



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Estudio sobre la medida del error de planitud con láser interferométrico

Autor:

Granados Romero, Adrián

Tutor:

**López Ruiz, Roberto
CMeIM/EGI/ICGF/IM/IPF**

Valladolid, octubre 2016.

RESUMEN

RESUMEN

Las medidas tienen una gran importancia en nuestra vida, ya que las utilizamos desde la estimación a simple vista de una distancia hasta en una investigación compleja. Para realizar medidas de alta precisión o para la puesta a punto de equipos de precisión es necesario un plano de referencia lo más exacto posible, dado por una mesa de planitud. Esta referencia debe ser controlada metrológicamente realizando, por ejemplo, una medida del error de planitud de dicha mesa.

Toda medida tiene un grado de variabilidad, y es importante conocerlo. Por ello estudiamos la variabilidad, repetibilidad, reproducibilidad en la medida del error de planitud con el láser interferométrico en varios controles.

Por último, hemos estudiado y desarrollado un programa en Excel que realiza los mismos cálculos que el láser interferométrico en el control de planitud, dando claridad y transparencia a los cálculos que realiza el software del láser.

Palabras claves: planitud, láser, interferometría, reproducibilidad, repetibilidad.

ABSTRACT

The measures are very important in our lives because we use them from the estimate at a glance from a distance to a complex investigation. To perform high precision measures or to tune precision equipment we need a reference plane as accurate as possible, and the flatness tables give it. This reference must be controlled metrologically performing, for example, a measure of the flatness error of that table.

Any measure has a degree of variability, and it is important to know. Therefore we study the variability, repeatability, reproducibility in the measure of the flatness error with the interferometric laser in several controls.

Finally, we have studied and carried out a programme on Excel that performs the same calculations as the interferometric laser in the flatness control, giving clarity and transparency to the calculations made by the laser software.

Keywords: flatness, laser, interferometry, reproducibility, repeatability.

ÍNDICE

ÍNDICE

Resumen.....	1
Índice.....	5
1-Objetivos.....	9
2-Introducción.....	13
2.1-Breve historia de la metrología.....	15
2.2-Ciencia y metrología en España.....	17
2.3-Metrología actual.....	19
3-Memoria.....	21
3.1-Teoría.....	23
3.1.1-Introducción a la metrología.....	23
3.1.2-Tipos de metrología.....	23
3.1.3-Instrumentos de medida.....	24
3.1.4-Control de planitud.....	26
3.1.5-Interferometría.....	31
3.1.6-Medida del error de planitud con láser.....	35
3.2-Desarrollo.....	41
3.2.1-Medida del error cero de planitud.....	46
3.2.2-Estudio de la repetibilidad del láser.....	52
3.2.3-Estudio de la reproducibilidad del láser.....	63

3.2.4-Implantación del control de planitud en Excel.....	78
3.2.4.1-Ejemplo teórico con Excel y con el láser.....	83
4-Resultados y conclusiones.....	99
Resultados.....	101
Conclusiones.....	103
5-Estudio económico.....	105
6-Líneas futuras.....	111
7-Bibliografía.....	115

1- OBJETIVOS

OBJETIVOS

- I. Para fabricar piezas de automoción, para la puesta a punto de equipos de precisión y para otras distintas actividades es necesario tener un plano de referencia lo más exacto posible. Este plano se consigue con mesas de planitud, las cuales hay que verificar que estén en las condiciones adecuadas, es decir, hay que calibrarlas. Para ello se realiza un control sobre el error de planitud, pero hay distintas formas para llevarlo a cabo como son con un comparador, con métodos ópticos, mediante reglas biseladas, etc. Otro método de medida del error de planitud se puede llevar a cabo con láser interferométrico, que explicaremos más detalladamente y sobre el que realizaremos distintos estudios, con el fin de conocer la forma de trabajar en un laboratorio de metrología y con instrumentación de precisión, como es el láser interferométrico.
- II. Cada aparato o instrumento de medida tiene una determinada precisión y por ello, y otras muchas causas, todas las medidas tienen una cierta incertidumbre. Al empezar una medición nos puede aparecer otro error muy importante, llamado el error de cero. Hay ciertos instrumentos que no tienen este error ya que cuentan con un ajuste inicial. Dicho error aparece cuando el instrumento debería darnos un cero, pero nos da un cierto valor. Así que estudiaremos este error de cero para la medida del error de planitud.
- III. Dentro de la variabilidad de la medición se encuentran dos principales fuentes, el equipo de medición empleado y el operario. Por tanto, es interesante estudiar la variación de los resultados al realizar el mismo control de planitud con las mismas condiciones y mismo operario, cambiando únicamente el tiempo, es decir, en momentos distintos. Para ello estudiaremos la repetibilidad de un equipo láser en una mesa de planitud. Resulta también interesante estudiar la variación de esos resultados cambiando únicamente el operario. Por ello estudiaremos la reproducibilidad en la medida del error de planitud con un equipo láser

en una mesa de planitud con clase I. Podremos estudiar cual de los dos estudios influye más en los resultados.

- IV. En el control de planitud con láser interferométrico vemos que lo que se está midiendo son ángulos en arcosegundos, y que los resultados salen en micras. ¿Qué cálculos realiza el sistema que no nos muestra? A parte de la altura máxima, nos salen otros resultados llamados valores de cierre, ¿cómo los calcula y qué nos indican? El software de cálculo de error de planitud por el método de "analizado Moody" resulta opaco, nada claro. Se ha llevado a cabo un ejercicio de esclarecimiento de los cálculos que se llevan a cabo para determinar el error de planitud y se ha implantado el sistema en una hoja de Excel.

2- INTRODUCCIÓN

2.1- Breve historia de la metrología

Antes del Sistema Métrico Decimal, los humanos no tenían más remedio que echar mano de lo que llevaban encima, su propio cuerpo, para contabilizar e intercambiar productos. Así aparecieron distintas medidas como son el pie, casi siempre apoyado sobre la tierra, como unidad de medida para medir pequeños terrenos y el paso, para medir terrenos más grandes. Aparece el codo, útil para medir piezas de tela u otros objetos que se puedan colocar a la altura del brazo. Luego para medidas más pequeñas aparece la palma o la cuarta, y, para medidas más pequeñas aún, aparecen el dedo y la pulgada (el dedo gordo).

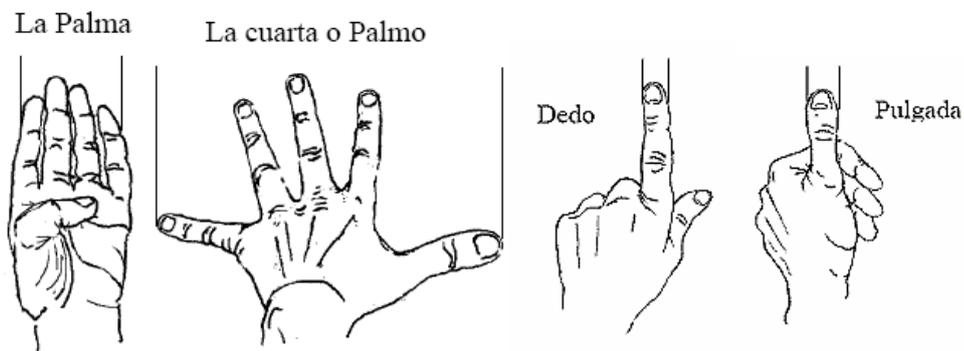


Ilustración 2.1a Medidas con el cuerpo [1]

Como se necesita una correspondencia entre unas unidades y otras, aparecen las primeras equivalencias: una pulgada tiene 12 líneas, una palma tiene cuatro dedos, un pie tiene cuatro palmas, un codo tiene pie y medio, etc. Con dichas relaciones se puede hacer un primer esbozo de un sistema antropométrico coherente, como el que se ve en la siguiente tabla:

	Dedo	Pulgada	Palma	Pie	Codo	Vara
Línea	1/9	1/12				
Grano	1/4	3/16				
Dedo		3/4				
Pulgada	4/3			1/12		
Palma	4	3		1/4		
Cuarta o Palmo	12		3	3/4		1/4
Pie	16	12	4			
Codo	24		6	1,5		
Grado	40		10	2,5	5/3	
Vara	48		12	3	2	
Paso	80		20	5	10/3	
Braza	96		24	6	4	

Tablaz.1 Equivalencias de las medidas [1]

Cada una de estas medidas se corresponde con un gesto humano característico. Así la braza es la altura del cuerpo humano, pero se forma al poner los brazos en cruz con las puntas de los dedos estiradas; y la vara, al doblar los brazos, es lo que mide el hombre de codo a codo.

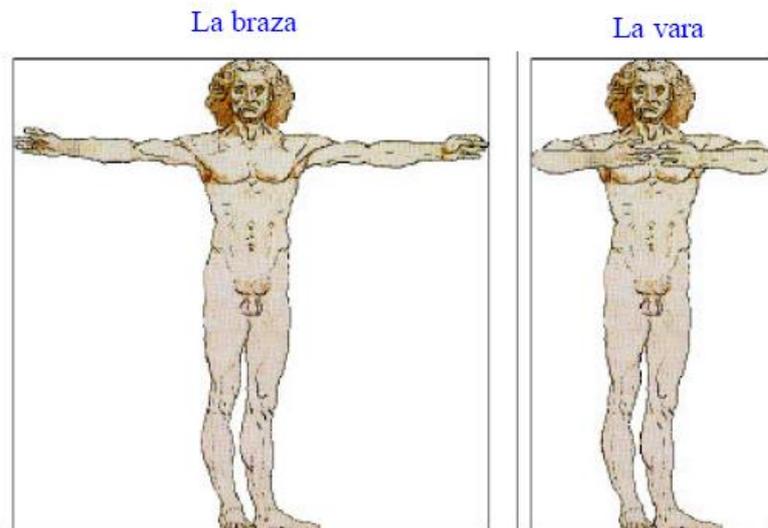


Ilustración 2.1b Medidas con el cuerpo [1]

Una regla observada a lo largo de la historia es que el grado de precisión de la medida depende el precio del producto, es decir, cuanto más barato es el producto, más de prisa se realiza la medición y con menos precisión. Actualmente diríamos que tanto la técnica de medición como el instrumento de medida deben adaptarse a la tolerancia de medida que deseamos comprobar y

que, en efecto, mayores tolerancias permiten mediciones más rápidas y con menos precisión.

Hasta el Renacimiento, la mayor parte de la información existente sobre la metrología se basa en sus aplicaciones en transacciones comerciales. Solo a partir del Renacimiento se hace visible la distinción entre metrología científica y otras actividades metrológicas, que podríamos denominar “de aplicación”.

Posteriormente, entre el final de siglo XV y XVIII, se consiguieron importantes avances en la astronomía, la geodesia y la medida del tiempo. La aparición de nuevas ideas marca para siempre el devenir de la ciencia en los países desarrollados. La metrología acompaña y precede en muchos casos a los avances científicos. Todo esto aparece cuando se establece con firmeza la superioridad del método experimental frente a la especulación. A partir de esta idea, los científicos exigen instrumentos cada vez más perfectos, pudiendo ser considerados como metrólogos aquellos que fueron capaces de construirlos por sí mismos. [1]

2.2- Ciencia y metrología en España

Los esfuerzos por acabar con la multiplicidad de valores aceptados duraron varios siglos, existiendo en la Novísima Recopilación hasta cinco leyes que se ocupan de esta cuestión, recogándose en varias de ellas algunas disposiciones más antiguas. Sin embargo, la solución definitiva tendría lugar más de doscientos años después, con la aparición del sistema métrico decimal.

Es importante saber que no solo en España sino también en el resto de países, seguía existiendo una diversidad enorme de pesos y medidas, lo cual empezaba a obstaculizar el comercio y el progreso industrial.

Aunque la primera propuesta aproximada de lo que luego conoceríamos como Sistema Métrico Decimal parece que está hecha en 1670 por el francés Gabriel Mouton, dicha propuesta sería discutida y manipulada durante más de 120 años, siendo finalmente Talleyrand el que, en 1790, la suscribió ante la Asamblea Nacional Francesa.

Finalmente, el 21 de septiembre de 1792 quedó fijado como valor del metro “la diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre que pasa por París”.

El 19 de julio de 1849 apareció la que puede considerarse como la primera ley fundamental de la metrología española, la cual dejaba claramente establecido el

concepto de uniformidad. "En todos los dominios españoles habrá solo un sistema de medidas y pesas". "La uniformidad fundamental de este sistema será igual a la diezmilésima parte del arco del meridiano que va del Polo Norte al Ecuador y se llamará metro". En el artículo tercero se materializa el patrón: "el patrón de este metro, hecho de platino, que se guarda en el conservatorio de Artes, se declaró patrón prototipo legal y con arreglo a él se ajustarían todos los del reino".

El siglo XX aportaría nuevas necesidades de precisión a las sucesivas definiciones del metro y de otras unidades, dando lugar a un sistema internacional de unidades para la ciencia y la técnica basado en el sistema métrico.

Con esta exposición en paralelo de ciencia y metrología, pretendemos mostrar los aspectos técnicos y las Instituciones que fueron apareciendo en España, a la vez que la Metrología permanecía en manos del Instituto Geográfico, hasta que la Comisión de Metrología y Metrotécnica se desligó orgánicamente del Instituto y sufrió su propia evolución.

En 1910, vio la luz una "Asociación de Laboratorios para el fomento de las investigaciones científicas y los estudios experimentales", ocupada de construir material científico y facilitar medios de realizar aquellos estudios experimentales que se juzgaran de interés para el progreso de la Ciencia.

Más importantes fueron las aportaciones del Instituto de Material Científico que se fundó para unificar y ordenar, en una sola partida económica, las cantidades destinadas a la compra de material científico para los centros docentes, incluyendo las Universidades, y de otro tipo, del Estado que hasta entonces hacían cuanto podían de manera desorganizada.

La Asociación intentó crear y organizar un Laboratorio Nacional para estudiar todos los problemas científicos y técnicos que pudiesen afectar a la producción y la industria nacional, para definir las unidades físicas necesarias y para fijar los patrones de medida, comparación y ensayo de aparatos. Dicho Laboratorio Nacional no se creó y por ello, quizás hoy tenemos menos historia y desarrollo metrológico.

Lo más parecido a ese laboratorio llegó en 1990 con la creación del Centro Español de Metrología (CEM), pero no responde exactamente a la idea de Laboratorio Nacional al estilo de los primeramente creados en Alemania, Reino Unido o los Estados Unidos.[1]

2.3- Metrología actual

Actualmente el Sistema Metrológico Español (SME) está formado por el Centro Español de Metrología (CEM) y los laboratorios asociados a él.



Ilustración 2.2 Centro Español de Metrología [2]

El CEM es un organismo autónomo adscrito a la Secretaría General de Industria del Ministerio de Industria, Energía y Comercio. Es, en aplicación del artículo 149 de la Constitución Española, el máximo órgano técnico en el campo de la metrología en España. El funcionamiento correcto del SME es vital para la interconexión de todas las capas de la sociedad, en las cuales se realizan diariamente multitud de mediciones. El SME permite garantizar la validez de todas las mediciones realizadas en España, así como la compatibilidad de éstas con las realizadas fuera de nuestras fronteras, aspecto básico para el reconocimiento internacional de nuestros intercambios comerciales y de nuestras contribuciones científico-técnicas.

Todos los integrantes del SME trabajan coordinadamente para garantizar la misión que tiene encomendada de manera conjunta y el éxito de la misma, ejercitando la iniciativa legislativa y la firma de acuerdos de cooperación oportunos, tendentes a lograr el mayor desarrollo metrológico de nuestro país. El último responsable de esta infraestructura es el CEM, que designa los laboratorios asociados. Entre ellos están los laboratorios de calibración, acreditados por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), que se encargan de cubrir la necesidad de las empresas de dar trazabilidad a sus medidas. Pueden hacerlo o bien realizando la calibración de los instrumentos directamente, o bien diseminando dicha trazabilidad por medio de patrones. Y así, las empresas podrán realizar distintas calibraciones como, por ejemplo, las mesas de planitud. [2]

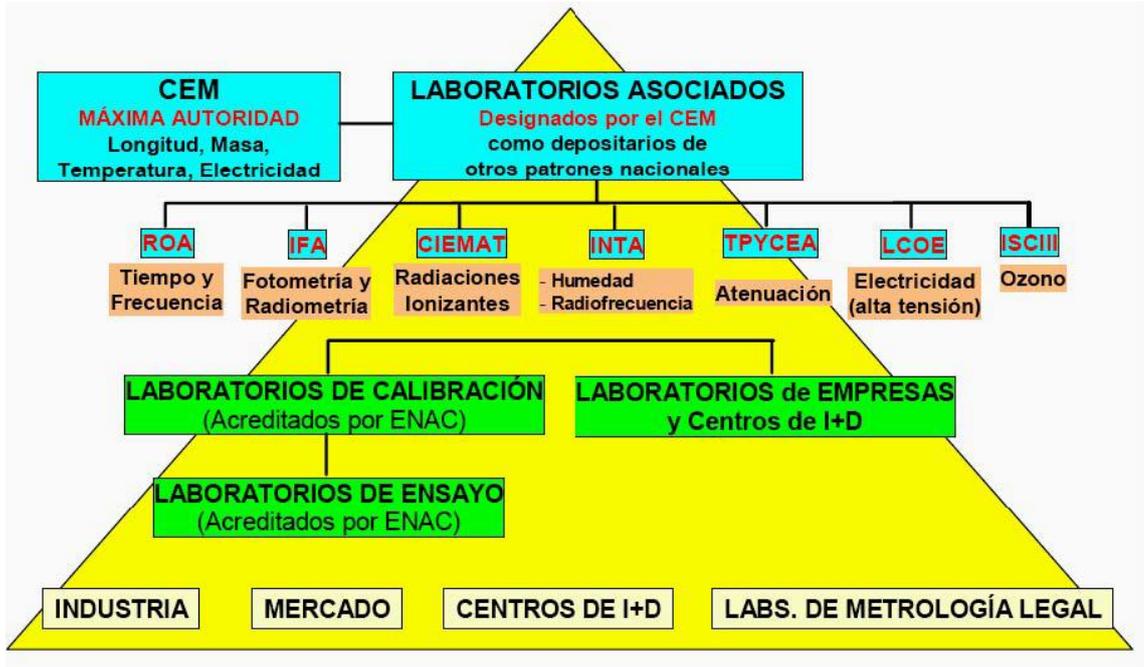


Ilustración 2.3 Funcionamiento del SME [2]

3- MEMORIA

3.1- TEORIA

3.1.1- Introducción a la metrología

La Metrología es la ciencia de las medidas; en su generalidad, trata del estudio y aplicación de todos los medios propios para las medidas de magnitudes, tales como longitud, masas, tiempos, temperaturas, etc. Por esta enumeración, es fácil ver que la metrología entra en todos los dominios de la ciencia. Así tenemos la Metrología Dimensional, que se ocupa de las medidas de las dimensiones, la Metrología Ponderal, que se ocupa de la medida de pesos, etc. [2]

3.1.2- Tipos de metrologías

La metrología tiene varios campos: metrología legal, metrología industrial y metrología científica son divisiones que se ha aceptado en el mundo encargadas en cubrir todos los aspectos técnicos y prácticos de las mediciones:

La Metrología Legal.

Este término está relacionado con los requisitos técnicos obligatorios. Un servicio de metrología legal comprueba estos requisitos con el fin de garantizar medidas correctas en áreas de interés público, como el comercio, la salud, el medio ambiente y la seguridad. El alcance de la metrología legal depende de las reglamentaciones nacionales y puede variar de un país a otro.

La Metrología Industrial

Esta disciplina se centra en las medidas aplicadas a la producción y el control de la calidad. Materias típicas son los procedimientos e intervalos de calibración, el control de los procesos de medición y la gestión de los equipos de medida.

El término se utiliza frecuentemente para describir las actividades metrológicas que se llevan a cabo en materia industrial, podríamos decir que es la parte de ayuda a la industria.

En la Metrología industrial la persona tiene la alternativa de poder mandar su instrumento y equipo a calibrarlo bien sea, en el país o en el exterior.

La Metrología Científica

También conocida como "metrología general". Es la parte de la Metrología que se ocupa de los problemas comunes a todas las cuestiones metrológicas, independientemente de la magnitud de la medida.

Se ocupa de los problemas teóricos y prácticos relacionados con las unidades de medida (como la estructura de un sistema de unidades o la conversión de las unidades de medida en fórmulas), del problema de los errores en la medida; del problema en las propiedades metrológicas de los instrumentos de medidas aplicables independientemente de la magnitud involucrada.

En la Metrología hay diferentes áreas específicas. Algunas de ellas son las siguientes:

- Metrología de masa, que se ocupa de las medidas de masa.
- Metrología dimensional, encargada de las medidas de longitudes y ángulos.
- Metrología de la temperatura, que se refiere a las medidas de las temperaturas.
- Metrología química, que se refiere a todos los tipos de mediciones en la química. [3]

3.1.3- Instrumento de medida

En un sistema de producción y de intercambiabilidad de productos, es fundamental garantizar que las múltiples cotas de una pieza se encuentran dentro de los límites de tolerancia, y que las medidas efectuadas son totalmente trazables con las efectuadas en cualquier otra fábrica del país o del mundo. El metrólogo será el encargado de comprobar la exactitud de las piezas de fabricación realizadas de acuerdo con las medidas y tolerancias marcadas en el plan. Para tal fin es necesario disponer de equipos para el control dimensional, desde los más básicos, como el pie de rey, hasta los más avanzados como los sistemas láser de medida.

El conocimiento de los equipos junto con su adecuada calibración permiten que el control de calidad de los productos se realice sin errores, evitando las pérdidas económicas ocasionadas por las piezas buenas que se tiran y las malas que entran a formar parte del lote aceptado, provocando el rechazo del cliente. [4]

A continuación, y siguiendo el Glosario de términos de la AEC (Asociación Española de la Calidad) y el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), se definen las cualidades más interesantes de un instrumento de medida:

- Rango nominal. Es el intervalo de las indicaciones que pueden obtenerse mediante ajuste de los controles de los instrumentos de medida. Se expresa normalmente por sus límites inferior y superior.

- Campo de medida. Intervalo de valores que puede tomar la magnitud a medir con un instrumento, de manera que el error de medida, operando dentro de las condiciones de empleo, sea inferior al máximo especificado para el instrumento. Un aparato puede tener varios campos de medida.
- Alcance. Valor máximo del campo de medida.
- Escala. Conjunto ordenado de signos en el dispositivo indicador que representan valores de la magnitud de medida.
- División de escala. Intervalo entre dos valores sucesivos de la escala. Hay instrumentos de división constante y de división variable.
- Lectura. Indicación obtenida directamente de un instrumento de medida.
- Resolución. Mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente.
- Sensibilidad. La sensibilidad de un sistema de medida es el cociente entre la variación de una indicación de un sistema de medida y la variación correspondiente del valor de la magnitud medida.
- Precisión. Es la proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, en circunstancias específicas.
- Incertidumbre. Es un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza.
- Repetibilidad. Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud, obtenidos con el mismo método, por el mismo observador, con los mismos instrumentos de medida, en el mismo laboratorio y a intervalos de tiempo suficientemente cortos.
- Reproducibilidad. Grado de concordancia entre los resultados de mediciones aisladas de la misma magnitud y con el mismo método, pero en condiciones diferentes; por ejemplo, con diferentes instrumentos de medida, por diferentes observadores, en diferentes laboratorios, a intervalos de tiempo suficientemente grandes, en diferentes condiciones de empleo de los instrumentos de medida, etc.
- Dispersión. Grado de separación o diseminación que presentan las observaciones o medidas de una serie. Normalmente se estima por el máximo valor absoluto de las desviaciones de dicha serie.
- Reversibilidad. Diferencia de las indicaciones de un instrumento de medida cuando se mide el mismo valor de la magnitud, bien creciendo o bien decreciendo ésta.
- Fiabilidad. Facultad de un elemento, servicio o proceso para realizar una función requerida bajo condiciones establecidas, durante un tiempo

determinado. Generalmente se expresa por un número que indica la probabilidad de que se cumpla esta característica.

