Fuente: Metales Díaz, S.A. de C.V.

²¹ Fuente: Aceros Fortuna S.A.

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

Costo por el uso de maquinaria:

Maquinaria	Horas	Costo
Fresadora	7	\$83,79
Taladro	1	\$4,58
Sierra cinta	1	\$3,80
Total:	9	\$92,17

Al total de horas se agrega una hora por la preparación de piezas y máquinas.

✓ Procedimiento de medición.

Los pasos para utilizar el sistema y el procedimiento de medición son los siguientes:

- Preparación del equipo. Verificar que se cuente con el equipo necesario, este es: paño libre de pelusa, alcohol al 99,9% de pureza, dos bloques patrón, dos indicadores electrónicos, dos niveles electrónicos, dos consolas digitales, un pie extensible y el sistema con el que se mide.

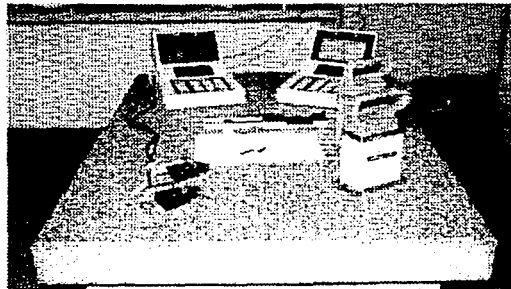


Ilustración 22: Equipo necesario.

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

- Anotar los datos de identificación de la mesa que se localizan generalmente a un costado de la misma.
- Verificar que la superficie de la mesa a medir esté libre de polvo o grasa y en caso necesario limpiarla con tela de algodón impregnada de alcohol.

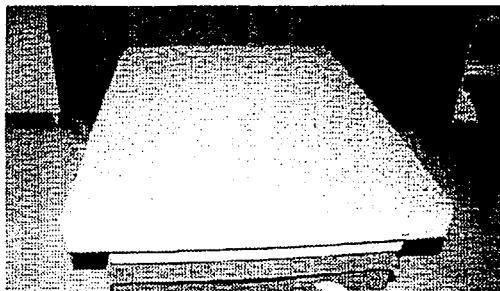


Ilustración 23: Mesa de referencia.

- Conectar los indicadores en un amplificador digital y los niveles electrónicos en otro, el amplificador digital de los indicadores debe estar en modo de medición de distancia, y la de los niveles en modo de medición de ángulo, en éste caso en segundos de arco. El intervalo seleccionado en cada caso dependerá de las lecturas que se detecten al comenzar las mediciones de tal forma que exista lectura en la pantalla es decir, que no sobrepase el intervalo seleccionado.
- Al momento de colocar o utilizar un nivel electrónico se debe verificar la dirección en la que marca signo positivo por lo que es recomendable que al avanzar lo haga con la salida del cable hacia el frente, de modo que cuando ese lado del nivel suba indique la inclinación con signo positivo en la pantalla, todo esto para simplificar la toma de datos y evitar confusiones. Las ilustraciones siguientes muestran lo anterior:
- Definiendo el nivel A, como aquel que medirá el las variaciones de nivel a lo largo de la perimetral larga, se coloca en el centro geométrico de la mesa, se hace un cero manual, y se verifica la horizontalidad primero en la dirección de la perimetral corta, en caso necesario se hacen las correcciones de inclinación de la mesa por medio de los apoyos destinados a tal fin,

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

posteriormente se hace lo mismo en la dirección de la perimetral larga, con ello queda corregido el error de inclinación debido a los apoyos.

Obtención de datos para ajuste de lecturas de los indicadores:

Se hace un trazado en la mesa, formando una malla, los nodos de dicha malla son los puntos en donde se harán las mediciones, la mesa tiene dimensiones de 600 por 900 mm, se deben dejar 2 cm en todas las orillas de la mesa, con lo que el área de trabajo se reduce a 560 por 860 mm, a lo largo de la perimetral corta se segmenta en tres partes y a lo largo de la perimetral larga en ocho partes, con lo que se crea una malla de 36 nodos.

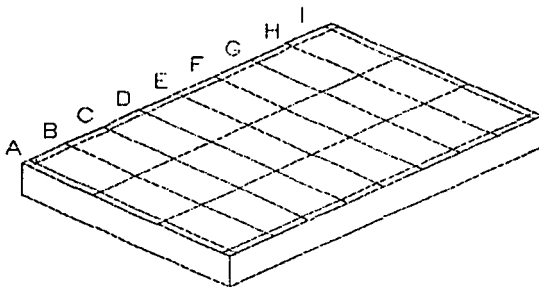


Ilustración 24: División de la superficie en mallas ortogonales, utilizando letras auxiliares.

- Sobre la primera trayectoria de medición (línea A) se utiliza el pie extensible junto con un nivel electrónico para medir las inclinaciones entre cada nodo, se realiza un ajuste a cero automático en el nivel utilizando el amplificador digital, lo que implica que el nodo uno es la referencia cero, y se toman las siguientes mediciones recorriendo el pie extensible a los otros tramos de recta, con lo cual se obtienen los valores de las alturas en los nodos 1 a 4, realizado lo anterior se conocen las alturas de los nodos 2 y 3, dichas alturas son las correcciones debidas a la inclinación de la primera línea de medición, el ajuste se hace en el programa ya que físicamente es muy difícil ajustar los indicadores a esos valores, por lo que se decidió hacer un cero electrónico en la primera línea y hacer la corrección en el software.

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

- Para lograr lo anterior, se colocan el nivel A sobre el pie extensible, previamente ajustado a la distancia requerida de 186,67 mm. Haciendo un cero automático en la posición inicial, esto es entre los nodos uno y dos, se realizan las mediciones a lo largo de la primera trayectoria. Posteriormente, conservando el ajuste del cero se hacen las mediciones en la trayectoria última. Ambas trayectorias se miden en tres ocasiones para el cálculo de la incertidumbre por repetibilidad.

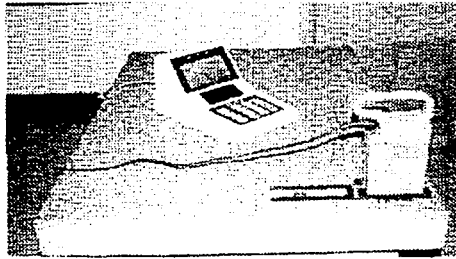


Ilustración 25: Primera trayectoria

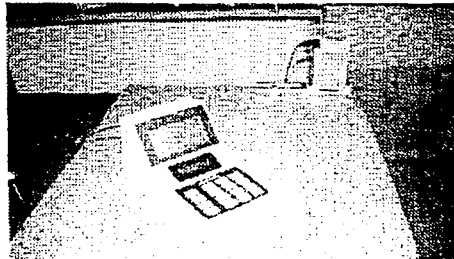


Ilustración 26: Última trayectoria.

Ensamble de los instrumentos sobre la estructura:

- Primero se coloca en su posición y se asegura con tornillos el nivel A que es el encargado de medir el las inclinaciones a lo largo de la perimetral larga, para equilibrar el peso de todo el

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

sistema. Posteriormente se colocan y se aseguran con tornillos los indicadores y el nivel B. Los bloques patrón se limpian con tela de algodón y alcohol y se colocan en los huecos rectangulares de las laminillas limpiando previamente la superficie de la mesa con un paño limpio para retirar las partículas de polvo.



Ilustración 27: Procedimiento de medición.



Ilustración 28: Bloques patrón auxiliares.

Ajuste de lecturas del equipo de medición:

- o Se coloca el sistema a lo largo de la trayectoria A. Se hace un cero automático en el nivel B. El nivel A puede mantenerse con el cero de referencia que se realizó sobre el pie extensible ó puede hacerse un cero automático. Se debe tener especial cuidado al identificar en que canal se muestra la lectura de cada aparato, para no intercambiar los datos. Los palpadores se ajustan

Capítulo 4: Diseño y Construcción del Sistema.

manualmente a cero sobre los bloques verificando que al elevarse el palpador, se indica una distancia positiva en el amplificador digital y viceversa, de no ser así se cambia el sentido de medición en el indicador por medio de un tornillo colocada a un costado. También es necesario percatarse del rango de medición, llevando el palpador a sus topes extremos y verificar que al momento de hacer contacto con el bloque patrón, se obtengan lecturas sin que el amplificador digital indique que está saturada, esto es que llegó al extremo el palpador y no detecta cambios en la distancia, hecho lo anterior para cada indicador se hace un cero electrónico en cada caso. De la misma manera, se debe tener especial cuidado al identificar en que canal se muestra la lectura de cada aparato, para no intercambiar los datos.

Toma de lecturas

- Una vez colocada la estructura en su posición, es decir, de tal manera que las esferas se apoyen sobre los nodos 1, 4 y 5, se inicia con las lecturas de todos los instrumentos ajustados conforme al párrafo precedente. Las lecturas en cada posición, constan de dos lecturas de nivel (A y B) y dos lecturas de indicador (a y b). Posteriormente se recorre la estructura una distancia de 107,5 mm en el sentido de la perimetral larga hasta la siguiente posición de medición conforme al trazado reticular.
- En cada estación de medición, los datos se van tomando de las pantallas digitales cambiando de canal en cada caso, y oprimiendo la tecla "hold" para congelar la lectura en un valor medio. Debe oprimirse éste mismo botón para evitar que la lectura quede congelada y equivocarse en la toma de datos. El procedimiento se realiza en tres ocasiones, cuidando de mantener libre de polvo la superficie a medir.
- Una vez tomadas todas las lecturas, se apagan los amplificadores digitales esperando a que la pantalla digital se apague para poder desconectar los tomacorrientes, después se retira primero el nivel B de la estructura, debido al equilibrio, posteriormente se retiran los indicadores y bloques patrón y finalmente el nivel A. Los datos obtenidos se ingresan en el programa para obtener el error de planitud, la incertidumbre y la gráfica, con lo que se puede realizar el reporte apropiado.

Capítulo 5.

Algoritmo de Medición.

