

Al Sr. D. Cristino de Pando

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL

En los términos de un

DE LA

sideración y apreciación

INTENSIDAD DE LA FUERZA DE GRAVEDAD

de un

EN MADRID

POR

DON JOAQUÍN BARRAQUER Y ROVIRA,

CORONEL DE INGENIEROS, RETIRADO;

DE LA REAL ACADEMIA DE CIENCIAS;

GEODESTA QUE FUÉ DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO Y ESTADÍSTICO;

EX DELEGADO DE ESPAÑA

EN LA ASOCIACIÓN GEODÉSICA INTERNACIONAL.

PUBLÍCASE EN EL TOMO VIII DE LAS MEMORIAS DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO Y ESTADÍSTICO.



MADRID,

IMPRENTA DE LA DIRECCIÓN GENERAL DEL INSTITUTO
GEOGRÁFICO Y ESTADÍSTICO.

1888.



INTRODUCCIÓN.

Durante algunos años (1877-83), estuvo á mi cargo, en virtud de comisión oficial, el establecimiento en España de los trabajos relativos á la fuerza de gravedad por medio del Péndulo, que de por sí figuraban en el Plan de Geodesia superior encomendado al INSTITUTO GEOGRÁFICO. Nuevo todavía el asunto en nuestro país, tracé y llevé á efecto personalmente, atento á los progresos del día y según pude disponer de recursos materiales, las numerosas y concertadas operaciones en que se informa este escrito, y que constituyen la Medición absoluta de la fuerza de gravedad en Madrid.

Iniciado á mediados de siglo el periodo de actividad y adelantamiento en que se encuentra la Geodesia experimental, había de adquirir singular y creciente interés científico la llamada *cuestión del péndulo*. Y ocasión eficaz de tal cultura se descubre á las claras en la empresa á que diera vida el sabio Baeyer, y cuyos horizontes se dilataron más y más merced á la cooperación de los países civilizados. Ya en un principio, al definir su *Programa* la *Asociación Geodésica Internacional* (1864), declara el lugar que en primera línea, y como materia genuina y de imprescindible concurso en el estudio matemático del Globo, corresponde á las observaciones directas sobre la gravedad, y concede preferencia, para la medida de esta fuerza, al instrumento ilustrado con los nombres de Huygens, Bohnenberger, Bessel y Cellérier.

Respondiendo á este acuerdo, Plantamour, el primero, en Suiza (1864), y poco después otros astrónomos en Rusia, Alemania y Austria, emprenden trabajos con aparatos de péndulo de inversión, construídos por Repsold, de Hamburgo.

Formaban ya las nuevas *estaciones de Péndulo* un caudal considerable, en no escasa parte publicado, ofreciendo resultados que se estimaban satisfactorios, cuando comenzó á reconocerse lo ilusorio de tal concepto (1876), por cuanto se sustentaba en la hipótesis tácita, pero, á la verdad, gratuita, de que en los aparatos de Repsold quedaba satisfecho por completo el requisito de la inmovilidad del sostén del péndulo oscilante. El norte-americano Peirce, y luego Plantamour, siguiendo las indicaciones teóricas de Cellérier, someten este punto á experimentación, y evidencian la defectuosidad de la hipótesis, estudiando en sus respectivos aparatos las influencias que por los sincrónicos movimientos transmitidos al plano de suspensión se ocasionan en la longitud calculada del péndulo matemático, cuya entidad resulta ser enorme relativamente á la precisión asequible. Pero si con estos estudios se trazó una pauta de procedimiento para tener en cuenta el preterido fenómeno del *balance del sostén*, como el lograrlo en cada caso particular exigiera operaciones especiales, por todo extremo delicadas, de nuevo trata Cellérier la cuestión teórica y la resuelve con elegancia, proponiendo al objeto, entre algún otro arbitrio, la *eliminación diferencial*, en el resultado del cálculo, de los efectos del balance, por el empleo sucesivo y combinado, en un mismo sostén, de dos péndulos de igual longitud y de masas diferentes.