- Trazabilidad. Propiedad de un resultado de medida por el cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.
- Verificación. Es la acción de revisar, inspeccionar, ensayar, comprobar, supervisar o cualquier otra actividad análoga, que establezca y documente los elementos, procesos, servicios o documentos están conformes con los requisitos especificados.
- Calibración. Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.
- Intercomparación. Operación por medio de la cual se contrastan los errores de medida o calibración de varios instrumentos del mismo nivel de precisión por medio de la medida de un patrón del que se desconoce su valor excepto por uno de los miembros participantes en la Intercomparación, que recibe la denominación de piloto. Los miembros que intervienen en la Intercomparación suelen ser laboratorios de calibración.
- Diseminación de unidades. Proceso, en sucesivos escalones, que tiene por objeto facilitar a empresas y organismos a partir de patrones primarios u otros aceptados como tales, patrones de nivel de precisión inferior. [4] [11]

3.1.4- Control de planitud

Ahora vamos en centrarnos en nuestro estudio, que trata de la planitud. Este tipo de verificación tiene importancia en todos aquellos elementos que hayan de emplearse como plano de referencia material de otras mediciones, como es el caso de los mármoles de trazar, y en aquellos que sirvan de soporte de deslizamiento de una superficie plana, como las guías de una máquina herramienta. La verificación de estos mármoles o mesas de planitud se realiza midiendo el error de planitud con respecto a un plano teóricamente liso. La medida de ese error se puede realizar por varios métodos:

- Control sobre una superficie patrón mediante la utilización de colorantes (azul de Prusia)

Se realiza cuando se dispone de una superficie de planitud correcta y comprobada, desplazando la superficie a examinar sobre el plano patrón, que normalmente está recubierto de una delgada película de sustancia colorante. Las partes más salientes de la pieza, que estaban en contacto con la superficie patrón, aparecerán coloreadas, siendo la forma y la extensión de estas partes coloreadas las que nos indican el grado de planitud de la pieza. Este control era realizado corrientemente en los talleres de ajuste. Este control presenta el inconveniente de que la estimación del operario no permite cuantificar la magnitud del defecto.

- Mediante una regla y bloques patrón

Se emplea en la verificación de superficies planas de gran extensión. La superficie a controlar se divide, con ayuda de un lápiz en una cuadrícula (figura 3.1) con sus lados a una pequeña distancia del borde y divisiones de 100 a 200 mm; se eligen luego tres esquinas A, B y C, que determinan el plano de referencia al cual se van a referir todas las altitudes de los puntos de la superficie a controlar.

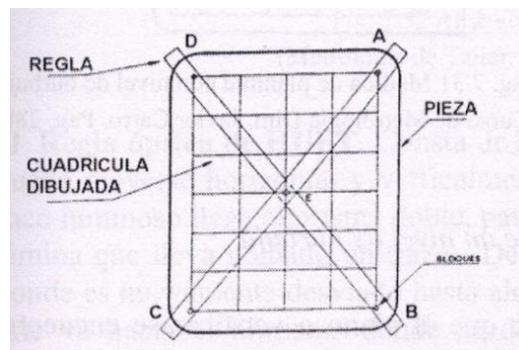


Ilustración 3.1 Control de planitud con regla y bloques patrón [5]

Situando la regla sobre los bloques iguales en los puntos A y C, se mide por combinación de calas (bloques patrón) la distancia bajo la regla en el punto central E. La diferencia entre la cala en E y las calas en A o C, dará la cota real del punto E respecto al plano de referencia.

Colocando a continuación la regla sobre B (que tiene las mismas calas que A o C) y E (cuyas calas se han determinado) se obtiene la cota del punto D. Basta con reiterar el método para los restantes puntos de la cuadrícula, para obtener un mapa de la planitud de la superficie.

- Mediante un comparador

El procedimiento permite medir el error de planitud muy rápidamente, colocando la superficie a verificar sobre una base plana sobre la que se puede deslizar un reloj comparador cuyo palpador está en contacto con la superficie. Las variaciones de planitud son indicadas en magnitud y signo por la aguja del comparador.

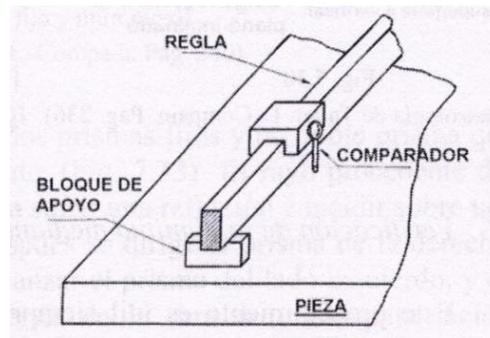


Ilustración 3.2 Control de planitud mediante comparador [5]

- Verificación de la planitud mediante un nivel de burbuja

Este procedimiento es útil siempre que el plano a verificar se encuentre horizontal, es decir, previamente nivelado. Se traza una retícula, y las lecturas de desnivel reflejadas en la tabla (figura 3.3a), se llevan a un gráfico, trazando cada pendiente a partir del punto extremo del desnivel anterior como se indica en la figura 3.3b.

POSICION	LECTURA (divisiones)	DESNIVEL (μm)	DESNIVEL RESPECTO DE A (μm)
A	-	-	0
B	+10	+5	+5
C	0	0	+5
D	+20	+10	+15
E	-2	-1	+14
F	-16	-8	+6
G	-12	-6	0

Ilustración 3.3a Control de planitud mediante nivel de burbuja [5]

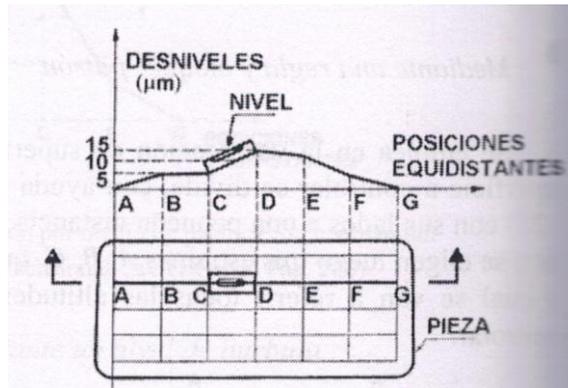


Ilustración 3.3b Control de planitud mediante nivel de burbuja [5]

- Verificación de planitud mediante máquina de medición por coordenadas

El palpador de la máquina de tres coordenadas tocará la superficie, definiendo un plano teórico, alineando los tres vértices del mayor triángulo que inscriba la superficie, y obteniendo las desviaciones de los otros puntos. [5]

- Verificación de planitud mediante reglas biseladas

La planitud de una superficie se comprueba apoyando sobre ella la arista de una regla, y observando si a través de la línea de contacto se ve alguna rendija de luz. El control se realiza en varias direcciones.

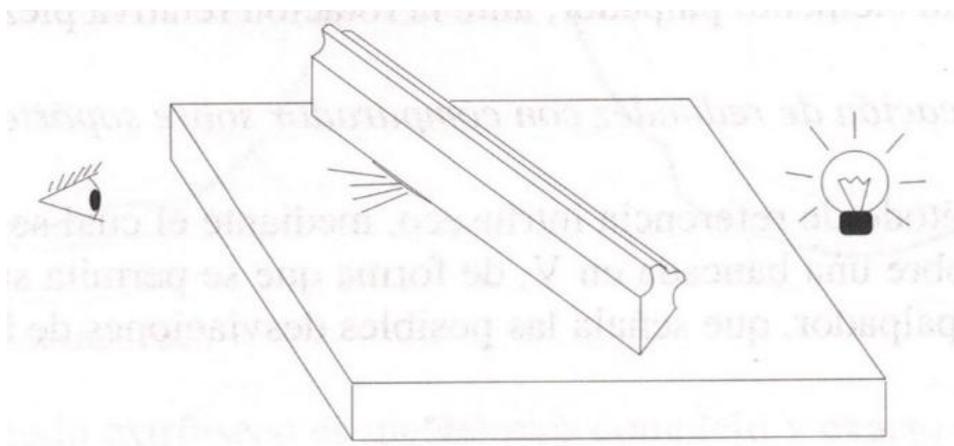


Ilustración 3.4 Control de planitud mediante reglas biseladas [6]

- Verificación de la planitud con métodos ópticos

-Método del anteojo fijo y de la mira móvil

El eje óptico del anteojo define una recta patrón, y se miden las desviaciones verticales entre los distintos puntos de la superficie y este eje óptico, con ayuda de las graduaciones de la mira. La precisión media es del orden de 0,1 mm.

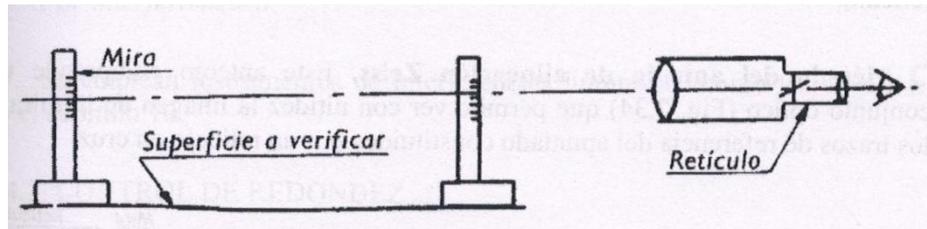


Ilustración 3.5 Control de planitud con anteojo fijo y mira móvil [5]

-Regla óptica de HUET

Consta de dos prismas fijos y un doble prisma que puede moverse horizontal y verticalmente. El rayo procedente del foco luminoso llega al prisma doble, para sufrir una reflexión e incidir sobre una lámina que lleva grabado un trazo. Después se dirige al prisma de la derecha, donde es nuevamente desviado hasta alcanzar el prisma del lado izquierdo, de éste va hacia el biprisma donde se desvía en la cara de unión para incidir finalmente en un ocular provisto de un retículo.

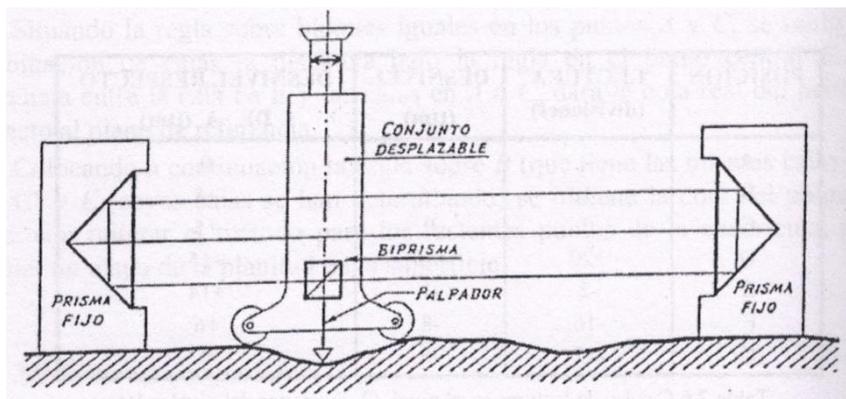


Ilustración 3.6 Control de planitud con regla HUET [5]

Las desviaciones del biprisma en el plano vertical, siguiendo las irregularidades de la superficie que transmite el palpador, desplazan la imagen del trazo en el campo ocular, midiéndose los desplazamientos con el tornillo micrométrico del ocular, que permite hacer coincidir la imagen del trazo y el retículo.

-Método del anteojo de alineación Zeiss

Este anteojo comprende un conjunto óptico que permite ver con nitidez la imagen de la mira y los trazos de referencia del apuntado constituidos por un retículo en cruz.

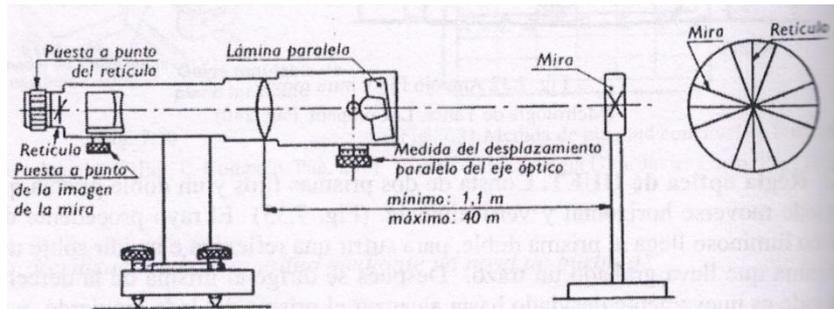


Ilustración 3.6a Control de planitud con anteojo Zeiss [5]

Sobre la superficie a verificar se traza una cuadrícula similar a la de la figura 3.1, se fija la mira en cada uno de los extremos de la superficie y se ajusta el anteojo de manera que asegure la coincidencia de los retículos y de la mira en cada posición (figura 3.6b).

La precisión de este instrumento viene dada por: $\pm \left\{ 0,01 + \frac{L}{200000} \right\}$ mm, donde L es la distancia en milímetros entre la mira y el anteojo que puede alcanzar los 40 m.

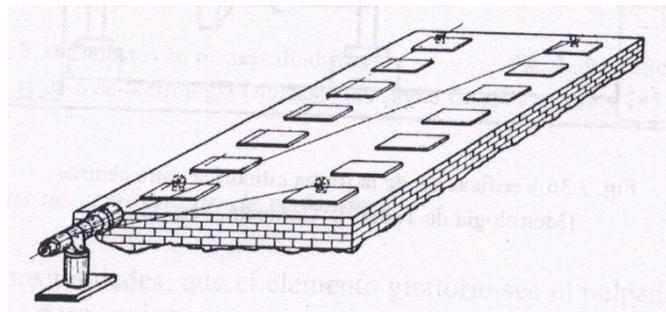


Ilustración 3.6b Control de planitud con anteojo Zeiss [5]

- Por interferometría

Este tipo de control es el que vamos a utilizar, así que lo explicamos más detalladamente a continuación. [6]

3.1.5- Interferometría

Los interferómetros son instrumentos que permiten realizar mediciones absolutas y relativas con relación a un patrón, mediante la observación de las interferencias luminosas con ellos producidas. Durante la operación es necesario mantener la temperatura rigurosamente constante, lo cual es bastante complejo. Esto es debido a que una mínima variación de temperatura de 0,5°C

en una pieza de acero de 20 milímetros provoca una dilatación superior a 0,11 micras, lo que origina un notable desplazamiento en las franjas de interferencia. Tenemos los siguientes interferómetros:

- Interferómetro de lámina de vidrio

Es muy utilizado en laboratorios de metrología para determinaciones de longitud. Consta de un foco luminoso, una lámina de vidrio, un soporte para las piezas y un dispositivo de observación. La figura 3.7 nos muestra este interferómetro aplicado a una medición sencilla y la forma de la figura de interferencia formada.

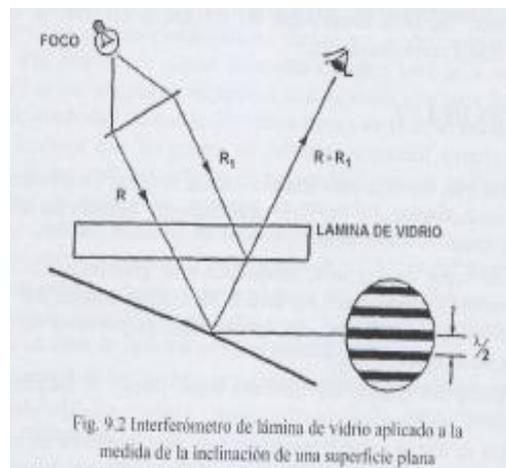


Ilustración 3.7 Control de planitud con interferómetro de lámina de vidrio [7]

- Interferómetro de Michelson

Consta de una delgada lámina de vidrio sobre la que incide un haz luminoso, parte del cual se desvía hacia la superficie de la pieza mientras la otra incide sobre un espejo plano. Los haces reflejados por estas superficies se superponen nuevamente sobre el vidrio y en el ocular se observa la figura de interferencia. [7]

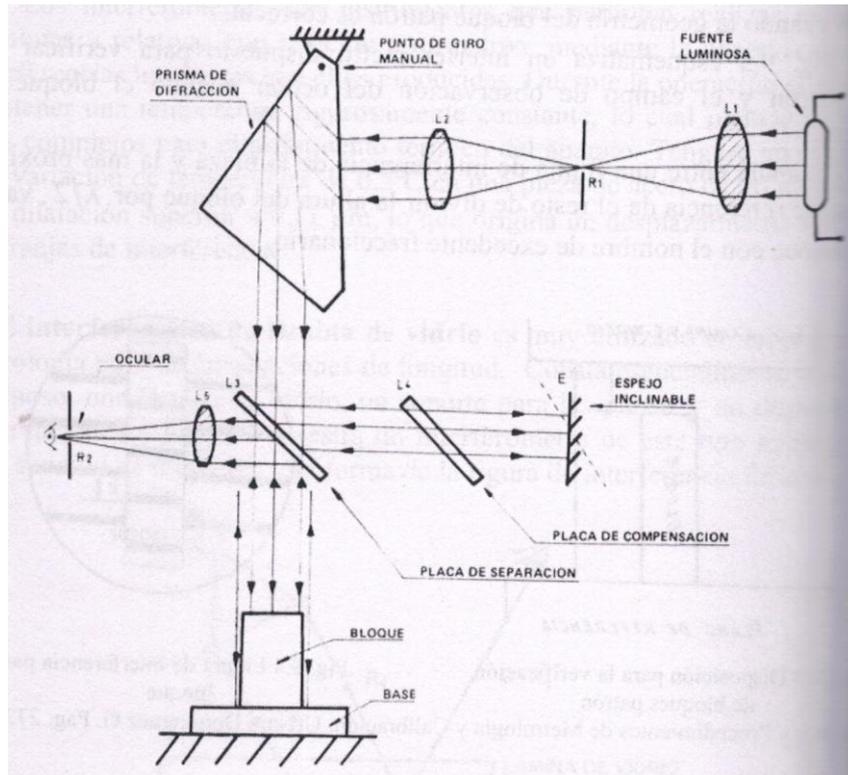


Ilustración 3.8 Control de planitud con interferómetro de Michelson [7]

- Láser de medición

Dentro de los interferómetros, el láser es el que vamos a utilizar en nuestros controles.

La palabra LÁSER está formada por las iniciales "Light Amplification by Stimulate Emission of Radiation", que significa amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación.

El uso de láseres en metrología tiene un precio elevado, pero se justifica por la absoluta coherencia de la radiación, su gran intensidad y la poca dispersión del haz.

En metrología se utilizan láseres gaseosos, consistentes en un tubo que contiene un gas, excitándose los electrones externos de los átomos por la energía luminosa de un flash intermitente. En el momento de la descarga (entre 10^{-6} y 10^{-4} s), los electrones excitados caen a sus niveles normales, emitiendo radiación monocromática y coherente. La energía de la radiación no es grande, pero la posibilidad de concentrarla en un haz muy fino y corto tiempo de descarga proporciona las potencias elevadas que caracterizan a estos instrumentos.

Empleando un láser como fuente de radiación en interferometría supone una capacidad mucho mayor que la que se puede obtener con una fuente clásica, ya que permite ampliar el campo de medición hasta decenas de metros. Permiten medir distancias de hasta 70 metros con precisión de 0,5 micras por metro y una resolución de 0,01 micras.

Un equipo láser de medición está formado por:

- La fuente luminosa (E) que para metrología es un emisor de He-Ne (90% de He y 10% de Ne) que emite dos frecuencias polarizadas planas perpendiculares por efecto Zeeman y separadas entre sí aproximadamente 2mhz, siendo despreciable frente a la frecuencia de emisión del láser 473 Thz
- Divisor de haz interferométrico (I), con la particularidad de que deja pasar una de las componentes, el haz de medida (f_1) y la otra, el haz de referencia (f_2), la refleja totalmente.
- Reflectores o espejos planos, fijos (RF) y móvil (RM).
- Sensor ambiente.
- Sensores de material.
- Un ordenador (C).

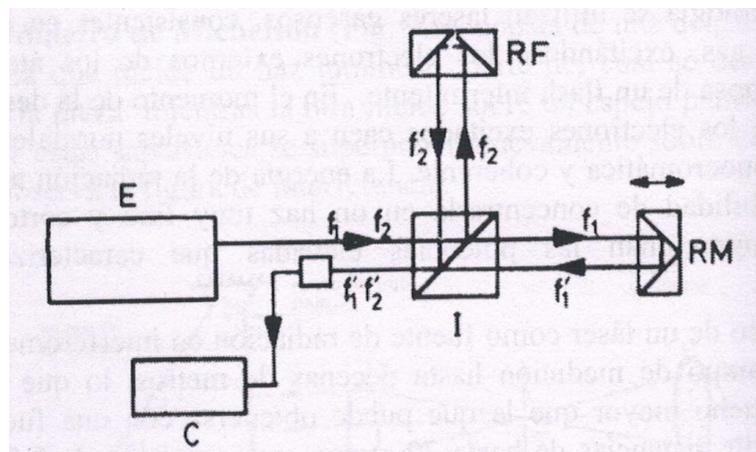


Ilustración 3.9 Componentes de un láser de medición [7]

Con este equipo se tiene un programa completo de metrología capaz de verificar linealidad, rectitud, perpendicularidad, ángulos, planitud, velocidades, aceleraciones y desviaciones angulares a desplazamientos lineales.

Las variaciones de intensidad de los haces debidos a polvo o humo en el medio ambiente no afectan al sistema lo que garantiza la fiabilidad de las mediciones.

La medida se basa en la exploración de la superficie mediante reiteración ordenada de la medida de una serie de líneas en el plano, para ello se utilizan los siguientes elementos:

- Kit de espacios patrón.
- Interferómetro angular.
- Reflector angular.
- Pareja de placas de alineación.
- Pareja de espejos de planitud con base. [8]

3.1.6- Medida del error de planitud con láser.

Aquí ya explicamos la teoría de nuestra medida del error de planitud. Posteriormente explicaremos los elementos y los pasos en los estudios prácticos. El método operativo más utilizado consta de las siguientes fases:

- a) Definición y dibujo de la retícula de medición sobre la superficie a verificar. La figura incluye números de líneas y letras mayúsculas que indican los puntos finales y el punto medio de cada línea estándar.

