

CUANTIFICACIÓN DE LAS IRREGULARIDADES EN SUPERFICIES GEOLÓGICAS PLANAS MEDIANTE MEDIDAS CON BRÚJULA Y PLACA DE TRES APOYOS

A. Manera Bassa (*), C. Manera Bassa (**) y P. Ramírez Oyanguren (***)

RESUMEN

Las irregularidades que presentan las superficies de las discontinuidades geológicas planas, introducen imprecisiones en las medidas que se efectúan sobre ellas con brújula. Se propone un método para el estudio de su geometría y su influencia sobre las medidas que se efectúan sobre ellas con brújula.

Palabras clave: Superficies geológicas, Estudio irregularidades, Método placa tres apoyos.

ABSTRACT

The irregularities existing in flat geological surfaces introduce a lack of accuracy in the readings taken with geological compass. We propose a method to study the geometry of the irregularities and the influence they have on the orientations determined with geological compass.

Key words: Geological surfaces, Study of irregularities, Tripod plate method.

Manera, A., Manera, C. y Ramírez, P. (1988): Cuantificación de las irregularidades en superficies geológicas planas mediante medidas con brújula y placa de tres apoyos. *Rev. Soc. Geol. España*, 1, (1-2), 197-210.

Manera, A., Manera, C. y Ramírez, P. (1988): Quantitative study of irregularities in flat geological surfaces by measurements with compass and tripod plate. *Rev. Soc. Geol. España*, 1, (1-2), 197-210.

1. INTRODUCCIÓN

Las discontinuidades naturales planas existentes en las rocas suelen presentar irregularidades en su superficie. Su estudio tiene un interés geológico intrínseco, por las implicaciones que puedan deducirse de su forma, dimensiones u orientación sobre la superficie portadora. Tienen también gran influencia en el comportamiento de dichas superficies frente a esfuerzos o sollicitaciones mecánicas que las afecten; por lo cual, es de gran interés su definición desde un punto de vista geomecánico.

Influyen también sobre los valores básicos de rumbo y buzamiento que se miden en el terreno con brújula, ya que originan diferencias, importantes en muchos casos, respecto al valor del plano real que se quiere determinar; la cuantificación de estas diferencias es esencial para conocer el grado de precisión o la validez de los resultados que se deduzcan de esas medidas.

Diferentes autores se han ocupado de métodos de medida de las irregularidades, empleando, básicamente,

dos sistemas: perfiles de irregularidades y medidas directas sobre las superficies. Al primer grupo corresponden los trabajos de Piteau, 1970; Barton, 1977; y Feker y Rengers (1971) al segundo el sistema de Feker y Rengers, 1971, de medidas con brújula y placas de apoyo circulares de diferentes radios. Un resumen de estos métodos, para aplicaciones geomecánicas, puede encontrarse en Barton, 1977, o en Ramírez Oyanguren *et al.*, 1984.

Los sistemas de estudio por perfiles, o son únicamente de tipo cualitativo Piteau, 1970; Barton, 1977; —que pueden ser suficientes para muchos propósitos—, o requieren de equipos complejos y no usuales de medida, perfilógrafos y afloramientos de dimensiones grandes (Feker y Rengers, 1971).

El procedimiento de medida con placas circulares (Feker y Rengers, 1971) presenta, no obstante su gran utilidad, algunos inconvenientes que limitan su aplicación: mide, únicamente, la envolvente exterior de las irregularidades de la superficie estudiada sin tener en cuenta los senos y zonas inferiores de dicha superficie; no tiene

(*) Urbanización las Mimbreras, Bloque, 10. Majadahonda. 28220 Madrid.

(**) c/ Isaac Peral, 18. 28015 Madrid.

(***) Escuela Superior Ingenieros de Minas. c/ Ríos Rosas 21. 28003 Madrid.

ningún control sobre los puntos de contacto del terreno en la placa de medida, aspecto de gran importancia, como se verá más adelante, para cuantificar las alturas de las irregularidades; es necesario, por este procedimiento, efectuar las medidas sobre una malla regular de puntos, o efectuar una ponderación de cada medida respecto a su área de influencia para poder obtener el valor medio del plano estudiado correctamente, y, por último, necesita de superficies de afloramiento grandes.

2. MÉTODO DE LA PLACA DE TRES APOYOS

Para medir y cuantificar las irregularidades de superficies planas, se ha realizado un procedimiento mediante un sencillo instrumento auxiliar de medida, que denominaremos «placa de tres apoyos» (figs. 1, 2 y 3). El método consiste en comparar entre sí diferentes planos, definidos cada uno de ellos, por tres puntos situados sobre la superficie estudiada. Estos planos se miden en el terreno con la brújula y la placa de tres apoyos.

2.1. Características de la placa de tres apoyos

Consiste en una placa de material plástico —sobre la que se efectuarán las medidas con la brújula— perfectamente plana, rígida y transparente (figs. 2 y 3). Presenta la placa dos conjuntos de orificios, normales a

ella, en las posiciones relativas que se indican en las figs. 1A y 1B. Dispone de una línea, GA, grabada en su cara inferior que se emplea como línea de referencia para orientar el instrumento en el terreno.

En los orificios de la placa se encastran tres patas metálicas, terminadas en punta, de 6 a 10 centímetros de longitud que, una vez montadas, pueden regularse para que sus extremos definan un plano perfectamente paralelo al de la superficie de la placa.

Pueden realizarse con la placa dos tipos de medidas, según se gire la placa, al efectuarlas en torno a su centro o entorno a un punto de apoyo. En el primer caso se utilizan los orificios indicados en la Fig. 1A. Instalando las patas metálicas en los orificios A, B y C situados en los vértices de triángulos equiláteros, se efectuarán medidas que denominaremos «adireccionales». Si las patas se sitúan en un orificio A y en los B', C' o B'', C'', vértices de un triángulo isósceles, se realizarán medidas que denominaremos «direccionales». Dispone la placa de una varilla auxiliar, que puede fijarse a ella en el radio GA, para colocar una pata de apoyo a 50 centímetros del centro G, punto A50, (Fig. 1). Si el giro de la placa se efectúa en torno a un punto de apoyo de la misma (orificios A de la placa) se emplearán, para instalar las patas metálicas, las configuraciones de la Fig. 1B, para obtener radios de giro de 5, 10, 15, 20 y 25 centímetros, y los puntos B10, C'' y A50 con la varilla auxiliar, para obtener un radio de giro de 50 centímetros; en estos casos, como puede apreciarse en la Fig. 1B, el dispositivo no es simétrico respecto a la línea de referencia GA.