El moderno aparato lleva impresa con este perfeccionamiento la personalidad del modesto cuanto ilustre ginebrino, que, inspirándose en el fundamental criterio de la atenuación sistemática y progresiva, por las observaciones mismas, de los errores inherentes á los medios y procedimientos, supo reivindicar para el péndulo de inversión la primacía, que por haberse desatendido un origen necesario de incertidumbre, común á toda suerte de péndulos, fué tema de luminosa controversia.

El empleo de cuatro péndulos de inversión, así *apareados*, es la novedad esencial de procedimiento que presenta este trabajo.

Comprende dos *estaciones*: en el edificio ocupado por el INSTITUTO GEOGRÁFICO la una, y la otra en el REAL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO.

Hecha aquélla desde luego (1877) con el único péndulo que poseía entonces el INSTITUTO, le di el carácter de *preliminar* que realmente hoy le conviene

respecto de la segunda, llevada á término muy posteriormente (1882-83) con los cuatro péndulos, y en la que se resume casi por entero la importancia de mis experimentos (*). Por esta razón, al publicarlos ahora en totalidad y por extenso, he de poner en el primer lugar la estación del OBSERVATORIO, prescindiendo del orden cronológico, y á seguida la del INSTITUTO por vía de *Apéndice*.

En conformidad de este concepto, se describen por menor en el Capítulo primero los dos empleados aparatos de péndulo de inversión, de los modelos *grande* y *pequeño*, de Repsold, provistos cada uno del par de péndulos de igual longitud y pesos diferentes, que oscilan respectivamente en un segundo y tres cuartos de segundo, y se hace también oportuna reseña de algunos aparatos é instrumentos auxiliares; contiene el Capítulo II la traza general del trabajo, ajustada á los principios fundamentales del método de experimentación; trátanse en los III y IV las diversas operaciones concertadas, con detalle de procedimientos, expresión íntegra de los datos originales de las observaciones, y de los resultados inmediatos; el Capítulo V comprende la *reducción* de las observaciones al caso de haberlas realizado en las supuestas condiciones teóricas; y constan, por último, en el capítulo VI los cálculos conducentes para valorar en definitiva el resultado total. Por lo que concierne exclusivamente á la estación del INSTITUTO (*Apéndice*), se sigue el mismo orden expositivo.

Á determinar la longitud absoluta del péndulo matemático concurren varios datos numéricos que, por excepción, no son producto de mis personales observaciones; tales son: los procedentes de la *Oficina Internacional de Pesas y Medidas*, de París, relativos á las *ecuaciones* de las reglas métricas de los aparatos de péndulo, y los suministrados por el OBSERVATORIO ASTRONÓMICO sobre la

(*) Los escritos á ellos referentes, y que oportunamente he anticipado, son:

Estudios experimentales en que se funda la ecuación del Metro de platino, definido por trazos, de la Comisión permanente de Pesas y Medidas. — Madrid, 1881.

Noticia de los primeros experimentos hechos en España con el péndulo de inversión, que determinan un valor para la intensidad de la fuerza de gravedad en Madrid. Presentada á la Real Academia de Ciencias. (Publicada en el tomo XXI de la *Revista de los Progresos de las Ciencias.*) — Madrid, 1882.

Rapport sur l'intensité de la pesanteur, inserto en *Comptes-rendus des séances de la Commission permanente de l'Association Géodésique Internationale pour la mesure des degrés en Europe, réunie à la Haye du 11 au 15 Septembre*, 1882. — Berlín, 1883.

Rapport sur la mesure de la pesanteur, inserto en *Comptes-rendus des séances de la septième Conférence Géodésique Internationale pour la mesure des degrés en Europe, réunie à Rome du 15 au 24 Octobre*, 1883. — Berlín, 1884.

marcha absoluta del reloj magistral del *Establecimiento*. Los documentos que justifican la procedencia de unos y otros datos están transcritos puntualmente en los lugares correspondientes del texto.

Si, alejado como me encuentro, desde fines del año de 1883, de contribuir á la misión científica, oficialmente proseguida por el INSTITUTO GEOGRÁFICO, doy término, presentando las *Estaciones de Péndulo en Madrid*, al honroso encargo que recibiera, he de lisonjearme de que con ellas se posee un primer fundamento experimental para desarrollar en España los trabajos sistemáticos relativos á la medida de la fuerza de gravedad.

