

tar colocado á mayor altura respecto del limbo, puede dar una vuel-

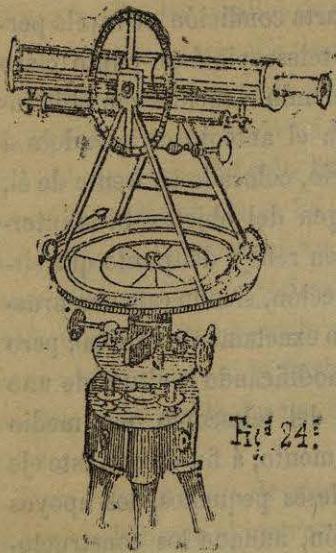


Fig. 24.

ta completa al derredor de su eje horizontal, al que está unido invariablemente. El nombre que se les ha dado proviene de la analogía que presenta esa construcción con la del instrumento astronómico llamado telescopio de tránsitos. Estos teodolitos, provistos de un círculo vertical completo, cuyo plano es paralelo al anteojo, al que va unido, reciben también el nombre de *altazimutes*, sobre todo cuando son de grandes dimensiones, y la perfección de su construcción los hace propios para las operaciones delicadas de la Geodesia y la Astronomía.

La graduación del limbo inferior está cubierta por la lámina superior, quedando solamente libre en dos espacios que se hallan en los extremos opuestos de la placa superior, en los que van colocados los vernieres. La aguja de la brújula es de mayores dimensiones que la del teodolito inglés.

58. Las rectificaciones del teodolito americano no presentan dificultad alguna, comprendiendo bien el objeto de las condiciones que debe llenar, y solamente describiré la corrección de la línea de colimación, por ser diferente la manera con que el anteojo se halla colocado en el instrumento.

En este caso debe invertirse el orden de las rectificaciones, haciendo en primer lugar la de los niveles hasta lograr que el limbo guarde una posición horizontal, después de lo cual y suponiendo que *A* (fig. 25ª) es el instrumento colocado en un terreno bastante plano, se clava una ficha *B* á una distancia conveniente para que pueda verse con toda claridad por el telescopio del teodolito, y se pone en coincidencia con ella la intersección de los hilos de la retícula. Fijando todo el instrumento, se mide la distancia de *A* á *B*, se hace girar el anteojo alrededor de su eje horizontal hasta que se halle en una di-

rección opuesta, y se hace colocar otra ficha en esta nueva dirección, á una distancia del teodolito igual á *AB*, y precisamente en coincidencia con los hilos de la retícula. Si la línea de colimación es perpendicular al eje de rotación *ab* del telescopio, habrá descrito en su movimiento un plano vertical, y la segunda ficha se habrá clavado en *B'* sobre la prolongación de *AB*; pero si siendo *OE* la perpendicular al eje de rotación *ab*, la línea de colimación no coincide con ella, describirá en su movimiento una superficie cónica *BAC*, y la intersección de los hilos señalará el punto *C* donde se clava la segunda ficha á una distancia del punto incógnito *E*, igual á *BO*. Para poner en claro el error y corregirlo, se hace girar la placa del vernier solamente, hasta que el anteojo, que no debe tocarse, ocupe su posición primitiva, y se dirige de nuevo á la ficha *B*, fijando el limbo. En esta nueva situación, la perpendicular *OE* habrá venido á colocarse en *O'E'*, simétricamente, aunque en sentido opuesto, respecto de la línea de colimación *AB*; y si vuelve á hacerse girar el telescopio al derredor del eje de rotación, que ahora ocupa la posición *cd*, la línea de colimación describirá la superficie cónica *BAD*, señalando el punto *D* en que se clava una tercera ficha. Como la distancia *CD* resulta necesariamente doble de *OO'*, y ésta á su vez es doble del error $BO = BO'$, se marcará fácilmente el punto *E'* de la perpendicular al eje de rotación, tomando desde *D* la cuarta parte de la pequeña distancia *CD*. Si en seguida se mueve la retícula por medio de sus tornillos hasta que coincida con *E'*, la nueva línea de colimación quedará correcta, y será *O'E'* perpendicular al eje de rotación *cd*.