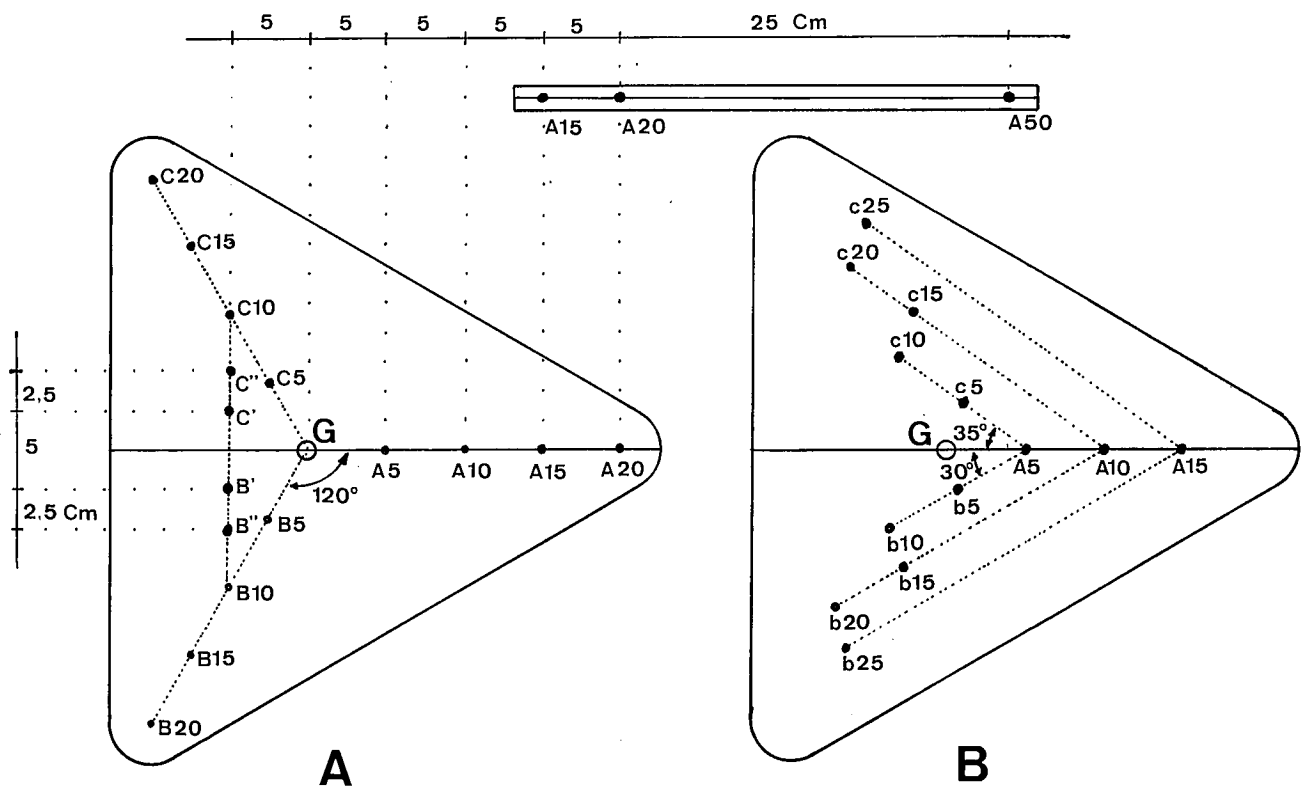


Fig. 1.—Croquis de la placa tres apoyos con sus medidas. A) dispositivo para medidas con giro en el centro. B) dispositivo con giro en un apoyo.
Fig. 1.—Sketch of the tripod plate with its dimensions. A) measurement device for rotation around the centre. B) measurement device for rotation around one pin.



Fig. 2.—Placa de tres apoyos, dispositivo con giro en un apoyo en el afloramiento estudiado.

Fig. 2.—Tripod plate, device for rotation around one pin and studied outcrop.

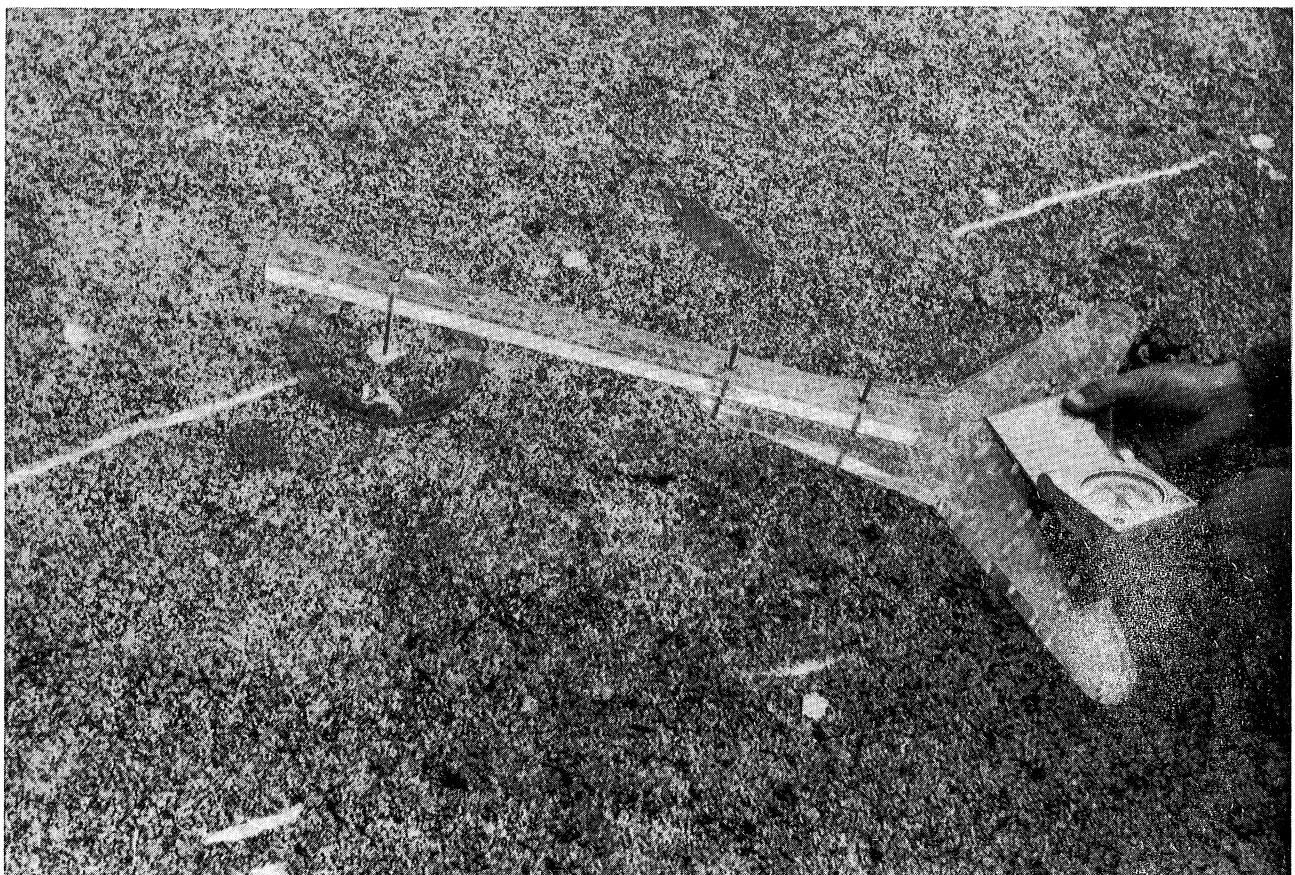


Fig. 3.—Placa de tres apoyos, dispositivo con giro en un apoyo con varilla auxiliar, radio 50 centímetros.

Fig. 3.—Tripod plate, device for rotation around one pin with auxiliar leg, 50 centimeter radius.

2.2. Forma de efectuar la toma de datos

En cada punto de observación se pueden realizar medidas sobre diferentes circunferencias concéntricas empleando diferentes radios de la placa de tres apoyos.

Con cada radio, se realizan n medidas con la brújula de la superficie de la placa girando esta, un mismo ángulo GG tras cada medida, en torno a su centro o sobre un punto de apoyo A ; hasta obtener medidas en toda la circunferencia recorrida por las patas de la placa. Se procede de la siguiente forma:

Se dibuja sobre la superficie a estudiar una línea horizontal —línea de referencia origen de giros de la placa de tres apoyos— su extremo derecho, punto E , será el centro del punto de observación.

Se define el tipo de medidas a realizar: giro en el centro de la placa o sobre un apoyo; y, en el primer caso, el tipo de dispositivo: adireccional o direccional.

Se sitúa un transportador de ángulos —graduado de 0° a 360° — sobre el afloramiento (Fig. 2) con su origen 0° sobre la línea de referencia dibujada en la roca y su centro en el punto E del punto de observación. La

placa de tres apoyos se estaciona sobre la superficie a estudiar de forma que el punto G , centro de giro de la placa o la pata de apoyo A de la misma, según el caso, coincida sobre el E , centro del punto de observación y del transportador de ángulos, y la línea « GA » de referencia de la placa se encuentre sobre la línea horizontal origen de giros.

Se realizan n medidas, con la brújula, sobre la superficie de la placa — n planos dato definidos por tres puntos— girando la placa en torno al punto de giro un mismo ángulo GG , tras cada medida. En el caso de estaciones con el dispositivo «adireccional» el número de medidas a realizar es de $120^\circ/GG$; pues al llegar el punto A de la placa a un ángulo de 120° , respecto a la línea horizontal de referencia, se repiten las medidas. Con el dispositivo «direccional» se deben realizar $360/GG$ medidas. Si se emplea el dispositivo con giro sobre un apoyo, la geometría de la Fig. 1B permite, con un ángulo de giro GG tras cada medida de 10 grados, tener, con 36 medidas, un registro completo con los puntos de apoyo B y C de la placa distribuidos de 5 en 5 grados sobre toda la circunferencia de medidas.

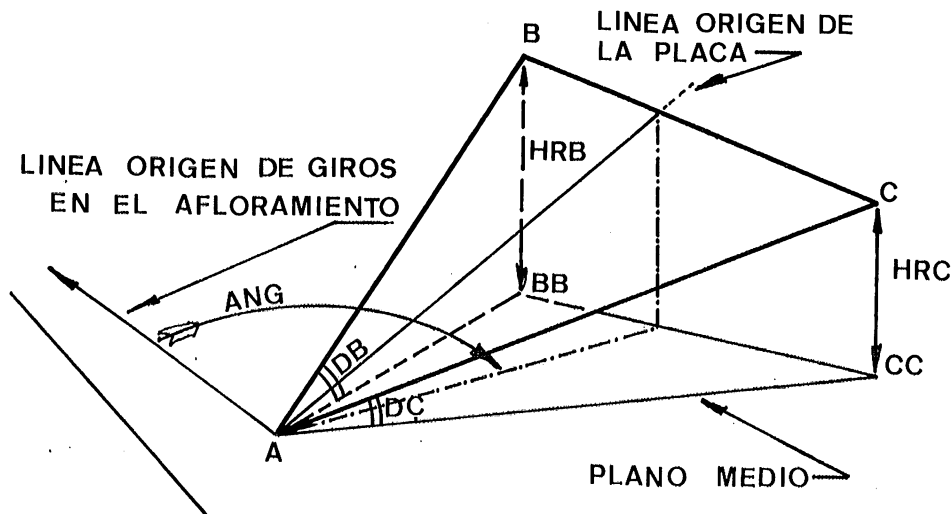


Fig. 4.—ABC, triángulo de puntos de medida con la placa de tres apoyos y alturas de irregularidades HRB y HRC, respecto al plano medio.