LONGITUD DEL PÉNDULO MATEMÁTICO DE SEGUNDOS

EN EL

OBSERVATORIO ASTRONÓMICO.

CAPÍTULO PRIMERO.

DESCRIPCIÓN DE APARATOS É INSTRUMENTOS.

GRAN APARATO DE PÉNDULO DE INVERSIÓN.

§ 1. El gran aparato de péndulo de inversión, representado por sus proyecciones en las figuras 1 y 2, consta del *péndulo PP*, en primer lugar, como instrumento de medida, de forma simétrica y ejes recíprocos muy aproximadamente, según las reglas dictadas por Bessel, de la *regla métrica RR* y del *comparador CC*; estas partes principales están montadas en el *trípode TT'T''*, al que van sólidamente unidos el *plano de suspensión* del péndulo, no visible en el dibujo, y el *arco graduado A*. Destinado el aparato á la medición absoluta de la fuerza de gravedad, se halla dispuesto para observar, así la longitud del péndulo por comparación con la regla, como la duración de las oscilaciones; la situación del centro de gravedad del péndulo respecto de los ejes, se determina mediante un sencillo *aparato anexo* (*fig.^s 10, 11, 12*).

Un segundo péndulo de inversión, agregado últimamente como auxiliar ó *complementario*, y que denominaré *ligero*, en contraposición del primitivo ó *pesado*, forma parte integrante del *aparato completo*, bajo el concepto de que, combinadas las observaciones hechas por separado con uno y otro péndulo, se deduce un resultado total, exento de los errores, de índole constante, originados de la flexibilidad del sostén que sucesivamente sustenta á los péndulos oscilantes.

Ambos péndulos tienen la longitud de un metro, con muy cortas diferencias, y, por lo tanto, efectúan una oscilación cabal en un segundo aproximadamente.

§ 2. El *péndulo pesado* (*fig. 3*), está compuesto de la varilla, los discos y los cuchillos de suspensión.

La varilla es un cilindro hueco ó tubo de latón *vv*, de sección circular de 43^{mm},8 de diámetro al exterior, y de 2^{mm},0 de espesor, abierto y reforzado en los extremos donde están unidos los remates *r*, cilíndricos y terminados en punta cónica de acero; la longitud total entre estas puntas es de 1^m,270. Existen practicadas en la varilla las grandes aberturas *aa*, á propósito para la colocación de los cuchillos y la suspensión del péndulo, y además las pequeñas ó tala-dros *a'* para observar los filos de los cuchillos; de suerte que, pudiendo circular el aire á través de todas estas aberturas, resultan condiciones favorables al equili-brio de las temperaturas de la masa metálica del péndulo y del ambiente, y es fácil asegurarse en cada momento de la ausencia de cuerpos extraños en el interior de la varilla.

De los dos discos, cilíndricos y también de latón, el uno, *M*, es macizo, y el otro, *H*, hueco; tienen 122^{mm},0 de diámetro y 33^{mm},0 de altura. Abrazando á la varilla, están unidos á ella entre los resaltos en anillo *b* y las piezas á tuer-ca *d*, como puede verse con detalle en la figura 13. La distancia entre los cen-tros de los discos es 1^m,184.

Dos juegos de cuchillos de suspensión, de ágata, y de acero, acompañan al aparato, estando preparado el péndulo pesado para el sucesivo empleo de am-bos. Los dos cuchillos de cada juego son iguales en materia, forma y dimen-siones, y estas últimas discrepan muy poco de uno á otro juego. En las figu-ras 15 y 16 se representa un cuchillo de ágata y otro de acero, respectivamente. La sección transversal es de figura pentagonal, pero en los extremos del cuchillo aparece rectangular por las piezas *h*, de la misma materia, adicionadas para la sólida unión con la varilla del péndulo. Todos los cuchillos están labrados con extraordinario primor, y particularmente el filo *ff*, en línea recta, sacado á bisel en las caras *g*, y que mide un ángulo de 95°, con mucha aproximación. Las dimensiones, son :

	LONGITUD.	ANCHURA.	ALTURA.
	mm	mm	mm
Cuchillos de acero.	95,5	14,0	18,0
— de ágata.	93,6	13,8	18,0

Los cuchillos apareados se distinguen entre sí por la marca grabada en una de las caras de cabeza; un punto (.), y dos puntos (..).