Se puede comprobar inmediatamente la operación, colocando otra ficha en *B'* á la mitad de la distancia *CD*, pues si se hace coincidir con ella la retícula del telescopio, valiéndose del tornillo tangencial del limbo, deberá hallarse la primera ficha *B* en la intersección de los hilos, al dirigir el anteojo á ese punto en virtud de su movimiento vertical al derredor de su eje de rotación. Si todavía se notare algún error, se repetirá la operación hasta que los dos puntos opuestos



se encuentren en la misma línea. El mismo sistema de corrección es aplicable á los teodolitos ingleses, pues aunque sus telescopios no pueden dar una vuelta entera al derredor del eje horizontal de rotación, sí pueden desmontarse é invertirse sobre sus collares; pero el medio que se indicó para su rectificación es indudablemente más rápido y sencillo que éste.

59. Los teodolitos de construcción francesa difieren algo de los que he descrito hasta ahora, y presentan más analogía con los contruidos por Ertel en Munich, con la diferencia de que éstos son generalmente instrumentos de más precisión que aquellos. El teodolito de Ertel está representado en la figura 26^a. Su limbo se compone de dos círculos concéntricos, de los que el interior lleva el sistema de los nonius, y sostiene los apoyos $B B'$ en que descansa el eje de rotación $A A'$ del telescopio superior $F F'$. De estos apoyos, el uno es susceptible de acortarse ó prolongarse con tornillos destinados al efecto, con el objeto de practicar una de las rectificaciones que diremos, y sobre el eje $A A'$, cuyos extremos son cilíndricos y perfectamente iguales, se coloca un nivel $H H'$ sostenido por dos apoyos, de los cuales uno es también susceptible de un pequeño aumento y disminución, y sirve igualmente para hacer otra rectificación. Las retículas de los telescopios están provistas de tornillos para comunicarles movimiento perpendicularmente al eje óptico, á fin de colocar la intersección de los hilos en un punto de este eje; y finalmente, el ocular movable permite también ver con la limpieza necesaria tanto la retícula como los objetos que se observan. Uno de los extremos A' del eje de rotación del anteojo lleva un pequeño círculo vertical graduado $G G'$ para medir los ángulos

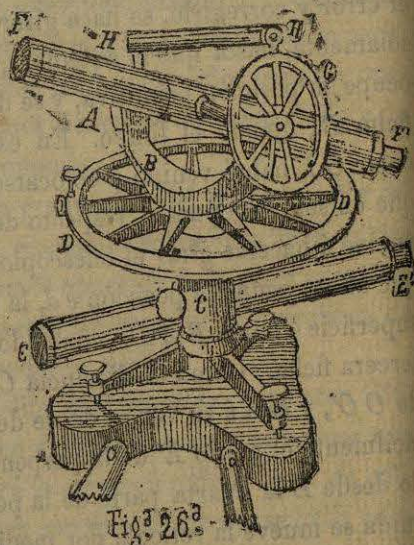


Fig. 26ª.

de altura, ó las distancias zenitales, y el otro A tiene un contrapeso para equilibrar el del círculo. Este está dividido en cuadrantes numerados de 0° á 90° , de tal modo que uno de los diámetros $0^\circ 0^\circ$ es paralelo al eje óptico del anteojo, y el otro perpendicular á él. Los nonius van fijos á los apoyos $B B'$ que sostienen el eje $A A'$, y deben estar arreglados de tal manera que estableciendo la coincidencia de sus *ceros* con los del círculo, la línea de colimación sea paralela al horizonte, para lo cual están provistos de movimientos por medio de tornillos y de un pequeño nivel paralelo al plano del círculo. En la Nivelación trataremos del modo de practicar estas rectificaciones.

En los teodolitos de Ertel, muchas veces el anteojo superior no es recto, sino rectangular ó *acodado* con el objeto de que pueda dar una vuelta entera sobre su eje, y en tal caso tiene en el interior del tubo un espejo metálico ó un prisma de vidrio que recibe los rayos luminosos bajo un ángulo de 45° y los refleja perpendicularmente á su dirección primitiva, de tal suerte, que el ocular queda situado en uno de los extremos A del eje. Pero de todos modos este eje puede invertirse sobre sus apoyos terminados en forma de Y, disposición que permite situar el círculo vertical tanto á la derecha como á la izquierda del observador, y sirve para ejecutar varias correcciones, entre otras la de rectificar la horizontalidad de la línea de los *ceros*.

Como en todos los teodolitos, los movimientos de este son: 1º, de toda la parte superior, esto es, del limbo con los nonius y el anteojo; 2º, del círculo interior solamente con los nonius y el anteojo; 3º, del anteojo solo en un plano perpendicular al del limbo; 4º, del anteojo inferior tanto en dirección vertical como horizontal. Por último, el instrumento tiene tornillos de presión para contener los movimientos generales, y de aproximación para comunicarlos con lentitud.