Fig. 4.—ABC, triangle of measurement points with tripod plate and irregularity heights HRB and HRC, relative to the average plane.

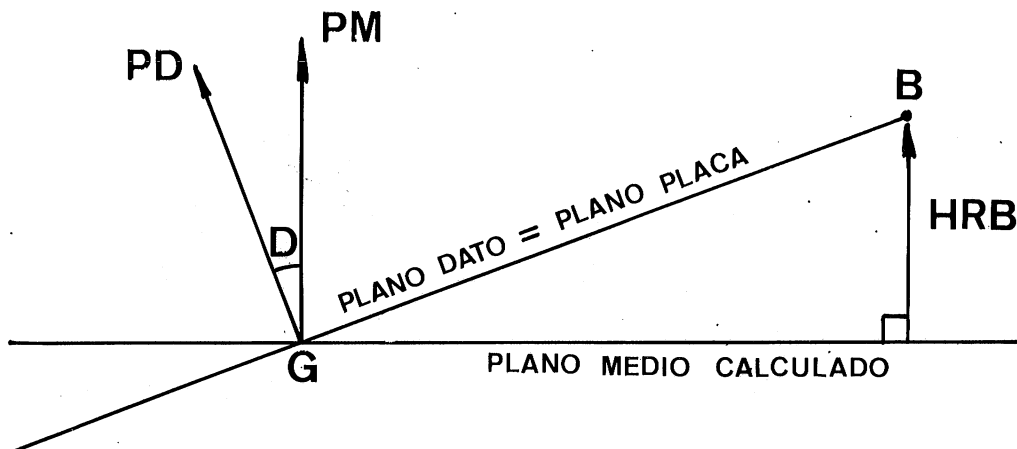


Fig. 5.—Relación entre la desviación angular y la altura de la irregularidad.

Fig. 5.—Relationship between angular deviation and irregularity height.

La diferencia esencial entre efectuar medidas con giro en el centro de la placa o giro en un apoyo de la misma, es que en el segundo caso se efectúan medidas de planos que tienen un punto común: el de giro de la placa. Esto permite, como se verá, el cálculo de las alturas de las irregularidades con este tipo de medidas; cosa que no es factible con medidas efectuadas por giro en el centro.

En cada punto de observación, en función de los resultados que se quieran obtener, pueden realizarse medidas con diferentes dispositivos y radios.

2.3. Características del método

Para el conjunto de observaciones con cada radio de medida, dado que se efectúan en posiciones espaciadas un mismo ángulo GG puede obtenerse directamente el plano medio PM de las medidas efectuadas; sin necesidad de realizar ninguna corrección o ponderación de los datos medidos. En un afloramiento pequeño pueden realizarse gran cantidad de medidas, lo cual no es factible con otros procedimientos.

Para cada plano n medido puede calcularse, también, el ángulo que el polo de dicho plano forma con el polo del plano medio PM del conjunto de medidas realizadas con el mismo radio (Fig. 5). Dicho ángulo es la desviación angular de cada dato respecto al plano medio.

Si se realizan medidas con giro en un apoyo, todos los planos medidos tienen un punto común: el A de giro de la placa. Tras calcular el plano medio PM, es factible calcular, respecto a él, las alturas de las irregularidades HRB y HRC, bajo los puntos de apoyo de la placa B y C (Fig. 4); esto es inmediato después de calcular los ángulos DB y DC, dado que los radios de la placa son conocidos. Al ser los radios de la placa iguales, los puntos de apoyo B y C giran sobre la misma circunferencia siendo, pues, valores comparables entre sí. Se obtiene, de esta forma, un perfil de las irregularidades del plano estudiado según la circunferencia de apoyo rastreada por las patas B y C de la placa, a intervalos constantes de 5 grados (figs. 6, 7 y 8).

Las alturas de las irregularidades, tal como se han calculado $HRB = RADIO * SEN(DB)$, $HRC = RADIO * SEN(DC)$, tendrán valores positivos sobre el plano medio —plano de referencia— y negativos bajo él. El punto de giro A de la placa —punto común de todos los planos y por el que pasa el plano de referencia para el cálculo de las alturas— estará, en la práctica, en cualquier punto arbitrario de las irregularidades estudiadas. Esto origina que sea necesario referir todas las alturas calculadas al plano geométrico medio de las irregularidades: se transforman todas las alturas en positivas; se calcula su valor medio y se resta a todas las alturas dicho valor medio. Puede entonces dibujarse el perfil de las irregularidades (figs. 6, 7 y 8). Del perfil, directamente, se obtienen los valores máximos y mínimos que definen las semiamplitudes de las ondas de irregularidades, para ese radio de medida.

Si la amplitud de las irregularidades es constante (Fig. 9), diferentes estaciones con radios crecientes en un mismo punto de observación, darán alturas de irregularidades máximas semejantes, siendo, en este caso, las desviaciones angulares menores a mayor radio de medida con la placa de tres apoyos. El dispositivo de medida captará una onda completa de las irregularidades, siempre que su longitud de onda sea igual o menor a dos veces el radio de giro de la placa. Efectuando en un mismo punto medidas con varios tamaños de radios de placa, puede emplearse el primer criterio para detectar diferentes órdenes de irregularidades y definir sus amplitudes, y el segundo criterio para acotar sus longitudes de onda.

Cuando se realizan medidas con varios radios en un mismo punto de observación, si se quieren comparar entre sí las alturas de las irregularidades obtenidas con los diferentes radios de medida, es necesario emplear en su cálculo el mismo plano de referencia: plano medio del total de las medidas con diferentes radios.

En las figs. 5 y 9, se ha representado el vector normal al plano dato, vector normal al plano medio y la altura de la irregularidad bajo el punto B, HRB, en el mismo plano —cosa que no suele suceder— para mayor sencillez del esquema.

2.4. Secuencia de cálculos a efectuar con las medidas realizadas

Para el conjunto de medidas con cada radio de la placa se realizan los cálculos siguientes:

— Cálculo del valor del plano medio que corresponde al conjunto n de medidas realizadas.

— Desviaciones angulares. Cálculo de las desviaciones angulares respecto al plano medio de cada medida realizada. Cálculo de los valores máximo, medio y desviación estándar de las desviaciones angulares calculadas.

En el caso de medidas con giro en un apoyo:

— Alturas de las irregularidades. Cálculo de las alturas de las irregularidades HRB y HRC. Como plano de referencia se emplea el plano medio, a no ser que en un mismo punto de observación se realicen medidas con distintos radios; en este caso, el plano de referencia para el cálculo será el plano medio del total de medidas efectuadas con los diferentes radios. Se calculan también los valores máximo, medio y desviación estándar de los valores absolutos de las alturas de irregularidades calculadas.

— Histograma de alturas de irregularidades.

— Dibujo del perfil de alturas de irregularidades respecto al plano medio según circunferencia de medidas.