El algoritmo²² necesario para determinar el error de planitud fue realizado en Microsoft Excel, una vez realizadas las mediciones y tomados los datos, se obtiene la magnitud del error de planitud, así como la gráfica representativa de la superficie de la mesa de granito. Por medio de una regresión múltiple [7] se obtiene el plano medio así como su ecuación, con la cual es posible graficar dicho plano para observar las distancias de cada punto al plano, el signo que acompaña al valor de la distancia indica si el punto se encuentra del mismo lado en que se encuentra el origen o si el plano medio los separa. Se determina que puntos se encuentran a cada lado del plano medio, con los puntos más alejados en cada lado se obtienen planos paralelos al plano medio que contienen a todos los puntos medidos, la distancia entre los planos paralelos determina el error de planitud.

La incertidumbre se calcula de la misma forma que se explicó en el Capítulo 3, con la diferencia de que en el presente caso no se presenta el error de cerradura.

$$\text{Incertidumbre expandida} = u = k * \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$$

✓ Primera Corrección de Lecturas

Las lecturas tomadas en la trayectoria A con la estructura van a diferir de aquellas tomadas con el pie extensible, debido a que al momento de colocar el nivel sobre la estructura (el que se utilizó con el pie extensible) éste va a medir tanto la inclinación de la mesa en la trayectoria A como la inclinación debida a la estructura, por lo que todos los valores restantes también van a considerar dichas inclinaciones, excepto en la última trayectoria ya que no se mide con la

²² (De Mamad ibn Musa al-Jwarizmi, matemático árabe de principios del siglo IX). Conjunto de reglas operativas cuya aplicación permite resolver un problema formulado mediante un número finito de operaciones. Un algoritmo debe tener tres propiedades: ser finito, definible y generalizable. Lo característico del algoritmo es que transforma cantidades, denominadas magnitudes de entrada, en otras cantidades, denominadas magnitudes de salida, partiendo de un conjunto bien definido de instrucciones de transformación.

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

estructura, por ello se debe determinar la inclinación propia de la estructura, para tomarla en cuenta en los datos obtenidos en la última trayectoria y hacer las correcciones pertinentes, en el software, lo anterior se realiza de la siguiente manera:

Dato en la línea A con el nivel N1 sobre la estructura:	80,5	Segundos
Altura en el nodo #4 de la línea A con la estructura:	218,6	Micrómetros
Altura obtenida en el punto #4 con el pie extensible:	-3,67	Micrómetros
Diferencia:	222,31	Micrómetros

La diferencia indica la inclinación debida únicamente a la estructura, por lo que en la última trayectoria se debe sumar dicho valor en el nodo 36, y de forma proporcional en los nodos 34 y 35, siendo así el nodo 33 no se le suma nada, es el punto de giro, ya que de sumarse directamente a todos estos nodos, significaría que la mesa se puede torcer, cosa que no puede suceder ya que es un cuerpo rígido, es un abatimiento como los realizados con el método de Union Jack, visto en Capítulo 3. El valor que da la diferencia se divide en el número de pasos que son 3 y ello da el valor proporcional de abatimiento, a continuación se muestran los datos obtenidos en las trayectorias A e I, así como los nuevos valores en la trayectoria I debido a las correcciones:

Trayectoria A

	Segundos	Grados	Radianes	Seno	micrómetros	acumulado
h ₁ =	---	---	---	---	---	0,00
h ₂ =	-2,06	-0,00057	-0,00001	-0,00001	-1,86	-1,86
h ₃ =	-1,53	-0,00043	-0,00001	-0,00001	-1,38	-3,25
h ₄ =	-0,46	-0,00013	0,00000	0,00000	-0,42	-3,67

Corrección en Palpador A:	-1,86	micrómetros
Corrección en Palpador B:	-3,25	micrómetros

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Trayectoria I:

	Segundos	Grados	Radianes	Seno	micrómetros	acumulado
h ₃₃ =	--	--	--	--	--	190,33
h ₃₄ =	0,13	0,000036	0,000001	0,000001	0,12	190,45
h ₃₅ =	-0,13	0,000036	-0,000001	-0,000001	-0,12	190,33
h ₃₆ =	-0,76	0,000211	-0,000004	-0,000004	-0,69	189,65

Valor por abatir:	222,31
# de pasos:	3
Valor proporcional:	74,103

Corrección:

	Acumulado	Sumar	Nuevo valor
h ₃₃ =	190,33	0	190,33
h ₃₄ =	190,45	74,10	264,55
h ₃₅ =	190,33	148,21	338,54
h ₃₆ =	189,56	222,31	411,95

El dato obtenido en el nodo 36 se debe transformar en su equivalente en segundos de arco para introducirlo en el programa, pero se le debe restar la cantidad en h₃₃ ya que esta cantidad se debe a la altura a la cual se encuentra dicha trayectoria por la inclinación a lo largo de la perimetral larga, este valor es el dato en h₃₃, que se toma de los cálculos para transformar los datos de los niveles e indicadores en cotas. Por lo tanto se resta el valor de h₃₆ con el de h₃₃, se divide entre mil para tener milímetros, se divide entre 560 que es la longitud entre las esferas a lo largo de esa dirección, y por medio de la función seno se calcula el ángulo, que multiplicado por 3600 da el valor en segundos, este valor se utiliza para los cálculos de las cotas.

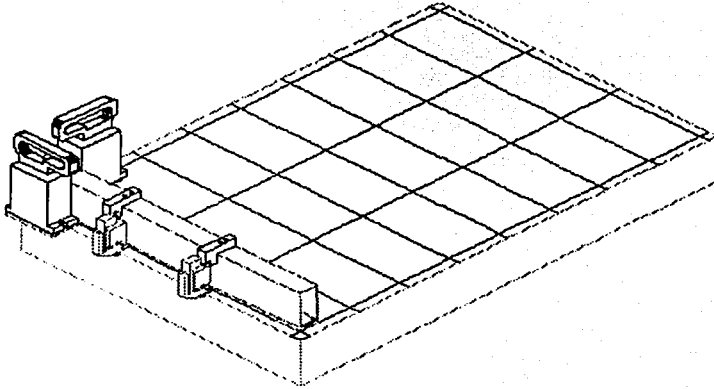


Ilustración 29: Malla sobre la mesa de granito.

Sobre cada trayectoria se toman los datos de los dos niveles así como de los indicadores, para ello se cuenta con dos amplificadores digitales, en una de ellas se conectan los niveles electrónicos en modo de medición de segundo de arco, la pantalla digital da el valor de cada nivel alternativamente por medio del botón respectivo, de igual forma para los indicadores conectados en el otro amplificador digital, pero en este caso se encuentra en el modo de medición de distancia en el rango de milímetros. El alcance en el modo de medición de ángulo es de ± 1000 segundos, la división mínima es de 0,1 segundos y la exactitud es de ± 1 dígito.

La tabla siguiente muestra los datos obtenidos, los cuales deben ser transformados a grados y posteriormente a micrómetros, los datos obtenidos por los indicadores están ya en micrómetros.

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Línea:	Del nivel N1 (segundos de arco):			Promedio	Grados	Radianes	Seno
A	80,5	80,5	80,6	80,5	0,0224	0,0004	0,0004
B	81,7	81,5	81,6	81,6	0,0227	0,0004	0,0004
C	81,5	81,3	81,4	81,4	0,0226	0,0004	0,0004
D	81,6	81,4	81,5	81,5	0,0226	0,0004	0,0004
E	81,7	81,9	81,8	81,8	0,0227	0,0004	0,0004
F	81,9	81,6	81,7	81,7	0,0227	0,0004	0,0004
G	82,1	82,5	82,5	82,4	0,0229	0,0004	0,0004
H	82,6	82,7	82,4	82,6	0,0229	0,0004	0,0004
I	-----	-----	-----	81,6	0,0227	0,0004	0,0004

Línea:	Del nivel N2 (segundos de arco):			Promedio	Grados	Radianes	Seno
A	44,9	44,8	45	44,9	0,0125	0,0002	0,0002
B	45,1	45,2	45,4	45,2	0,0126	0,0002	0,0002
C	45,4	46,2	46,2	45,9	0,0128	0,0002	0,0002
D	45,2	45,4	45,1	45,2	0,0126	0,0002	0,0002
E	46,2	46,3	46,1	46,2	0,0128	0,0002	0,0002
F	46,4	46,3	46,5	46,4	0,0129	0,0002	0,0002
G	45,4	45,7	45,6	45,6	0,0127	0,0002	0,0002
H	45,8	45,6	45,8	45,7	0,0127	0,0002	0,0002

Tabla 22: Niveles

Datos de los indicadores:

Línea:	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio
A	0	0	0	0
B	-1,56	-1,78	-1,67	-1,67
C	-1,22	-1,44	-1,36	-1,34
D	-0,32	-1,12	-0,76	-0,73
E	-0,48	-0,94	-0,75	-0,72
F	-0,82	-1,22	-1,38	-1,14
G	-0,14	-0,32	-0,57	-0,34
H	-0,22	-0,14	-0,19	-0,18

Tabla 23: Datos palpador A

Línea:	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio
A	0	0	0	0
B	-0,6	-0,52	-0,64	-0,59
C	2,9	1,64	2,08	2,21
D	-0,78	-0,2	-0,96	-0,65
E	-0,46	-0,56	-0,87	-0,63
F	0,02	-0,64	-0,74	-0,45
G	-0,38	-0,84	-0,91	-0,71
H	-0,98	-0,58	-0,61	-0,72