La sujeción de los cuchillos al péndulo está dispuesta por intermedio de las *monturas*, que consisten (cada una) en la pieza de latón *ee* (*fig.^s 3, 14*), á modo

de abrazadera de la varilla *vv*, fija invariablemente á ella con soldadura y pasadores á rosca, y que, prolongada diametralmente en el sentido de las aberturas *aa*, dejando libres sus huecos, afecta la forma de un bastidor rectangular, sobre cuyos lados menores, ó de cabeza, insisten, sujetos por medio de tornillos, los puentes *ss*. Al través de estos puentes, y, por tanto, de la varilla, puede correrse el cuchillo *cc* para colocarlo en la situación precisa, sujeto por sus extremidades entre el bastidor *ee* y las piezas *n,n*, movidas por los tornillos *m,m*, y lateralmente asegurado entre pequeños toques de tornillo que atraviesan los puentes. Las presiones ejercidas por intermedio de las piezas *n,n* están templadas por los resortes *o, o*; de manera que los efectos de dilatación de la varilla tienen lugar con independencia de los cuchillos.

La posibilidad de la inversión horizontal de cada cuchillo en la montura, y de colocarlos indistintamente en una ú otra, proporciona varias combinaciones ó *modos de colocación* del juego de cuchillos, realizándose siempre, por construcción, el paralelismo de los filos, perpendiculares al eje de la varilla, como exige el requisito de la forma simétrica del péndulo.

La sustitución de los cuchillos de acero por los de ágata, menos pesados, trae consigo el adicionar las piezas suplementarias *k*, unidas con tornillos á la varilla.

	KILOGRAMOS.
El peso total del péndulo pesado con los cuchillos de acero, ó con los de ágata y piezas suplementarias, es.	7,013
El peso del disco macizo.	2,663
— — hueco.	0,288
— de un cuchillo de acero.	0,156
— — de ágata.	0,051
— de cada par de piezas suplementarias.	0,105

En la montura del cuchillo, inmediata al disco macizo (*M*), está grabada la Firma «*A. Repsold & Söhne*. — Hamburg, 1873».

§ 3. El *péndulo ligero* (*fig. 4*) es en un todo semejante al *pesado*, aparte de algunos detalles que pueden apreciarse en el dibujo, como lo es, el carecer de resortes para templar la presión sobre el cuchillo colocado en su montura; pero sólo admite el empleo del juego de cuchillos de ágata. Las dimensiones son:

VARILLA. . .	Diámetro exterior. . .	42 ^{mm} ,2.—	Espesor. . .	1 ^{mm} ,0.—	Longitud total.	1 ^m ,256
DISCOS. . . .	Diámetro.	97 ^{mm} ,5.—	Altura. . .	25 ^{mm} ,5.—	Distancia entre centros. .	1 ^m ,188

y los pesos :

	KILOGRAMOS.
Peso total del péndulo.	3,218
— del disco macizo.	1,253
— del disco hueco.	0,189

En la montura del cuchillo, inmediata al disco macizo (*M*), está grabada la *Firma* «*A. Repsold & Söhne.*—Hamburg, 1881».