60. Las principales condiciones que debe llenar el teodolito de esta construcción y que incluyen las que se han indicado respecto del teodolito inglés, son:

- I. El eje $A A'$ debe ser paralelo al plano del limbo.
- II. La línea de colimación debe ser perpendicular al eje de rotación $A A'$.

Para comprobar y rectificar la primera, sirve el nivel $H H'$ de que

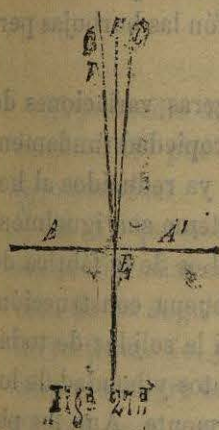
hemos hablado; mas como es difícil que sus dos pies sean exactamente iguales, lo primero que debe hacerse es corregirlo, haciendo que sea perfectamente paralelo el eje de rotación, lo cual se practica de este modo. Se establece el instrumento de manera que el eje de rotación AA' quede en la dirección de uno de los tornillos T de los pies, y se paralizan todos los movimientos. En seguida se coloca el nivel HH' en su lugar sobre los extremos del eje, y se mueve el tornillo del pie hasta que la burbuja ocupe el medio del tubo. Después se invierte el nivel, y entonces, si sus pies son iguales, la burbuja volverá al mismo lugar; mas si hay alguna diferencia entre ellos, se inclinará hacia uno de los extremos del tubo, en cuyo caso debe volverse al centro dividiendo la corrección en dos partes iguales, de las que una se hace por medio del tornillo del pie, y la otra aumentando ó disminuyendo la longitud de uno de los apoyos del nivel, usando los tornillos de que está provisto para el caso. Debe repetirse el procedimiento hasta que en las dos posiciones del nivel, la burbuja no salga de su centro, siendo esta la prueba de que ambos apoyos son perfectamente iguales, y de consiguiente de que los ejes de rotación y del nivel son paralelos.

Para establecer ahora el paralelismo entre el plano del limbo y el eje de rotación, se hace girar el instrumento 180° al derredor de la columna vertical C sin tocar el nivel, y si la burbuja después de oscilar se fija en el centro, subsiste el paralelismo; mas en el caso contrario, se hace la corrección la mitad con el tornillo del pie y la otra mitad modificando la longitud de uno de los apoyos BB' del eje, con los tornillos destinados al efecto. Se repite la operación hasta corregir completamente el pequeño error que pueda quedar.

Una vez satisfechos de esta rectificación, se procede á nivelar el limbo, lo que se practica así: La operación anterior da á conocer que la línea trazada en el limbo paralelamente al eje AA' es horizontal; luego si concebimos que este plano se mueva al derredor de esta línea, hasta que un diámetro perpendicular á ella y paralelo al horizonte, quede contenido en él, entonces el círculo, conteniendo á la vez las dos rectas horizontales, quedará también horizontal. De consiguiente, hágase girar el instrumento 90° al derredor de la columna,

de modo que el eje de rotación AA' venga á situarse en la dirección de los otros dos tornillos del pie, y obsérvese si la burbuja se restablece en medio del tubo, en cuyo caso el diámetro del círculo paralelo á esta nueva dirección será también horizontal, y no habrá que hacer corrección alguna; mas si no fuere así, condúzcase otra vez la burbuja al centro usando los dos tornillos del pie, esto es, bajando el uno y subiendo el otro al mismo tiempo, hasta que no haya error. Comunmente, todas estas correcciones no se consiguen inmediatamente, sino poco á poco, y es acaso preferible hacerlas lo mejor que sea posible á la primera vez, y en seguida volver á comenzar tomando por punto de partida la dirección de otro de los tornillos del pie. El teodolito estará perfectamente nivelado cuando dándole una vuelta entera con suavidad, la burbuja no deje el medio del tubo. No cesaremos de recomendar el manejo de los instrumentos y la ejecución de todas sus correcciones, pues sólo la práctica da el tino que se necesita para conseguir las exacta y prontamente.