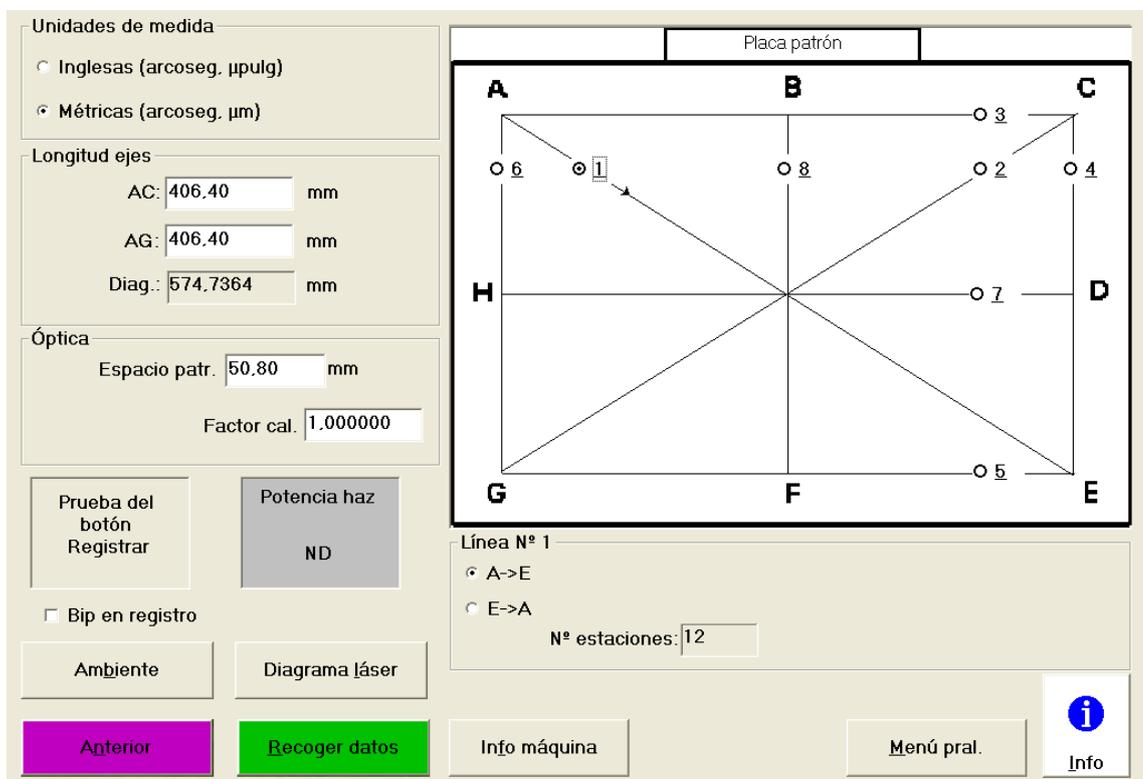


Ilustración 3.10 Pantalla principal del control de planitud

Según el manual de referencia de mediciones del láser[12], en mediciones de planitud, la retícula se dibuja de la siguiente forma:

- 1- Determinación de los requisitos del borde de la retícula. Para ubicar las ópticas hay que dejar un margen entre las líneas del perímetro de la retícula de medición y el contorno del mármol de trazado. Este margen debe ser entre 51 y 76 mm. (de 2 a 3 pulgadas).
- 2- Elección del espacio patrón. Éstos se utilizan para marcar los puntos de medición, denominados estaciones en las líneas durante el trazado de la retícula. El kit de espacios patrón incluye tres tamaños: 2, 4 y 6 pulgadas, es decir, 51, 102 y 153 mm. (redondeando). Estos tamaños son en realidad las distancias entre las líneas de trazar en el pie de entrada y salida de los espacios patrón, no la longitud total de los mismos, como vemos en la siguiente imagen:



Ilustración 3.11 Espacio patrón

- 3- Dibujo de las líneas perimetrales de la retícula de medición. Aunque ya tenemos los bordes aproximados de la medición, ahora se trazan las líneas que definirán los bordes reales de la retícula (líneas 3 a 6), siguiendo los siguientes pasos:
 - 3.1- Utilizando una regla y un lápiz o tiza, trazamos una línea perimetral en el lado más próximo a la placa patrón del mármol de trazado (línea 3).
 - 3.2- Marcamos el punto medio de la línea 3 (punto B).
 - 3.3- Comenzando en dicho punto, marcamos las estaciones de la medición en las dos direcciones de la línea hasta que se salga del margen dibujado. Entonces el final de la línea será el punto anterior.
 - 3.4- A partir de esos finales, trazamos las dos líneas perpendiculares a la 1 (líneas 4 y 6) y marcamos las máximas estaciones posibles sin sobrepasar el margen de medición y teniendo en cuenta que tienen que ser pares.

- 3.5- Con los finales de las dos líneas anteriores se marca la línea equivalente en longitud y estaciones a la línea 3 (línea 5).
4. Dibujo de las líneas de medición interiores. Siguiendo los siguientes pasos:
 - 4.1- Dibujamos las diagonales para conectar los ángulos opuestos de la retícula.
 - 4.2- Marcamos sus estaciones fuera de los puntos de intersección de las dos diagonales. Las dos mitades de cada diagonal tienen que tener el mismo número de estaciones. Y cada diagonal debe tener el mismo número de estaciones.
 - 4.3- Dado que el programa indica el número de estaciones y que seguramente no se pueda tener un número entero de estaciones en la diagonal, puede cortar antes del final de la diagonal o seguir después del mismo para conseguir el número indicado de estaciones.
 - 4.4- Dibujamos las líneas que conectan los puntos medios de los lados opuestos de la retícula (líneas 7 y 8)
 - 4.5- Marcamos las estaciones de ambas líneas teniendo en cuenta que son iguales que las de sus líneas paralelas.
- b) Ensamblaje y montaje de la óptica. Se fija el reflector angular sobre el espacio patrón escogido y el interferómetro se fija a la base de uno de los espejos de planitud. Es muy importante no tocar con los dedos la parte activa tanto del reflector como del interferómetro, ya que implicaría su limpieza siendo ésta delicada y no efectiva al 100% (el haz láser pierde parte de su potencia).
- c) Emplazamiento del cabezal láser. Se debe ubicar el cabezal y colocar la regla en paralelo a la primera línea de medición aproximadamente a unos 5 mm. Elegimos un borde y situamos el cabezal en paralelo a dicho borde de manera que el haz quede a unos 25 mm por encima del borde de la mesa de planitud.
- d) Alineación de la óptica. Hay que alinear el cabezal de modo que el haz haga blanco en el centro del primer espejo de planitud y colocar el reflector lo más cerca posible del interferómetro.
- e) Comprobación de la potencia del haz. Se realiza un recorrido a lo largo de las estaciones que se van a medir comprobando que la potencia del haz hace posible la medida en todas las estaciones.
- f) Realización de la medición. Se realiza un RESET para la puesta a cero y se sitúa el reflector en las distintas estaciones pulsando en cada una de ellas el botón de registro. Se realiza este proceso con cada una de las líneas y al finalizar aparecerá una pantalla de análisis de datos que puede ser por

visión isométrica (imagen 3.12a) o mediante un gráfico numérico (imagen 3.12b) para el análisis de los datos obtenidos.

En el recuadro de resultados (izquierda) vemos distintos valores:

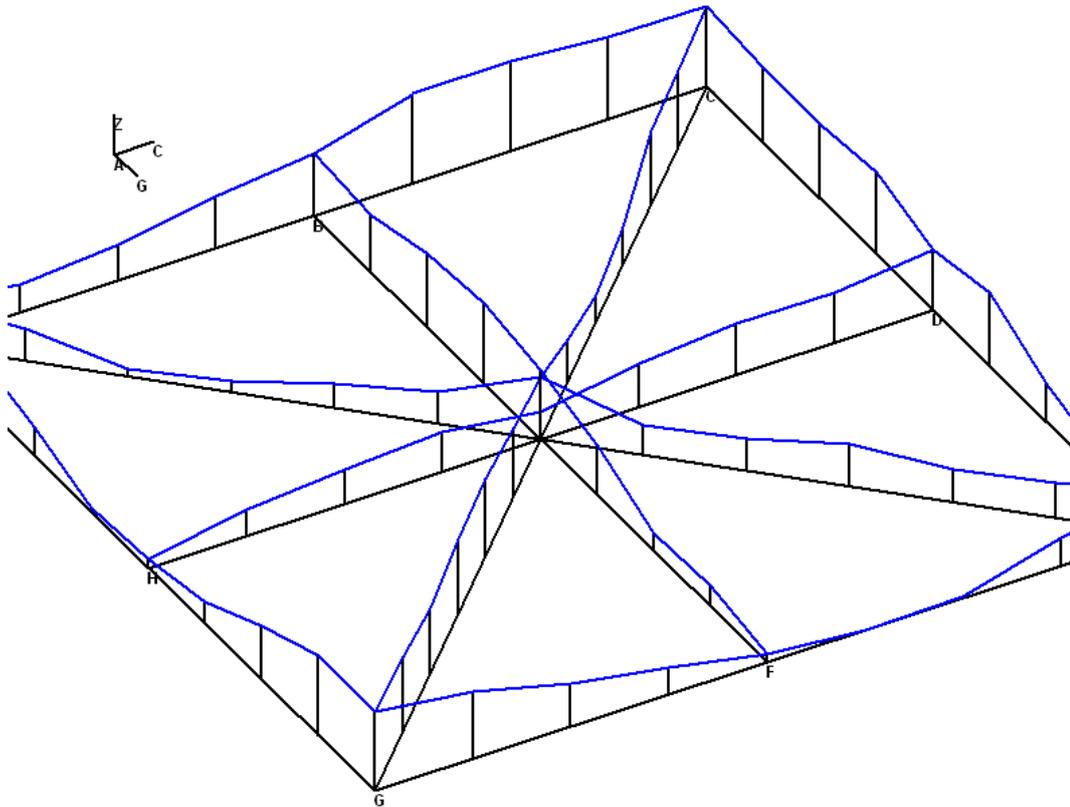
- Altura máxima: nos indica el punto más alto de toda la retícula y su línea.
- Más/menos: es la mitad del valor de altura máxima.
- Valores de cierre: son las diferencias de altura entre los puntos medios de las líneas en cruz (7 y 8) y el punto medio de las diagonales, es decir, líneas 1 y 2 (que es el mismo).

En el recuadro del medio vemos la fecha, nombre del archivo y si quisiéramos se puede editar el nombre de la máquina, operador, ubicación, número de serie y comentarios.

Por último, en el recuadro de la izquierda vienen los datos ambiente: temperatura, presión y humedad del aire, y tres posibles temperaturas del material. Estos datos podemos introducirlos teóricamente en el sistema, a mano, o con los distintos sensores.

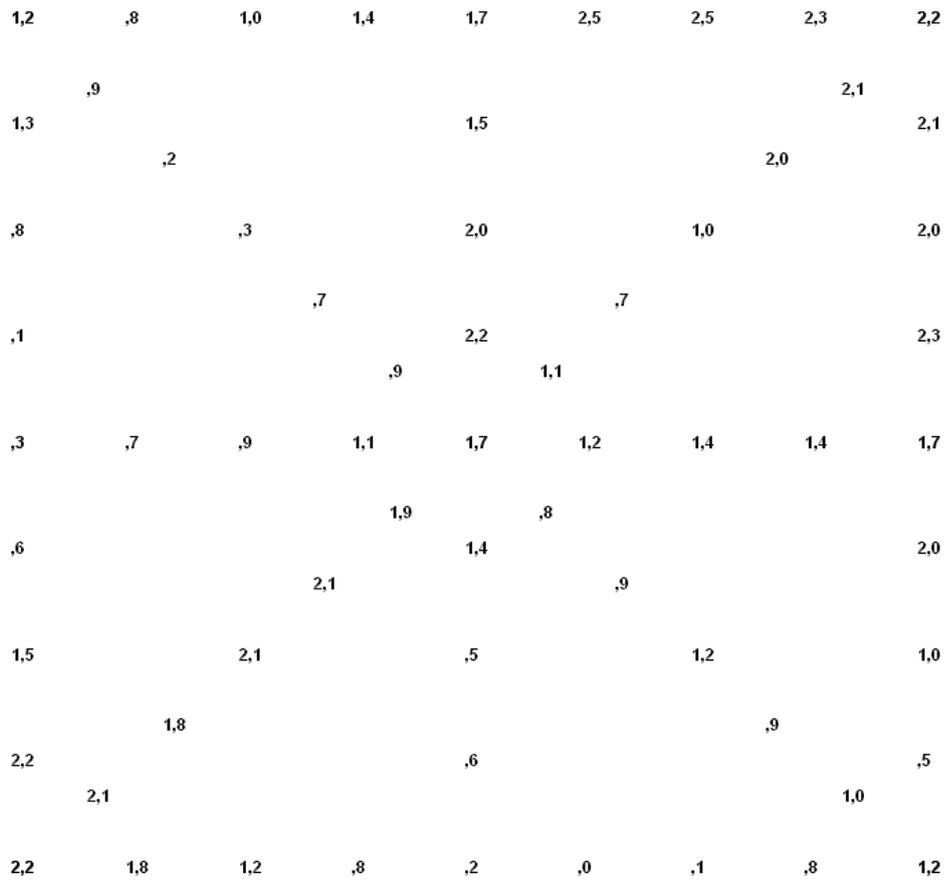
1,00 μm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 2,4675 μm línea3(CA) Más.Menos: 1,2337 μm Cierre n° 7(DH): -,9544 μm Cierre n° 8(BF): ,1847 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 15/06/2015 17:39:00 Fecha actual: 15/06/2015 17:52:11 Nombre archivo: tfg.txt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
		Min.	Máx.	Media	
		T aire	20,0	20,0	20,0
		P aire	760,73	760,73	760,73
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1			
		T MT2			
		T MT3			

Ilustración 3.12a Visión isométrica de los resultados



Elevación en μm

Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 2,4675 μm línea3(CA) Más/Menos: 1,2337 μm Cierre n° 7(DH): -,9544 μm Cierre n° 8(BF): ,1847 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 15/06/2015 17:39:00 Fecha actual: 15/06/2015 17:54:43 Nombre archivo: tfg.txt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Mín.	Máx.	Media
		T aire	20,0	20,0	20,0
		P aire	760,73	760,73	760,73
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1			
		T MT2			
		T MT3			

Ilustración 3.12b Visión numérica de los resultados

3.2- DESARROLLO

Ahora pasaremos a describir los distintos controles realizados en el laboratorio. Empezamos describiendo los elementos del equipo láser:

- Trípode: vemos las tres patas abiertas y un cilindro central que se desplaza verticalmente a través de la manivela. Hay dos aprietes, uno de las patas y otro del cilindro central.



Ilustración 3.13 Trípode

- Placa base: es la unión entre el trípode y la cabeza del láser. Por abajo se une con el cilindro central y se aprieta con la rosca que vemos abajo a la izquierda. Posee una manivela que vemos en el medio de la imagen que sirve para el desplazamiento lateral del conjunto. A la derecha vemos un soporte dorado que es donde apoya la parte trasera de la cabeza y que se puede mover a ambos lados.



Ilustración 3.14 Placa base

- Cabeza del láser: vemos que tiene una agarradera para cogerla. El tornillo que vemos, junto con el del otro lado, apoya en la placa base y se sujeta con unas piezas que veremos posteriormente. En la parte delantera vemos los orificios de salida y entrada del haz del láser.



Ilustración 3.15a Cabeza del láser

Esta es la parte trasera de la cabeza, en la que tenemos la conexión a red, el botón de encendido/apagado y la conexión con la tarjeta de adquisición (en rojo). El tornillo que se ve es el apoyo en la placa base, y que permite desplazar verticalmente la parte trasera de la cabeza, que nos permite controlar el movimiento de cabeceo.



Ilustración 3.15b Cabeza del láser

- Piezas de sujeción: aquí vemos las dos piezas que sujetan la cabeza del láser a la placa base.

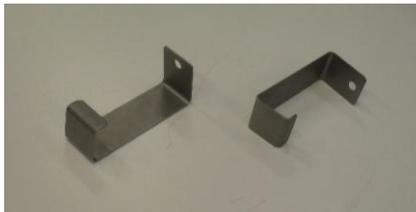


Ilustración 3.16 Piezas de sujeción

Aquí podemos ver el conjunto ya montado:



Ilustración 3.17 Láser montado

- Tarjeta de adquisición
Vemos los conectores que tiene. El cable rojo es el que hemos descrito anteriormente que conecta la cabeza del láser con la tarjeta de adquisición. El cable negro es el que va a la corriente. El cable gris de abajo del todo se conecta con el ordenador. Los cables amarillos son sensores de temperatura del material (hay dos y puede haber hasta 3). El cable azul es el sensor de aire.



Ilustración 3.18 Tarjeta de adquisición

La mesa a la que vamos a hacer el control de planitud tiene unas medidas de 600 x 404 x 50 mm.



Ilustración 3.19 Mesa a medir su planitud

Ahora tenemos que dibujar con un lápiz bien afilado las líneas que vamos a medir, es decir, la cuadrícula exterior, las dos diagonales, y las dos líneas que forman una cruz y que pasan por el punto medio. A este conjunto de líneas le llamamos retícula.

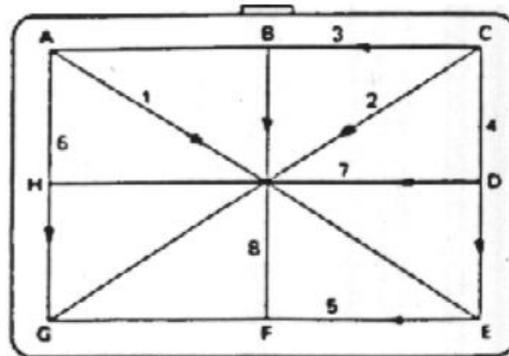


Ilustración 3.20 Retícula [5]

En la práctica, hemos dibujado la retícula de una forma distinta a la teórica, que se explica a continuación:

Debido a las medidas de nuestra mesa vamos a utilizar el espacio patrón menor para tener un número de estaciones adecuado, es decir, espacio patrón de 51 mm.

Como hemos dicho antes, esos 51 mm son la distancia entre el pie de entrada y el de salida. La línea perpendicular a dichos pies debe coincidir con la línea de medición que estemos midiendo de la mesa.

Una vez elegido el espacio patrón, realizamos unos cálculos básicos para evitarnos dibujar una retícula de margen y para eliminar el problema de donde dibujamos la primera línea, ya que en el manual pone que se dibuje aproximada a la de la retícula de margen. El margen que nos dice dicho manual, para nuestra mesa que es relativamente pequeña, es elevado, así que lo reducimos lo máximo posible siempre y cuando entren las ópticas.

- Líneas largas (3, 5 y 7): 600mm. Probamos con 11 estaciones.

$11 \times 51 = 561$ mm mediría cada línea.

$600 - 561 = 39$ mm $39 / 2 = 19.5$ mm sobraría a cada lado

Esta distancia no sería suficiente para colocar las ópticas, así que probamos con 10 estaciones.

$10 \times 51 = 510$ mm mediría cada línea.

$600 - 510 = 90$ mm $90 / 2 = 45$ mm sobraría a cada lado.

Con estos 45 mm ya entraría las ópticas, así que nos quedamos con que estas líneas medirán 510 mm., tendrán 10 estaciones y a cada lado sobrarán 45 mm.

- Líneas cortas (4, 6 y 8): 404 mm. Probamos con 7 estaciones.

$7 \times 51 = 357$ mm $404 - 357 = 47$ mm $47 / 2 = 23.5$ mm

23.5 mm a cada lado es una distancia insuficiente. Probamos con 6 estaciones.

$6 \times 51 = 306$ mm $404 - 306 = 98$ mm $98 / 2 = 49$ mm

Estas líneas medirán 306 mm., con 6 estaciones cada una y a cada lado sobrarán 49 mm.

- Líneas diagonales (1 y 2). Aunque el programa te calcula lo que miden y las estaciones, vamos a calcularlo nosotros también.

$d^2 = 510^2 + 306^2$ $d = 594.8$ mm (siendo d la longitud de las diagonales)

$594.8 / 51 = 11.66$ estaciones

Dado que el número de estaciones tiene que ser par y ya que nos podemos pasar un poco del límite de la diagonal, el número de estaciones de cada diagonal será 12. Luego veremos como el programa da este mismo número de estaciones.

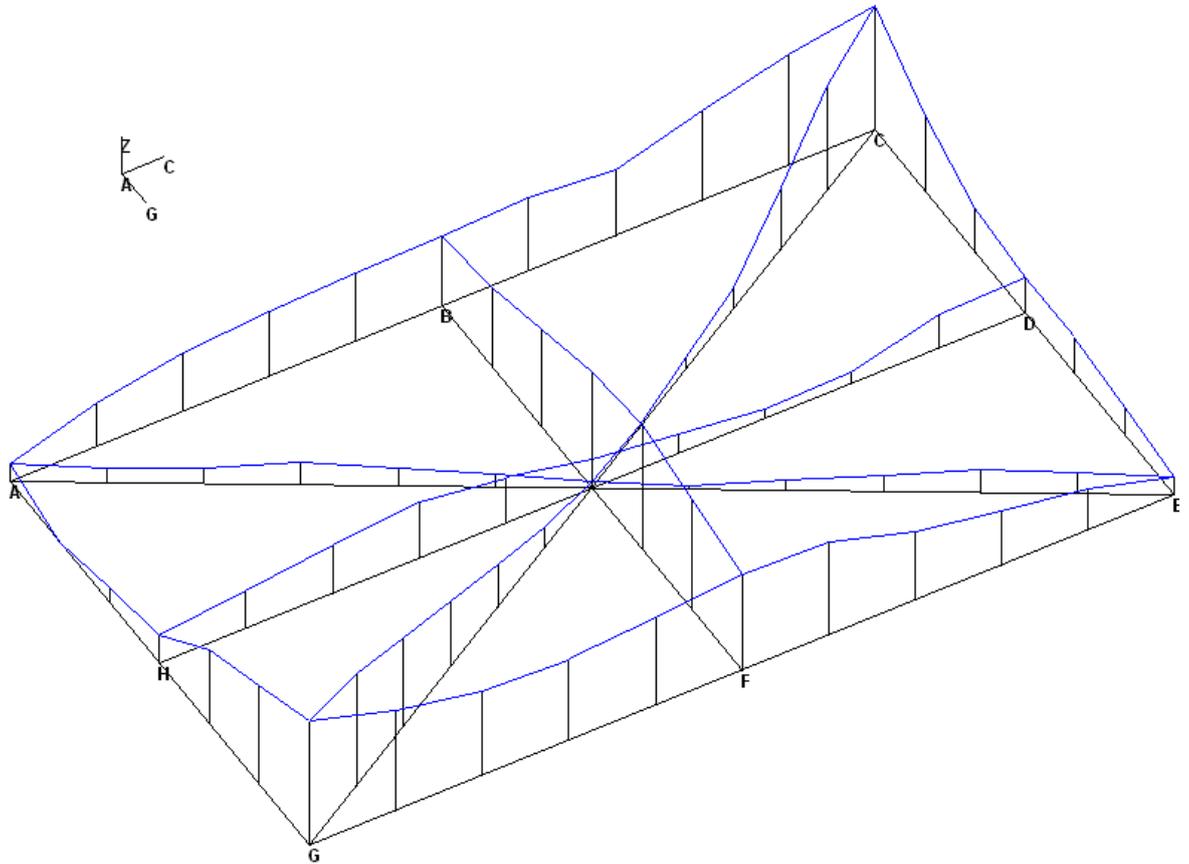
3.2.1- Medida del error cero de planitud

En este control queremos ver qué resultado obtenemos sin mover el interferómetro ni el reflector, y marcando todos los puntos de la retícula. Es decir, en teoría, al no mover los espejos todos los valores deberían ser iguales por lo que la altura de todos los puntos debería ser la misma, siendo la altura máxima igual a 0 (luego veremos el caso teórico), pero no sucede esto.