Tabla 24: Datos palpador B

✓ Segunda Corrección de Lecturas

Con los datos anteriores se calcula la altura de cada punto, se conocen las distancias entre las bases de las esferas, $L_1 = 560$ (a lo largo de la perimetral corta), por lo que la distancia de nodo a nodo en esta dirección es de $L_1/3 = 186,67$, y $L_2 = 107,5$ (a lo largo de perimetral larga), con los datos de los niveles se calculan las alturas con la función seno, y las alturas respectivas en los puntos donde se encuentran los indicadores a los cuales se les suman los valores de corrección antes indicados, se obtienen las alturas de los 36 nodos, en la última trayectoria se sustituyen directamente los nuevos valores antes encontrados. Las tablas siguientes muestran las ecuaciones de transformación para cada cota y los resultados de estos cálculos:

$$h_1 = 0$$

$$h_2 = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_1 + A_1 + A^*$$

$$h_3 = 2/3L_1 \text{ sen } \alpha_1 + B_1 + B^*$$

$$h_4 = L_1 \text{ sen } \alpha_1$$

$$h_5 = L_2 \text{ sen } \beta_1 + H_1$$

$$h_6 = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_2 + h_5 + A_2 + A^*$$

$$h_7 = 2/3L_1 \text{ sen } \alpha_2 + h_5 + B_2 + B^*$$

$$h_8 = L_1 \text{ sen } \alpha_2 + h_5$$

$$h_9 = L_2 \text{ sen } \beta_2 + h_5$$

$$h_{10} = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_3 + h_9 + A_3 + A^*$$

$$h_{11} = L_1 \text{ sen } \alpha_3 + h_9 + B_3 + B^*$$

$$h_{12} = L_1 \text{ sen } \alpha_3 + h_9$$

$$h_{13} = L_2 \text{ sen } \beta_3 + h_9$$

$$h_{14} = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_4 + h_{13} + A_4 + A^*$$

$$h_{15} = 2/3L_1 \text{ sen } \alpha_4 + h_{13} + B_4 + B^*$$

$$h_{16} = L_1 \text{ sen } \alpha_4 + h_{13}$$

$$h_{17} = L_2 \text{ sen } \beta_4 + h_{13}$$

$$h_{18} = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_5 + h_{17} + A_5 + A^*$$

$$h_{19} = 2/3L_1 \text{ sen } \alpha_5 + h_{17} + B_5 + B^*$$

$$h_{20} = L_1 \text{ sen } \alpha_5 + h_{17}$$

$$h_{21} = L_2 \text{ sen } \beta_5 + h_{17}$$

$$h_{22} = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_6 + h_{21} + A_6 + A^*$$

$$h_{23} = 2/3L_1 \text{ sen } \alpha_6 + h_{21} + B_6 + B^*$$

$$h_{24} = L_1 \text{ sen } \alpha_6 + h_{21}$$

$$h_{25} = L_2 \text{ sen } \beta_6 + h_{21}$$

$$h_{26} = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_7 + h_{25} + A_7 + A^*$$

$$h_{27} = 2/3L_1 \text{ sen } \alpha_7 + h_{25} + B_7 + B^*$$

$$h_{28} = L_1 \text{ sen } \alpha_7 + h_{25}$$

$$h_{29} = L_2 \text{ sen } \beta_7 + h_{25}$$

$$h_{30} = 1/3L_1 \text{ sen } \alpha_8 + h_{29} + A_8 + A^*$$

$$h_{31} = 2/3L_1 \text{ sen } \alpha_8 + h_{29} + B_8 + B^*$$

$$h_{32} = L_1 \text{ sen } \alpha_8 + h_{29}$$

$$h_{33} = L_2 \text{ sen } \beta_8 + h_{29}$$

$$h_{34} = h^*_{33}$$

$$h_{35} = h^*_{34}$$

$$h_{36} = h^*_{35}$$

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Donde A^* y B^* , son los valores de corrección para los datos obtenidos por los indicadores A y B respectivamente, se debe tomar en consideración que los valores de los nodos h_{34} , h_{35} y h_{36} provienen de las correcciones antes mencionadas debidas a la comparación de resultados obtenidos al medir con el pie extensible la primera y última línea y posteriormente medir la primera línea con el sistema, determinando la diferencia debida al desnivel del sistema, y haciendo las correcciones pertinentes.

Línea A:			Línea D:		
Punto 1:	$H_1=$	0,0	Punto 13:	$H_{13}=$	70,9
Punto 2:	$H_2=$	71,0	Punto 14:	$H_{14}=$	142,1
Punto 3:	$H_3=$	142,5	Punto 15:	$H_{15}=$	214,5
Punto 4:	$H_4=$	218,6	Punto 16:	$H_{16}=$	292,2
Línea B:			Línea E:		
Punto 5:	$H_5=$	23,4	Punto 17:	$H_{17}=$	94,5
Punto 6:	$H_6=$	93,7	Punto 18:	$H_{18}=$	165,9
Punto 7:	$H_7=$	167,3	Punto 19:	$H_{19}=$	238,7
Punto 8:	$H_8=$	244,9	Punto 20:	$H_{20}=$	316,6
Línea C:			Línea F:		
Punto 9:	$H_9=$	47,0	Punto 21:	$H_{21}=$	118,6
Punto 10:	$H_{10}=$	117,4	Punto 22:	$H_{22}=$	189,5
Punto 11:	$H_{11}=$	193,3	Punto 23:	$H_{23}=$	262,8
Punto 12:	$H_{12}=$	268,0	Punto 24:	$H_{24}=$	340,5

Tabla 25: Alturas.

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Línea G:		
Punto 25:	$H_{25} =$	142,7
Punto 26:	$H_{26} =$	215,1
Punto 27:	$H_{27} =$	287,9
Punto 28:	$H_{28} =$	366,4
Línea H:		
Punto 29:	$H_{29} =$	166,5
Punto 30:	$H_{30} =$	239,2
Punto 31:	$H_{31} =$	312,0
Punto 32:	$H_{32} =$	390,7
Línea I:		
Punto 33:	$H_{33} =$	190,3
Punto 34:	$H_{34} =$	264,6
Punto 35:	$H_{35} =$	338,5
Punto 36:	$H_{36} =$	411,95

Tabla 26: Alturas (continuación).

En cada línea los valores se obtienen calculando la altura formada por el cateto opuesto al ángulo obtenido al transformar el dato respectivo de segundos de arco a grados a lo largo de la perimetral corta, y aplicando la función seno, conocida dicha altura se pueden conocer las alturas respectivas en los nodos intermedios ya que conocemos la distancia a la cual se encuentran con respecto a las esferas (esto es 186.6 mm), a estos valores se les suman los valores indicados por los indicadores. En las líneas siguientes a la primera se debe aparte agregar el valor debido al desnivel en la dirección de la perimetral larga, con ello se obtienen todos los valores anteriores. El siguiente paso es obtener un plano medio, para ello se requiere trabajar con las temas ordenadas²³ de puntos obtenidas:

²³ Una tema de coordenadas (x, y, z) determina uno y solamente un punto P en el espacio con respecto a un sistema coordenado fijo.

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Punto	x[μ m]	y[μ m]	z[μ m]
1	0,0	0,0	0,0
2	186666,7	0,0	71,0
3	373333,3	0,0	142,5
4	560000,0	0,0	218,6
5	0,0	107500,0	23,4
6	186666,7	107500,0	93,7
7	373333,3	107500,0	167,3
8	560000,0	107500,0	244,9
9	0,0	215000,0	47,0
10	186666,7	215000,0	117,4
11	373333,3	215000,0	193,3
12	560000,0	215000,0	268,0
13	0,0	322500,0	70,9
14	186666,7	322500,0	142,1
15	373333,3	322500,0	214,5
16	560000,0	322500,0	292,2
17	0,0	430000,0	94,5
18	186666,7	430000,0	165,9
19	373333,3	430000,0	238,7
20	560000,0	430000,0	316,6
21	0,0	537500,0	118,6
22	186666,7	537500,0	189,5
23	373333,3	537500,0	262,8
24	560000,0	537500,0	340,5
25	0,0	645000,0	142,7
26	186666,7	645000,0	215,1
27	373333,3	645000,0	287,9
28	560000,0	645000,0	366,4
29	0,0	752500,0	166,5
30	186666,7	752500,0	239,2
31	373333,3	752500,0	312,0
32	560000,0	752500,0	390,7
33	0,0	860000,0	190,3
34	186666,7	860000,0	264,6
35	373333,3	860000,0	338,5
36	560000,0	860000,0	412,0

Tabla 27: Puntos

Para obtener la ecuación del plano medio, se debe primero hacer una regresión múltiple[7], a continuación se explica este procedimiento:

En la regresión múltiple se trata con puntos que constan de $n(r+1)$ elementos, es decir: $(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{ir}, y_i)$, donde las x son conocidas, y las y son variables aleatorias.

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Para el caso particular aquí tratado, se requiere conocer los valores que resuelven la ecuación de regresión lineal siguiente:

$$\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 = y \dots\dots(1).$$

estos son x_1 y x_2 , que es el problema de ajustar un plano a un conjunto de n puntos con coordenadas (x_{i1}, x_{i2}, y_i) . Se aplica el método de mínimos cuadrados para obtener los coeficientes β_0 , β_1 y β_2 , se minimizan los cuadrados de los valores correspondientes a las cotas o distancias verticales, esto se logra minimizando la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2})]^2$$

Las ecuaciones normales resultantes al derivar parcialmente la ecuación anterior con respecto a cada coeficiente β_0 , β_1 y β_2 son las siguientes:

$$\begin{aligned} \Sigma y &= n\beta_0 + \beta_1 \Sigma x_1 + \beta_2 \Sigma x_2 \\ \Sigma x_1 y &= \beta_0 \Sigma x_1 + \beta_1 \Sigma x_1^2 + \beta_2 \Sigma x_1 x_2 \\ \Sigma x_2 y &= \beta_0 \Sigma x_2 + \beta_1 \Sigma x_1 x_2 + \beta_2 \Sigma x_2^2 \dots(2) \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones lineales²⁴ anterior por el método de determinantes o método de Cramer se obtienen los valores de β_0 , β_1 y β_2 y se sustituyen en la ecuación (1), para obtener la ecuación buscada.

Se realizan todas las operaciones anteriores para obtener el sistema de ecuaciones utilizando los puntos de la tabla anterior, sustituyendo en las ecuaciones (2):

Para calcular la distancia de cada punto al plano medio se utilizan los siguientes teoremas:

Teorema 5.1. La distancia dirigida d del punto $P_1(x_1, y_1, z_1)$ al plano $Ax + By + Cz + D = 0$ se obtiene por la fórmula.