Todos estos cálculos pueden realizarse y representarse en un único diagrama (figs. 6, 7 y 8), mediante un ordenador personal y una impresora matricial. En dichas figuras es de destacar la representación del perfil de irregularidades en el que se ha indicado en ordenadas, las alturas de irregularidades positivas sobre el plano medio, y negativas bajo él, y en abscisas los puntos

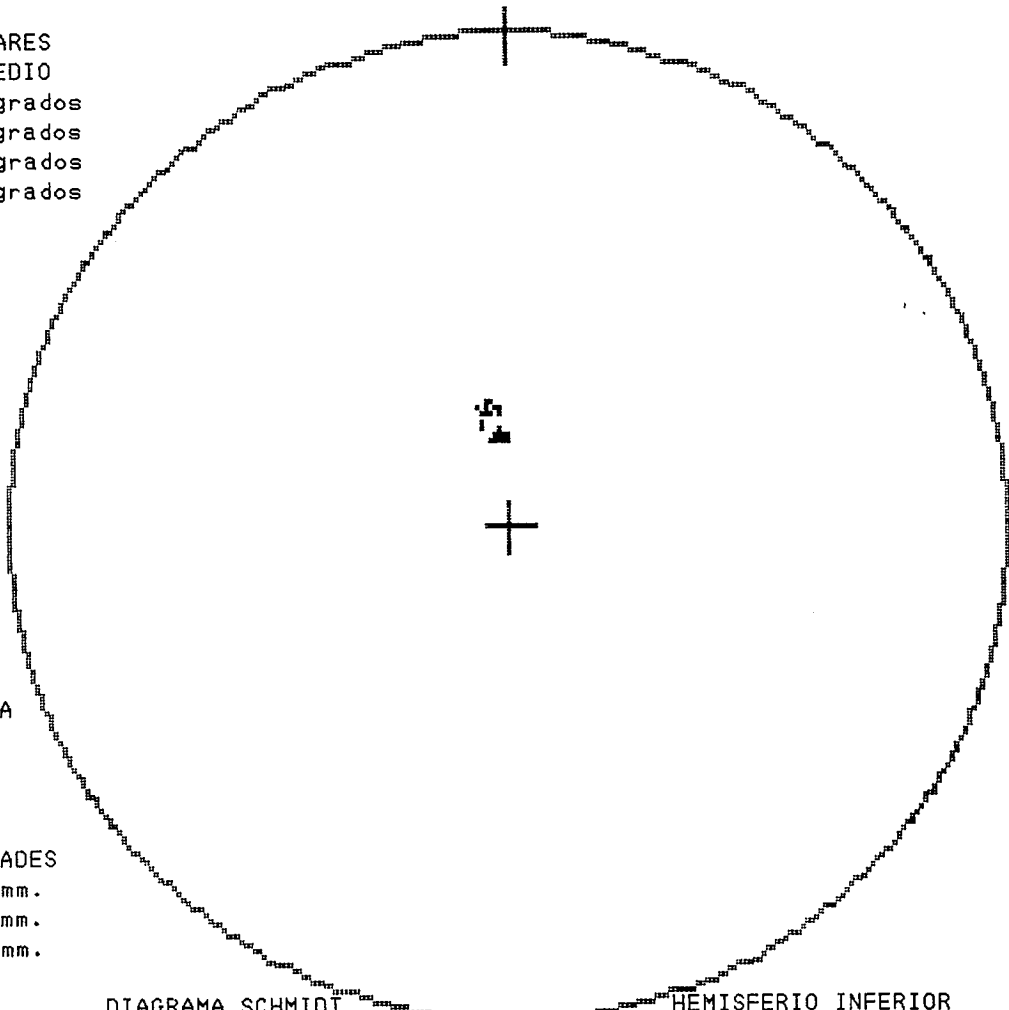
POLO MEDIO

ESTACION.....F-02-20

DIR. BUZAMIENTO....171.4
 BUZAMIENTO.....17.8

Tipo medida.....GIRO UN APOYO
 Radio A.....20.00 Cm.

DESVIACIONES ANGULARES
 RESPECTO AL POLO MEDIO
 Máxima..... 3.7 grados
 Mínima..... 1.1 grados
 Media..... 2.6 grados
 Des.Standard. 0.6 grados



PLANO DE REFERENCIA
 DIR. BUZ.....172.8
 BUZAMIENTO... 17.7

ALTURAS DE RUGOSIDADES
 Máxima..... 7.8 mm.
 Media..... 3.1 mm.
 Des.Standard. 1.8 mm.

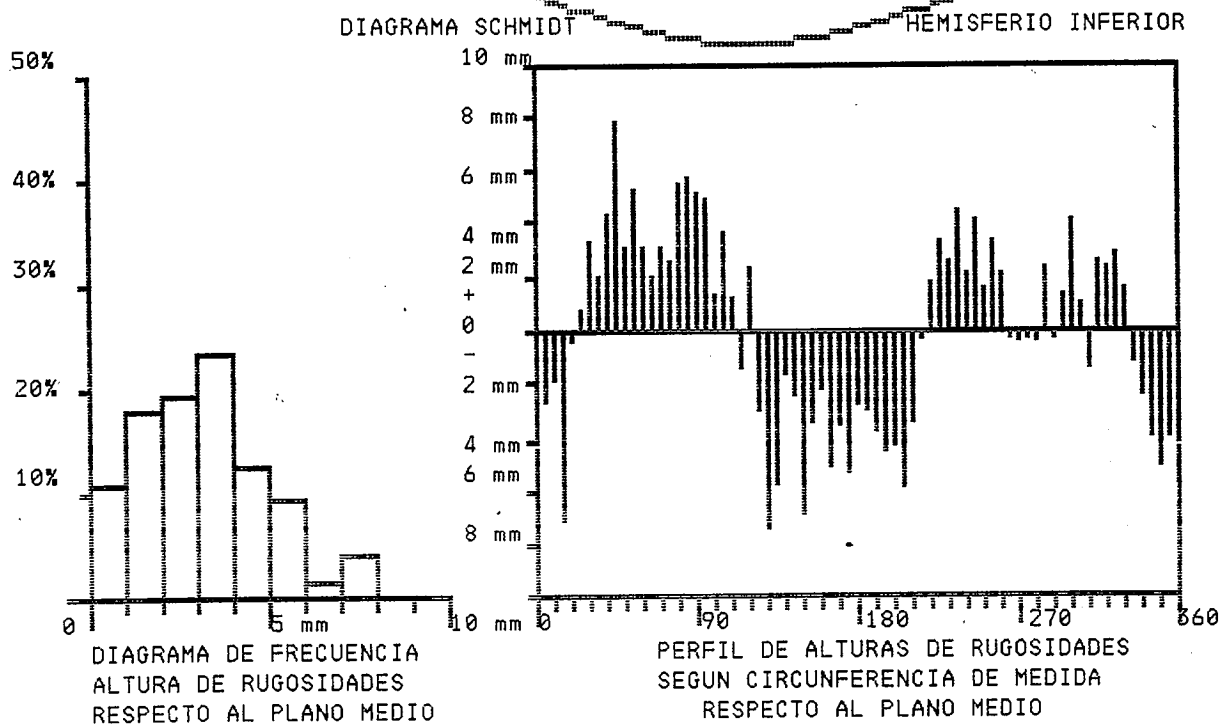


Fig. 6.—Resultado de las medidas con giro en un apoyo y radio 20 cm en el punto de observación 02.

Fig. 6.—Results of the measurements for rotation around one pin and 20 cm radius in the observation point 02.

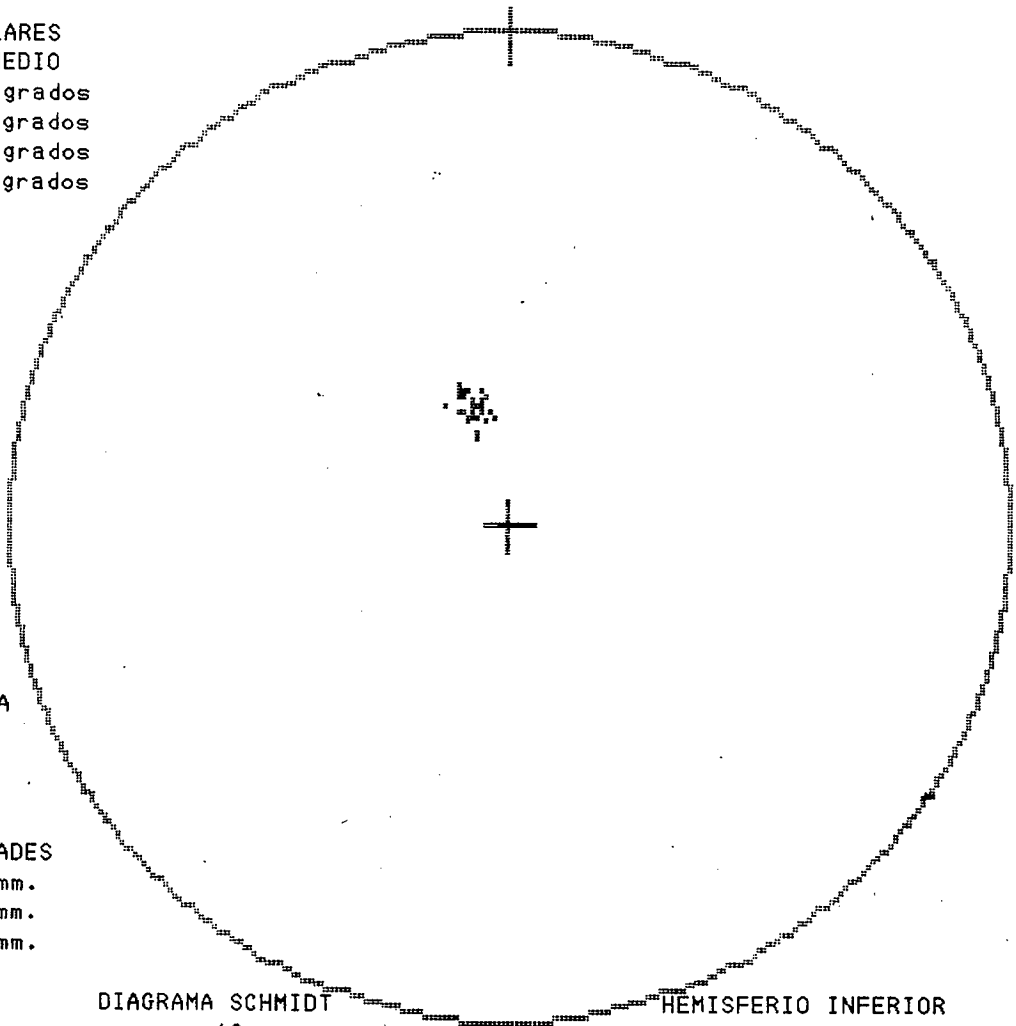
POLO MEDIO

ESTACION.....F-03-10

DIR. BUZAMIENTO....163.0
 BUZAMIENTO.....20.8

Tipo medida.....GIRO UN APOYO
 Radio A.....10.00 Cm.