Lo hemos hecho dos veces:

0,05 μm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: ,1782 μm línea2(CG) Más/Menos: ,0891 μm Cierre n° 7(DH): ,0335 μm Cierre n° 8(BF): ,1579 μm

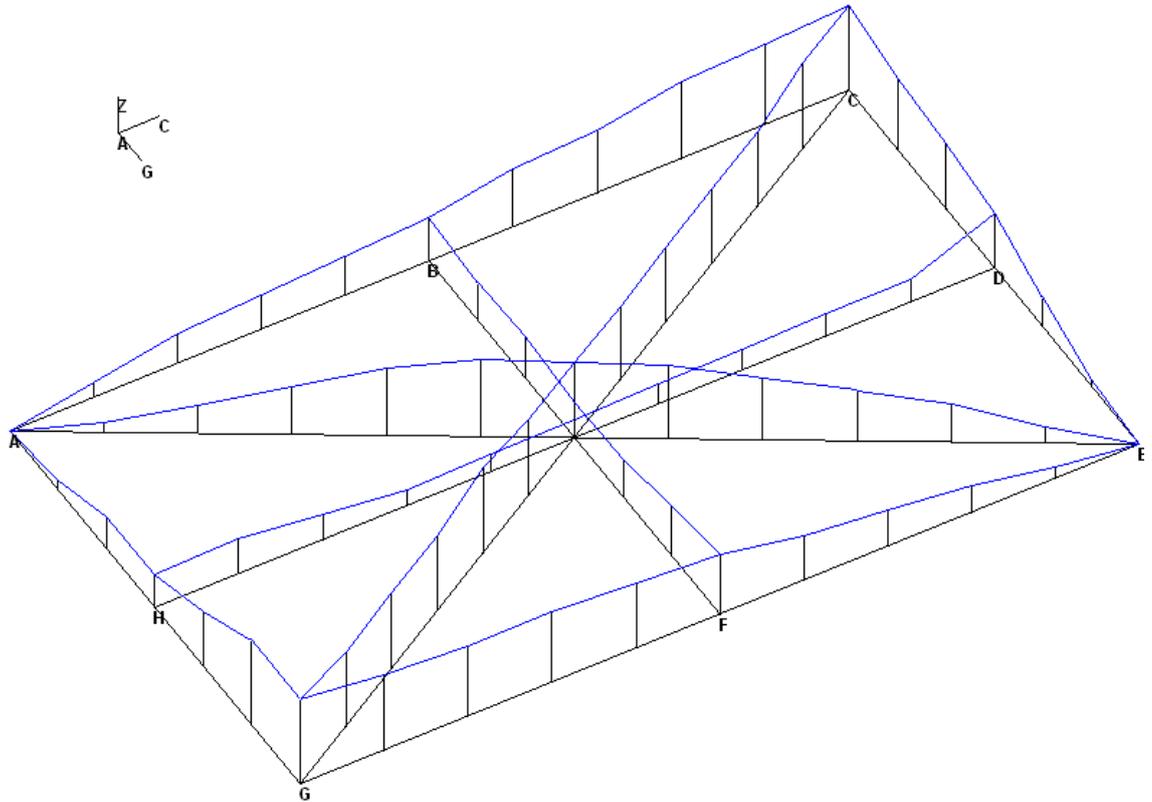
Nombre máq.: Fecha de adquisición: 14/05/2015 19:15:34 Fecha actual: 14/05/2015 19:20:07 Nombre archivo: planitudcero1.txt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:

Datos ambiente: métricos			
	Min.	Máx.	Media
T aire	20,0	20,0	20,0
P aire	760,73	760,73	760,73
H aire	50,0	50,0	50,0
T MT1			
T MT2			
T MT3			

Ilustración 3.21 Control 1 planitud o

0,05 μm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: ,1274 μm línea2(CG) Más.Menos: ,0637 μm Cierre n° 7(DH): -,0847 μm Cierre n° 8(BF): -,0591 μm

Nombre máq.: Fecha de adquisición: 14/05/2015 18:34:19 Fecha actual: 14/05/2015 18:35:46 Nombre archivo: planitudcero2.txt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:

Datos ambiente: métricos			
	Min.	Máx.	Media
T aire	20,0	20,0	20,0
P aire	760,73	760,73	760,73
H aire	50,0	50,0	50,0
T MT1			
T MT2			
T MT3			

Ilustración 3.22 Control 2 planitud o

Vemos que en el primer control la elevación máxima es 0,1782 micras y los valores de cierre son 0,0335 y 0,1579 micras, mientras que en el segundo la elevación máxima es 0,1274 micras y los valores de cierre son -0,0847 y -0,0591 micras. Que un valor de cierre sea negativo solo nos indica que el punto medio de esa línea es inferior al punto medio de las diagonales.

$$(0,1782 - 0,1274) / 0,1782 \times 100 = 28,5 \text{ \% de variación de una medida a otra.}$$

Con esto nos damos cuenta que cada medida en un mismo punto, aunque consiguiéramos colocar la estación de medida con los mismos puntos de apoyo, seguiría habiendo una variación que puede llegar a casi las 0,2 micras. Esta mesa tiene una altura máxima entorno a 200 micras (como veremos después), por lo que vemos que la variación es del 0,1 %. En cambio, en la otra mesa la altura máxima es entorno a 5 micras (también lo veremos después). Aquí la variación llega al 4%. Entonces vemos que en una mesa sin clase esa variación es prácticamente insignificante, pero en una mesa de clase I (sin tener en cuenta la incertidumbre) esa variación es más significativa.

Según la norma UNE 82309-1:1999 [10] las mesas de planitud se clasifican en clase en función de las medidas de dicha mesa, su medida de error de planitud y la incertidumbre de dicha medida. La tabla clasificatoria es la siguiente (longitudes de la mesa en milímetros y tolerancias en micras):

Tamaño de la mesa	Longitud de la diagonal (aprox.)	Zona de margen	Tolerancia de desviación total ^{1) 2)} para grados de mesas			
			0	1	2	3
Rectangular						
160 × 100	188	2	3	6	12	25
250 × 160	296	3	3,5	7	14	27
400 × 250	471	5	4	8	16	32
630 × 400	745	8	5	10	20	39
1 000 × 630	1 180	13	6	12	24	49
1 600 × 1 000 ³⁾	1 880	20	8	16	33	66
2 000 × 1 000 ³⁾	2 236	20	9,5	19	38	75
2 500 × 1 600 ³⁾	2 960	20	11,5	23	46	92
Cuadrada						
250 × 250	354	5	3,5	7	15	30
400 × 400	566	8	4,5	9	17	34
630 × 630	891	13	5	10	21	42
1 000 × 1 000 ³⁾	1 414	20	7	14	28	56

Tabla 3.1

Además hemos calculado la desviación típica de todos los puntos de cada control con el objetivo de comprobar si los resultados son coherentes entre sí y de dar fiabilidad al control, como podemos ver en la siguiente tabla con todos los valores en micras:

	control 1	control 2
media	0,0785	0,0707
s	0,0557	0,0406
máxima	0,1782	0,1274

Tabla 3.2

Sabemos que si la desviación típica es muy elevada, nos indica que hay valores muy dispersos y no sería del todo fiable la medida. En nuestros controles vemos que no sucede esto por lo que podríamos decir que son valores fiables.

En cuanto al valor porcentual de la desviación típica frente a la altura máxima vemos que es del 31 %.

$$0,0557 / 0,1782 * 100 = 31,26 \%$$

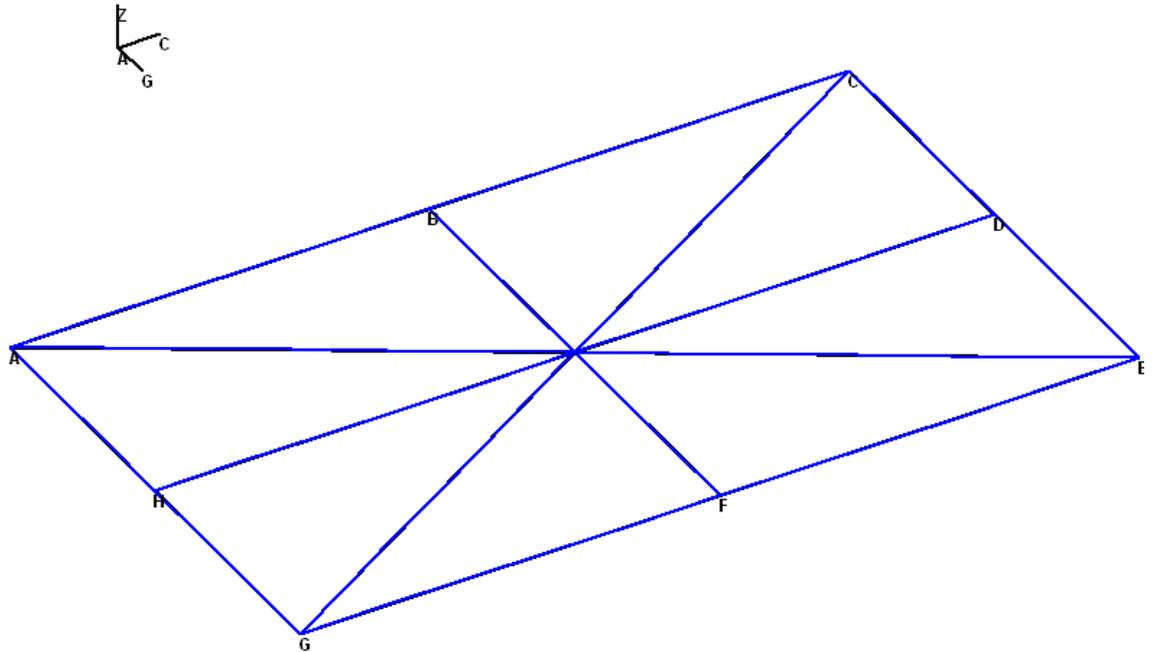
$$0,0406 / 0,1274 * 100 = 31,87 \%$$

Realizamos ahora el mismo control, pero de manera teórica, es decir, el sistema nos permite introducir manualmente un valor angular en vez de ser medido. Así que introducimos en todos los puntos de medida el valor 0, y vemos que el resultado si es el esperado: altura máxima igual a 0. Esto nos indica que los cálculos del sistema son correctos.

Hemos observado que aunque introduzcamos manualmente otro valor distinto a 0, si dicho valor es el mismo en todos los puntos, la altura máxima también es 0 ya que todos los puntos están a la misma altura. Esto nos indica que el sistema muestra resultados coherentes de planitud.

20,00 µm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: ,000 µm línea1(AE) Más.Menos: ,000 µm Cierre n° 7(DH): ,000 µm Cierre n° 8(BF): ,000 µm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 14/05/2015 18:43:11 Fecha actual: 14/05/2015 18:48:36 Nombre archivo: planitudceroteclado.txt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Min.	Máx.	Media
		T aire	20,0	20,0	20,0
		P aire	760,73	760,73	760,73
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1			
		T MT2			
		T MT3			

Ilustración 3.23 Control teórico planitud o

3.2.2- Estudio de la repetibilidad del láser

Vamos a estudiar la repetibilidad del sistema láser en la mesa anteriormente explicada, realizando dos controles con las mismas condiciones, es decir, realizados por la misma persona, mismo equipo láser, en el mismo laboratorio, siguiendo el mismo orden y sentido de medida de líneas y en un intervalo de tiempo corto. El primer control se realizó por la mañana y el segundo por la tarde. Esta mesa no está clasificada en clase, por lo que esperamos una altura máxima bastante elevada.

Ambos controles se realizan de la misma manera:

Se elige una primera recta, y el sentido de ésta. Por ejemplo, la diagonal AE, sentido de A a E. Se coloca la cabeza del láser en paralelo con la línea de medición, si no se puede, habrá que utilizar los espejos. Se ajusta la cabeza del láser a la altura aproximada a la que está la óptica.

Se coloca una regla que nos ayude a mover el interferómetro a lo largo de la recta, ya que el reflector se fija al final de la línea. Ahora hay que cuadrar el láser. Esto consiste en que el láser pasa por el interferómetro, entra por la parte de abajo del reflector, sale por la parte de arriba y llega otra vez al interferómetro, pasando por él y acabando en la cabeza del láser. Cuando llega a la cabeza del láser se enciende un piloto que nos indica que el láser está midiendo, y en la pantalla se ve el % de potencia de retorno del haz.

Por último, hay que conseguir que ese % no baje del 80% y que se mantenga a lo largo de toda la recta, ya que si es inferior el sistema no nos asegura que la medida sea fiable.



Ilustración 3.24 Posición de los espejos

Aquí vemos la cabeza del láser, el piloto de la izquierda nos indica que el láser está encendido, y el de la derecha que el láser puede medir, ya que el láser sale (orificio superior) y está llegando adecuadamente por el orificio inferior.

Si no estuviera llegando veríamos esto:



Ilustración 3.25 Cabeza del láser solo con piloto de encendido

A continuación, está la tabla de valores finales del primer control, junto con las dos gráficas. Esta tabla nos da el número de la línea, los puntos de la misma con su posición en milímetros y la altura o elevación calculada por el analizado Moody de cada punto en micras:

Nº línea	Nº punto	Posición	Elevación
1	1	0	89,6726
1	2	51	90,4804
1	3	102	87,5877
1	4	153	83,9836
1	5	204	79,7432
1	6	255	75,593
1	7	306	72,0257
1	8	357	69,5148
1	9	408	69,2608
1	10	459	69,9731
1	11	510	73,3279

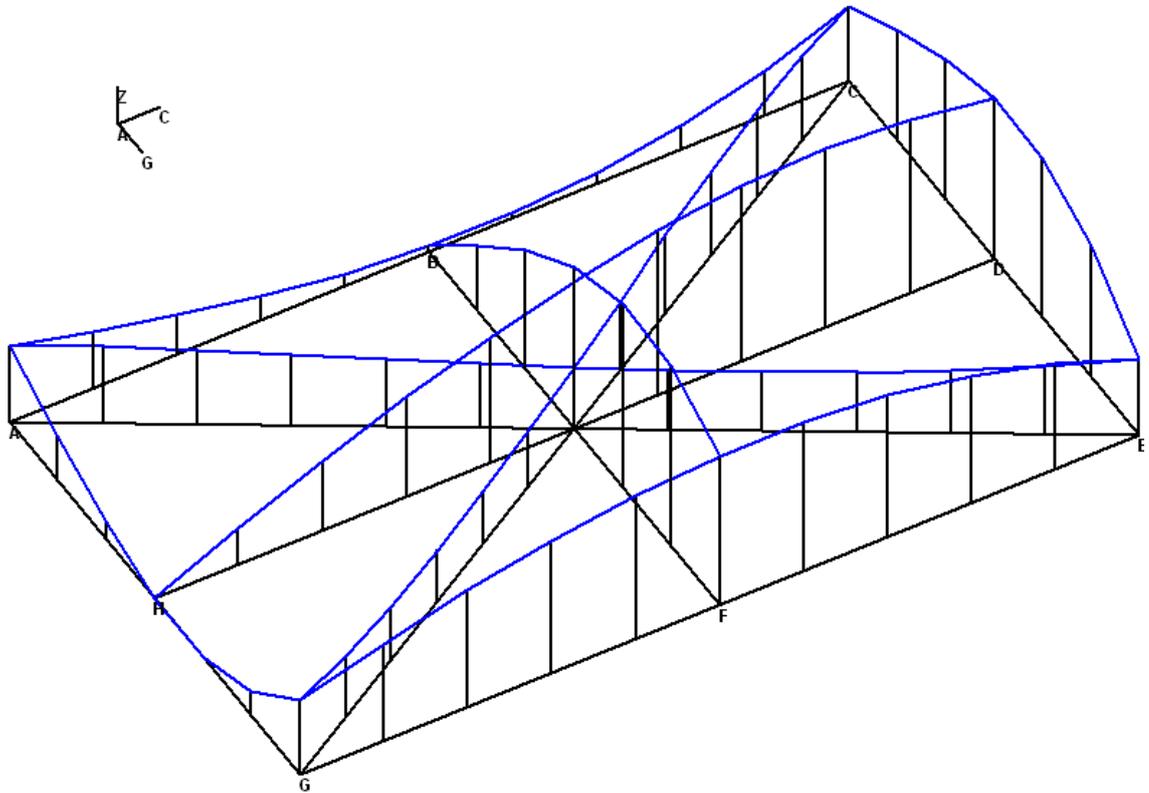
1	12	561	80,3824
1	13	612	89,6726
2	1	0	88,7386
2	2	51	100,1179
2	3	102	103,1967
2	4	153	99,671
2	5	204	92,2542
2	6	255	81,9401
2	7	306	72,0257
2	8	357	65,1137
2	9	408	62,487
2	10	459	60,9559
2	11	510	63,1253
2	12	561	73,1946
2	13	612	88,7386
3	1	0	88,7386
3	2	51	52,9518
3	3	102	27,9293
3	4	153	13,5565
3	5	204	6,333
3	6	255	6,3959
3	7	306	13,8835
3	8	357	27,7373
3	9	408	45,8745
3	10	459	66,4631
3	11	510	89,6726
4	1	0	88,7386
4	2	51	129,9471
4	3	102	166,3302
4	4	153	189,2745
4	5	204	187,2991
4	6	255	153,8756
4	7	306	89,6726
5	1	0	89,6726
5	2	51	125,2665
5	3	102	149,492
5	4	153	168,3595
5	5	204	176,9769

5	6	255	176,5544
5	7	306	170,6887
5	8	357	157,2379
5	9	408	139,0652
5	10	459	114,7186
5	11	510	88,7386
6	1	0	89,6726
6	2	51	51,8435
6	3	102	20,0077
6	4	153	0,0198
6	5	204	0
6	6	255	29,1527
6	7	306	88,7386
7	1	0	189,2745
7	2	51	203,7069
7	3	102	210,3229
7	4	153	206,9848
7	5	204	195,167
7	6	255	174,505
7	7	306	148,1529
7	8	357	117,9799
7	9	408	81,8914
7	10	459	43,0948
7	11	510	0,0198
8	1	0	6,3959
8	2	51	77,1094
8	3	102	141,2348
8	4	153	191,1467
8	5	204	217,1226
8	6	255	213,4851
8	7	306	176,5544

Tabla 3.3

40,00 μm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 217,123 μm línea8(BF) Más.Menos: 108,561 μm Cierre n° 7(DH): 102,479 μm Cierre n° 8(BF): 119,121 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 27/04/2015 11:22:10 Fecha actual: 11/06/2015 12:30:24 Nombre archivo: planitud1.ftt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Min.	Máx.	Media
		T aire	20,0	20,0	20,0
		P aire	760,73	760,73	760,73
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1			
		T MT2			
		T MT3			

Ilustración 3.26a Control 1

89,7	66,5	45,9	27,7	13,9	6,4	6,3	13,6	27,9	53,0	88,7
	90,5								100,1	
51,8		87,6			77,1			103,2		129,9
			84,0					99,7		
20,0				79,7	141,2		92,3			166,3
					75,6	81,9				
,0	43,1	81,9	118,0	148,2	72,0	195,2	207,0	210,3	203,7	189,3
					65,1	69,5				
,0				62,5	217,1		69,3			187,3
			61,0					70,0		
29,2		63,1			213,5			73,3		153,9
									80,4	
	73,2									
88,7	114,7	139,1	157,2	170,7	176,6	177,0	168,4	149,5	125,3	89,7

Elevación en μm

Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 217,123 μm línea8(BF) Más/Menos: 108,561 μm Cierre n° 7(DH): 102,479 μm Cierre n° 8(BF): 119,121 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 27/04/2015 11:22:10 Fecha actual: 27/04/2015 11:27:53 Nombre archivo: planitud1.txt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Mín.	Máx.	Media
		T aire	20,0	20,0	20,0
		P aire	760,73	760,73	760,73
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1			
		T MT2			
		T MT3			

Ilustración 3.26b Control 1

Como dijimos la altura máxima es muy elevada, en este caso es de 217 micras en la línea 8. Y los valores de cierre son 102 y 119 micras, también muy elevados. Esto lo esperábamos ya que con altos valores de altura máxima suele corresponder altos valores de valores de cierre. ¿Por qué? Una altura máxima elevada nos indica que hay una elevada diferencia entre las alturas medidas por el láser y, a su vez, entre las alturas del analizado Moody. Por ende, los valores de cierre, que son diferencias de alturas, serán también elevados. Si no fueran elevados sería mera casualidad.

Recordamos que los valores de cierre son las diferencias de altura entre los puntos medios de las líneas en cruz (7 y 8) y el punto medio de las diagonales (que es el mismo).

Lo interesante sería que estos valores de cierre fueran los más bajos posibles ya que indicaría que esas diferencias son pequeñas, pero no influye en la clase de la mesa ya que es un valor que nos da el sistema Moody no muy relevante.