§ 4. La *regla métrica* está formada, en lo esencial, por un cilindro hueco de latón *ll* (*fig. 5*), de igual fabricación que las varillas de los péndulos y de la misma sección transversal que la del pesado, en cuyos extremos, vaciados en una semicircunferencia, y por la parte interior, lleva sólida é invariablemente unidas dos piezas, también de latón, con subdivisiones métricas grabadas sobre plata, contenidas en un mismo plano de simetría de la regla. Estas piezas adicionales están resguardadas de inmediato contacto por las cubiertas ó tapaderas *m*, sujetas con tornillos al cilindro hueco, y que terminan en espigas *r* (de puntos en el dibujo), para recibir á rosca, é indistintamente, ya la caperuza superior *c'*, ya la contera *c*, sobre la que se sustenta y gira la regla en las dos posiciones verticales, recíprocamente inversas, que puede tener en el aparato. Las subdivisiones métricas se divisan por los taladros *o*, practicados en las tapaderas; y existen además otros *o'* en la regla que penetran hasta el interior, proporcionándose así, en análogas condiciones á las que tienen las varillas de los péndulos, y al objeto de conseguir la uniformidad de temperatura en toda la masa, la fácil circulación del aire.

En la figura 24 se muestran con todo detalle la regla y su interior por cortes, longitudinal y transversal, acompañados de proyecciones de las extremidades, suponiendo quitadas las tapaderas (*), y de las imágenes de las subdivisiones métricas terminales, tal como aparecen en los campos de los microscopios micrométricos del comparador. Las piezas *a* y *a'*, antes mencionadas, están fijadas por medio de los tornillos *t*, *t*, y *t'*, *t'*, al cilindro hueco de latón *ll*, que resulta prolongado por ambos extremos en la semicircunferencia *b'b'b'*, *bbb* hasta el enrase con ellas; la pieza *a*, inferior en el dibujo, tiene la sección de un cuadrante y lleva señalado en la subdivisión métrica el trazo 0 y otro trazo de cada lado á la distancia de décima de milímetro; en la otra pieza *a'* está la subdivisión con 23 trazos, á los que, promediando el marcado 1^m, corresponde la numeración desde 998^{mm},9 á 1001^{mm},1. Las líneas *ee*, que limitan los trazos de uno y otro extremo, coinciden precisamente con el eje de figura de la regla.

(*) La proyección de la extremidad, inferior en el dibujo, corresponde á la posición invertida de la regla.

En el interior del tubo de latón, ó sea, de la regla, propiamente dicha, hay otros dos, concéntricos, casi del mismo espesor y de algo menor longitud que él, de acero el uno y el otro de zinc, que forman termómetro. Fijo el tubo de acero hh por el extremo inmediato al trazo 0, con los tornillos n , puede dilatarse libremente en sentido longitudinal resbalando su otro extremo, donde está invariablemente unido el tubo interior de zinc zz por intermedio de la pieza de latón $l'l'$ y con los tornillos n' , dentro de un collar que forma cuerpo con el tubo exterior de latón; el tubo de zinc, que se dilata también con libertad, lleva adicionada en su extremo libre, próximo al trazo 0 de la regla, otra pieza de latón $l''l''$, la cual es de forma cilíndrica circular en una parte, para resbalar asimismo pasando al través de la cabeza del tubo de acero, y tiene hacia la extremidad la sección de un cuadrante, en una de cuyas caras planas existe grabada sobre plata una subdivisión de décimas de milímetro (marcado el trazo 0) que se presenta lateralmente en el mismo plano $e'e'$ de simetría y casi en contacto con la terminal de la regla. La situación del trazo 0 de ésta, respecto de la subdivisión unida al termómetro, dependiente casi por entero de la temperatura de las masas de los tubos de acero y de zinc, puede servir de medida, en buenas circunstancias de observación, de la temperatura propia del tubo exterior; el que, como es de advertir, obedece á las acciones de dilatación con independencia completa de las producidas sobre el termómetro.

Los datos de peso cuyo conocimiento interesa, son :

	KILOGRAMOS.
Peso del tubo de latón con las piezas que llevan las subdivisiones métricas, y con las tapaderas.	2,917
— del tubo de acero con los seis tornillos de unión al anterior y al de zinc.	1,307
— del tubo de zinc con sus apéndices de latón.	1,227
PESO TOTAL DE LA REGLA.	5,451