DESVIACIONES ANGULARES
 RESPECTO AL POLO MEDIO
 Máxima..... 4.9 grados
 Mínima..... 0.4 grados
 Media..... 2.4 grados
 Des.Standard. 1.1 grados



PLANO DE REFERENCIA
 DIR. BUZ.....164.1
 BUZAMIENTO... 21.1

ALTURAS DE RUGOSIDADES
 Máxima..... 6.7 mm.
 Media..... 2.1 mm.
 Des.Standard. 1.4 mm.

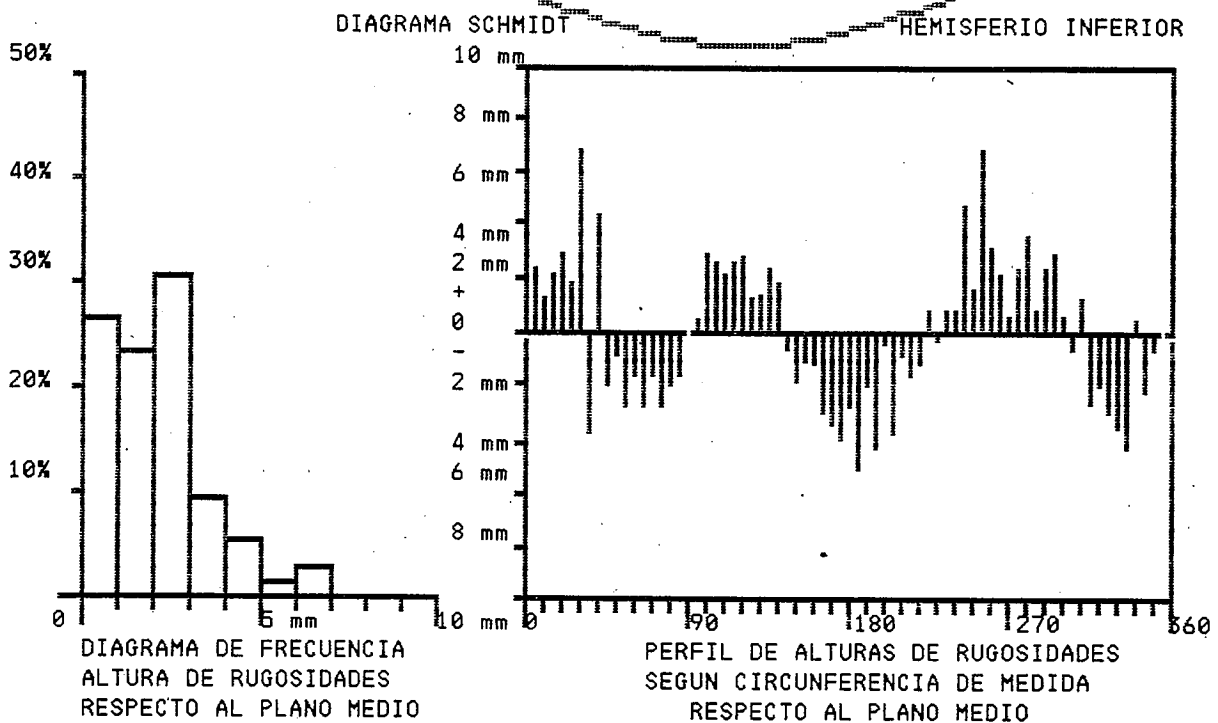


Fig. 7.—Resultados de las medidas con giro en un apoyo y radio 10 cm en el punto de observación 03.

Fig. 7.—Results of the measurements for rotation around one pin and 10 cm radius in the observation point 03.

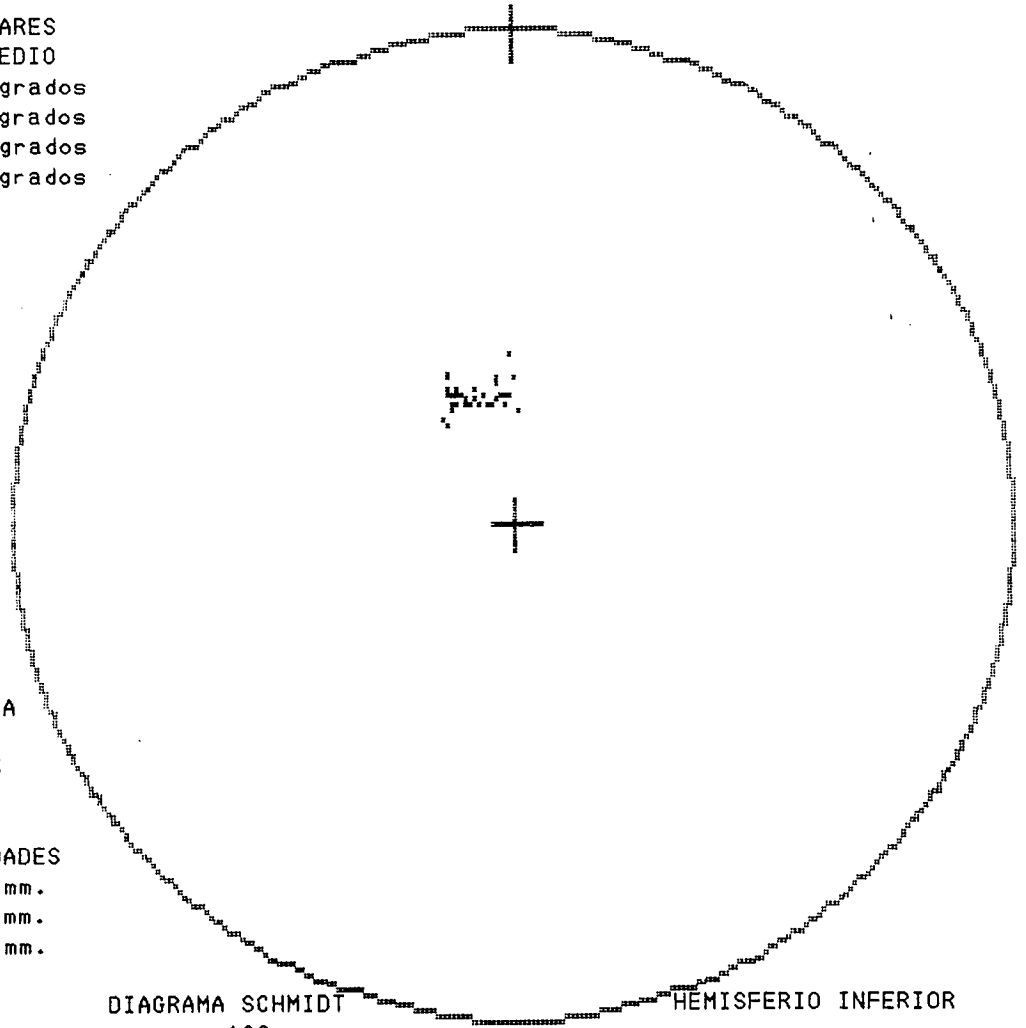
POLO MEDIO

ESTACION.....F-05-50

DIR. BUZAMIENTO....163.6
 BUZAMIENTO.....22.6

Tipo medida.....GIRO UN APOYO
 Radio A.....50.00 Cm.

DESVIACIONES ANGULARES
 RESPECTO AL POLO MEDIO
 Máxima..... 8.9 grados
 Mínima..... 1.0 grados
 Media..... 3.9 grados
 Des.Standard. 2.0 grados



PLANO DE REFERENCIA
 DIR. BUZ.....174.3
 BUZAMIENTO... 20.3

ALTURAS DE RUGOSIDADES
 Máxima.....63.1 mm.
 Media.....25.3 mm.
 Des.Standard.17.0 mm.