Ahora vemos los resultados del segundo control:

Nº línea	Nº punto	Posición	Elevación
1	1	0	95,1423
1	2	51	98,8391
1	3	102	96,1767
1	4	153	92,8071
1	5	204	88,9651
1	6	255	85,0189
1	7	306	81,2804
1	8	357	78,8829
1	9	408	78,3264
1	10	459	78,4344
1	11	510	81,139
1	12	561	87,426
1	13	612	95,1423
2	1	0	96,1447
2	2	51	108,0951
2	3	102	112,0776
2	4	153	108,4188
2	5	204	101,4831
2	6	255	91,258
2	7	306	81,2804

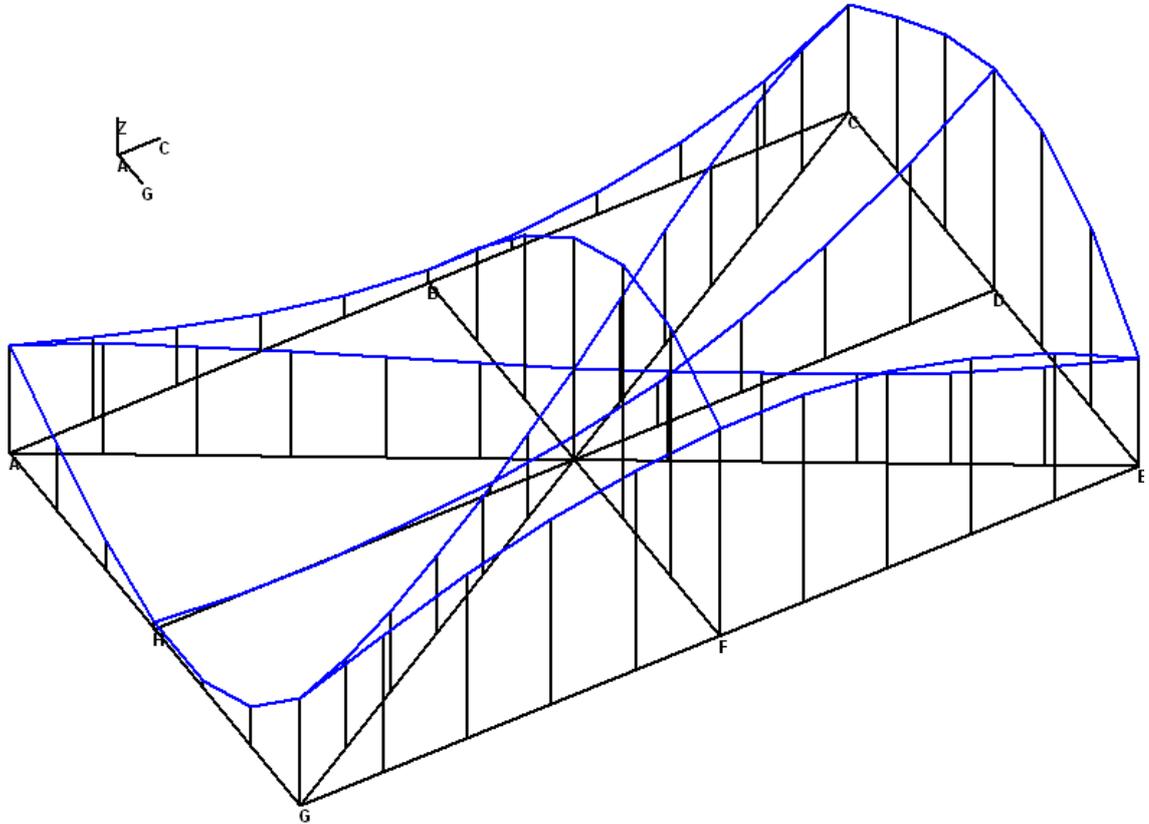
2	8	357	74,3598
2	9	408	70,7374
2	10	459	68,9351
2	11	510	70,8051
2	12	561	80,5603
2	13	612	96,1447
3	1	0	96,1447
3	2	51	59,2009
3	3	102	34,1179
3	4	153	19,5504
3	5	204	11,88
3	6	255	11,8094
3	7	306	18,9537
3	8	357	32,5769
3	9	408	51,2877
3	10	459	72,0861
3	11	510	95,1423
4	1	0	96,1447
4	2	51	137,3816
4	3	102	173,7504
4	4	153	196,2408
4	5	204	193,2234
4	6	255	159,2602
4	7	306	95,1423
5	1	0	95,1423
5	2	51	130,9135
5	3	102	155,7104
5	4	153	174,7071
5	5	204	184,2297
5	6	255	183,7279
5	7	306	177,9291
5	8	357	164,7072
5	9	408	146,4417
5	10	459	122,0492
5	11	510	96,1447
6	1	0	95,1423
6	2	51	57,8911
6	3	102	25,9926

6	4	153	6,4898
6	5	204	6,5803
6	6	255	36,1922
6	7	306	96,1447
7	1	0	196,2408
7	2	51	143,1996
7	3	102	99,1807
7	4	153	64,4876
7	5	204	38,2571
7	6	255	21,2633
7	7	306	9,6338
7	8	357	3,7255
7	9	408	0
7	10	459	0,9011
7	11	510	6,4898
8	1	0	11,8094
8	2	51	83,0429
8	3	102	147,3517
8	4	153	197,0133
8	5	204	224,2768
8	6	255	220,5868
8	7	306	183,7279

Tabla 3.4

30,00 μm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 224,277 μm línea8(BF) Más.Menos: 112,138 μm Cierre n° 7(DH): -60,017 μm Cierre n° 8(BF): 115,733 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 30/04/2015 12:30:41 Fecha actual: 11/06/2015 12:31:22 Nombre archivo: planitud2.ftt Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Min.	Máx.	Media
		T aire	20,0	20,0	20,0
		P aire	760,73	760,73	760,73
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1			
		T MT2			
		T MT3			

Ilustración 3.27a Control 2

95,1	72,1	51,3	32,6	19,0	11,8	11,9	19,6	34,1	59,2	96,1
	98,8								108,1	
57,9		96,2			83,0			112,1		137,4
			92,8					108,4		
26,0			89,0		147,4		101,5			173,8
				85,0		91,3				
6,5	,9	,0	3,7	9,6	81,3	38,3	64,5	99,2	143,2	196,2
				74,4		78,9				
6,6			70,7		224,3		78,3			193,2
			68,9					78,4		
36,2		70,8			220,6			81,1		159,3
	80,6								87,4	
96,1	122,0	146,4	164,7	177,9	183,7	184,2	174,7	155,7	130,9	95,1

Elevación en μm

Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 224,277 μm línea8(BF) Más/Menos: 112,138 μm Cierre n° 7(DH): -60,017 μm Cierre n° 8(BF): 115,733 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 30/04/2015 12:30:41 Fecha actual: 30/04/2015 12:31:57 Nombre archivo: planitud2.fit Operador: Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Mín.	Máx.	Media
		T aire	20,0	20,0	20,0
		P aire	760,73	760,73	760,73
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1			
		T MT2			
		T MT3			

Ilustración 3.27b Control 2

En este control, la altura máxima es de 224 micras en la línea 8. Los valores de cierre son -60 y 116 micras.

$$(224,277 - 217,123) / 224,277 * 100 = 3,2 \%$$

En cuanto a porcentaje, la variación es baja debido a que estamos hablando de elevaciones muy altas, pero la diferencia es de unas 7 micras, que es bastante elevado.

Estas alturas máximas, sin tener en cuenta la incertidumbre y como podemos ver en la tabla 3.1, nos indica que la mesa está fuera de clase, es decir, que estamos ante una mesa que no podemos clasificar.

3.2.3- Estudio de la reproducibilidad del láser

Se va a medir la reproducibilidad con dos medidas del error de planitud con láser interferométrico de una mesa de granito. Estos controles son realizados con las mismas condiciones, es decir, mismo sistema láser, mismo laboratorio, intervalo de tiempo mínimo, pero son realizados por dos personas distintas.

El procedimiento será medir una persona una línea, guardar, abrir otro control, medir la otra persona y guardar. Se cambia de línea y se repite la acción. Así la única variación es donde paramos el espacio patrón, ya que es imposible hacerlo en el mismo sitio siempre.

Este control lo realizamos con un equipo distinto al anterior, ya que éste está calibrado, por lo que las mediciones son trazables. Con este equipo tenemos los medidores de temperatura de material, de humedad y de aire. Los valores que miden, antes eran introducidos a mano.

La mesa tiene unas medidas de 1200 x 800 x 150. Para hacernos una idea de características, hemos encontrado una mesa similar no clasificada en esta web:

DCL metrología
Instrumentos de Medida, Instrumentos de Medición y Control
con Certificado de Calibración Opcional

Inicio Equipos de Ocasión Calibraciones ENAC Trusted Shops Servicios Catálogo Contacto

Atención a Cliente
945 298 084

Búsqueda de productos
Buscar por

Instrumentos de Medida

- MARCAS DISTRIBUIDAS
- Aplicaciones Smartphones
- Acelerómetros
- Alexómetros
- Altímetros
- Anemómetros
- Anillos Patrón
- Bancos de Centrar
- Básculas y Pesas
- Bloques y Espigas Patrón

Instrumentos de Medida » Mesas de Planitud » Mesas de Planitud de Granito » Mesa de Planitud 1.200 x 800 x 150

Mesa de Planitud 1.200 x 800 x 150
N.º de producto: 600A

- Dimensiones: 1.200 x 800 x 150 mm.
- Peso: 485 Kg.
- Planitud 7 micras.
- Pulse sobre la imagen para ver los gráficos del Certificado de Calibración de fabricante.
- Certificado de Calibración ENAC opcional, consúltenos.
- Soporte opcional ref. 600M.

Plazo de entrega: 7-15 días

1.870,00 €
(IVA no incluido)

VOLVER

1 + **COMPRAR**

Recomendar
Hacer una pregunta

Ilustración 3.28 Características de la mesa de planitud

De la misma forma anterior realizamos el cuadro de estaciones. Nos queda así:

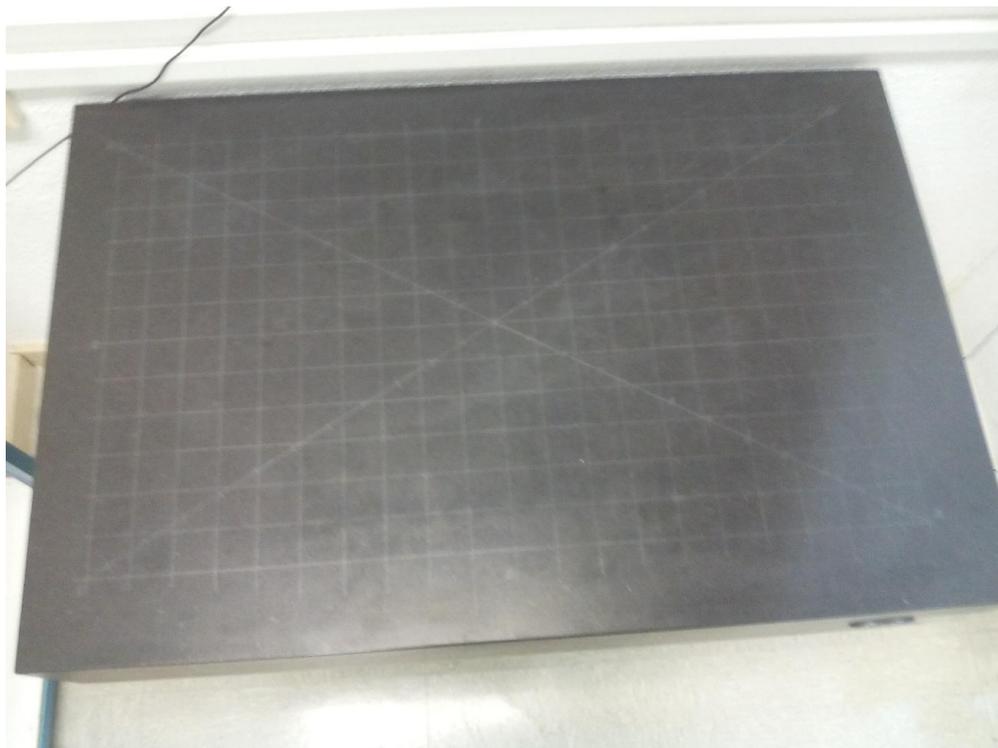


Ilustración 3.29 Retícula

El lado largo nos queda con 20 estaciones, el corto con 12 y las diagonales con 24.

En esta medición son necesarios los espejos, debido a su colocación. Es algo más complicado cuadrar el haz del láser.

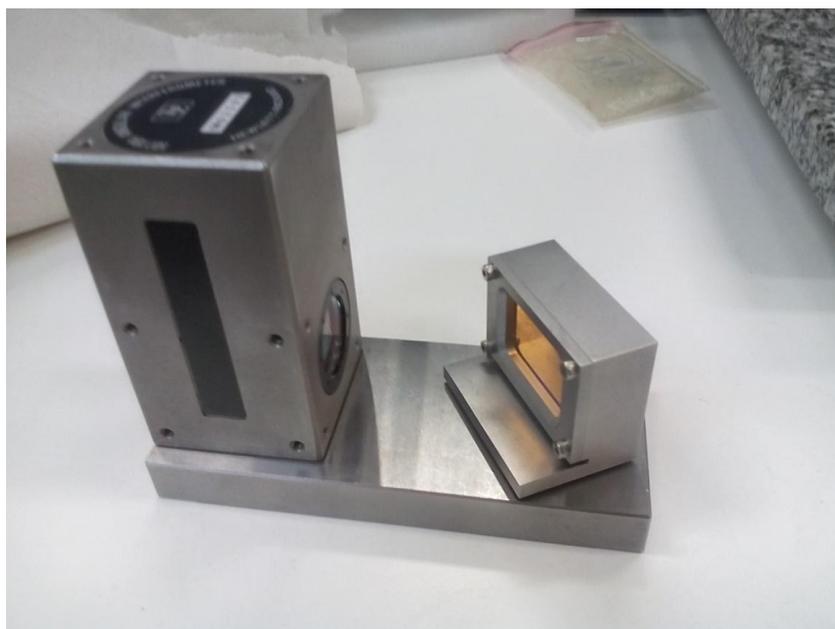


Ilustración 3.30 Interferómetro con el espejo

El haz que sale del láser tiene que llegar al espejo, y del espejo al interferómetro. Este proceso es algo más complicado por lo que nos lleva más tiempo cuadrar el láser. Se consigue cuadrar a base de ir probando diferentes posiciones, tanto girando el espejo, como moviendo la cabeza del láser.

El proceso es exactamente el mismo que el explicado anteriormente.

El resultado final de la medición realizada por la primera persona es el siguiente:

Nº línea	Nº punto	Posición	Elevación
1	001	0,0	0,8467
1	002	50,8	0,4836
1	003	101,6	0,5517
1	004	152,4	0,674
1	005	203,2	0,4437
1	006	254,0	0,2932
1	007	304,8	0,808
1	008	355,6	1,0358
1	009	406,4	1,4496
1	010	457,2	1,3717
1	011	508	1,6348
1	012	558,8	1,5499
1	013	609,6	1,9307
1	014	660,4	2,0488

1	015	711,2	2,0374
1	016	762	1,7379
1	017	812,8	1,8174
1	018	863,6	2,1012
1	019	914,4	2,1385
1	020	965,2	1,8985
1	021	1016	1,6449
1	022	1066,8	1,2272
1	023	1117,6	0,8846
1	024	1168,4	0,9526
1	025	1219,2	0,8467
2	001	0,0	4,4904
2	002	50,8	3,7517
2	003	101,6	3,5118
2	004	152,4	2,9994
2	005	203,2	2,7899
2	006	254,0	2,5607
2	007	304,8	2,1238
2	008	355,6	2,1917
2	009	406,4	2,0344
2	010	457,2	1,9541
2	011	508	1,8428
2	012	558,8	1,7879
2	013	609,6	1,9307
2	014	660,4	1,8595
2	015	711,2	1,9589
2	016	762	2,1222
2	017	812,8	2,3347
2	018	863,6	2,4538
2	019	914,4	2,8664
2	020	965,2	3,0483
2	021	1016	3,2143
2	022	1066,8	3,3497
2	023	1117,6	3,3584
2	024	1168,4	4,0174
2	025	1219,2	4,4904
3	001	0,0	4,4904
3	002	50,8	4,0567
3	003	101,6	3,9086

3	004	152,4	3,7485
3	005	203,2	3,5237
3	006	254,0	3,2392
3	007	304,8	2,8773
3	008	355,6	2,0735
3	009	406,4	1,8225
3	010	457,2	1,3365
3	011	508	0,8169
3	012	558,8	0,5491
3	013	609,6	0,473
3	014	660,4	0,3869
3	015	711,2	0,0
3	016	762	0,0309
3	017	812,8	0,2136
3	018	863,6	0,2887
3	019	914,4	0,5171
3	020	965,2	0,5416
3	021	1016	0,8467
4	001	0,0	4,4904
4	002	50,8	4,3911
4	003	101,6	4,4447
4	004	152,4	4,2609
4	005	203,2	4,1872
4	006	254,0	3,8715
4	007	304,8	3,5986
4	008	355,6	3,4372
4	009	406,4	2,9348
4	010	457,2	2,1701
4	011	508	1,6835
4	012	558,8	1,1874
4	013	609,6	0,8467
5	001	0,0	0,8467
5	002	50,8	1,4476
5	003	101,6	2,0684
5	004	152,4	2,5307
5	005	203,2	2,8395
5	006	254,0	3,3389
5	007	304,8	3,4893
5	008	355,6	2,7259

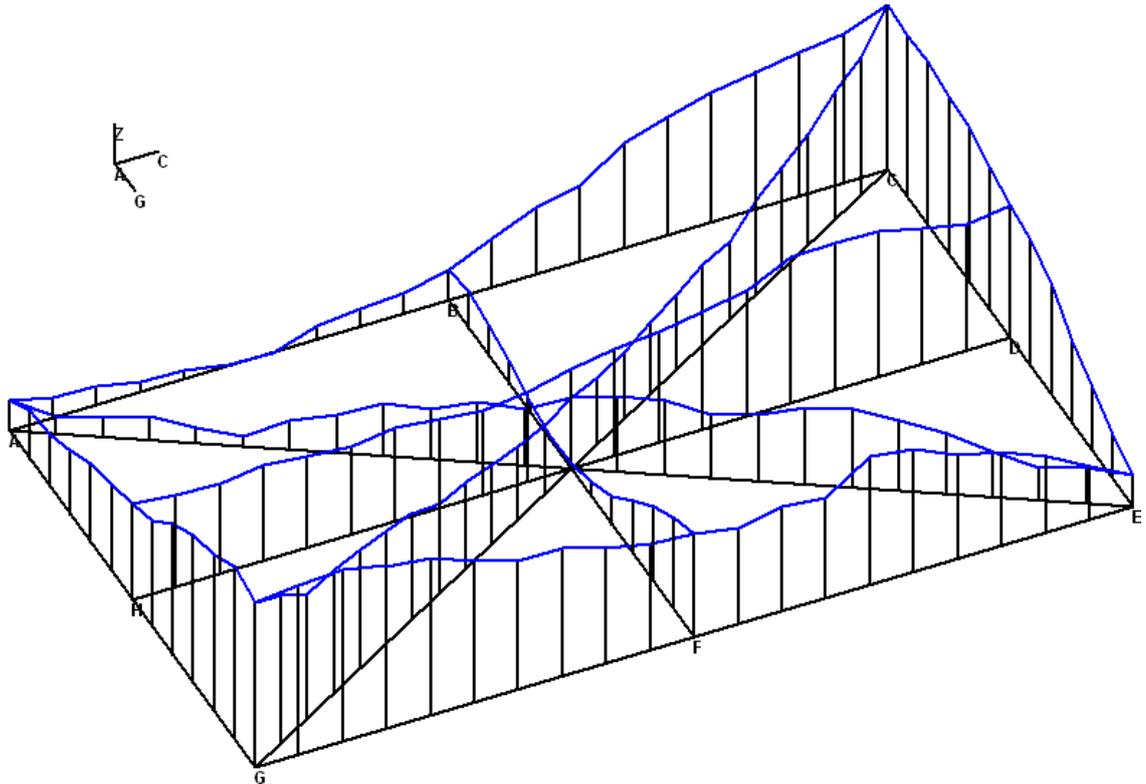
5	009	406,4	2,83
5	010	457,2	2,5913
5	011	508	2,8137
5	012	558,8	2,8788
5	013	609,6	3,1208
5	014	660,4	3,5026
5	015	711,2	3,4992
5	016	762	3,8407
5	017	812,8	4,2955
5	018	863,6	4,4293
5	019	914,4	4,6724
5	020	965,2	4,6179
5	021	1016	4,4904
6	001	0,0	0,8467
6	002	50,8	1,3094
6	003	101,6	1,4438
6	004	152,4	1,7613
6	005	203,2	2,1558
6	006	254,0	2,3346
6	007	304,8	2,6193
6	008	355,6	2,9141
6	009	406,4	3,603
6	010	457,2	4,0451
6	011	508	4,2535
6	012	558,8	4,7112
6	013	609,6	4,4904
7	001	0,0	3,5986
7	002	50,8	3,4416
7	003	101,6	3,7152
7	004	152,4	3,9924
7	005	203,2	4,0057
7	006	254,0	4,0011
7	007	304,8	3,4293
7	008	355,6	3,2099
7	009	406,4	3,0218
7	010	457,2	2,9046
7	011	508	2,7319
7	012	558,8	2,4432
7	013	609,6	2,2782

7	014	660,4	2,429
7	015	711,2	2,549
7	016	762	2,3763
7	017	812,8	2,481
7	018	863,6	2,5773
7	019	914,4	2,4564
7	020	965,2	2,4839
7	021	1016	2,6193
8	001	0,0	0,8169
8	002	50,8	1,0062
8	003	101,6	0,8377
8	004	152,4	0,6086
8	005	203,2	0,238
8	006	254,0	0,0852
8	007	304,8	0,1315
8	008	355,6	0,3719
8	009	406,4	0,7755
8	010	457,2	1,4243
8	011	508	2,0403
8	012	558,8	2,4583
8	013	609,6	2,8137

Tabla 3.5

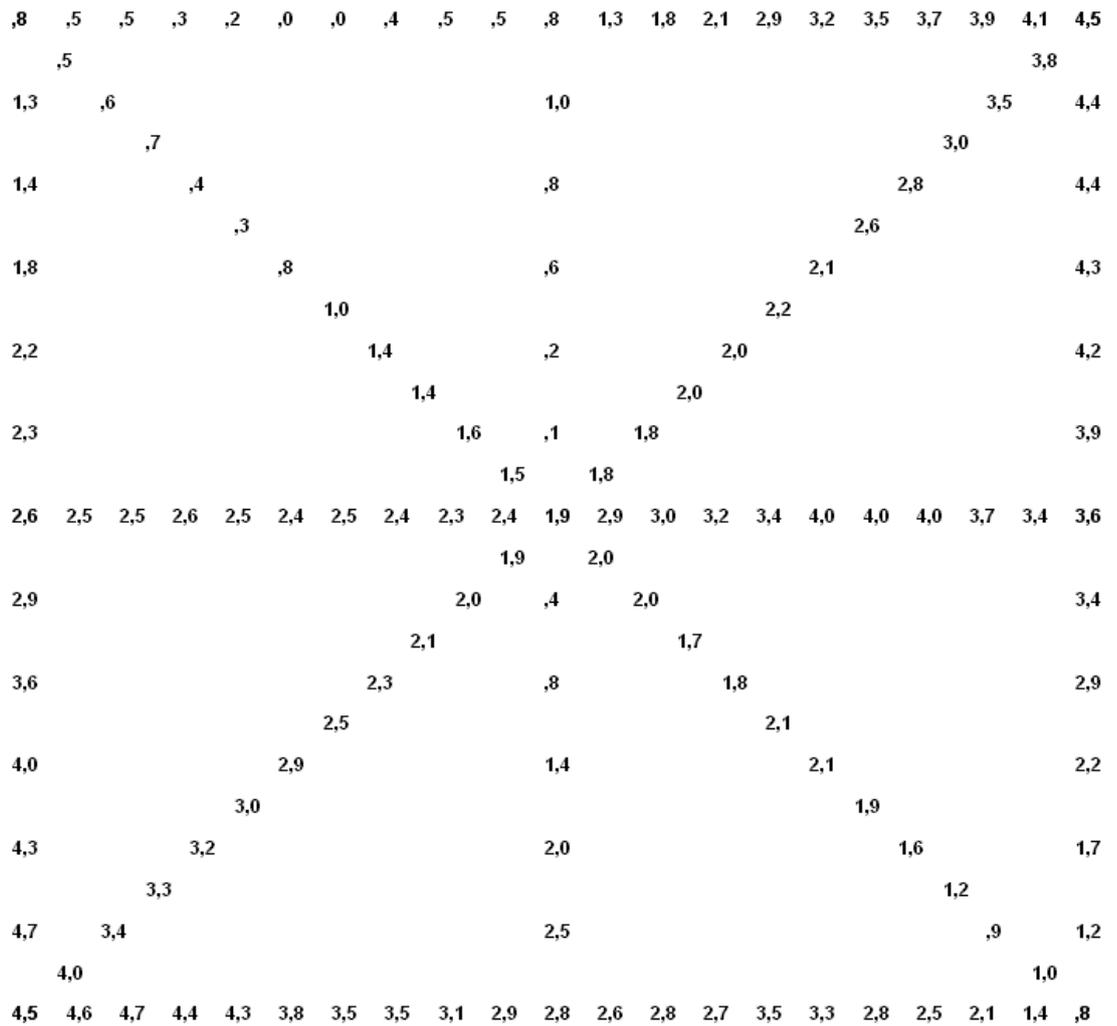
1,00 μm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 4,7112 μm línea6(AG) Más.Menos: 2,3556 μm Cierre n° 7(DH): ,8012 μm Cierre n° 8(BF): -1,7992 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 03/06/2015 20:13:58 Fecha actual: 10/06/2015 16:54:10 Nombre archivo: adrianbuena.txt Operador: Adrian Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Min.	Máx.	Media
		T aire	19,57	22,53	20,34
		P aire	704,21	705,03	704,63
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1	19,42	19,89	19,57
		T MT2	19,17	19,97	19,73
		T MT3	19,17	25,36	22,26

Ilustración 3.31a Control persona 1



Elevación en µm

Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 4,7112 µm línea6(AG) Más/Menos: 2,3556 µm Cierre nº 7(DH): ,8012 µm Cierre nº 8(BF): -1,7992 µm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 03/06/2015 20:13:58 Fecha actual: 10/06/2015 16:54:46 Nombre archivo: adrianbuena.txt Operador: Adrian Ubicación: Nº de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Mín.	Máx.	Media
		T aire	19,57	22,53	20,34
		P aire	704,21	705,03	704,63
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1	19,42	19,89	19,57
		T MT2	19,17	19,97	19,73
		T MT3	19,17	25,36	22,26

Ilustración 3.31b Control persona 1

La elevación máxima es 4,7 micras en la línea AG, con los cierres 0,8 y -1,8 micras.