§ 5. El *comparador* (*fig. 6*), se compone de un cilindro hueco de latón cc , de sección circular, de 51^{mm} de diámetro exterior y 2^{mm} de espesor, fabricado por igual procedimiento que las varillas de los péndulos y la regla, y que, como ésta, tiene un remate ó contera sobre el que gira una vez montado en el aparato; al cilindro hueco van unidos dos microscopios iguales, M, M , paralelos y en dirección perpendicular al eje de giro, cuyas ampliaciones lineales se aproximan á 30 veces, y que están provistos de aparatos micrométricos m , en la disposición ordinaria, con retículos formados por tres hilos de araña (*fig. 24*): los

dos paralelos, para comprender las imágenes, ya del trazo de observación de la regla, ya del filo del cuchillo, y el tercero, que los cruza perpendicularmente. La equivalencia lineal de una revolución del tornillo ó *vuelta micrométrica* es, muy aproximadamente, una subdivisión menor de la regla, es decir, una décima de milímetro; y como la circunferencia del tambor está dividida en 100 *partes* iguales, á una de éstas corresponde la milésima de milímetro ó *micrón*, pudiendo apreciarse en el tambor hasta la décima de parte. La cortadura triangular ó *muesca v* en el diafragma, y fija, por consiguiente, en el borde del campo óptico, determina la situación central de los hilos paralelos, á que corresponde la línea de colimación de referencia.

Los microscopios *M* (*fig.s* 6, 25) están colocados en sus monturas *pp*, pasando por los collares *s*, que los ciñen cediendo al movimiento de los tornillos *s'*; el microscopio inferior se fija al tubo *cc*, atravesándole diametralmente por las aberturas *a*; pero el superior se halla unido á otro tubo interior *c'c'*, que es movable en sentido longitudinal con el tornillo de cabeza, *tt*, mediante la acción del muelle en espiral *rr* cuando se aflojan los tornillos *t'*, que obrando sobre el resorte *r'r'*, establecen la sujeción entre ambos tubos; por manera, que la distancia entre los microscopios es susceptible de corrección entre ciertos límites, á fin de que, una vez promediada entre las longitudes de comparación, aparezcan sucesivamente hacia los centros de los campos ópticos, así las imágenes de los fillos de los cuchillos, como las de los trazos terminales de la regla. Para la precisa colocación, los microscopios se pueden correr y girar dentro de sus collares, luego de aflojados los tornillos *s'*; las pequeñas correcciones en los sentidos vertical y lateral, y para enfocar la imagen, se hacen por medio del sistema de tornillos *v*, *l* y *f*.

§ 6. El *trípode* en que están montados el péndulo, la regla y el comparador es de latón, y consta de tres tubos *T, T, T* (*fig.s* 1, 2), de 32^{mm} de diámetro exterior, que forman armadura unidos por sus extremos con fuertes tuercas: en la parte superior á la pieza *T' T'*, y en la inferior á la *T'' T''*, la cual, á manera de basa, lleva tres brazos con pies de tornillo *z, z, z*, que señalan un triángulo equilátero de 0^m,602 de lado.

Hacia la parte central de la pieza *T' T'*, ó de la *cabeza del trípode* (*fig.s* 7, 8, 13), está invariablemente unido, como formando con ella un solo cuerpo, el brazo prismático *bb*, destinado al asiento y enlace de la montura *b'* de la pieza *pp*, ó *plano de suspensión* del péndulo; y lateralmente hay dispuestos en la pieza *T' T'* los dos collares *d* y *d'* para la sujeción del comparador y de la regla. En la basa *T'' T''* (*fig.s* 9, 14), y correspondiendo verticalmente con el plano de suspensión y estos collares, se encuentran el *arco graduado A* y los apoyos *E* y *E'* del comparador y de la regla.

En la figura 13 puede examinarse con detalle el mecanismo para la suspensión del péndulo. Una sencilla palanca articulada $g g$, obrando por medio del tornillo fijo t , mueve en dirección vertical el sistema $k k$, de forma de horquilla, cuyos brazos verticales sirven de guías á otros interiores k' , k' , unidos por la lámina flexible ó muelle r y terminados en cojinetes h' , h' , á propósito para recibir el cuchillo c hacia los extremos del filo; de suerte que, con los suaves movimientos del tornillo t , se deja suspendido el péndulo para la observación descansando el filo del cuchillo sobre el plano p , y se le eleva luego á fin de que permanezca sustentado en totalidad, mientras no se observa, por intermedio del mecanismo de palanca, en la cabeza del trípode.