Luego que se ha nivelado bien el teodolito, se examina si existe la segunda de las condiciones indicadas, de la manera que vamos á enseñar. Hemos dicho que se llama *línea de colimación* la recta que une el centro de curvatura del objetivo con la intersección de los hilos de la retícula, á diferencia del *eje óptico*, que es la que une los centros



de curvatura de ambos lentes, y que se supone perpendicular al eje de rotación. Como la retícula es movable, sucede con frecuencia que la línea de colimación no coincide con el eje óptico, ó lo que es lo mismo, que no es perpendicular al eje de rotación AA' del anteojo. Para restablecer la coincidencia, después de nivelado el teodolito, se dirige el telescopio á un objeto distante y bien definido C (fig. 27^a), tal como la arista de un edificio lejano, y luego que se ha hecho coincidir con la intersección de los hilos y se ha fijado perfectamente el instrumento, se quita el anteojo de sus apoyos con el mayor cuidado para no producir movimiento alguno, y se invierten los extremos del eje de rotación AA' ,

de modo que el que estaba á la derecha venga á quedar á la izquierda, y se vuelve á observar el mismo objeto. Si en esta nueva posición queda siempre cortado por los hilos, no habrá error alguno; más si este existe, la línea de colimación habrá tomado una posición EC' que forma con la primera un ángulo CEC' doble del error, de modo que la intersección de los hilos se presentará desviada de la señal C . Para corregirla se moverá la retícula una cantidad igual á la mitad del desvío, de modo que la intersección se coloque en F , siendo entonces EF perpendicular al eje AA' . Como es muy difícil apreciar á la simple vista la mitad de la pequeña distancia CC' se mueve todo el teodolito hasta colocar otra vez la intersección de los hilos en el objeto C , y se repite la operación corrigiendo poco á poco el error hasta obtener la coincidencia en ambas posiciones. Estas correcciones, una vez hechas, no son muy susceptibles de desarreglo; pero conviene comprobarlas de tiempo en tiempo.

Los teodolitos franceses tienen casi siempre dos niveles fijos al limbo en posición rectangular, y cada uno de ellos debe corregirse separadamente para situarlos con exactitud paralelamente al círculo, procediendo según se ha visto, en dos direcciones perpendiculares la una á la otra, y destruyendo el desvío de la burbuja tanto con los tornillos del pie como con los del nivel. Una vez corregidos, el limbo estará horizontal cuando en toda una revolución las burbujas permanezcan en el centro.

Como se ve por todo lo que precede, las ligeras variaciones de construcción que se han indicado, no alteran la propiedad fundamental del teodolito, que consiste en dar los ángulos ya reducidos al horizonte, y puede decirse que los de cualquier sistema son igualmente buenos, con tal que estén bien contruídos. Los de la fábrica de Troughton y Simms son generalmente de muy buena construcción, y la finura y exactitud de las divisiones, unida á la solidez de todas sus partes, así como la suavidad de los movimientos y bondad de los anteojos, me inducen á recomendarlos particularmente. Aun los pequeños de cinco ó seis pulgadas de diámetro proporcionan resultados suficientemente exactos para casi todas las operaciones topográficas.

61. Después de bien nivelado el teodolito, el modo de tomar los ángulos es enteramente el mismo que con el círculo repetidor; pero como por lo común el anteojo inferior no tiene tornillo de aproximación, es preferible el primer método de repetición que explicamos (núm. 49) usando este anteojo únicamente para denunciar movimientos irregulares. Además, como es difícil destruir completamente el error de colimación, y por otra parte, puede existir otro pequeñísimo de excentricidad, cuando se desea proceder con la mayor precisión, debe observarse el mismo ángulo repitiéndolo en las dos posiciones inversas del telescopio, y tomar el término medio de los dos resultados. Como ejemplo pongo á la vista los que obtuve midiendo desde el Observatorio del Colegio de Ingenieros, el ángulo entre las señales del Peñón y del cerro de los Gachupines: llamaremos *posición directa*, del anteojo, aquella en que el círculo vertical queda á la derecha del observador, y *posición inversa* cuando queda á la izquierda.

POSICIÓN DIRECTA.

POSICIÓN INVERSA.

$$n = 10 \quad g = +7''.5$$

$$G = 607^\circ 48' 45''.0$$

$$n = 10 \quad g = +7''.5$$

$$G = 607^\circ 48' 17''.5$$

$$60^\circ 46' 51''.75 \dots a = \frac{G-g}{n} \dots 60^\circ 46' 49''.00$$

El promedio de ambos resultados es $60^\circ 46' 50''.4$. La semidiferencia $1''.37$ puede considerarse como el efecto de las causas de error mencionadas.