²⁴ Un conjunto finito de ecuaciones lineales en las variables x_1, x_2, \dots, x_n se conoce como "sistema de ecuaciones lineales" o sistema lineal. Una sucesión de números s_1, s_2, \dots, s_n es una solución del sistema si $x_1 = s_1, x_2 = s_2, \dots, x_n = s_n$ es una solución de todas las ecuaciones en tal sistema [9].

$$d = \frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{+/-\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

en donde el signo del radical se elige de acuerdo al siguiente teorema:

Teorema 5.2. La forma general de la ecuación de un plano $Ax + By + Cz + D = 0$, puede reducirse a la forma normal,

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - p = 0$$

dividiendo cada término por $r = \pm\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$, en donde el signo que precede al radical r se escoge como sigue:

- Si $D \neq 0$, r es de signo contrario a D .
- Si $D = 0$ y $C \neq 0$, r y C son del mismo signo.
- Si $D = C = 0$ y $B \neq 0$, r y B son del mismo signo.
- Si $D = C = B = 0$, entonces $A \neq 0$, r y A son del mismo signo.

Conociendo que puntos se encuentran a cada lado del plano medio, se determina aquella distancia mayor a cada lado del plano, y utilizando la siguiente ecuación:

$$d = \frac{D_1 - D_2}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$

se determina D_2 para cada caso, que son los datos necesarios para determinar las ecuaciones de los planos paralelos, la distancia entre los planos paralelos, será el error de planitud [8].

De acuerdo a lo anterior se obtienen los siguientes resultados:

Resultados de las sumatorias: todas las unidades son micrómetros.

X	Y	x ²	xy	y ²	Z	xz	yz
1,01E+07	1,55E+07	4,39E+12	4,33E+12	9,43E+12	7,36E+03	2,68E+09	3,79E+09

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Sistema de ecuaciones:

$$7,36E+03 = 36,00B_0 + 1,01E+07b_1 + 1,55E+0 b_2$$

$$2,68E+09 = 1,01E+07B_0 + 4,39E+12b_1 + 4,33E+1 b_2$$

$$3,79E+09 = 1,55E+07B_0 + 4,33E+12b_1 + 9,43E+1 b_2$$

El sistema anterior se resuelve por el método de determinantes:

Det. A:	36,00	1,01E+07	1,55E+07	Delta=	1,57E+26
	1,01E+07	4,39E+12	4,33E+12		
	1,55E+07	4,33E+12	9,43E+12		
Det. B:	7,36E+03	1,01E+07	1,55E+07	Delta x=	-4,83E+26
	2,68E+09	4,39E+12	4,33E+12		
	3,79E+09	4,33E+12	9,43E+12		
Det. C:	36,00	7,38E+03	1,55E+07	Delta y=	6,19E+22
	1,01E+07	2,68E+09	4,33E+12		
	1,55E+07	3,79E+09	9,43E+12		
Det D:	36,00	1,01E+07	7,36E+03	Delta z=	3,52E+22
	1,01E+07	4,39E+12	2,68E+09		
	1,55E+07	4,33E+12	3,79E+09		

Valor de $b_0 = -2,91$

Valor de $b_1 = 3,96 E -04$

Valor de $b_2 = 2,25 E -04$

Sustituyendo estos valores en la ecuación del plano medio:

$$z = -2,91 + 3,96 E-04 x + 2,25 E-04 y$$

Por lo tanto:

$$A = 3,96 E-04$$

$$B = 2,25 E-04$$

$$C = -1,0$$

$$D = -2,91$$

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

Según el teorema antes mencionado para determinar la distancia de un punto a un plano y la asignación del signo del radical se obtienen los siguientes resultados, en donde las unidades son micrómetros:

Punto	X	Y	z	Ax	By	Cz	d
1	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,91
2	186666,7	0,0	71,0	73,8	0,0	-71,0	-0,08
3	373333,3	0,0	142,5	147,7	0,0	-142,5	2,27
4	560000,0	0,0	218,6	221,5	0,0	-218,6	-0,01
5	0,0	107500,0	23,4	0,0	24,2	-23,4	-2,17
6	186666,7	107500,0	93,7	73,8	24,2	-93,7	1,37
7	373333,3	107500,0	167,3	147,7	24,2	-167,3	1,67
8	560000,0	107500,0	244,9	221,5	24,2	-244,9	-2,16
9	0,0	215000,0	47,0	0,0	48,4	-47,0	-1,60
10	186666,7	215000,0	117,4	73,8	48,4	-117,4	1,79
11	373333,3	215000,0	193,3	147,7	48,4	-193,3	-0,19
12	560000,0	215000,0	268,0	221,5	48,4	-268,0	-1,05
13	0,0	322500,0	70,9	0,0	72,7	-70,9	-1,40
14	186666,7	322500,0	142,1	73,8	72,7	-142,1	1,29
15	373333,3	322500,0	214,5	147,7	72,7	-214,5	2,68
16	560000,0	322500,0	292,2	221,5	72,7	-292,2	-1,12
17	0,0	430000,0	94,5	0,0	96,9	-94,5	-0,83
18	186666,7	430000,0	165,9	73,8	96,9	-165,9	1,58
19	373333,3	430000,0	238,7	147,7	96,9	-238,7	2,69
20	560000,0	430000,0	316,6	221,5	96,9	-316,6	-1,36
21	0,0	537500,0	118,6	0,0	121,1	-118,6	-0,76
22	186666,7	537500,0	189,5	73,8	121,1	-189,5	2,12
23	373333,3	537500,0	262,8	147,7	121,1	-262,8	2,70
24	560000,0	537500,0	340,5	221,5	121,1	-340,5	-1,12
25	0,0	645000,0	142,7	0,0	145,3	-142,7	-0,80
26	186666,7	645000,0	215,1	73,8	145,3	-215,1	0,71
27	373333,3	645000,0	287,9	147,7	145,3	-287,9	1,77
28	560000,0	645000,0	366,4	221,5	145,3	-366,4	-2,88
29	0,0	752500,0	166,5	0,0	169,5	-166,5	-0,41
30	186666,7	752500,0	239,2	73,8	169,5	-239,2	0,77
31	373333,3	752500,0	312,0	147,7	169,5	-312,0	1,82
32	560000,0	752500,0	390,7	221,5	169,5	-390,7	-3,03
33	0,0	860000,0	191,4	0,0	193,7	-190,3	-0,10
34	186666,7	860000,0	265,7	73,8	193,7	-264,6	-0,47
35	373333,3	860000,0	339,7	147,7	193,7	-338,5	-0,61
36	560000,0	860000,0	413,1	221,5	193,7	-412,0	-0,18

Tabla 28: distancias

Se obtiene el valor positivo mayor y el valor negativo menor, que serán las distancias a las cuales se encuentran los planos paralelos del plano medio, la distancia entre dichos planos será el error de planitud, posteriormente se pueden manipular los datos de tal forma que todas las

Capítulo 5: Algoritmo de Medición.

distancias sean positivas, para hacer una gráfica en un cuadrante donde los valores de los ejes sean positivos.

Valor positivo mayor:	2,70	micrómetros
Valor negativo menor:	-3,03	micrómetros

Error de planitud= 5,71 Micrómetros

La gráfica representativa de la superficie es la siguiente:

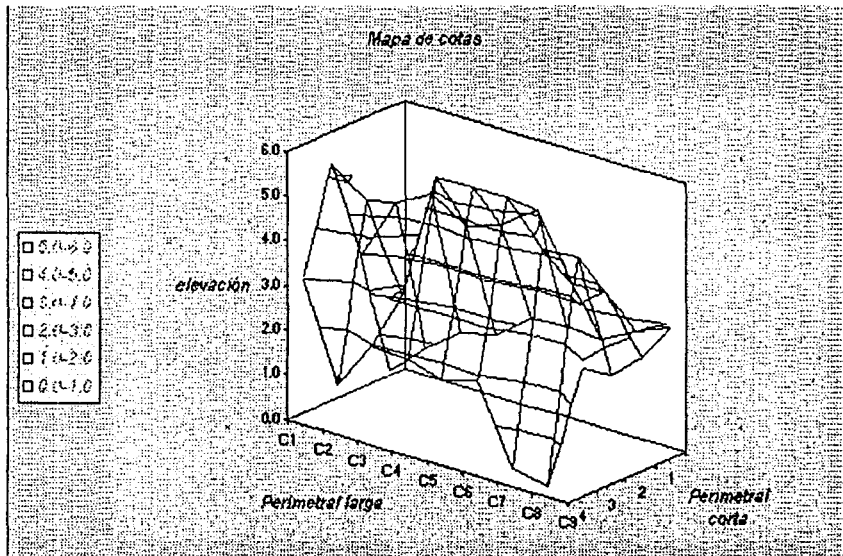


Ilustración 30: Mapa de cotas.

El resultado de la incertidumbre para el presente caso, según lo explicado en el Capítulo 3 es de $\pm 0,93$ micrómetros.

Capítulo 6.

Validación del Método.