Á cada uno de los dos juegos de cuchillos acompaña en el aparato un *plano de suspensión* de la misma materia, ágata, y acero (*fig.s 13, 17, 18*), exactamente iguales en forma y dimensiones, que son: 15^{mm} de altura y 9^{mm} de anchura, en la sección transversal, y 60^{mm} de longitud. Los rebajos cilíndricos o están al objeto de facilitar la observación del filo del cuchillo, por el resto en contacto con el plano, destacándose en esta parte sobre el fondo; y para fijar el plano p sirven los taladros o' , por los que atraviesan pasadores x , á tornillo en la montura (*fig. 7*). La labra de estas piezas, especialmente en la cara superior ó de contacto con el filo del cuchillo, nada deja que desear.

El *arco graduado A* (*fig.s 9, 14*), para medir la amplitud de las oscilaciones del péndulo, está subdividido de 10' en 10' hasta 2° 40' de cada lado del trazo 0; se une al trípode con los tornillos z , que le atraviesan por taladros ó aberturas alargadas, lo que permite corregir la situación del arco hasta que el trazo 0 corresponda con el extremo del péndulo, libremente suspendido y en equilibrio; una *pinza*, en la pieza giratoria z' , obrando por la acción combinada del muelle y y tornillo y' , sirve para sujetar, á voluntad, el péndulo.

De conformidad con los principios á que obedecen la construcción y empleo del péndulo de inversión, son igualmente posibles, en cada una de las *Suspensiones* recíprocas, es decir, de uno ú otro cuchillo, los dos *Modos de suspensión*, que se corresponden por la semirevolución horizontal del instrumento.

La regla y el comparador, verticalmente montados en el trípode, pasan por los collares d' y d (*fig.s 8, 9*), y se sustentan en los apoyos E' y E , enteramente iguales, encajando la extremidad cónica ó contera en una pieza n de nuez, con espiga vertical de acero, que entra á rozamiento en la pieza m , la cual descansa en el cerco e , fijo en el trípode, y se une á él por los tornillos laterales g . Mediante estos tornillos se puede corregir horizontalmente en todos sentidos la situación de la pieza m , y, por tanto, la de la nuez, la que tiene además corrección vertical independiente con el tornillo s (*fig. 1*). La situación del collar d del comparador (*fig.s 7, 8*) en la cabeza del trípode es invariable,

mas no así la del collar d' de la regla, cuya unión, por medio del sistema de tornillos t' , permite variar entre pequeños límites su distancia al d ; y puede además hacerse girar la regla y el comparador dentro de los collares, venciendo el ligero rozamiento que ocasiona la presión de las flexibles láminas de cierre f' y f .

Con estas disposiciones es posible corregir la situación de la regla y comparador, respecto de la del péndulo libremente suspendido y en equilibrio, para efectuar las mediciones lineales, observando sucesivamente con los microscopios fijos en el comparador giratorio alrededor de un eje inmóvil, así los filos de los cuchillos, como los trazos de la regla que definen las magnitudes de comparación.

Como partes accesorias, acompañan al aparato de péndulo :

Un *nivel* (*fig. 19*) para la horizontalidad del plano de suspensión. El valor angular de una subdivisión es $32''$.

Otro *nivel* (*fig. 26*) para la verticalidad del comparador y de la regla, el cual se coloca, en el primer caso, descansando sus pies n, n sobre el tubo del microscopio superior y la varilla bb en rebajos ó guías dispuestas en b', b' (*fig. 25*), que impiden el movimiento transversal; y en el segundo caso, se monta el nivel por intermedio de la pieza $m m$ (*fig. 26*), que le recibe del mismo modo que el microscopio y enchufa por m' en el remate r de la regla (*fig. 24*).