62. Ya que nos hemos hecho cargo del manejo del teodolito y de sus rectificaciones, demostraremos las ventajas teóricas de la repetición de los ángulos. Fácilmente se concibe que por exacto que sea un instrumento, y á pesar del cuidado que se ponga en corregirlo y usarlo, siempre es posible cometer errores, demasiado pequeños á la verdad, para que nuestros sentidos puedan valuarlos aisladamente, pero cuya influencia se hace sentir en los resultados, según veremos al hablar del modo de comprobarlos. En la medida de los ángulos los errores que resultan deben atribuirse á diversas causas, como

son: 1ª *Error de mira*, esto es, falta de coincidencia exacta entre la intersección de los hilos y la señal observada. 2ª Errores de la graduación del limbo y de la excentricidad del anteojo. 3ª Errores de lectura, en los que se comprenden los que provienen de la aproximación angular que es siempre limitada. 4ª Error de colimación.

La primera causa de error tiene lugar cuando la señal que se observa, ó los hilos de la retícula, presentan un espesor sensible. Como midiendo varias veces el mismo ángulo se tiene derecho para esperar compensación, quiere decir que este error aumente unas veces, y otras disminuya el valor del ángulo verdadero, puede suponerse que el promedio de las observaciones, resulta sensiblemente independiente de él. Por otra parte, debe usarse siempre una retícula muy fina, y dar á las señales sólo el grueso necesario para distinguir-las con claridad.

Igualmente la repetición nulifica casi del todo los pequeños errores que pueden existir en las divisiones y en la centración, puesto que el ángulo se mide con diferentes partes de la graduación, y que siempre se adopta el término medio de las indicaciones de todos los nonius.

Con respecto á los errores de lectura y aproximación, recordemos que como el punto de partida de cada observación es el mismo en que se detuvo el vernier al fin de la anterior, no hay que hacer más que las lecturas g y G ; y hemos visto que siendo n el número de repeticiones, se tiene:

$$a = \frac{G - g}{n}$$

Si suponemos que se cometen los errores α y β en los valores de G y g respectivamente, el que resulta en el ángulo será x , de modo que se tenga:

$$a + x = \frac{(G + \alpha) - (g + \beta)}{n} = \frac{G - g}{n} + \frac{\alpha - \beta}{n}$$

Reduciendo con ayuda de la primera ecuación, se obtiene:

$$x = \frac{\alpha}{n} - \frac{\beta}{n}$$

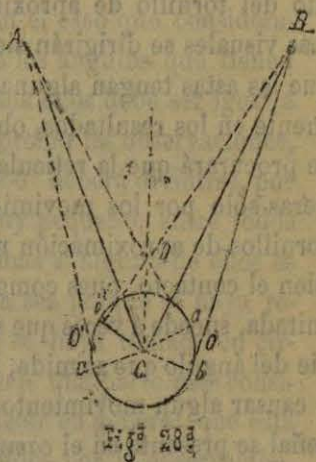
Este resultado demuestra que para los mismos valores de α y β , el de x disminuye al paso que crece n , y como siempre α y β son muy pequeños, puede considerarse x casi nulo cuando n es suficientemente grande. Para hacer esto más palpable, supongamos que además de los grados y minutos, sea 24 el número de segundos del ángulo que se mide; mas si la aproximación del instrumento es sólo de 10'', y no se hace más que una observación, aun cuando no se cometa ningún otro error, nos veremos precisados á tomar ó 20'' ó 30'', resultando en el primer caso una diferencia de 4'' y de 6'' en el segundo: esto es, todo el error de lectura ó aproximación afectará al ángulo. No sucedería lo mismo después de diez observaciones, por ejemplo, pues los mismos errores producirán sólo 0'',4 ó 0'',6 en el resultado.

Por lo que toca al error de colimación, hemos visto que el modo de eliminar sus efectos, casi siempre inapreciables, es observar en las dos posiciones del anteojo.

63. Hay teodolitos llamados *excéntricos* ó *doblemente repetidores*, cuyo anteojo está establecido en el extremo de un diámetro del limbo, y que se mueve paralelamente á otro círculo vertical destinado á la medida y repetición de las distancias zenitales. Cuando se quiere tomar con ellos el ángulo horizontal entre dos objetos, es preciso hacer la doble observación, esto es, repetir tanto con el anteojo á la derecha como á la izquierda, y el medio de ambos resultados es el ángulo que se busca.