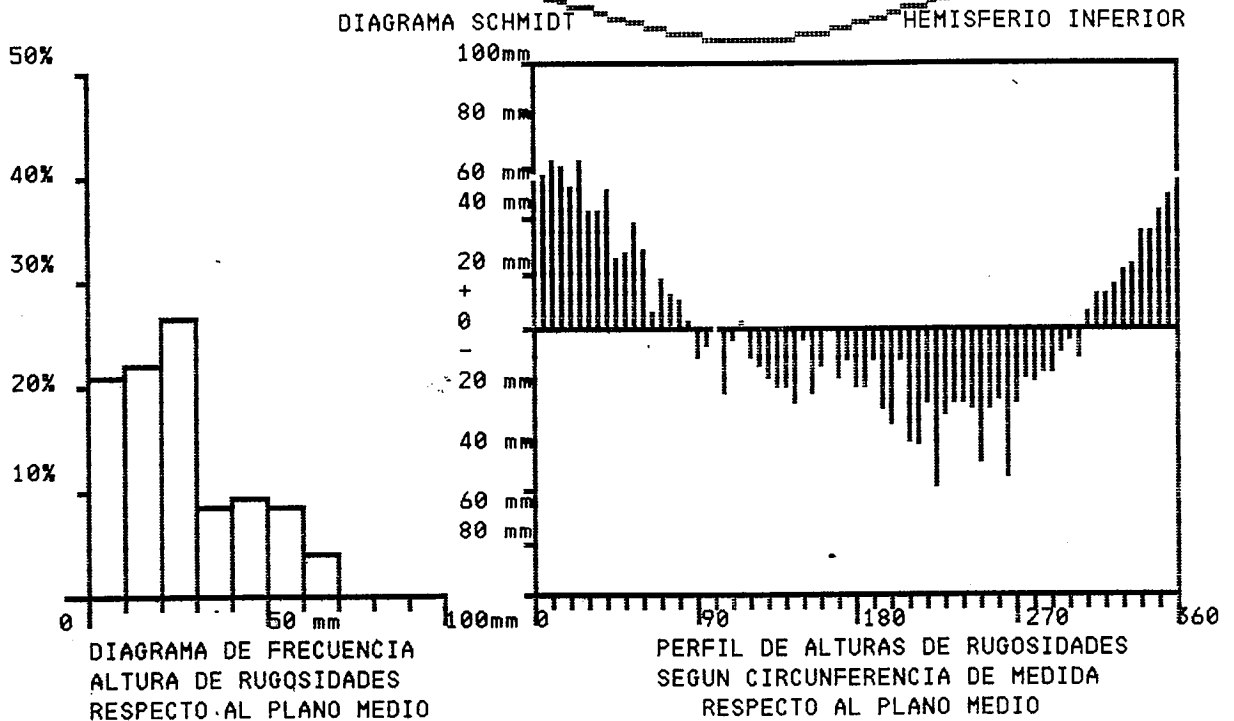


Fig. 8.—Resultados de las medidas con giro en un apoyo y radio 50 cm en el punto de observación 05.

Fig. 8.—Results of the measurements for rotation around one pin and 50 cm radius in the observation point 05.

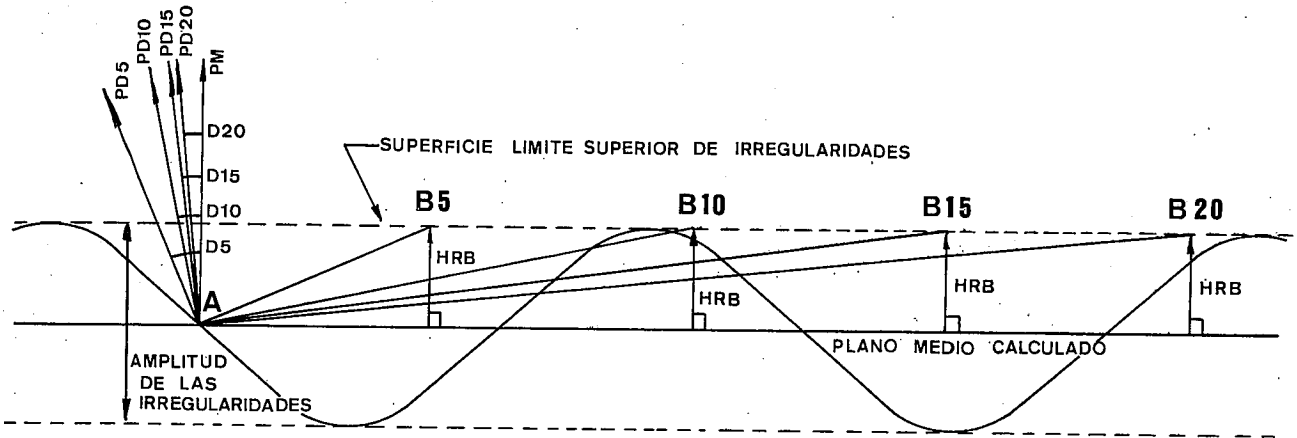


Fig. 9.—Relación, para diferentes radios de la placa de tres apoyos, entre desviaciones angulares de los diferentes planos datos y alturas de irregularidades. D5 a D20, desviaciones angulares. PD5 a PD20, planos dato. A-B5 a A-B20 radios de la placa de tres apoyos. HRB altura de las irregularidades.

Fig. 9.—Relationship, for various radii of tripod plate, between angular deviations, of the different data planes, and irregularity heights. D5 to D20, angular deviations, PD5 to PD20, data planes, A-B5 to A-B20, radius of tripod plate, HRB irregularity heights.

de medida sobre la circunferencia, en grados respecto a la línea origen de giros. Cada trazo, de 5 en 5 grados, corresponde a la altura de la irregularidad en un punto de apoyo de las patas de la placa sobre el plano estudiado. Pueden apreciarse perfectamente los ascensos y descensos del perfil: reflejo de las irregularidades de la superficie estudiada.

2.5. Resultados que se obtienen

El valor medio de un conjunto de datos será realmente un valor que refleje el fenómeno estudiado, si la muestra es representativa de dicho fenómeno y sus individuos son independientes y homogéneos. Esto, en nuestro caso, se garantiza por el aparato de medida —placa de tres apoyos— y el método empleado: los individuos que se analizan —planos— están definidos por tres puntos con posiciones relativas constantes que cubren toda la circunferencia de medidas a intervalos regulares. Estas condiciones no suelen darse con otros métodos de medida.

Para cada radio de medida, con el dispositivo adireccional o el direccional, se obtiene: un valor medio muy exacto del plano y valores numéricos de la dispersión angular de los datos. Con el sistema por giro en un apoyo, además, se obtienen valores de la amplitud de las irregularidades, para cada radio de medida.

De la comparación entre sí de los resultados de medidas con diferentes radios, en un mismo punto de observación, se puede detectar la existencia de más de un orden de irregularidades y obtener, de cada uno de ellos, su longitud de onda y orientación en el plano portador. En estos casos, se puede concretar la dispersión angular originada por cada orden de irregularidades.

De la comparación entre sí de resultados de diferentes puntos de observación —efectuados sobre una misma superficie— se pueden obtener las dispersiones angulares producidas por ondulaciones o alabeamientos, de la superficie estudiada, de orden mayor que los radios

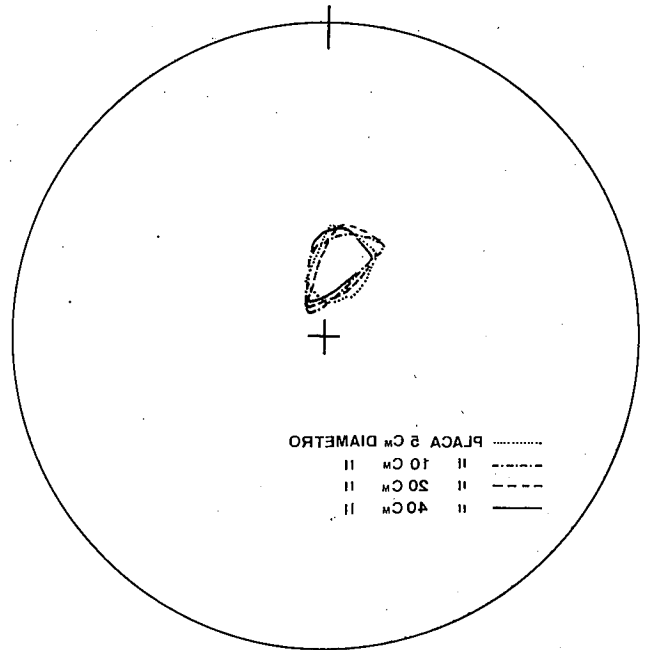


Fig. 10.—Representación estereográfica de las dispersiones de polos obtenidos mediante medidas con placas circulares.