Varios *reflectores*, destinados á mejorar las condiciones de visibilidad en la observación de los cuchillos, dirigiendo la luz á través de la abertura circular a' de la varilla (*fig. 3*) en la parte posterior respecto del microscopio: los unos (*fig.s 21, 22*), consisten en un plano r , pintado de blanco, ó en un espejo, esmerilado r' , y, colocados sobre la cabeza del trípode, hacen que en el campo iluminado del microscopio se destaque, relativamente oscuro, el filo del cuchillo; los otros (*fig. 20*) son en forma de tubo a'' , que, penetrando en la varilla á través de dicho taladro circular, dan paso por su interior á la luz, directa ó reflejada por uno de los anteriores, la cual experimenta la reflexión total en el pequeño prisma p , y se dirige luego por delante del cuchillo, de modo que el filo aparece entonces iluminado sobre el fondo oscuro del microscopio. Otro reflector de espejo r'' (*fig. 23*) puede tener aplicación para el cuchillo inferior, colocado á través de la varilla sobre los lados menores del bastidor e de la montura (*fig. 14*).

Una *pantalla* ó cortina de fuerte bayeta, con armadura metálica, que la hace adaptarse á la forma exterior del aparato, sujeta al trípode por medio de un tornillo en p' (*fig. 8*), y cuyo objeto es proteger al aparato de las influencias por temperatura que podría ocasionar la proximidad del observador.

Por último, para la conservación de los cuchillos hay las piezas h (*fig. 14*),

que cubren el filo y le preservan de choque, sujetas con pasadores de resorte h' introducidos por las aberturas de iluminación.

§ 7. El establecimiento del aparato *en estación* supone, como primer requisito, la horizontalidad del plano de suspensión del péndulo. Esto se consigue fácilmente, una vez montado el trípode, con el comparador y la regla, sobre un sólido pilar de fábrica, sirviéndose del nivel especial (*fig. 19*), y por medio de los tornillos z de apoyo (*fig.s 1, 2*), que descansan sobre tejos incrustados en el pilar. La tolerancia puede llevarse hasta algunas pocas subdivisiones del nivel, pues que una de éstas ($32''$) significa tan sólo en la longitud del péndulo un error relativo de la cienmillonésima. Suspendido luego libremente el péndulo sobre el plano, y fijo en la situación de reposo con la pinza unida al arco graduado (*fig.s 9, 14*), se corrige éste para que el trazo central ó *cero* coincida en la vertical con el remate cónico del péndulo.

La medición de la distancia entre los cuchillos exige la igualdad de los intervalos que sobre el péndulo y la regla, y en dirección de las magnitudes lineales que se comparan, comprendan los ejes ópticos, ó más bien, unas mismas líneas de colimación de los microscopios micrométricos, lo que se realiza con la verticalidad de uno y otra y su equidistancia al eje de giro del comparador, también vertical, permaneciendo por supuesto los microscopios respectivamente invariables en las convenientes colocaciones, durante la operación. Al efecto, y valiéndose de los medios indicados en los párrafos anteriores, se procede á las correcciones del comparador, para conseguir que las imágenes de los fillos de los cuchillos aparezcan á la vez enfocadas hacia los centros de los campos de los microscopios, y con los requisitos resumidos en: 1) Verticalidad del eje de giro; 2) Ejes ópticos, es decir, líneas de colimación de referencia, muy aproximadamente horizontales, y en un plano vertical; y 3) Horizontalidad de los hilos paralelos de los retículos.

Hecho esto, resta llevar la regla á la situación vertical, y á distancia y altura respecto del comparador, ya determinadas, para que con los microscopios se dividan, en las mismas convenientes circunstancias que los fillos de los cuchillos, los trazos de las subdivisiones previamente elegidos como terminales ó de comparación, lo que se logra sin dificultad mediante los movimientos de corrección en el apoyo y el del collar unido á la parte superior del trípode.

La condición de verticalidad del comparador y de la regla queda suficientemente satisfecha dentro de una subdivisión del nivel ($9''$).

Puesto así el aparato en estación, queda preparado, por lo que toca á la disposición de sus partes, para efectuar las observaciones de la distancia entre los cuchillos y de la duración de las oscilaciones, en los cuatro distintos *Modos de suspensión* del péndulo.