Para realizar la validación del método se realizan las mediciones entre cada nodo utilizando el pie extensible y un nivel electrónico, con lo cual se obtiene el desnivel entre cada par de nodos, se mide en la dirección de la perimetral corta en todas las líneas desde A hasta I, esto significa que en cada línea se obtienen tres datos, ya que la distancia entre nodos es de 186,67 mm, distancia a la que se debe ajustar el pie extensible. Posteriormente, una vez colocado y atornillado el nivel, se hace un cero automático por medio del amplificador digital y se comienza a medir. Para el caso de las mediciones necesarias a lo largo de la perimetral larga, se ajusta la distancia del pie extensible a 107,5 mm, lo que implica que se obtienen ocho mediciones. El proceso se realiza en tres ocasiones, se obtiene un promedio de los datos, y se transforman los segundos de arco en grados, se obtiene el seno de cada ángulo que multiplicado por la longitud correspondiente da como resultado una altura o cota en cada nodo, a continuación se tienen las ecuaciones de transformación necesarias para obtener dichas cotas de cada nodo:

$$\begin{array}{lll}
 h_1 = 0 & h_{13} = L_2 \operatorname{sen} \beta_3 + h_9 & h_{25} = L_2 \operatorname{sen} \beta_6 + h_{21} \\
 h_2 = L_1 \operatorname{sen} \alpha_1 & h_{14} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{10} + h_{13} & h_{26} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{19} + h_{25} \\
 h_3 = L_1 \operatorname{sen} \alpha_2 + h_2 & h_{15} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{11} + h_{14} & h_{27} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{20} + h_{26} \\
 h_4 = L_1 \operatorname{sen} \alpha_3 + h_3 & h_{16} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{12} + h_{15} & h_{28} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{21} + h_{27} \\
 \\
 h_5 = L_2 \operatorname{sen} \beta_1 & h_{17} = L_2 \operatorname{sen} \beta_4 + h_{13} & h_{29} = L_2 \operatorname{sen} \beta_7 + h_{25} \\
 h_6 = L_1 \operatorname{sen} \alpha_4 + h_5 & h_{18} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{13} + h_{17} & h_{30} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{22} + h_{29} \\
 h_7 = L_1 \operatorname{sen} \alpha_5 + h_6 & h_{19} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{14} + h_{18} & h_{31} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{23} + h_{30} \\
 h_8 = L_1 \operatorname{sen} \alpha_6 + h_7 & h_{20} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{15} + h_{19} & h_{32} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{24} + h_{31} \\
 \\
 h_9 = L_2 \operatorname{sen} \beta_2 + h_5 & h_{21} = L_2 \operatorname{sen} \beta_5 + h_{17} & h_{33} = L_2 \operatorname{sen} \beta_8 + h_{29} \\
 h_{10} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_7 + h_9 & h_{22} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{16} + h_{21} & h_{34} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{25} + h_{33} \\
 h_{11} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_8 + h_{10} & h_{23} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{17} + h_{22} & h_{35} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{26} + h_{34} \\
 h_{12} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_9 + h_{11} & h_{24} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{18} + h_{23} & h_{36} = L_1 \operatorname{sen} \alpha_{27} + h_{35}
 \end{array}$$

Teniendo las cotas en los 36 nodos, estos datos se pueden manipular de la misma forma que las cotas obtenidas utilizando el nuevo método, por lo que el procedimiento es el mismo, los datos que se obtienen son los siguientes:

$$\text{Error de planitud} = 4,77 \text{ Micrómetros}$$

Capítulo 6: Validación del Método.

La incertidumbre expandida, utilizando un factor de cobertura $k = 2$, para el método de validación es de $\pm 0,94$ micrómetros, dicha incertidumbre se determina de acuerdo a lo explicado en el Capítulo 3.

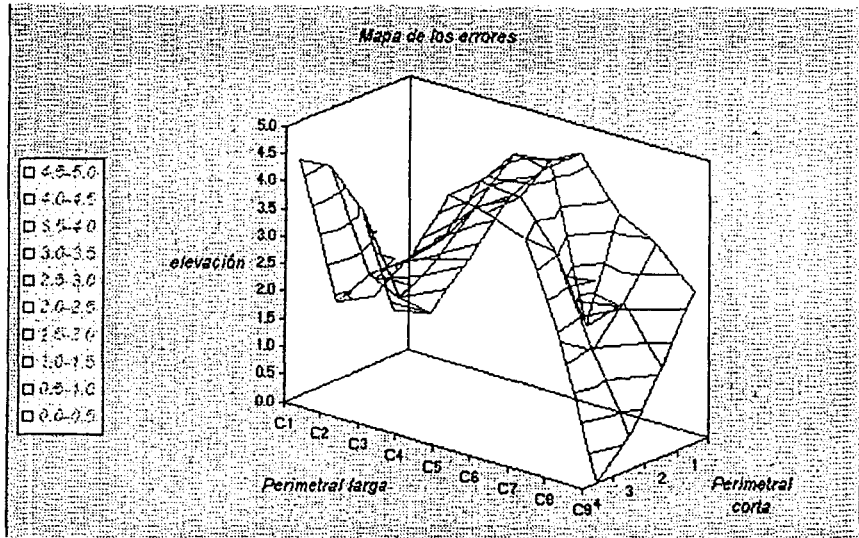


Ilustración 31: Gráfica del método de validación.

Este valor se compara con el resultado obtenido por el método de Union Jack, el cual ha sido ejemplificado en el Capítulo 3, los datos obtenidos directamente de las mediciones, y los cálculos para obtener las alturas se dan a continuación, así como el número de divisiones a lo largo de cada perimetral:

Paso perimetral largo: 107,5 mm
Divisiones perimetrales largas: 8

Paso perimetral corto: 93,33 mm
Divisiones perimetrales cortas: 6

Paso diagonal: 102,63 mm
Divisiones diagonales: 10,00

Capítulo 6: Validación del Método.

Los datos en la perimetral larga AB son:

#	Perimetral AB (seg.)			Promedio AB
1	0	0	0	0,0
2	-6,2	-5,8	-5,5	-5,8
3	-5,7	-6,4	-6,5	-6,2
4	-7,4	-6,2	-6,5	-6,7
5	-4,8	-4,4	-4,2	-4,5
6	-3,5	-3,3	-3,5	-3,4
7	-1,4	-1,9	-1,7	-1,7
8	-2,8	-2,8	-2,6	-2,7
9	-2,2	-2	-1,7	-2,0

Grados	Radianes	Sen	mm	micrómetros	acumulado
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00
-0,00162	-0,00003	-0,00003	-0,00304	-3,04	-3,04
-0,00172	-0,00003	-0,00003	-0,00323	-3,23	-6,27
-0,00186	-0,00003	-0,00003	-0,00349	-3,49	-9,76
-0,00124	-0,00002	-0,00002	-0,00233	-2,33	-12,09
-0,00095	-0,00002	-0,00002	-0,00179	-1,79	-13,88
-0,00046	-0,00001	-0,00001	-0,00087	-0,87	-14,75
-0,00076	-0,00001	-0,00001	-0,00142	-1,42	-16,17
-0,00055	-0,00001	-0,00001	-0,00102	-1,02	-17,20

Tabla 29: Validación, perimetral AB.

Capítulo 6: Validación del Método.

Para la perimetral larga HF:

#	Central HF (seg.)			Promedio HF
1	0	0	0	0,0
2	-3,8	-2,9	-2,4	-3,0
3	-4,3	-4	-3,3	-3,9
4	-4,8	-3,9	-3,5	-4,1
5	-4,6	-3,8	-2,9	-3,8
6	-1,6	-1,4	-1,8	-1,6
7	-4,3	1,3	3,7	0,2
8	-1,7	-1,9	-1,2	-1,6
9	-2,1	-1,8	-1,9	-1,9

Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	acumulado
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00
-0,00084	-0,00001	-0,00001	-0,00158	-1,58	-1,58
-0,00107	-0,00002	-0,00002	-0,00202	-2,02	-3,60
-0,00113	-0,00002	-0,00002	-0,00212	-2,12	-5,72
-0,00105	-0,00002	-0,00002	-0,00196	-1,96	-7,68
-0,00044	-0,00001	-0,00001	-0,00083	-0,83	-8,51
0,00006	0,00000	0,00000	0,00012	0,12	-8,39
-0,00044	-0,00001	-0,00001	-0,00083	-0,83	-9,22
-0,00054	-0,00001	-0,00001	-0,00101	-1,01	-10,23

Tabla 30: Validación, perimetral HF.

Para la perimetral larga DC:

#	Perimetral DC (seg.)			Promedio DC
1	0	0	0	0,0
2	0,1	-0,1	-0,3	-0,1
3	-2,8	-2,3	-2,6	-2,6
4	-3,4	-3,2	-3,5	-3,4
5	-2,5	-2,4	-2,4	-2,4
6	-2,1	-2,5	-2,2	-2,3
7	-0,1	-0,1	-0,4	-0,2
8	-0,5	-0,8	-0,8	-0,7
9	-0,4	-0,8	-0,6	-0,6

Capítulo 6: Validación del Método.

Grados	Radianes	Sen	mm	micrómetros	acumulado
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00
-0,00003	0,00000	0,00000	-0,00005	-0,05	-0,05
-0,00071	-0,00001	-0,00001	-0,00134	-1,34	-1,39
-0,00094	-0,00002	-0,00002	-0,00175	-1,75	-3,14
-0,00068	-0,00001	-0,00001	-0,00127	-1,27	-4,41
-0,00063	-0,00001	-0,00001	-0,00118	-1,18	-5,59
-0,00006	0,00000	0,00000	-0,00010	-0,10	-5,70
-0,00019	0,00000	0,00000	-0,00036	-0,36	-6,06
-0,00017	0,00000	0,00000	-0,00031	-0,31	-6,38

Tabla 31: Validación, perimetral DC.

Los cálculos respectivos para la perimetral corta AD son:

#	Perimetral AD (seg.)			Promedio AD
1	0	0	0	0,0
2	2,4	1,8	2,6	2,3
3	1,7	1,5	1,6	1,6
4	5,4	5,6	5,3	5,4
5	4,6	4,6	5	4,7
6	7,2	5,9	6,4	6,5
7	9,2	7,8	7,6	8,2

Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	acumulado
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00
0,00063	0,00001	0,00001	0,00103	1,03	1,03
0,00044	0,00001	0,00001	0,00072	0,72	1,75
0,00151	0,00003	0,00003	0,00246	2,46	4,21
0,00131	0,00002	0,00002	0,00214	2,14	6,35
0,00181	0,00003	0,00003	0,00294	2,94	9,29
0,00228	0,00004	0,00004	0,00371	3,71	13,00

Tabla 32: Validación, perimetral AD.

Capítulo 6: Validación del Método.