Fig. 10.—Stereographic representation of pole scatter obtained from measurements with circular plates.

de medida con las placa; y por procedimientos semicuantitativos (figs. 12 y 13), información sobre las longitudes de onda de los diferentes órdenes de irregularidades y orientación de las mismas en el plano portador.

3. CASO PRÁCTICO ESTUDIADO

El método se ha aplicado al estudio de una superficie granítica situada en las inmediaciones de la Silla de Felipe II en El Escorial, Madrid. En cinco puntos de observación (Fig. 12), se han realizado medidas con diferentes radios con dispositivo direccional, adireccional

Tabla I.—Placa de tres apoyos. Giro en el centro. Resultados de los cálculos con las medidas de diferentes radios. S-01 a S-05, numeración de los puntos de observación. A05 a A20 radios en centímetros de las medidas adireccionales. D 50 radio en centímetros de las medidas direccionales.

Table I.—Tripod plate. Rotation in the center. Results of the calculations with station data; S-01 to S-05, number of station; A05 to A20, radius in cm of the adirectional measurements; D50, radius in cm of the directional measurements.

Medidas	Dir. Buz.	Buz.	Desviación angular		
			Max.	Med.	Des. Sta.
S-01-A05	178,5	18,5	2,0	1,1	0,5
S-01-A10	176,0	17,5	3,0	1,2	0,7
S-01-A15	176,9	17,9	1,9	1,0	0,5
S-01-A20	178,0	18,2	1,2	0,6	0,3
S-01-D50	178,2	18,0	3,5	2,1	0,7
S-02-A05	174,2	17,7	3,2	1,8	0,8
S-02-A10	175,6	16,5	2,5	1,5	0,4
S-02-A15	172,9	18,1	2,6	1,5	0,6
S-02-A20	171,2	18,4	2,8	1,5	0,7
S-02-D50	172,9	18,9	4,2	2,0	1,1
S-03-A05	163,5	22,9	2,9	1,5	0,6
S-03-A10	163,7	20,7	3,3	1,5	0,7
S-03-A15	163,6	20,7	1,8	0,9	0,4
S-03-A20	164,6	20,7	1,6	0,8	0,3
S-03-D50	166,7	20,4	6,5	2,0	1,4
S-04-A05	167,6	19,3	2,3	0,9	0,5
S-04-A10	169,0	18,0	3,2	1,6	0,8
S-04-A15	169,7	18,0	2,2	1,2	0,5
S-04-A20	170,2	18,8	2,9	1,5	0,7
S-04-D50	169,0	19,1	3,3	1,5	0,8
S-05-A05	179,7	19,6	2,2	1,0	0,4
S-05-A10	175,6	20,4	2,9	1,0	0,5
S-05-A15	174,2	20,3	1,7	0,9	0,4
S-05-A20	172,1	20,4	1,8	0,9	0,4
S-05-D50	171,0	21,1	7,1	3,0	1,6

y con giro en un apoyo. Para comparar los resultados obtenidos, se han efectuado estaciones con placas circulares (Método de Fecker y Rengers, 1971) sobre una malla regular de 40 x 40 centímetros. En total se han realizado 1.812 determinaciones de dirección de buzamiento y buzamiento, en 16 horas de trabajo de campo. El tiempo empleado en realizar las medidas con cada radio ha oscilado entre 8 y 12 minutos.

En las tablas I a V se presentan los valores numéricos resultado de las observaciones realizadas. En las figs. 12 y 13 se muestran unos croquis de la superficie del afloramiento estudiado.

Las dispersiones angulares que se obtienen por el sistema de medida con placas circulares (Tabla III), son del orden del doble o superiores a las obtenidas con la placa de tres apoyos (tablas I, II y IV). Gráficamente

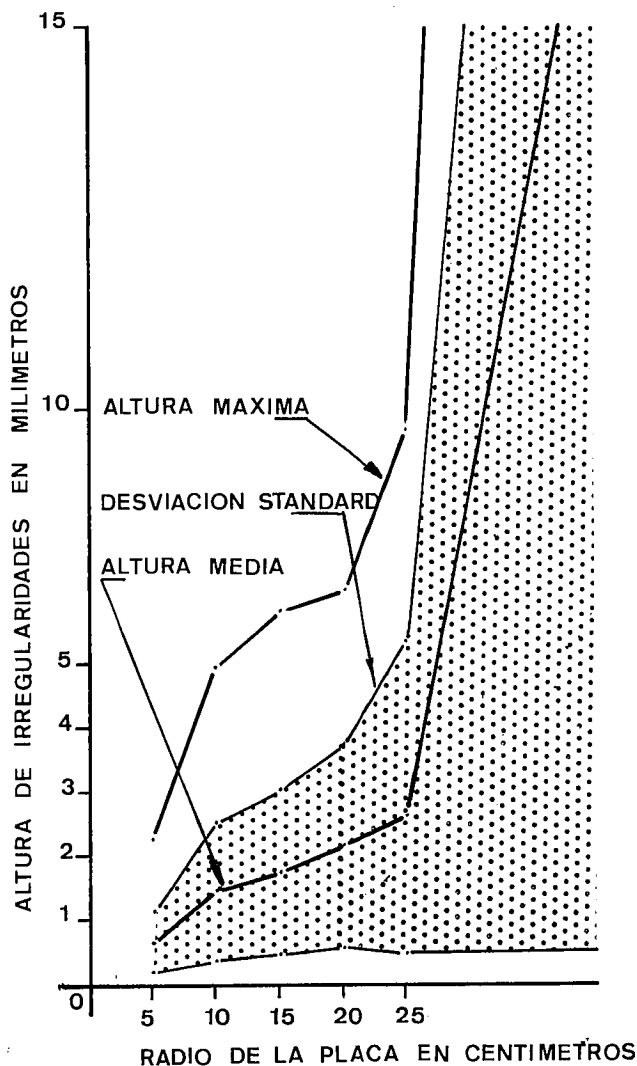


Fig. 11.—Representación gráfica de los valores de alturas de irregularidades medidas en el punto de observación 01.

Fig. 11.—Graphic representation of height values of irregularities measured on the observation point 01.

puede apreciarse esto, comparando la Fig. 10 con las 6, 7 y 8.

En la Tabla I se reflejan los resultados de las medidas con dispositivo «adireccional» y «direccional». De su comparación con los valores de la Tabla II, medidas con giro en un apoyo, se aprecian valores de dispersiones angulares algo menores con el dispositivo «adireccional»; esto es consecuencia del mayor tamaño del triángulo definido por los puntos de apoyo, con este dispositivo, para el mismo radio de giro de la placa. En este sentido el dispositivo «direccional» de radio 50 proporciona unos resultados superiores a su equivalente de igual radio y giro en un apoyo. De lo anterior se sigue que parece más adecuado emplear los dispositivos «adireccional» y «direccional» cuando no se precise información sobre las dimensiones de las irregularidades, dada la mejor definición de estos dispositivos y el menor número de medidas que se precisa tomar con ellos.

Respecto a los valores del plano medio obtenido por los diferentes procedimientos (tabla V), el resultado es

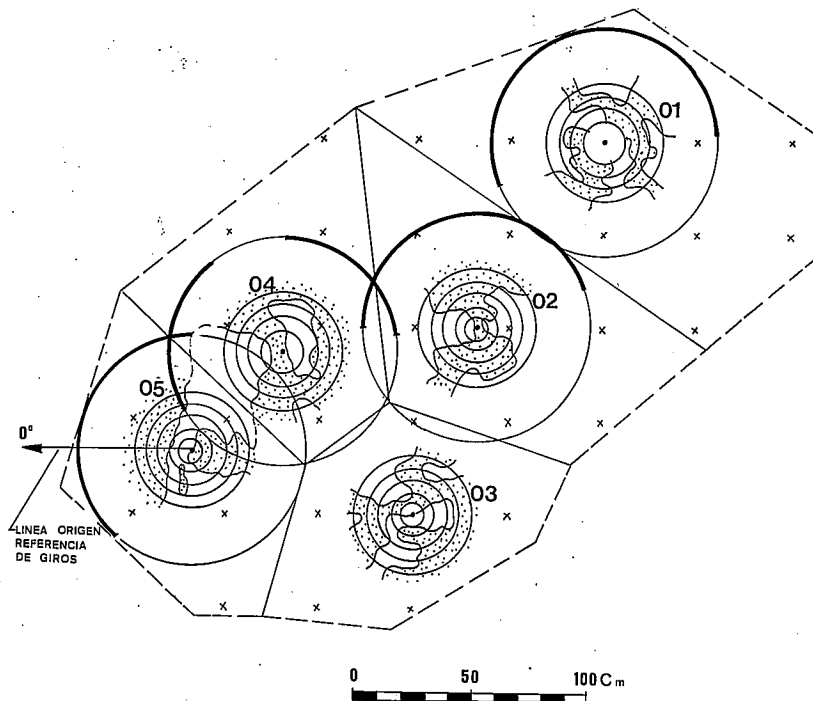


Fig. 12.—Planta de situación de puntos de observación en el afloramiento, polígonos de influencia y circunferencias de barrido de la placa de tres apoyos. 01 a 05, centros de los puntos de observación de la placa de tres apoyos. X puntos de medida con placas circulares. Las zonas punteadas y las líneas de trazo grueso sobre los círculos de radio 50 centímetros corresponden a la zona de la superficie estudiada situada sobre el plano de referencia.