Y el resultado de la otra persona es el siguiente:

Nº línea	Nº punto	Posición	Elevación
1	001	0,0	1,1117
1	002	50,8	0,7687
1	003	101,6	0,8716
1	004	152,4	0,9926
1	005	203,2	0,7463
1	006	254,0	0,6278
1	007	304,8	1,1528
1	008	355,6	1,2256
1	009	406,4	1,6621
1	010	457,2	1,6702
1	011	508	1,8123
1	012	558,8	1,615
1	013	609,6	1,9946
1	014	660,4	2,1987
1	015	711,2	2,2217
1	016	762	2,0351
1	017	812,8	2,2144
1	018	863,6	2,4658
1	019	914,4	2,577
1	020	965,2	2,307
1	021	1016	2,0217
1	022	1066,8	1,5835
1	023	1117,6	1,093
1	024	1168,4	1,1189
1	025	1219,2	1,1117
2	001	0,0	5,0018
2	002	50,8	4,0825
2	003	101,6	3,6169
2	004	152,4	3,1348
2	005	203,2	2,8683
2	006	254,0	2,719
2	007	304,8	2,3165
2	008	355,6	2,1816
2	009	406,4	2,0046
2	010	457,2	1,9082
2	011	508	1,8187

2	012	558,8	1,7836
2	013	609,6	1,9946
2	014	660,4	2,0382
2	015	711,2	2,1748
2	016	762	2,48
2	017	812,8	2,7575
2	018	863,6	2,9048
2	019	914,4	3,3575
2	020	965,2	3,5683
2	021	1016	3,7703
2	022	1066,8	3,9529
2	023	1117,6	3,9946
2	024	1168,4	4,5134
2	025	1219,2	5,0018
3	001	0,0	5,0018
3	002	50,8	4,3694
3	003	101,6	3,9049
3	004	152,4	3,6055
3	005	203,2	3,1331
3	006	254,0	2,9793
3	007	304,8	2,5173
3	008	355,6	2,1698
3	009	406,4	1,7279
3	010	457,2	1,1925
3	011	508	0,7455
3	012	558,8	0,4793
3	013	609,6	0,3207
3	014	660,4	0,2508
3	015	711,2	0,0
3	016	762	0,2578
3	017	812,8	0,4844
3	018	863,6	0,4907
3	019	914,4	0,7684
3	020	965,2	0,764
3	021	1016	1,1117
4	001	0,0	5,0018
4	002	50,8	4,8244
4	003	101,6	4,7669
4	004	152,4	4,462

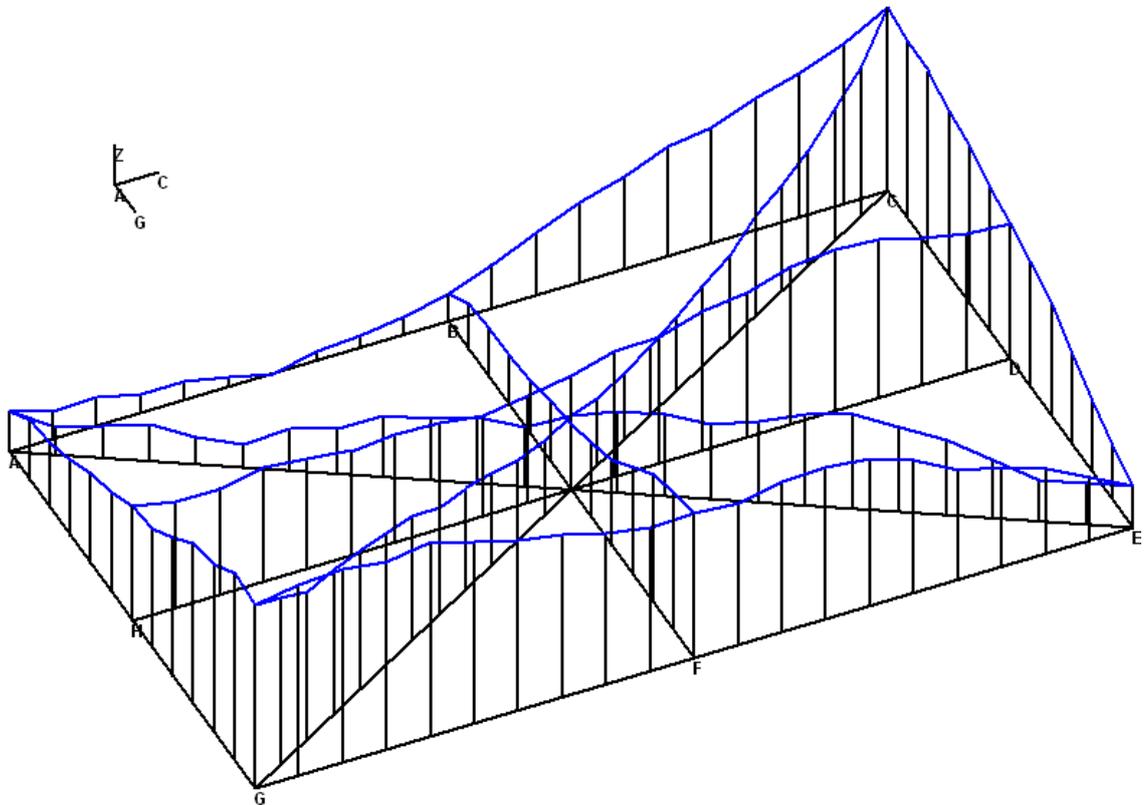
4	005	203,2	4,2813
4	006	254,0	3,9032
4	007	304,8	3,6762
4	008	355,6	3,4073
4	009	406,4	3,0446
4	010	457,2	2,4137
4	011	508	1,8869
4	012	558,8	1,4439
4	013	609,6	1,1117
5	001	0,0	1,1117
5	002	50,8	1,6982
5	003	101,6	2,2847
5	004	152,4	2,7131
5	005	203,2	2,9946
5	006	254,0	3,6097
5	007	304,8	3,9977
5	008	355,6	4,1318
5	009	406,4	4,1085
5	010	457,2	3,8631
5	011	508	3,9336
5	012	558,8	3,8978
5	013	609,6	4,1019
5	014	660,4	4,4263
5	015	711,2	4,6262
5	016	762	4,928
5	017	812,8	5,2983
5	018	863,6	5,1225
5	019	914,4	5,2617
5	020	965,2	5,2011
5	021	1016	5,0018
6	001	0,0	1,1117
6	002	50,8	1,6436
6	003	101,6	1,775
6	004	152,4	2,0756
6	005	203,2	2,4679
6	006	254,0	2,6931
6	007	304,8	3,1129
6	008	355,6	3,2458
6	009	406,4	3,8009

6	010	457,2	4,392
6	011	508	4,5803
6	012	558,8	5,1012
6	013	609,6	5,0018
7	001	0,0	3,6762
7	002	50,8	3,7756
7	003	101,6	4,0015
7	004	152,4	4,3372
7	005	203,2	4,418
7	006	254,0	4,2872
7	007	304,8	3,9502
7	008	355,6	3,8059
7	009	406,4	3,4646
7	010	457,2	3,4023
7	011	508	3,1157
7	012	558,8	2,9104
7	013	609,6	2,7303
7	014	660,4	2,8772
7	015	711,2	2,9184
7	016	762	2,8406
7	017	812,8	2,9863
7	018	863,6	3,1061
7	019	914,4	2,892
7	020	965,2	2,8869
7	021	1016	3,1129
8	001	0,0	0,7455
8	002	50,8	1,2404
8	003	101,6	1,3475
8	004	152,4	1,3776
8	005	203,2	1,4044
8	006	254,0	1,6485
8	007	304,8	1,763
8	008	355,6	2,0224
8	009	406,4	2,3486
8	010	457,2	2,8925
8	011	508	3,4683
8	012	558,8	3,7186
8	013	609,6	3,9336

Tabla 3.6

1,00 μm = Escala AZ

Trazado de planitud



Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 5,2983 μm línea5(EG) Más.Menos: 2,6492 μm Cierre n° 7(DH): 1,1211 μm Cierre n° 8(BF): -,2317 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 03/06/2015 20:08:31 Fecha actual: 10/06/2015 16:56:23 Nombre archivo: robertobuena.txt Operador: Adrian Ubicación: N° de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos			
			Min.	Máx.	Media
		T aire	19,57	22,73	20,27
		P aire	704,21	705,03	704,58
		H aire	50,0	50,0	50,0
		T MT1	19,41	19,68	19,55
		T MT2	19,62	19,89	19,71
		T MT3			

Ilustración 3.32a Control persona 2

1,1 ,8 ,8 ,5 ,5 ,3 ,0 ,3 ,3 ,5 ,7 1,2 1,7 2,2 2,5 3,0 3,1 3,6 3,9 4,4 5,0
,8 4,1
1,6 ,9 1,2 3,6 4,8
1,0 3,1
1,8 ,7 1,3 2,9 4,8
,6 2,7
2,1 1,2 1,4 2,3 4,5
1,2 2,2
2,5 1,7 1,4 2,0 4,3
1,7 1,9
2,7 1,8 1,6 1,8 3,9
1,6 1,8
3,1 2,9 2,9 3,1 3,0 2,8 2,9 2,9 2,7 2,9 2,0 3,4 3,5 3,8 4,0 4,3 4,4 4,3 4,0 3,8 3,7
2,0 2,2
3,2 2,2 2,0 2,2 3,4
2,5 2,0
3,8 2,8 2,3 2,2 3,0
2,9 2,5
4,4 3,4 2,9 2,6 2,4
3,6 2,3
4,6 3,8 3,5 2,0 1,9
4,0 1,6
5,1 4,0 3,7 1,1 1,4
4,5 1,1
5,0 5,2 5,3 5,1 5,3 4,9 4,6 4,4 4,1 3,9 3,9 3,9 4,1 4,1 4,0 3,6 3,0 2,7 2,3 1,7 1,1

Elevación en μm

Análisis numérico: Analizado Moody Elev. máx: 5,2983 μm línea5(EG) Más/Menos: 2,6492 μm Cierre nº 7(DH): 1,1211 μm Cierre nº 8(BF): -,2317 μm	Nombre máq.: Fecha de adquisición: 03/06/2015 20:08:31 Fecha actual: 10/06/2015 16:56:35 Nombre archivo: robertobuena.txt Operador: Adrian Ubicación: Nº de serie: Comentarios:	Datos ambiente: métricos <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Mín.</th> <th>Máx.</th> <th>Media</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T aire</td> <td>19,57</td> <td>22,73</td> <td>20,27</td> </tr> <tr> <td>P aire</td> <td>704,21</td> <td>705,03</td> <td>704,58</td> </tr> <tr> <td>H aire</td> <td>50,0</td> <td>50,0</td> <td>50,0</td> </tr> <tr> <td>T MT1</td> <td>19,41</td> <td>19,68</td> <td>19,55</td> </tr> <tr> <td>T MT2</td> <td>19,62</td> <td>19,89</td> <td>19,71</td> </tr> <tr> <td>T MT3</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Mín.	Máx.	Media	T aire	19,57	22,73	20,27	P aire	704,21	705,03	704,58	H aire	50,0	50,0	50,0	T MT1	19,41	19,68	19,55	T MT2	19,62	19,89	19,71	T MT3			
	Mín.	Máx.	Media																											
T aire	19,57	22,73	20,27																											
P aire	704,21	705,03	704,58																											
H aire	50,0	50,0	50,0																											
T MT1	19,41	19,68	19,55																											
T MT2	19,62	19,89	19,71																											
T MT3																														

Ilustración 3.32b Control persona 2

La elevación máxima es 5,3 micras en la línea EG. Los valores de cierre son 1,1 y -0,2 micras.

Como vemos hay una diferencia en el valor clave de 0,6 micras sobre unos valores de 5, lo que es alrededor de un 11% de variación. Y esta variación es respecto de hacerlo una persona distinta.

$$(5,3 - 4,7) / 5,3 * 100 = 11,32 \%$$

Con las medidas de la mesa (largo, ancho y diagonal) y con estas alturas máximas, como dijimos anteriormente sin tener en cuenta la incertidumbre y mirando la tabla 3.1, vemos que esta mesa tiene clase I.

Comparando repetibilidad y reproducibilidad, nos damos cuenta que el porcentaje de variación es mayor con el cambio de operario. Puede ser debido a que, al final y al cabo, cada operario tiene su forma de colocar los espejos, se fija en un punto distinto, desde un ángulo de vista distinto, etc.

3.2.4- Implantación del control de planitud en Excel

Dada la posibilidad de meter en el software datos teóricos y ver qué resultados proporciona, se ha podido obtener todos los pasos que realiza el software para dar los resultados finales. Se van a explicar a continuación:

En primer lugar, sabíamos que los espejos miden ángulos, medidos en arco segundos, y el resultado es una altura, dada en micras.

La relación entre el ángulo y la altura es la siguiente:

$$\text{Arcosegundos} / 3600 = \alpha \text{ grados}$$

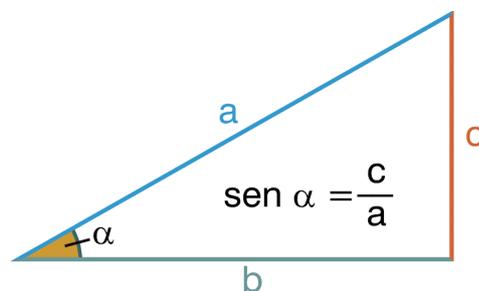


Ilustración 3.33 Relación ángulo y altura

En ángulos tan pequeños se puede estimar que "a" mide lo mismo que "b", y conocemos lo que vale "b", que es lo que mide cada estación.

Luego la altura "c" es: $c = b * \text{sen } \alpha$

Vamos a realizar este cálculo para $\alpha = 1$ arcoseg, y $b = 51$ mm. Entonces pasamos los arcosegundos a grados y los milímetros a micras:

$$c = \text{sen} (1 / 3600) * (51 * 1000) = 0,24725 \text{ micras / arcoseg}$$

Hemos determinado el valor "c" para transformar el valor angular (arcoseg) medido por el interferómetro láser en una altura (micras).

Ahora solo habrá que multiplicar el valor del ángulo por este valor "c" para conseguir la altura.

Los cálculos que realiza el sistema Moody los estudiamos gráficamente. Una vez que supimos dichos cálculos los implantamos teóricamente en la siguiente ecuación:

$$[(\alpha * C * A) - B * C] * (1 / A) * C = (\alpha * A - B) * (1 / A) * C$$

A = número total estaciones / número de la estación.

B = suma de todos los valores angulares de una línea.

C = 0,24725 micras / arcoseg (calculado anteriormente).

α = sumatorio de los α en dicha estación.

Una vez llegado a esta ecuación y explicándola en este trabajo, nos dimos cuenta de que hay una manera más fácil de llegar al mismo resultado. Aunque realizamos toda la explicación con la ecuación, más adelante explicamos también la manera más fácil.

Ahora vamos a explicar gráficamente como hemos llegado a esa ecuación, es decir, lo que hace el sistema del láser para calcular la altura a partir del ángulo, y los cambios que hace.

Para la explicación nos inventamos esta línea de 6 estaciones con los siguientes valores angulares (arcoseg):

3	2	-1	5	-2	3
---	---	----	---	----	---

Tabla 3.7

Tenemos 6 estaciones, es decir, 7 puntos siendo el primero de valor cero. Esto es debido a que la estación tiene tres puntos de apoyo, uno atrás y dos adelante. El apoyo de atrás, en la estación 1, es el cero y mide las desviaciones respecto a ese apoyo. Luego el valor 3 corresponde con la inclinación entre el apoyo 0 y el final de la primera estación, siendo éste el punto 2.

Se hace el sumatorio total en cada punto y una línea con esos valores:

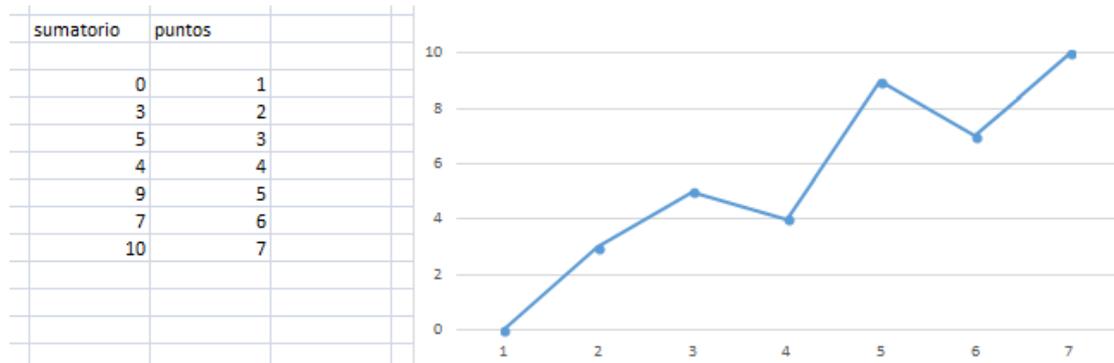


Ilustración 3.34 Sumatorio y gráfica línea inventada

El software del láser estudia la planitud independientemente de la orientación de la línea de estudio y, en general, de la mesa. Para ello, lo primero que hace es calcular una recta en la que los dos puntos extremos sean cero. Luego veremos que el sistema láser llama a esto "ajuste a cero del punto final". Para ello se divide el sumatorio total entre el número de estaciones, y ese valor es lo que se suma en cada punto:

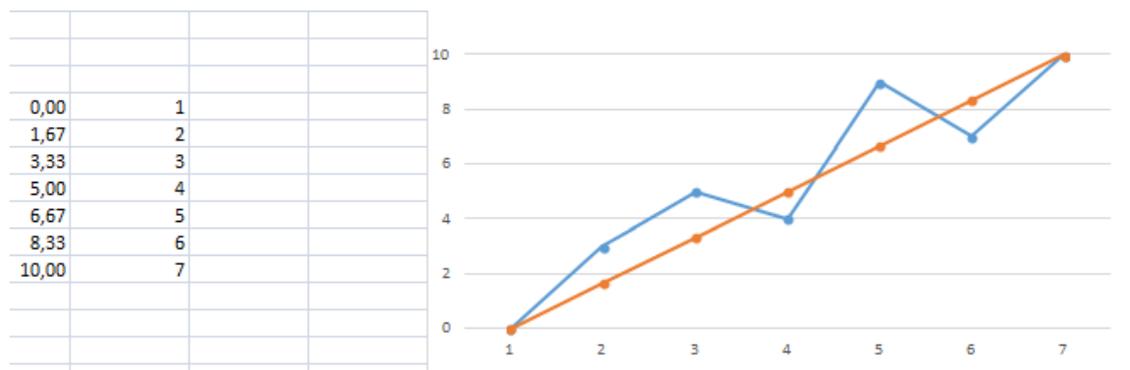


Ilustración 3.35 Recta que une extremos

Con esta recta roja, se va a calcular la altura que luego nos sale en el ajuste a cero del punto final, es decir, nos sirve de referencia. Entonces el valor que buscamos es la altura vertical entre el mismo punto de nuestra línea azul y la recta roja. Esta altura multiplicada por el valor "c", nos daría nuestro valor final.

Para ello hay que hacer una recta que pase por cada estación de nuestra línea inventada:

La primera recta pasa por 0 y 3, así que, al tener 6 estaciones, el último punto será el 18.

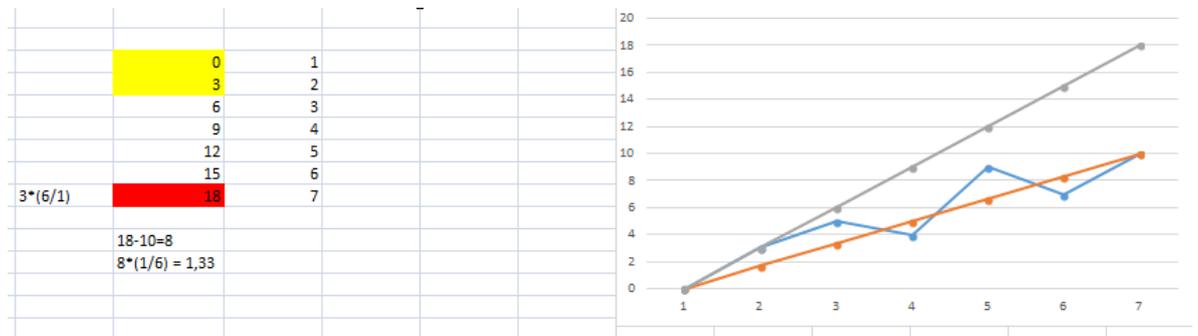


Ilustración 3.36 Recta que pasa por segundo punto

Recordamos la fórmula que estamos utilizando: $(\alpha * A - B) * (1 / A) * C$.

$$\alpha * A = 3 * (6 / 1) = 18$$

$$\alpha * A - B = 18 - 10 = 8$$

$$(\alpha * A - B) * (1 / A) = 8 * (1 / 6) = 1,33$$

Es decir:

- $\alpha * A$: nos calcula el último punto de la recta que pasa por cada estación.
- $\alpha * A - B$: es la diferencia vertical del último punto de ambas rectas
- $(\alpha * A - B) * (1 / A)$: nos calcula esa diferencia, pero en la estación correspondiente a nuestra línea.