Para la perimetral corta EG:

#	Central EG (seg.)			Promedio EG
	0	0	0	
1				
2	4,1	4,3	4,1	4,2
3	6,5	6,6	6,3	6,5
4	5,5	6,4	6,3	6,1
5	6,6	6,2	6,5	6,4
6	7,1	6,8	6,9	6,9
7	6,9	6,7	6,6	6,7

Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	acumulado
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00
0,00116	0,00002	0,00002	0,00189	1,89	1,89
0,00180	0,00003	0,00003	0,00293	2,93	4,81
0,00169	0,00003	0,00003	0,00275	2,75	7,56
0,00179	0,00003	0,00003	0,00291	2,91	10,47
0,00193	0,00003	0,00003	0,00314	3,14	13,60
0,00187	0,00003	0,00003	0,00305	3,05	16,65

Tabla 33: Validación, perimetral EG.

Para la perimetral corta BC:

#	Perimetral BC (seg.)			Promedio BC
	0	0	0	
1				0,0
2	6,8	7,4	6,9	7,0
3	7,2	7	7,1	7,1
4	7,3	7,6	7,2	7,4
5	7,1	7,1	7,3	7,2
6	7,5	7,3	7,1	7,3
7	7,4	7,6	6,8	7,3

Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	acumulado
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00
0,00195	0,00003	0,00003	0,00318	3,18	3,18
0,00197	0,00003	0,00003	0,00321	3,21	6,40
0,00205	0,00004	0,00004	0,00333	3,33	9,73
0,00199	0,00003	0,00003	0,00324	3,24	12,97
0,00203	0,00004	0,00004	0,00330	3,30	16,27
0,00202	0,00004	0,00004	0,00329	3,29	19,56

Tabla 34: Validación, perimetral BC.

Capítulo 6: Validación del Método.

Los resultados para la diagonal AC son:

#	Diagonal AC (seg.)			Promedio AC
1	0	0	0	0,0
2	-3,1	-2,1	-2,2	-2,5
3	-0,6	-0,4	-0,4	-0,5
4	0,2	0,1	0,1	0,1
5	0,3	0,2	0,3	0,3
6	1,1	1,6	1,4	1,4
7	0,7	0,4	0,5	0,5
8	3,8	4,3	3,6	3,9
9	2,3	2,6	2,4	2,4
10	1,4	1,9	1,6	1,6
11	3,3	3,8	3,6	3,6

Grados	Radianes	Sen	mm	micrómetros	Acumulado
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00
-0,00069	-0,00001	-0,00001	-0,00123	-1,23	-1,23
-0,00013	0,00000	0,00000	-0,00023	-0,23	-1,46
0,00004	0,00000	0,00000	0,00007	0,07	-1,39
0,00007	0,00000	0,00000	0,00013	0,13	-1,26
0,00038	0,00001	0,00001	0,00068	0,68	-0,58
0,00015	0,00000	0,00000	0,00027	0,27	-0,32
0,00108	0,00002	0,00002	0,00194	1,94	1,63
0,00068	0,00001	0,00001	0,00121	1,21	2,84
0,00045	0,00001	0,00001	0,00081	0,81	3,65
0,00099	0,00002	0,00002	0,00177	1,77	5,42

Tabla 35: Validación, diagonal AC.

y finalmente para la diagonal BD:

#	Diagonal BD (seg.)			Promedio BD
1	0	0	0	0,0
2	5,8	5,9	5,8	5,8
3	7	7,5	7,4	7,3
4	5,2	5,2	5,3	5,2
5	5,9	5,3	5,6	5,6
6	6,6	6,5	6,6	6,6
7	7,7	7,5	7,7	7,6
8	7,5	7,5	7,5	7,5
9	7,6	7,4	7,4	7,5
10	9	8,6	8,8	8,8
11	6,5	6,4	6,5	6,5

Capítulo 6: Validación del Método.

Grados	Radianes	sen	mm	micrómetros	acumulado
0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00
0,00162	0,00003	0,00003	0,00290	2,90	2,90
0,00203	0,00004	0,00004	0,00363	3,63	6,53
0,00145	0,00003	0,00003	0,00260	2,60	9,14
0,00156	0,00003	0,00003	0,00279	2,79	11,92
0,00182	0,00003	0,00003	0,00327	3,27	15,19
0,00212	0,00004	0,00004	0,00380	3,80	18,99
0,00208	0,00004	0,00004	0,00373	3,73	22,72
0,00207	0,00004	0,00004	0,00371	3,71	26,44
0,00244	0,00004	0,00004	0,00438	4,38	30,81
0,00180	0,00003	0,00003	0,00322	3,22	34,03

Tabla 36: Validación, diagonal BD.

La gráfica resultante utilizando el método de Union Jack es la siguiente:

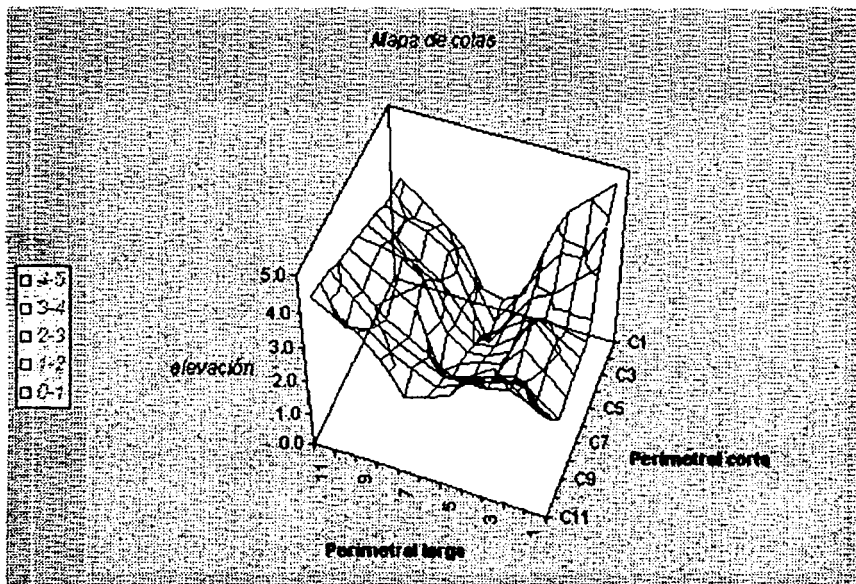


Ilustración 32: Utilizando el método de Union Jack.

Capítulo 6: Validación del Método.

La incertidumbre expandida para el presente caso es de

Incertidumbre = $\pm 2,54$ Micrómetros

El valor del error de planitud es el siguiente:

Error de planitud = 4,55 micrómetros

Desde la perspectiva de planta o superior:

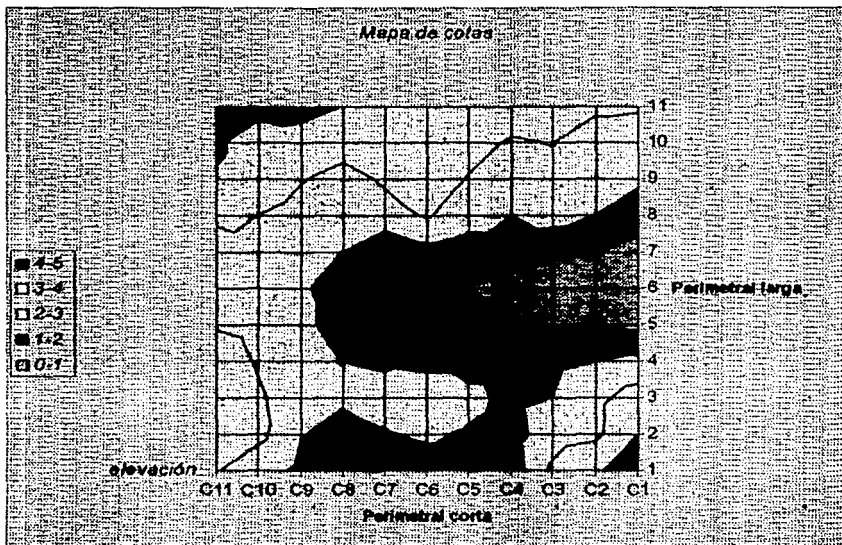


Ilustración 33: Vista superior.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 7.

Análisis de resultados.

En la tabla que se presenta a continuación se observan los resultados obtenidos al medir la mesa de planitud del Laboratorio de Metrología del CIUNAM utilizando el método de Union Jack, el método nuevo y el método de validación:

Método:			
	Union Jack	Método Nuevo	Validación del Método Nuevo
Error de planitud	4,55 μm	5,71 μm	4,77 μm
Incertidumbre	$\pm 2,54 \mu\text{m}$	$\pm 0,93 \mu\text{m}$	$\pm 0,94 \mu\text{m}$
Rango	2,01– 7,09 μm	4,78– 6,64 μm	3,83– 5,71 μm

Tabla 37: Resultados obtenidos.

Para cada método se muestra el error de planitud obtenido, la incertidumbre asociada y el rango en el cual se encuentra el error de planitud, para calcular el límite superior dentro del rango se suma el error de planitud con la incertidumbre asociada y para el caso del límite inferior se resta el error de planitud y la incertidumbre asociada.

Al utilizar el método de Union Jack, el error de planitud obtenido es de 4,55 μm , que como se observa de la tabla anterior es el dato de menor magnitud numérica, pero la incertidumbre asociada es de $\pm 2,54 \mu\text{m}$, que es aproximadamente 2,73 veces mayor que la incertidumbre asociada para los métodos nuevo y de validación, por lo que el rango en el que se encuentra el error de planitud abarca desde 2,01 hasta 7,09 μm , lo que equivale a una amplitud de 5,08 μm .

Utilizando el método nuevo se obtiene un error de planitud de 5,71 μm , que es el dato de mayor magnitud numérica, sin embargo, la incertidumbre asociada para este caso es de $\pm 0,93 \mu\text{m}$, con lo cual el rango en el que se encuentra el error de planitud va desde 4,78 μm hasta 6,64 μm , lo que es equivalente a una amplitud de 1,86 μm . El método de validación da un resultado

Capítulo 7: Análisis de resultados.

de $4,77 \mu\text{m}$ en el error de planitud y $0,94 \mu\text{m}$ en la incertidumbre asociada, que es muy cercana a la obtenida con el método nuevo.

De lo anterior se puede observar que el valor del error de planitud obtenido con el método nuevo se encuentra dentro del rango del error de planitud del método de validación (límite superior) así como dentro del rango del error de planitud del método de Union Jack.