Sea, en efecto, $ACB = x$ (fig. 28) el ángulo, y supongamos que se comienza con el anteojo á la derecha. Dirigido á la primera señal ocupará la posición aA , y llevado á la segunda, quedará según bB , de modo que el arco recorrido es $aBC = a$. En seguida se lleva el anteojo á la izquierda, ocupando sucesivamente las direcciones $a'A$ y $b'B$, siendo el ángulo $a'Cb' = a'$.

Los ángulos AOB y $BO'A$ son iguales á a y a' respectivamente,



puesto que en los cuadriláteros $CaOb$ y $CaO'b'$, los ángulos en C y en O son suplementarios; luego en los triángulos DOB y $DO'A$, se tendrá:

$$a = ADB - B \quad \text{y} \quad a' = ADB - A$$

de donde resulta:

$$a + a' = 2ADB - (A + B)$$

Si prolongamos la recta CD , será fácil obtener:

$$ACB = x = ADB - \frac{1}{2}(A + B)$$

luego eliminando á ADB entre esta ecuación y la anterior, resultará finalmente:

$$x = \frac{1}{2}(a + a')$$

Las cantidades a y a' son los resultados de las series observadas con el anteojo á la derecha y á la izquierda.

64. Cualquiera que sea el instrumento que se use, debe ponerse el mayor esmero en su manejo, evitando movimientos bruscos ó demasiado rápidos que lo desarreglen; y no continuando la operación sino hasta estar perfectamente seguros de que las retículas cortan bien las señales. Cuando el inferior se use como anteojo de prueba y se note alguna desviación, no debe fijarse definitivamente el superior sin haber restablecido la coincidencia entre aquél y la señal, por medio del tornillo de aproximación que mueve todo el instrumento. Las visuales se dirigirán siempre al pie de las señales por temor de que las astas tengan alguna ligera inclinación que influiría necesariamente en los resultados, observándolas á diversas alturas, y también se procurará que la retícula se acerque lo más que se pueda á las banderas sólo por los movimientos generales, á fin de no hacer de los tornillos de aproximación más que el uso necesario para establecer bien el contacto, pues como su longitud es por lo común bastante limitada, sucede á veces que se termina su curso antes de concluir la serie del ángulo que se mide, lo cual podría interrumpir la observación ó causar algún movimiento irregular en el teodolito. Luego que la señal se presenta en el campo del anteojo, ó espacio circular que limita la vista, para saber en qué sentido deben hacerse los movimientos, se tendrá presente que siempre en estos anteojos las imágenes de los

objetos exteriores se presentan invertidas, pues aunque aumentando el número de los lentes podrían verse en su estado natural, se disminuiría con esto la cantidad de luz, perjudicándose la claridad de la visión, que es el objeto más importante.

Como prevenciones generales añadiremos que deben evitarse las observaciones á medio día cuando el sol es demasiado ardiente, porque las ondulaciones de la atmósfera, especialmente en los terrenos bajos, producen mucha incertidumbre en la dirección de las visuales, haciendo aparecer los objetos con un movimiento vibratorio. Los mejores resultados se obtienen por las mañanas muy temprano, ó por las tardes desde cosa de las cuatro en adelante, y en general en los días nublados y no calinosos.

Quando el punto de estación es vértice de varios triángulos, es de desearse que se observen todos los ángulos de una sola vez, esto es, sin tener que poner varias veces el teodolito, pues gran parte de las discordancias que se notan en las series del mismo ángulo, ó en el conjunto de los resultados, proviene de que es muy difícil situar siempre el centro del instrumento exactamente en el mismo punto, ó en la vertical de la estación. Después de haber medido todos los ángulos de la triangulación primaria, se toman los de la secundaria, teniendo cuidado de referir ó enlazar algún punto de éstas con dos vértices por lo ménos de la fundamental. En el caso que consideramos bastaría, en rigor, deducir el último de los ángulos que tienen el vértice común; puesto que la suma de todos ellos debe ser igual á 360° ; pero se miden siempre todos para comprobar las observaciones, y en el caso de que la suma difiera algo de 360° deberá dividirse, por regla general, el error, que supondremos muy pequeño, entre todos los ángulos observados, por partes iguales; mas si alguno de ellos es menos digno de confianza que los demás, ya sea porque se haya repetido menor número de veces, ó ya porque se haya tomado en circunstancias más desfavorables, debe aplicársele una parte más considerable de la corrección, aunque conviene decir en general, que esta clase de modificaciones de los valores obtenidos por la observación, debe hacerse con la mayor circunspección y jamás de una manera enteramente arbitraria.