Y así será en todos los puntos. Vamos con los siguientes:

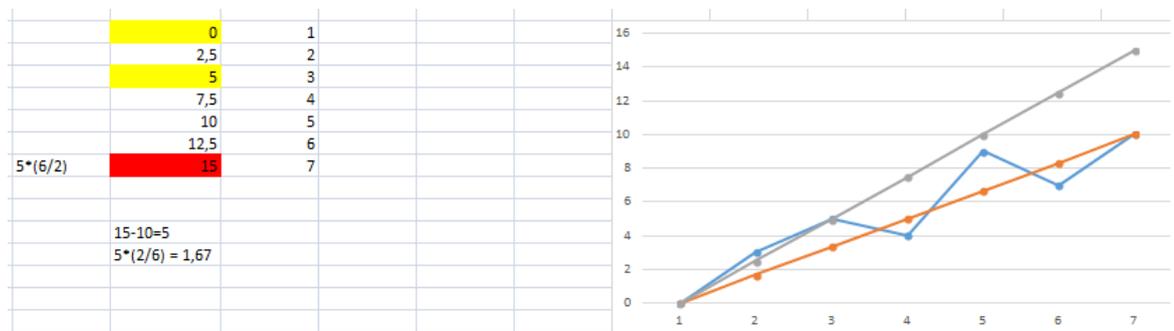


Ilustración 3.37 Recta que pasa por tercer punto

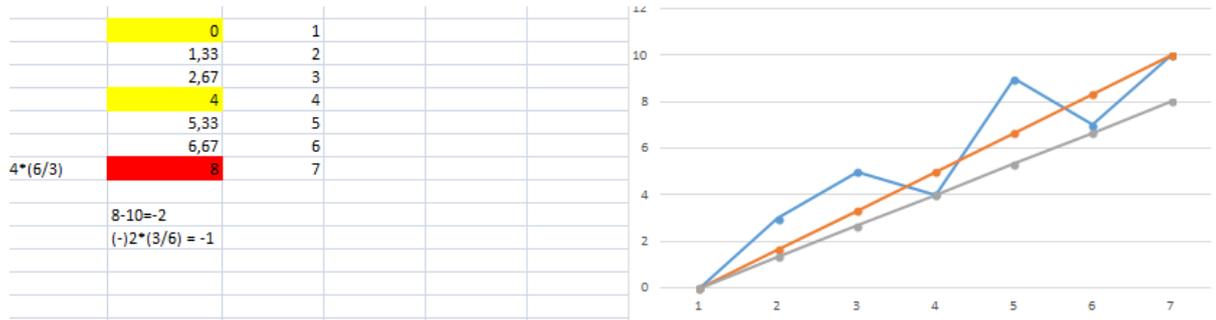


Ilustración 3.38 Recta que pasa por cuarto punto

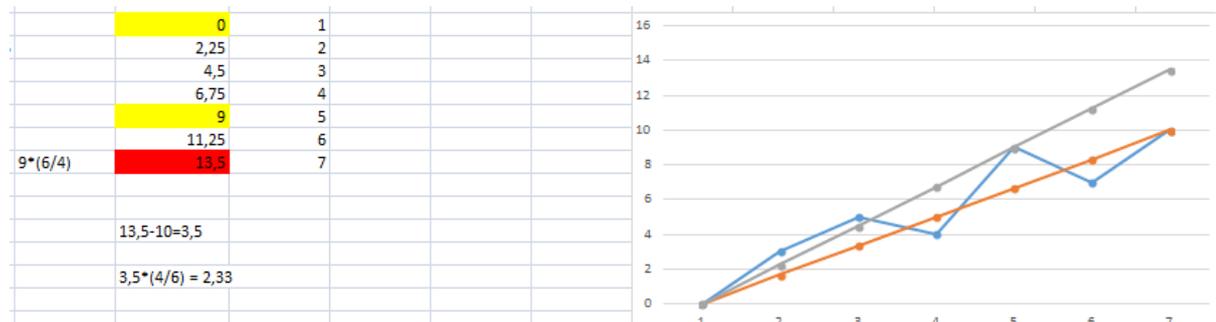


Ilustración 3.39 Recta que pasa por quinto punto

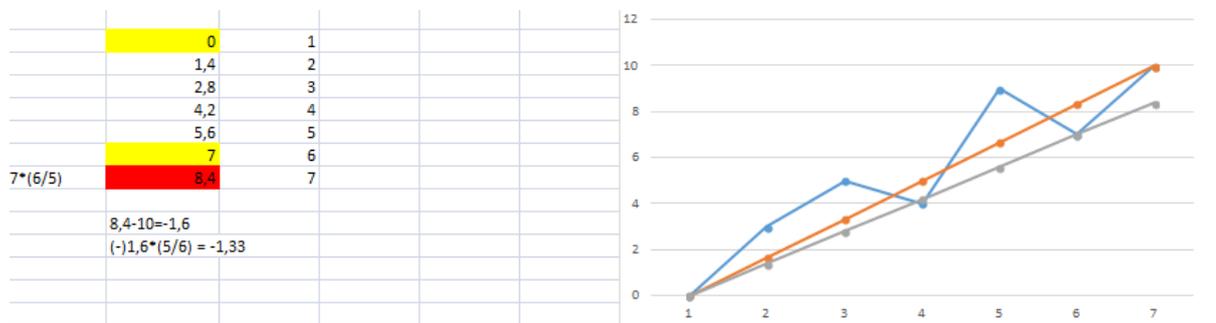


Ilustración 3.40 Recta que pasa por sexto punto

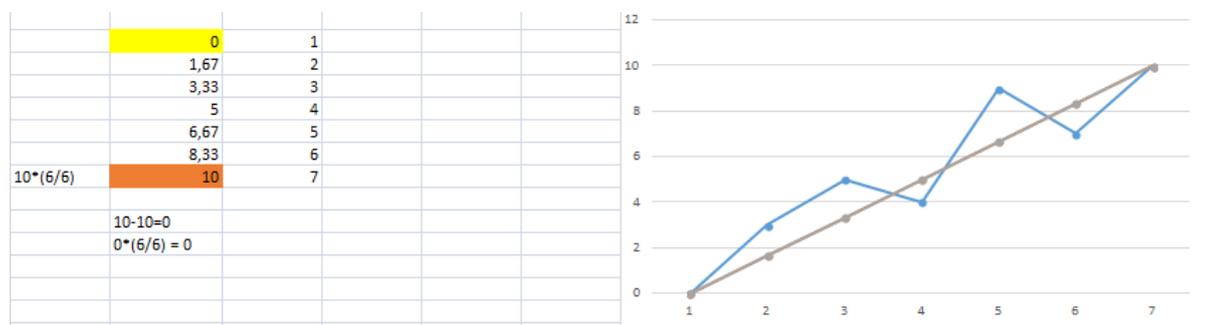


Ilustración 3.41 Recta que pasa por último punto

Y el último punto, como se sabía, da o.

Hasta aquí tenemos los valores $(\alpha * A - B) * (1 / A)$ de cada estación de la línea. Como dijimos anteriormente solo faltaría multiplicarlo por "c" para completar la ecuación. Es decir, al multiplicar la diferencia vertical de cada estación por el valor "c" tenemos nuestra línea ajustada a cero en los extremos.

Y está ecuación $(\alpha * A - B) * (1 / A)$, como dijimos anteriormente, da unos resultados que se pueden conseguir más fáciles de la siguiente manera: explicando que la recta roja es únicamente de referencia, nos damos cuenta de que no, que la podemos utilizar para llegar a los resultados. Es decir, solo necesitamos restar al sumatorio de los valores angulares, los valores de dicha recta roja en cada punto. Lo vemos a continuación, donde podemos observar que los valores de la diferencia entre línea inventada y recta son los mismos que los calculados con la ecuación:

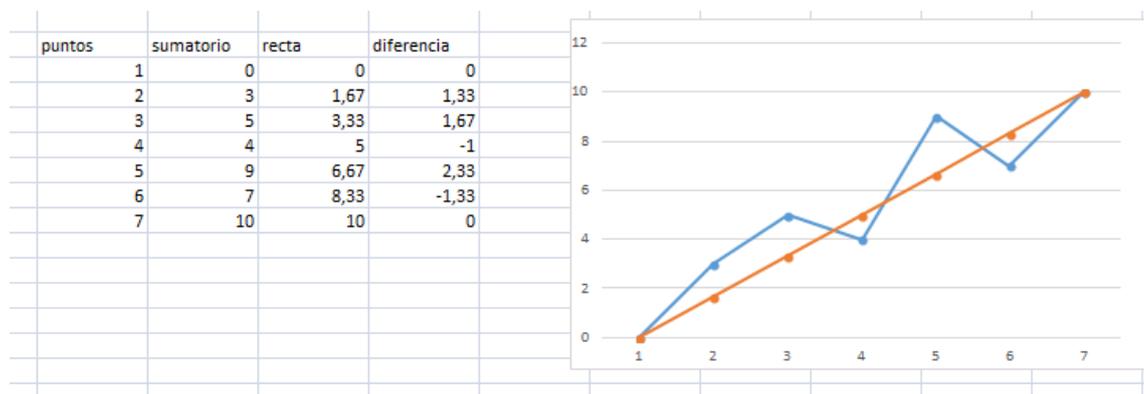


Ilustración 3.42 Resultados calculados con la diferencia entre líneas

3.2.4.1- Ejemplo teórico con Excel y con el láser

Se va a explicar todo el proceso con un ejemplo teórico.

Tenemos 8 estaciones en cada lado.

Con el espacio patrón de 50,8 mm, nos queda que cada lado mide:

$$50,8 \times 8 = 406,4 \text{ mm.}$$

Este es el valor que hay que meter en el programa y te calcula el número de estaciones, la medida de las diagonales, y el número de estaciones de la diagonal.

	AC	AG	AE		ESP PAT		altura alfa 1
LONG	406,4	406,4	574,736392		50,8		0,246285142
EST	8	8	12				

Ilustración 3.43 Medidas de la mesa y espacio patrón

En amarillo veremos siempre los datos que hemos medido en el programa.

Con los cálculos realizados anteriormente, para el espacio patrón de 50,8 mm. y para un $\alpha = 1$, el resultado de la altura es 0,246285 (el valor C)

Tras distintas pruebas, para que se vean todas las posibles opciones de cálculos, hemos puesto los siguientes valores teóricos angulares para cada estación. Se verán en los recuadros amarillos en medida.

Repetimos la forma teórica de calcular la altura, que es la siguiente:

$$[(\alpha * C * A) - B * C] * (1 / A) * C = (\alpha * A - B) * (1 / A) * C.$$

A = número total estaciones/ número de la estación.

B = suma de todos los valores angulares de una línea.

C = 0,246285 micras / arcoseg (calculado anteriormente).

α = sumatorio de los α en dicha estación.

Empezamos con la diagonal AE:

AE 1	estacion	medidas	sumatorio
	1	0,3	0,3
	2	-1,2	-0,9
	3	2,1	1,2
	4	3,1	4,3
	5	2,4	6,7
	6	5	11,7
	7	-2	9,7
	8	1,8	11,5
	9	2,8	14,3
	10	0,6	14,9
	11	1,8	16,7
	12	2,6	19,3

Ilustración 3.44 Valores diagonal AE

Como vemos el último sumatorio es a lo que hemos llamado B (valor 19,3).

Y α son los sumatorios angulares.

Vamos a explicar detalladamente la primera estación, ya que las demás se calculan de la misma forma.

G10 : =E10*(/\$H\$4/C10)										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2		A	B	C		AC	AG	AE		ESP PAT
3		H		D	LONG	406,4	406,4	574,736392		50,8
4		G	F	E	EST	8	8	12		
5										
6							medidas en arco seg: 1 arc seg --> 0,246285 micras			
7										
8		AE 1	estacion	medidas	sumatorio					
9										
10			1	0,3	0,3		3,6	-15,7	-1,30833333	-0,32222306
11			2	-1,2	-0,9		-5,4	-24,7	-4,11666667	-1,01387383
12			3	2,1	1,2		4,8	-14,5	-3,625	-0,89278364
13			4	3,1	4,3		12,9	-6,4	-2,13333333	-0,5254083
14			5	2,4	6,7		16,08	-3,22	-1,34166667	-0,33043257
15			6	5	11,7		23,4	4,1	2,05	0,50488454
16			7	-2	9,7		16,6285714	-2,67142857	-1,55833333	-0,38379435
17			8	1,8	11,5		17,25	-2,05	-1,36666667	-0,33658969
18			9	2,8	14,3		19,0666667	-0,23333333	-0,175	-0,0430999
19			10	0,6	14,9		17,88	-1,42	-1,18333333	-0,29143742
20			11	1,8	16,7		18,2181818	-1,08181818	-0,99166667	-0,24423277
21			12	2,6	19,3		19,3	0	0	0

Ilustración 3.45a Cálculos diagonal AE

Como vemos en el recuadro de la fórmula, lo que hace es: $\alpha * A$.

Ésta es la fórmula del siguiente recuadro:

=G10-\$E\$21

Lo que hace es al resultado anterior, restarle B.

El siguiente recuadro es:

=H10*C10/\$H\$4

Lo que hace es multiplicar el resultado anterior por $(1 / A)$.

Y en el último recuadro:

=I10*\$L\$3

Multiplica todo por C, obteniendo ya una altura.

Y así obtenemos las 12 alturas de las 12 estaciones, pero necesitamos 13 puntos.

El sistema láser lo que hace es ajustar los puntos extremos a valor cero. Ya tenemos el último punto igual a 0, así que añadimos un punto al principio de la línea de valor también 0., como explicamos anteriormente.

estacion	medidas	sumatorio						puntos=est+1	n
								0	0
1	0,3	0,3	3,6	-15,7	-1,30833333	-0,32222306		-0,3222	
2	-1,2	-0,9	-5,4	-24,7	-4,11666667	-1,01387383		-1,0139	
3	2,1	1,2	4,8	-14,5	-3,625	-0,89278364		-0,8928	
4	3,1	4,3	12,9	-6,4	-2,13333333	-0,5254083		-0,5254	
5	2,4	6,7	16,08	-3,22	-1,34166667	-0,33043257		-0,3304	
6	5	11,7	23,4	4,1	2,05	0,50488454		0,5049	
7	-2	9,7	16,6285714	-2,67142857	-1,55833333	-0,38379435		-0,3838	
8	1,8	11,5	17,25	-2,05	-1,36666667	-0,33658969		-0,3366	
9	2,8	14,3	19,0666667	-0,23333333	-0,175	-0,0430999		-0,0431	
10	0,6	14,9	17,88	-1,42	-1,18333333	-0,29143742		-0,2914	
11	1,8	16,7	18,2181818	-1,08181818	-0,99166667	-0,24423277		-0,2442	
12	2,6	19,3	19,3	0	0	0		0	

Ilustración 3.45b Cálculos diagonal AE

A continuación, para hacer el análisis de Moody no puede haber negativos, así que se suma el máximo valor negativo (si lo hubiera) a todos los puntos. Y nos queda así:

ntos=est+1	min neg	moody
0		1,0139
-0,3222	1,0139	0,6917
-1,0139		0,0000
-0,8928		0,1211
-0,5254		0,4885
-0,3304		0,6835
0,5049		1,5188
-0,3838		0,6301
-0,3366		0,6773
-0,0431		0,9708
-0,2914		0,7225
-0,2442		0,7697
0		1,0139

Ilustración 3.46 Suma del máximo valor negativo

Ya tenemos las alturas de la primera diagonal. El recuadro en azul es el punto central, que lo utilizaremos más tarde. Aunque se observe que es el valor más alto, es pura casualidad.

Ahora nos pasamos a la otra diagonal y realizamos los mismos cálculos:

CG 2										0		1,4695
	1	0,6	0,6	7,2	-6,8	-0,56666667	-0,13956158			-0,1396	1,4695	1,3299
	2	1	1,6	9,6	-4,4	-0,73333333	-0,1806091			-0,1806		1,2889
	3	-3	-1,4	5,6	-19,6	-4,9	-1,2067972			-1,2068		0,2627
	4	0,1	-1,3	-3,9	-17,9	-5,96666667	-1,46950135			-1,4695		0,0000
	5	2,7	1,4	3,36	-10,64	-4,43333333	-1,09186413			-1,0919		0,3776
	6	3,6	5	10	-4	-2	-0,49257028			-0,4926		0,9769
	7	2,1	7,1	12,1714286	-1,82857143	-1,06666667	-0,26270415			-0,2627		1,2068
	8	1,9	9	13,5	-0,5	-0,33333333	-0,08209505			-0,0821		1,3874
	9	1,1	10,1	13,4666667	-0,53333333	-0,4	-0,09851406			-0,0985		1,3710
	10	-0,1	10	12	-2	-1,66666667	-0,41047524			-0,4105		1,0590
	11	2,3	12,3	13,4181818	-0,58181818	-0,53333333	-0,13135208			-0,1314		1,3381
	12	1,7	14	14	0	0	0			0		1,4695

Ilustración 3.47 cálculos diagonal CG

Lo siguiente que se hace es hacer coincidir el punto medio (recuadro azul) de las dos diagonales. Para ello se iguala el valor menor con el mayor, y esa diferencia se suma a todos los puntos de la diagonal con el valor menor.

Entonces nos queda lo siguiente:

1,0139	1		1,0139
0,6917	2	suma a esta diagonal	0,6917
0,0000	3		0,0000
0,1211	4	0	0,1211
0,4885	5		0,4885
0,6835	6		0,6835
1,5188	7		1,5188
0,6301	8		0,6301
0,6773	9		0,6773
0,9708	10		0,9708
0,7225	11		0,7225
0,7697	12		0,7697
1,0139	13		1,0139
1,4695	1		2,0114
1,3299	2		1,8718
1,2889	3	suma a esta diagonal	1,8308
0,2627	4		0,8046
0,0000	5	0,5419	0,5419
0,3776	6		0,9195
0,9769	7		1,5188
1,2068	8		1,7487
1,3874	9		1,9293
1,3710	10		1,9129
1,0590	11		1,6009
1,3381	12		1,8800
1,4695	13		2,0114

Ilustración 3.48 Igualar el punto medio de ambas diagonales

Ahora ya tenemos los puntos medios de las diagonales con el mismo valor.

Lo siguiente es realizar los mismos cálculos para obtener las alturas de los 4 lados exteriores. Empezamos con la línea CA:

CA 3										0,1247	
									0	2,0114	2,0114
	1	1,2	1,2	9,6	6,1	0,7625	0,187792		0,1878	1,8867	2,0745
	2	1,8	3	12	8,5	2,125	0,523356		0,5234	1,7620	2,2854
	3	0,9	3,9	10,4	6,9	2,5875	0,637263		0,6373	1,6373	2,2746
	4	-2,1	1,8	3,6	0,1	0,05	0,012314		0,0123	1,5127	1,5250
	5	-0,3	1,5	2,4	-1,1	-0,6875	-0,16932		-0,1693	1,3880	1,2187
	6	-0,8	0,7	0,9333333	-2,56667	-1,925	-0,4741		-0,4741	1,2633	0,7892
	7	0,1	0,8	0,914286	-2,58571	-2,2625	-0,55722		-0,5572	1,1386	0,5814
	8	2,7	3,5	3,5	0	0	0		0	1,0139	1,0139

Ilustración 3.49 Cálculos línea CA

Lo único no explicado son las dos últimas columnas: después de añadir el o en el primer punto, hay que conseguir que los extremos de cada línea coincidan con los extremos de las diagonales calculados anteriormente. En la diagonal CG, el valor del punto extremo C es 2,0114 (es el mismo que G ya que igualamos los valores inicial y final de cada diagonal). Y en la diagonal AE, el valor de A es 1,0139. Para igualar los valores extremos, desarrollamos una recta sabiendo los valores extremos y el número de estaciones. Necesitamos saber el valor que hay que añadir a cada punto para formar la recta. Será la división entre la diferencia de extremos y el número de estaciones.

La fórmula es la siguiente:

$$=(\$R\$25-\$R\$9)/\$F\$4$$

Eso es: $(2,0114 - 1,0139) / 8 = 0,1247$

Y a esa recta hay que sumar punto a punto la línea CA.

	0,1247	
0	2,0114	2,0114
0,1878	1,8867	2,0745
0,5234	1,7620	2,2854
0,6373	1,6373	2,2746
0,0123	1,5127	1,5250
-0,1693	1,3880	1,2187
-0,4741	1,2633	0,7892
-0,5572	1,1386	0,5814
0	1,0139	1,0139

Ilustración 3.50 Suma de la recta para igualar extremos

La primera columna son los 9 puntos de la línea, la segunda es la recta desarrollada, y la tercera es la suma de ambas líneas.

Y así con las otras tres líneas, teniendo en cuenta que el orden de la recta que se suma puede ser el contrario.

AE			
1,1960			
0,8738			
0,1821			
0,3032			
0,6706			
0,8656			
1,7009	CA	EG	
0,8122	2,1935	1,1960	
0,8594	2,2567	0,7727	
1,1529	2,4676	0,0539	
0,9046	2,4568	0,0000	
0,9518	1,7071	0,2171	
1,1960	1,4008	0,7543	
	0,9713	1,1930	
	0,7635	1,8288	
CG	1,1960	2,1935	
2,1935			
2,0539			
2,0129	CE	AG	
0,9867	2,1935	1,1960	
0,7240	2,0597	1,2684	
1,1016	2,0489	0,7743	
1,7009	2,2597	0,1078	
1,9308	1,6579	0,2540	
2,1114	1,9919	0,5973	
2,0950	1,0452	1,4578	
1,7830	0,4679	2,1705	
2,0621	1,1960	2,1935	
2,1935			

Ilustración 3.53 Alturas de las líneas estudiadas

Ahora tenemos que hacer las últimas dos líneas, que forman una cruz. En azul vemos los puntos intermedios de las líneas del rectángulo, que serán el inicio y final de las líneas en cruz.