Conclusiones.

Conclusiones.

Del análisis de resultados presentado en el capítulo anterior, se observa que el resultado obtenido del error de planitud utilizando el método nuevo ($5,71 \mu\text{m}$), se encuentra dentro de los rangos del error de planitud del método de Union Jack y del método de validación. La incertidumbre asociada para el caso del método nuevo es de 2,73 veces menor, lo que indica que al utilizar el método nuevo se presentan menores errores durante el proceso de toma de datos.

Otro aspecto importante a considerar, es que el proceso de toma de datos se simplifica notablemente, debido a que en cada paso de medición se toman cuatro lecturas con el método nuevo, en comparación con el método de Union Jack, en el que se toma una lectura por cada paso de medición, lo que implica que el tiempo de medición total sea menor, aunque esto último depende de la persona que realice la medición.

Al utilizar el método nuevo, se abarcan zonas de la superficie, en las que el método de Union Jack no toma lecturas, por lo que se puede afirmar que el método nuevo da una idea más próxima a la realidad en lo que se refiere al valor obtenido del error de planitud. Al observar los resultados de las incertidumbres asociadas se puede afirmar que el método nuevo da resultados más confiables, puesto que la incertidumbre es mucho menor (2,73 veces).

El costo de fabricación del sistema es bajo (718,93 pesos mexicanos), ya que la calibración de una mesa de las dimensiones analizadas, supera los 2,000 pesos por lo que la inversión se recupera rápidamente.

Referencias.

Referencias

- [1] Diccionario de la Lengua Española. Decimonovena edición. Real Academia Española. Madrid 1970
- [2] Segundo Estévez Somolinos La medición en el taller mecánico. Tercera edición.. Barcelona España 1962.
- [3] Norma internacional ISO 8512-2 de 1990 Surface Plates. Part 2: Granite. Primera Edición 1990-12-01.
- [4] Francis T. Farago Handbook of dimentional measurement. Segunda Edición 1982.
- [5] Roberto Galicia Sánchez. Metrología geométrica dimensional. Editorial AGT, S.A. primera edición 1986.
- [6] Donald R. Askeland. La ciencia e Ingeniería de los materiales. Grupo editorial Iberoamérica 1987.
- [7] Richard A. Johnson. Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund. Quinta edición. 1997. Prentice Hall-Hispanoamerica, S.A.
- [8] Charles H. Lehmann. Geometría Analítica. Decimacuarta edición 1990. Editorial Limusa Noriega.
- [9] Howard Antón. Introducción al Álgebra Lineal. Tercera edición. Editorial Limusa.
- [10] Collett-Hope. Mediciones en Ingeniería. Editorial Gustavo Gili, S.A. Primera edición 1986.
- [11] Stuart Pugh. Total Design, Integrated Methods for Successful Product Engineering. Addison-Wesley Publishing Company. 1990.
- [12] Ferdinand P. Beer. Mecánica de Materiales. Segunda edición 1999. McGraw-Hill Interamericana.

Bibliografía.

Bibliografía.

- FRANCIS T. FARAGO Handbook of dimensional measurement. Segunda Edición 1982.
- K. J. HUME. Engineering Metrology. Second Edition 1963. Ed. Macdonald and Co. Ltd.
- SEGUNDO ESTÉVEZ SOMOLINOS La medición en el taller mecánico. Tercera edición.. Barcelona España 1962.
- DANIEL E. PUNCOCHAR Interpretation of geometric dimensioning and tolerancing, New York Industrial 1990.
- Mediciones Mecánicas. Prácticas. Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales. Facultad de Ingeniería. UNAM.
- ERNEST O. DOEBELIN Measurement Systems, application and design.. International Student Edition. Mc. Graw-Hill 1980.
- H. ROBERTO GALICIA SÁNCHEZ Metrología geométrica dimensional. Editorial AGT, S.A. Primera edición 1986.
- ELLEN FINKELSTEIN AutoCad 14 bible. I.D.G. Books worldwide 1997.
- RICHARD A. JOHNSON Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund.. Quinta edición. 1997. Prentice Hall-Hispanoamerica S.A.
- DONALD R. ASKELAND. La ciencia e Ingeniería de los materiales. Grupo editorial Iberoamérica 1987.
- CHARLES H. LEHMANN. Geometría Analítica Decimacuarta edición 1990. Editorial Limusa Noriega.
- HOWARD ANTÓN. Introducción al Álgebra Lineal. Tercera edición. Editorial Limusa.

Bibliografía.

- COLLETT-HOPE. Mediciones en Ingeniería. Editorial Gustavo Gili, S.A. Primera edición castellana. Barcelona 1976.
- Diccionario de la Lengua Española. Decimonovena edición. Real Academia Española. Madrid 1970.
- Norma internacional ISO 8512-2 de 1990. Surface Plates. Part 2: Granite. Primera Edición 1990-12-01.
- Gran Enciclopedia Larousse. Editorial Planeta 1993. Quinta edición.
- Diccionario Enciclopédico ESPASA. Octava edición. ESPASA – CALPE, S.A. Madrid 1979.
- JOSEPH EDWARD SHIGLEY. Diseño en Ingeniería Mecánica. Segunda edición 1981. Mc. Graw Hill de México S.A. de C.V.
- FERDINAND P. BEER. Mecánica de Materiales. Segunda edición 1999. McGraw-Hill Interamericana.

Índice alfabético.

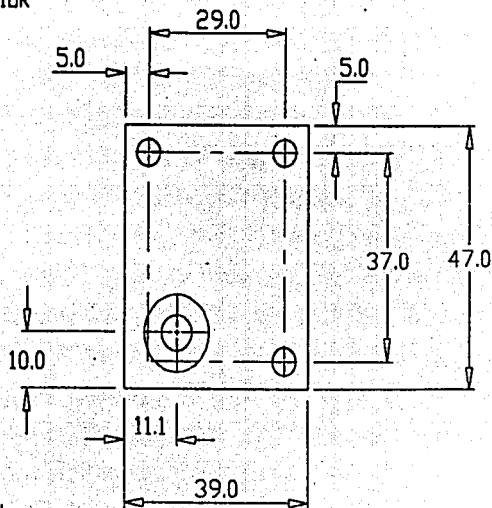
Índice alfabético.

A	
ajuste	11, 13, 20, 21, 36, 66, 67
alabeo	22, 28, 29, 31
autocolimador	33, 34, 35
B	
bloques patrón	25, 26, 27, 28, 31, 55, 56, 64, 68, 69
C	
calibración	2, 9, 11, 12, 19, 47, 52
E	
error de planitud	48, 69, 70, 80, 82, 92
exactitud	8, 12, 13, 18, 26, 32, 34, 54
F	
franjas de interferencia luminosa	25
I	
indicadores electrónicos	53, 54, 64
M	
Marmoleado	20
Mesas de referencia	14
método de los tres mármoles	21
métodos ópticos	23, 26
metrología	8, 9, 10, 11, 12
metrología científica	9
metrología dimensional	10
metrología industrial	9
metrología legal	9
metrológica oficial	9
N	
nivel de burbuja	18, 29, 30
odos	
norma internacional ISO 8512-2 de 1990	13, 54, 96, 98
P	
perimetral corta	36, 53, 55, 65, 66, 75, 77, 84, 88, 89
perimetral larga	36, 41, 55, 65, 66, 67, 69, 72, 75, 77, 84, 86, 87
planitud	2, 10, 12, 13, 18, 20, 22, 23, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 34, 48, 54
plano de referencia	13, 22, 27, 29, 32, 33, 34
plano medio	70, 77, 78, 79, 80
R	
regresión múltiple	70, 78
Rockwell C	18
S	
Sistema Métrico Decimal	10
T	
ternas ordenadas	77
trazabilidad	11
U	
Union Jack	34, 35, 71
V	
vista topográfica	34
W	
Whitworth	17, 21
Z	
Zeiss	24

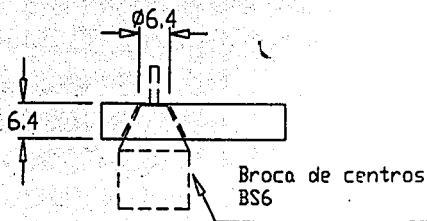
Apéndice.

Apéndice.

VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



Placa menor a una pieza.

Tolerancias generales: ± 0.4

Acabado superficial: ∇

NOTAS.

Los 3 agujeros pequeños son pasados de $\phi 5.1$ mm ($19/64$ in)

Para la perforación cónica utilizar una broca de centros BS6, teniendo la máxima penetración a la altura del diámetro menor del cono.

MATERIALES.

Placa de acero 1018 ó similar, de 6.35 mm ($1/4$ in) de espesor.

CENTRO DE INSTRUMENTOS

U N A M

PROYECTO: MET 0015

Diseño y Construcción de un Sistema para Medición de Planitud de Mesas de Referencia.

LABORATORIO:

METROLOGIA

ESC: S/E

DIB. No.: 001

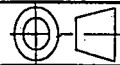
FECHAS: 12/FEB/01

ACOT: mm

DBUJO: CARLOS VALDES

DISEÑO: CARLOS VALDES

REVISO/APROBO: R. Nova S.



Tolerancias generales: ± 0.4

Acabado superficial: ∇

NOTAS.

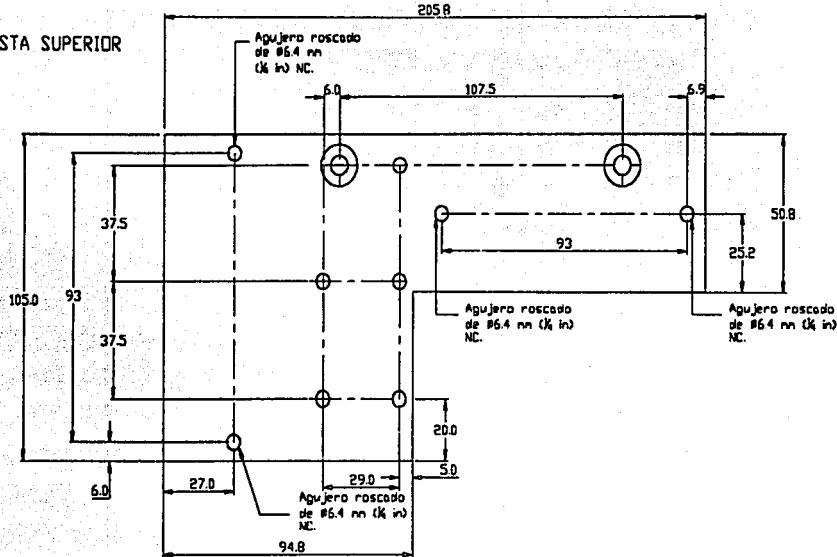
Los 5 agujeros pequeños sin indicaciones son pasados de $\varnothing 5.1$ mm ($13/4$ in).

Para la perforación cónica utilizar una broca de centros BS6, teniendo la máxima penetración a la altura del diámetro menor del cono.

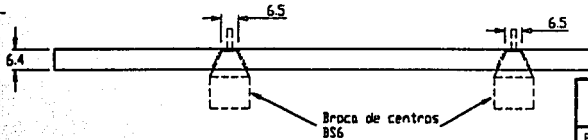
MATERIALES.

Placa de acero 1018 ó similar, de 6.35 mm ($1/4$ in) de espesor.

VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



Placa mayor: una pieza.

CENTRO DE INSTRUMENTOS

U N A M

PROYECTO: MET 0015
Diseño y Construcción de un Sistema para Medición de Planitud de Mesas de Referencia.

LABORATORIO:
METROLOGIA

ESC: S/E

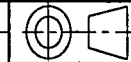
DIB. No.: 002

FECHAS: 12/FEB/01

ACOT: mm

DIBUJO: CARLOS VALDES

DISENO: CARLOS VALDES



REVISO/APROBO:
R. Novo S.

Tolerancias generales: ± 0.4

Acabado superficial: ∇

NOTAS.

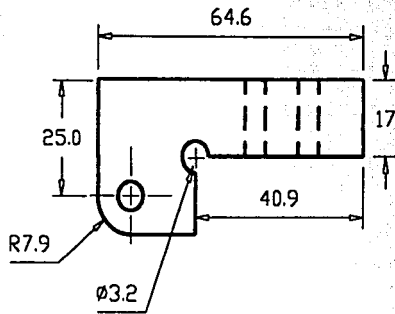
Los dos agujeros pequeños de la vista superior son pasados de $\varnothing 5.1$ mm ($1/4$ in).

El agujero de la vista lateral es roscado de $\varnothing 6.4$ mm ($1/4$ in) NC

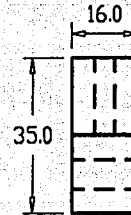
MATERIALES.

Latón ó aluminio.

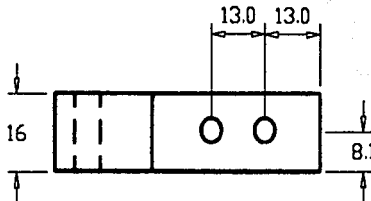
VISTA LATERAL



VISTA FRONTAL



VISTA SUPERIOR



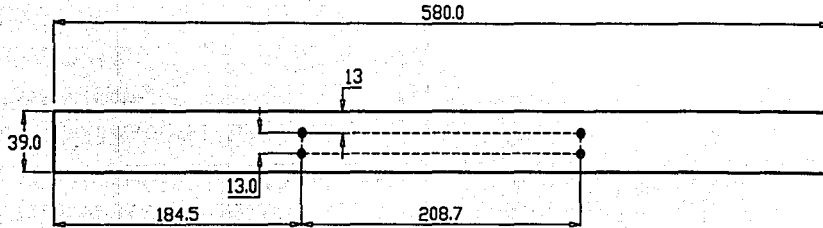
Soporte: dos piezas.

CENTRO DE INSTRUMENTOS			
U	N	A	M
PROYECTO: MET 0015 Diseño y Construcción de un Sistema para Medición de Planitud de Mesas de Referencia.		LABORATORIO: METROLOGÍA	
ESC: S/E	DB. No.: 003		
FECHAS: 12/FEB/01	ACD: mm		
DIBUJO: CARLOS VALDES	DISEÑO: CARLOS VALDES	REVISO/APROBO: R. Nova S.	

Tolerancias generales: $\pm 0,4$

Acabado superficial: ∇

VISTA SUPERIOR



NOTAS.

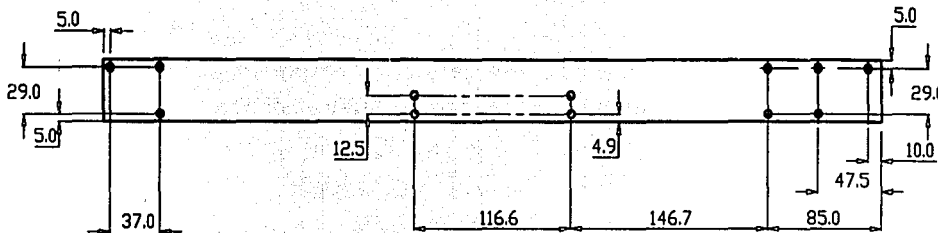
Todos los agujeros de la vista inferior son roscados de $\varnothing 4.8$ mm ($\frac{3}{16}$ in) NC.

Los cuatro agujeros de la vista superior son roscados de $\varnothing 4.8$ mm ($\frac{3}{16}$ in) NC.

MATERIALES.

Perfil tubular de aluminio de sección rectangular de 39X77mm, de 2mm de espesor de pared.

VISTA INFERIOR



Estructura: una pieza.

CENTRO DE INSTRUMENTOS

U N A M

PROYECTO: MET 0015
Diseño y Construcción de un Sistema para Medición de Planitud de Mesas de Referencia.

LABORATORIO:
METROLOGÍA

ESC: S/E

DB. No.: 004

FECHAS: 12/FEB/01

ACOT: mm

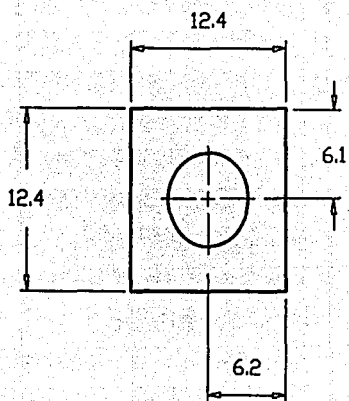
DIBUJO: CARLOS VALDES

DISÑO: CARLOS VALDES

REVISO/APROB: R. Nava S.



VISTA SUPERIOR:



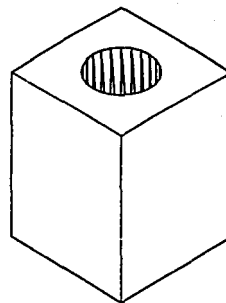
Tolerancias generales: ± 0.4

Acabado superficial: ∇

NOTAS.

El agujero de la vista superior es roscada de $\varnothing 6.4$ mm ($1/4$ in) NC.

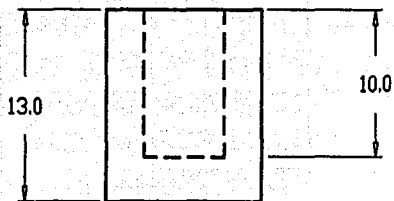
VISTA 3D:



MATERIALES.

Latón ó aluminio.

VISTA LATERAL:

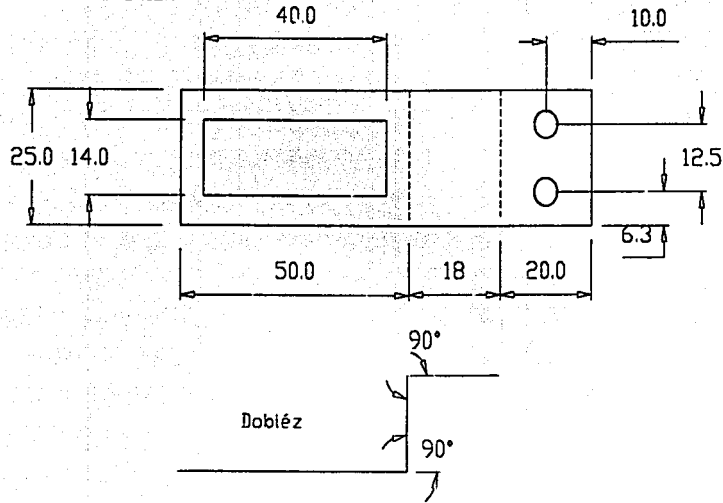


Tope de seguridad:
1 pieza.

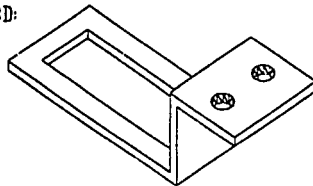
CENTRO DE INSTRUMENTOS		
U N A M		
PROYECTO: MET 0015 Diseño y Construcción de un Sistema para Medición de Planitud de Mesas de Referencia.		LABORATORIO: METROLOGIA
ESC: S/E	DIB. No.: 005	
FECHA: 26/FEB/01	ACOT: mm	
DIBUJO: CARLOS VALDES	DISEÑO: CARLOS VALDES	REVISO/APROBO: R. Nava S.

Tolerancias generales: ± 0.4

VISTA SUPERIOR:



VISTA 3D:



Placa inferior
dos piezas:

NOTAS.

Los agujeros de la vista superior son pasados de $\varnothing 5.1$ ($19/64$ in).

MATERIALES.

Lámina negra calibre 18 ó similar.

CENTRO DE INSTRUMENTOS

U N A M

PROYECTO: MET 0015

Diseño y Construcción de un Sistema para Medición de Planitud de Mesas de Referencia.

LABORATORIO:
METROLOGIA

ESC: S/E

DIB. No.: 006

FECHAS: 12/FEB/01

ACOT: mm

DIBUJO: CARLOS VALDES

DISEÑO: CARLOS VALDES

REVISÓ/APROBO:
R. Nava S.