De la misma forma que las demás líneas (diagonales y bordes), calculamos las alturas de ambas:

DH 7	1	-1,3	-1,3	-10,4	-4,1	-0,5125	-0,12622		
	2	0,1	-1,2	-4,8	1,5	0,375	0,092357		
	3	-0,9	-2,1	-5,6	0,7	0,2625	0,06465		
	4	-1,9	-4	-8	-1,7	-0,85	-0,20934		
	5	1,3	-2,7	-4,32	1,98	1,2375	0,304778		
	6	-0,7	-3,4	-4,53333	1,766667	1,325	0,326328		
	7	-1	-4,4	-5,02857	1,271429	1,1125	0,273992		
	8	-1,9	-6,3	-6,3	0	0	0		
BF 8	1	0,1	0,1	0,8	0,9	0,1125	0,027707		
	2	2,7	2,8	11,2	11,3	2,825	0,695756		
	3	1,4	4,2	11,2	11,3	4,2375	1,043633		
	4	-0,5	3,7	7,4	7,5	3,75	0,923569		
	5	-1,4	2,3	3,68	3,78	2,3625	0,581849		
	6	-2,8	-0,5	-0,66667	-0,56667	-0,425	-0,10467		
	7	1,1	0,6	0,685714	0,785714	0,6875	0,169321		
	8	-0,7	-0,1	-0,1	0	0	0		

Ilustración 3.54 Cálculos líneas en cruz DH y BF

Y se hace lo mismo, se desarrolla una recta con los valores inicial y final, y la diferencia entre ellos se divide entre el número de estaciones (resultado en amarillo en las siguientes tablas) para sacar todos los valores de la recta. Y se suma los valores de dicha recta con los valores de las líneas, quedando:

diferencia entre pto medio CE y AG			
	0,1755		
0	1,6579	1,6579	1
-0,1262	1,4824	1,3562	2
0,0924	1,3069	1,3993	3
0,0646	1,1314	1,1960	4
-0,2093	0,9559	0,7466	5
0,3048	0,7805	1,0853	6
0,3263	0,6050	0,9313	7
0,274	0,4295	0,7035	8
0	0,2540	0,2540	9
diferencia entre pto medio CA y EG			
	0,1863		
0	1,7071	1,7071	1
0,0277	1,5208	1,5485	2
0,6958	1,3346	2,0304	3
1,0436	1,1483	2,1919	4
0,9236	0,9621	1,8857	5
0,5818	0,7758	1,3576	6
-0,1047	0,5896	0,4849	7
0,1693	0,4033	0,5726	8
0	0,2171	0,2171	9

Ilustración 3.55 Suma de la recta para igualar extremos

Ahora hay que hacer lo mismo, sumar el mínimo valor negativo a todos los puntos de todas las líneas. En este caso no hay valor negativo por lo que no hay que sumar nada.

Así que nos quedan las alturas finales de cada punto y de cada línea:

AE		CA		EG		DH	
1,1960	1	2,1935	1	1,1960	1	1,6579	1
0,8738	2	2,2567	2	0,7727	2	1,3562	2
0,1821	3	2,4676	3	0,0539	3	1,3993	3
0,3032	4	2,4568	4	0,0000	4	1,1960	4
0,6706	5	1,7071	5	0,2171	5	0,7466	5
0,8656	6	1,4008	6	0,7543	6	1,0853	6
1,7009	7	0,9713	7	1,1930	7	0,9313	7
0,8122	8	0,7635	8	1,8288	8	0,7035	8
0,8594	9	1,1960	9	2,1935	9	0,2540	9
1,1529	10						
0,9046	11						
0,9518	12						
1,1960	13						
CG		CE		AG		BF	
2,1935	1	2,1935	1	1,1960	1	1,7071	1
2,0539	2	2,0597	2	1,2684	2	1,5485	2
2,0129	3	2,0489	3	0,7743	3	2,0304	3
0,9867	4	2,2597	4	0,1078	4	2,1919	4
0,7240	5	1,6579	5	0,2540	5	1,8857	5
1,1016	6	1,9919	6	0,5973	6	1,3576	6
1,7009	7	1,0452	7	1,4578	7	0,4849	7
1,9308	8	0,4679	8	2,1705	8	0,5726	8
2,1114	9	1,1960	9	2,1935	9	0,2171	9
2,0950	10						
1,7830	11						
2,0621	12						
2,1935	13						

Ilustración 3.56 Alturas definitivas de todas las líneas

Con estos resultados el programa te da varios datos:

La altura máxima y el valor más/menos, que es la altura máxima entre 2:

elevacion maxima	mas/menos
2,4676	1,2338

Ilustración 3.57 Altura máxima y valor más/menos

Los valores de cierre, que son las diferencias de altura entre los puntos medios de las líneas en cruz (7 y 8) y el punto medio de las diagonales (que es el mismo).

DH	-0,9543
BF	0,1848

Ilustración 3.58 Valores de cierre

Y así nos quedaría el mapa de resultados:

1,1960	0,7635	0,9713	1,4008	1,7071	2,4568	2,4676	2,2567	2,1935
1,2684	0,8738			1,5485			2,0539	2,0597
0,7743		0,1821	0,3032		2,0304	0,9867	2,0129	2,0489
0,1078			0,6706	0,8656	2,1919	1,1016	0,7240	2,2597
0,2540	0,7035	0,9313	1,0853	1,7009	1,1960	1,3993	1,3562	1,6579
0,5973			2,1114	1,9308	1,3576	0,8122		1,9919
1,4578		2,0950		0,4849		0,8594	1,1529	1,0452
2,1705	2,0621	1,7830			0,5726		0,9046	0,9518
2,1935	1,8288	1,1930	0,7543	0,2171	0,0000	0,0539	0,7727	1,1960

Ilustración 3.59 Mapa de resultados

A continuación, vemos lo mismo pero hecho por el programa metiendo los valores angulares teóricos (sombreados en amarillo):

Vemos las medidas de las líneas y del espacio patrón.

Unidades de medida

Inglesas (arcoseg. μpulg)

Métricas (arcoseg. μm)

Longitud ejes

AC: mm

AG: mm

Diag.: mm

Óptica

Espacio patr.: mm

Factor cal.:

Prueba del botón Registrar

Potencia haz ND

Bip en registro

Ambiente Diagrama láser

Anterior Recoger datos Info máquina Menú pral. Info

Placa patrón

Línea N° 1

A->E

E->A

N° estaciones:

Ilustración 3.60 Pantalla inicio control de planitud

En la siguiente imagen (3.35) se ven los valores de los medidores de temperatura, humedad y presión.

Configuración de tarjeta

Direcciones

10887A: Nivel inte

10886A: 288

Unidades ambiente

(*F. pulg. Hg)

(*C. mm Hg)

SI (*C. kPa)

Compensación del ambiente

Auto

Temperatura aire: 20.00 °C

Presión aire: 760.73 mm Hg

Humedad relativa: 50 %

Laser Wavelength: 632,9913540

Comp. longitud onda luz: 0,9997284

Compensación del material

Auto

Average Material Temp.: 20.00 °C

MT1 Sensor: N/C °C

MT2 Sensor: N/C °C

MT3 Sensor: N/C °C

Coef. exp.: 11,700 PPM/°C

Linear Scaling Factor: 1.000

Número de compensación total: 0,9997284

Aceptar

Menú pral.

Info

Ilustración 3.61 Pantalla ambiente del control de planitud

Aquí se ve lo primero que hemos explicado, el calculo de la altura a partir de la medida angular. Esto es en la diagonal AE, antes de hacer el analisis de Moody.

Elevación

Ajuste a 0 pto final

Analizado Moody

Elevation Spec. 1.0000 µm

Unidades pos.

mm

pulg.

Nº línea	Nº punto	Posición: mm	Elevación: micras
1	1	.000	.000
1	2	50.80	-.3222
1	3	101.60	-1.0139 *
1	4	152.40	-.8928
1	5	203.20	-.5254
1	6	254.00	-.3304
1	7	304.80	.5049
1	8	355.60	-.3838
1	9	406.40	-.3366
1	10	457.20	-.0431
1	11	508.00	-.2914
1	12	558.80	-.2442
1	13	609.60	.000

Custom

* = fuera espec.

Anterior

Imprimir datos

Impr. en archivo

Menú pral.

Info

Ilustración 3.62 Resultados primera línea medida del control

Y con el programa se pueden sacar las alturas finales donde se ven los números con más resolución:

Nº línea	Nº punto	Posición	Elevación
1	1	0	1,196
1	2	50,8	0,8738
1	3	101,6	0,1821
1	4	152,4	0,3032
1	5	203,2	0,6706
1	6	254	0,8656
1	7	304,8	1,7009
1	8	355,59999	0,8122
1	9	406,39999	0,8594
1	10	457,19999	1,1529
1	11	507,99999	0,9046
1	12	558,79999	0,9518
1	13	609,59999	1,196
2	1	0	2,1935
2	2	50,8	2,0539
2	3	101,6	2,0129
2	4	152,4	0,9867
2	5	203,2	0,724
2	6	254	1,1016
2	7	304,8	1,7009
2	8	355,59999	1,9308
2	9	406,39999	2,1114
2	10	457,19999	2,095
2	11	507,99999	1,783
2	12	558,79999	2,0621
2	13	609,59999	2,1935
3	1	0	2,1935
3	2	50,8	2,2566
3	3	101,6	2,4675
3	4	152,4	2,4567
3	5	203,2	1,7071
3	6	254	1,4007
3	7	304,8	0,9713
3	8	355,59999	0,7635
3	9	406,39999	1,196

4	1	0	2,1935
4	2	50,8	2,0596
4	3	101,6	2,0488
4	4	152,4	2,2597
4	5	203,2	1,6578
4	6	254	1,9918
4	7	304,8	1,0452
4	8	355,59999	0,4679
4	9	406,39999	1,196
5	1	0	1,196
5	2	50,8	0,7727
5	3	101,6	0,0539
5	4	152,4	0
5	5	203,2	0,217
5	6	254	0,7542
5	7	304,8	1,1929
5	8	355,59999	1,8287
5	9	406,39999	2,1935
6	1	0	1,196
6	2	50,8	1,2684
6	3	101,6	0,7743
6	4	152,4	0,1077
6	5	203,2	0,254
6	6	254	0,5972
6	7	304,8	1,4577
6	8	355,59999	2,1704
6	9	406,39999	2,1935
7	1	0	1,6578
7	2	50,8	1,3561
7	3	101,6	1,3992
7	4	152,4	1,196
7	5	203,2	0,7466
7	6	254	1,0852
7	7	304,8	0,9313
7	8	355,59999	0,7035
7	9	406,39999	0,254
8	1	0	1,7071
8	2	50,8	1,5485

8	3	101,6	2,0303
8	4	152,4	2,1919
8	5	203,2	1,8856
8	6	254	1,3576
8	7	304,8	0,4849
8	8	355,59999	0,5726
8	9	406,39999	0,217

Tabla 3.7

4- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

RESULTADOS

En el presente trabajo se han llevado a cabo distintos controles de planitud con láser interferométrico con el fin de estudiar la medida del error de planitud. A continuación exponemos los resultados de cada uno de ellos:

- I. En el control de planitud cero con valores teóricos (introducidos a mano en el sistema) los resultados son correctos ya que da altura máxima 0 micras. Pero al hacer el control práctico, sin mover los espejos y marcando todos los puntos de la retícula, tenemos como alturas máximas 0,1782 y 0,1274 micras, y como valores de cierre 0,0335 y 0,1579 micras, y -0,0847 y -0,0591 micras, respectivamente. La variación porcentual de la altura máxima llega al 28,5 % entre ambos valores. Pero si lo comparamos con la altura máxima de la mesa sin clase en la que realizamos el control, la variación es del 0,1 % ya que dicha altura máxima es de unas 200 micras. En cambio, según vamos reduciendo esa altura máxima, esa variación aumenta considerablemente hasta el punto de llegar a ser del 4% en la otra mesa de clase I que medimos, ya que la altura máxima es cercana a 5 micras.
- II. Se realizaron dos mismos controles de planitud sobre la misma mesa, con el mismo láser interferométrico, la misma persona y bajo las mismas condiciones, pero en momentos de tiempos diferentes para estudiar la repetibilidad del láser. Las alturas máximas en ambos ensayos son de 217 y 224 micras y los valores de cierre son 102 y 119 micras, y -60 y 116 micras, respectivamente. La variación del error de planitud es del 3,2 %, pero tenemos que tener en cuenta que la altura máxima tiene un valor de más de 200 micras en ambos controles, y ese 3,2 % es debido a unas 7 micras de variación.
- III. Se realizaron dos controles de planitud en la misma mesa, con el mismo láser y bajo las mismas condiciones, pero llevados a cabo por distintos operarios para estudiar la reproducibilidad en la medida del error de

planitud. Esto es importante ya que cada operario coloca la estación donde cree conveniente. Las alturas máximas fueron 4,7 y 5,3 micras y los valores de cierre fueron 0,8 y -1,8 micras, y 1,1 y -0,2 micras, respectivamente. La variación del error de planitud es del 11,32 %. En micras, 0,6 de variación en valores de altura máxima entorno a 5.

IV. Hemos desarrollado y explicado un programa en excel que, teniendo como datos los ángulos de las estaciones, nos aclara los cálculos que hace el software del sistema láser y nos da los mismos resultados, es decir, las alturas, alturas máximas y valores de cierre. Esto lo hemos hecho con el objetivo de entender el proceso que realiza el software del láser para el cálculo del error de planitud. Realizamos el ejemplo teórico (valores medidos manualmente en el sistema) y vemos que todos los resultados son iguales, siendo éstos los siguientes: altura máxima 2,4675 micras, más/menos 1, 2337 micras y valores de cierre -0,9544 y 0,1847 micras.

Aquí tenemos todos los resultados en micras resumidos en una tabla:

ERROR 0	control 1	control 2	variación
altura máx.	0,1782	0,1274	28,50%
valores de cierre	0,0335 0,1579	-0,0847 -0,0591	
REPETIBILIDAD	control 1	control 2	variación
altura máx.	217	224	3,20%
valores de cierre	102 119	-60 116	
REPRODUCIBILIDAD	control 1	control 2	variación
altura máx.	4,7	5,3	11,32%
valores de cierre	0,8 1,8	1,1 -0,2	
EXCEL	control	excel	
altura máx.	2,4675	2,4676	
valores de cierre	-0,9544 0,1847	-0,9543 0,1848	

Tabla 4.1 Resultados

CONCLUSIONES

Una vez explicado como hemos llevado a cabo todos los controles y concentrando los resultados más importantes en el apartado anterior, podemos valorar si hemos cumplido los objetivos y redactar nuestras conclusiones:

- I. Hemos aprendido como hay que trabajar en un laboratorio de metrología y con equipo de precisión, como es el láser interferométrico.
- II. Nos damos cuenta que el software del láser no tiene el error de cero porque en el control con valores teóricos el resultado final de altura máxima es cero. Pero esto es distinto cuando lo realizamos con los espejos y que, aún sin moverlos, nos da un valor distinto a cero. Este error es prácticamente despreciable (0,1 % en nuestra mesa) para mesas sin clase y, según disminuye la altura máxima o lo que es lo mismo, según aumenta la clase de una mesa, vemos que dicho error aumenta porcentualmente llegando a ser del 4% en la mesa estudiada de clase I. Todas estas conclusiones son fiables ya que la desviación típica calculada nos indica que los datos no están muy dispersos, por lo que son fiables.
- III. En cuanto a la repetibilidad, vemos que realizando el mismo control, bajo las mismas condiciones y únicamente en momentos de tiempo diferentes, habrá una pequeña variación del error de planitud, alrededor del 3%, capaz de condicionar la clase de una mesa. Al estudiar la clase de la mesa según la norma UNE 82309-1:1999 y sin tener en cuenta la incertidumbre de medida llegamos a la conclusión de que esta mesa no tiene clase.
- IV. En cuanto a la reproducibilidad, realizando el mismo control por dos operarios distintos y bajo las mismas condiciones nos damos cuenta que este único cambio afecta considerablemente al error de planitud, alrededor del 11%. Aunque en cuanto a porcentaje sea alto, en micras es bastante bajo y esto es debido a que, como dijimos antes, las variaciones en mesas de clase más alta son más notables. Según la norma UNE

82309-1:1999 y sin tener en cuenta la incertidumbre de medida, esta mesa tendría una clase I.

- V. Comparando ambos estudios, llegamos a la conclusión de que el porcentaje de variación más significativa es el de reproducibilidad. Esto es debido a que cada operario tiene su forma de colocar los espejos, se fija en un punto distinto, desde un ángulo de vista distinto, etc. y por ello varían más los resultados.
- VI. Tras varios estudios, hemos conseguido el objetivo de saber como funciona el software del láser y no quedarnos solo en los resultados finales. Llegamos a la conclusión de que con este programa en excel además de conocer todos los cálculos que hace el sistema láser, nos da un alto margen para probar distintas medidas de planitud, porque aunque se puedan meter valores teóricos en el sistema láser, no sabríamos decir porque dan unos y otros resultados. De esta forma, con el excel, veríamos en qué momento cambian los resultados, pudiendo pobrar multitud de opciones en el control de planitud.

5- ESTUDIO ECONÓMICO

ESTUDIO ECONÓMICO

Para realizar el estudio económico de este Trabajo Fin de Grado se calcularán los costes totales, divididos en:

- Costes directos: gastos asociados directamente a la realización del proyecto.
 - Coste de personal: salario del personal.
 - Coste de material amortizable: se incluyen todos los materiales amortizables utilizados.
 - Coste de material no amortizable: costes asociados a recursos consumibles.
 - Costes indirectos: gastos no relacionados directamente con el proyecto.
- Costes de personal

Para realizar el proyecto se han requerido de dos personas: un ingeniero y un técnico ayudante. En la siguiente tabla aparecen los trabajadores, sueldo mensual, sueldo por hora, horas trabajadas y gasto total. Antes calculamos las horas de trabajo en un mes para calcular el sueldo por horas:

21 días laborales x 8 h/d = 168 h/mes

trabajador	€/mes	€/h	horas	€
ingeniero	2500	14,88	300	4464,29
técnico	1000	5,95	60	357,14

Tabla 5.1

Gasto total de personal: 4821,43 €

- Coste de material amortizable

Se ha utilizado un ordenador portátil para el desarrollo del proyecto, con sistema operativo Windows 7, y con el paquete Microsoft Office 2007. El sistema de medición era el láser interferométrico de medición modelo HP 5519A, que hay que calibrarlo cada cinco años.

En la siguiente tabla mostramos los costes de los materiales, años de amortización, los meses de utilización y el gasto total. Este gasto total lo calcularemos de la siguiente forma:

(coste materiales / años amortización) x (meses de uso / 12)

concepto	coste	amortización	tiempo de uso	€
portatil	500	3	12	166,67
windows 7	150	10	12	15,00
office 2007	120	10	12	12,00
laser	70000	30	2	388,89
calibración	1200	5	2	40,00

Tabla 5.2

Coste total de material amortizable: 622,56 €

- Coste de material no amortizable

Los costes son debidos a los materiales necesarios para el desarrollo del estudio. Los vemos en la siguiente tabla:

conceptos	€
materiales de oficina	20
encuadernación	30
CD-rom	3

Tabla 5.3

Gasto total de material no amortizable: 53 €

- Coste indirecto

Aquí incluimos los gastos derivados del estudio, como son energía e internet. Lo vemos en la siguiente tabla:

conceptos	€
electricidad	120
internet	40
alquiler oficina	300

Tabla 5.4

Gasto total de costes indirectos: 460 €

- Coste total

costes	€	%
directo	5496,98	92,28
-personal	4821,43	80,94
-amortizable	622,56	10,45
-no amortizable	53	0,89
indirecto	460	7,72
Total	5956,98	

Tabla 5.5

Coste total del proyecto: 5956,98 €

En la siguiente figura se muestra la distribución de los costes:

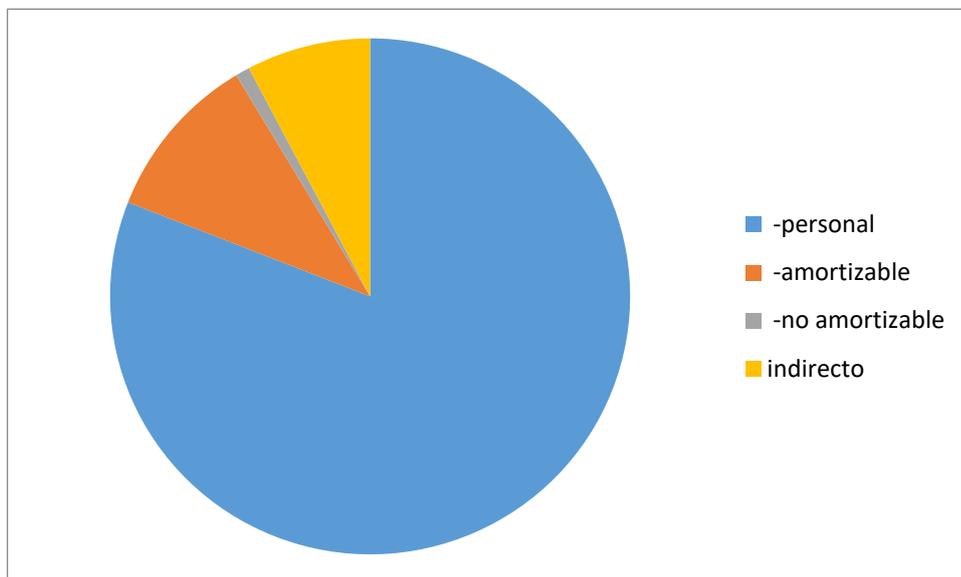


Ilustración 5.1 Distribución de los costes totales

6- LÍNEAS FUTURAS

LÍNEAS FUTURAS

Como líneas futuras de estudio, sería interesante estudiar las distintas formas de realizar los controles de planitud (con comparador, con nivel de burbuja, etc.) para ver cual de todas nos da mejores resultados teniendo en cuenta el tiempo y dinero empleado.

Como hemos dicho al definir la clase de las mesas, nos faltaba saber la incertidumbre de medida. Sería importante saber si error de cero está incluido en esa incertidumbre y de que otros errores depende, o si tiene relación con la repetibilidad.

Otra opción sería realizar un control de planitud con un medidor angular, que debe ser de buena calidad y capaz de medir ángulos muy pequeños, y con esos datos realizar todos los cálculos del excel. Realizando en la misma mesa un control de planitud con láser interferométrico, se podrían comparar ambos resultados y hacer diferentes estudios incluyendo lógicamente el económico.

A parte de comparar ambos controles, con el programa excel podemos estudiar a fondo la sensibilidad de distintos parámetros sobre el resultado del error de planitud.

7- BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] - www.cem.es (mayo 2016)
- [2] - Automatización mediante PC de los procesos de calibración de bloques patrón longitudinales según la norma ISO 3650 (UPC); de Madariaga Herrera; 2009.
- [3] - www.monografias.com, "introducción a la metrología", Prof. Jesús A. Cerda (mayo 2016)
- [4] - Tecnología Mecánica I (Universidad Politécnica de Madrid); J.M. Pérez. 1998
- [5] - Metrotecnica en la ingeniería mecánica (Universidad de Valladolid); A. Ventura, J.J. Sanabria. 2005
- [6] - Metrología dimensional (Universidad de Málaga); L. Sevilla Hurtado, M.J. Martín Sánchez. Segunda edición, 2005.
- [7] - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida (CEM).
- [8] - Técnicas y procedimientos de metrología y calibración (Universidad de Valladolid); U. Domínguez Garrido. Segunda edición, 1998.
- [9] - Curso de metrología dimensional (Universidad Politécnica de Madrid); J. Carro. 1978
- [10] - UNE 82309-1:1999
- [11] - Vocabulario Internacional de Metrología. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados. 3ª edición 2012, CEM.
- [12] - Manual de referencia de mediciones. Calibrador dinámico HP 5529^a.