Fig. 12.—Sketch of location of observation points in the outcrop, influence polygon of each station and scanning circumference of tripod plate. 01 to 05, reading stations of tripod plate. X points of reading with circular plates. The dotted areas and the dark lines of the circles of 50 cm radius correspond to the zones of the outcrop located over the average plane.

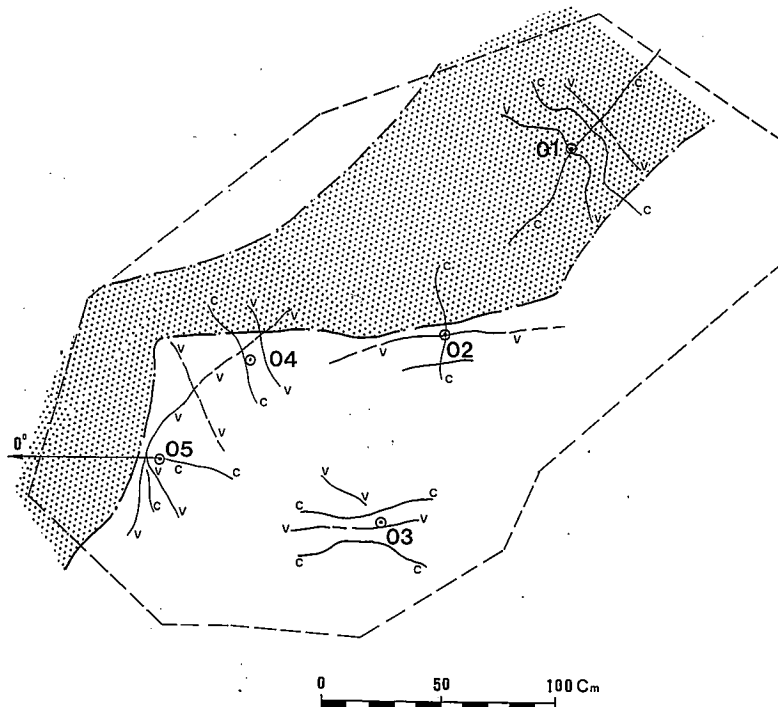


Fig. 13.—Planta del afloramiento con los ejes de crestas «C» y valles «V» de irregularidades del segundo nivel. El punteado representa la zona de la superficie estudiada, sobre el plano medio, para el tercer nivel de irregularidades.

Fig. 13.—Sketch of the outcrop with the axis of the ridges «C» and valleys «V» of the second level irregularities. The dotted area represent the outcrop zone located over the average plane, for the third level irregularities.

Tabla II.—Placa de tres apoyos. Giro en un apoyo. Resultados de los cálculos con las medidas de diferentes radios. F-01 a F-05, numeración de los puntos de observación. 05 a 50 radios en centímetros de las medidas.

Table II.—Tripod plate. Rotation around one pin. Results of the calculation with data station. F-01 to F-05, number of the station; 05 to 50, radius in cm of the station.

Medidas	Dir. Buz	Buz	Desviación angular			Altura irregularid. mm		
			Max.	Med.	Des. Sta.	Max.	Med.	Des. Stan
F-01-05	178,5	18,2	4,3	1,6	0,9	2,3	0,7	0,5
F-01-10	176,7	17,7	3,3	1,7	0,7	5,0	1,5	1,1
F-01-15	177,5	17,8	2,7	1,5	0,5	5,9	1,8	1,3
F-01-20	178,1	18,0	3,3	1,4	0,7	6,2	2,2	1,6
F-01-25	179,0	18,0	2,1	1,1	0,5	8,7	2,7	2,2
F-01-50	178,0	21,4	19,2	4,3	3,8	60,0	24,6	29,8
F-02-05	172,9	17,5	5,9	2,7	1,0	2,5	0,8	0,6
F-02-10	175,8	16,7	3,6	1,8	0,8	6,1	2,3	1,4
F-02-15	172,9	17,5	3,9	2,1	0,6	7,4	2,0	1,6
F-02-20	171,4	17,8	3,7	2,6	0,6	7,6	3,0	1,7
F-02-25	171,1	18,9	4,3	3,1	0,7	15,0	5,0	3,4
F-02-50	171,2	21,0	5,0	2,0	0,9	36,4	18,9	9,3
F-03-05	164,0	22,7	5,5	3,3	1,2	3,2	1,2	0,9
F-03-10	163,0	20,8	4,9	2,4	1,2	6,8	2,0	1,4
F-03-15	163,8	20,6	3,4	1,8	0,6	5,4	1,8	1,4
F-03-20	165,1	21,0	5,3	2,1	0,9	8,2	2,7	2,4
F-03-25	164,8	20,6	5,3	2,0	1,0	35,4	14,3	9,0
F-03-50	169,7	21,5	7,6	3,2	1,8	50,1	18,0	12,5
F-04-05	167,7	18,3	4,3	3,0	0,6	2,0	0,7	0,9
F-04-10	168,0	17,8	5,6	3,9	0,7	4,2	1,4	1,1
F-04-15	169,6	17,6	4,6	3,0	0,6	5,2	2,0	1,3
F-04-20	170,4	17,6	6,8	3,3	1,0	8,2	3,2	2,5
F-04-25	170,2	18,4	3,9	2,4	0,6	8,5	2,7	2,4
F-04-50	170,1	20,3	7,7	3,1	1,7	64,4	15,1	13,3
F-05-05	180,5	19,6	3,4	1,8	0,7	4,1	1,4	0,8
F-05-10	176,0	20,4	2,5	1,3	0,6	3,8	1,3	0,8
F-05-15	173,5	20,0	3,9	1,9	0,7	6,8	2,1	1,5
F-05-20	172,5	20,5	3,9	2,3	0,8	9,2	3,4	2,0
F-05-25	170,0	21,2	4,4	2,5	0,9	17,8	5,6	4,7
F-05-50	163,3	22,6	8,6	3,9	2,0	63,1	25,3	17,0

Tabla III.—Placas circulares. Resultado de los cálculos con los datos de las medidas efectuadas.

Table III.—Circular plates. Results of the calculations with the data of the readings.

Medidas	Dir. Buz.	Buz.	Desviación angular		
			Max.	Med.	Des. Sta.
Diámetro-05	169,8	20,4	10,5	4,8	2,8
Diámetro-10	170,1	20,7	14,7	4,9	2,9
Diámetro-20	170,3	20,4	12,9	4,3	2,9
Diámetro-40	170,3	21,2	13,2	4,2	2,7

Tabla IV.—Valores medios del conjunto de medidas de cada punto de observación.

Table IV.—Average values of the measurements in every observation point.

Valores totales medios de cada punto de observación	Dir. Buz.	Buz.	Desviación angular		
			Max.	Med.	Des. Sta.
Media de medidas F-01-05 A 25	177,9	17,9	0,5	0,3	0,1
Media de medidas F-02-05 A 25	172,8	12,7	1,3	0,7	0,5
Media de medidas F-03-05 A 25	164,1	21,1	1,6	0,7	0,4
Media de medidas F-04-05 A 25	169,0	18,0	0,5	0,5	0,1
Media de medidas F-05-05 A 25	174,3	20,3	2,2	1,2	0,7

Tabla V.—Valores medios de las medidas realizadas con la placa de tres apoyos, ponderadas en relación a sus áreas de influencia, y total de medidas de placas circulares.

Table V.—Average values of the measurements taken with tripod plate, weighted according to their respective influence areas, and total of circular plate data.

Valores totales medios	Dir. Buz.	Buz.	Desviación angular		
			Max.	Med.	Des. Sta.
Media ponderada med. adireccionales	170,8	19,3	4,4	2,1	0,9
Media ponderada med. direccionales	170,6	19,7	3,0	1,6	0,8
Media ponderada med. giro un apoyo	170,7	19,2	3,0	2,0	0,6
Media estaciones placas circulares	170,1	20,7	14,6	4,6	2,8

prácticamente idéntico, ligeramente superior en buzamiento en las medidas con placas circulares.

De los valores numéricos de alturas de las irregularidades obtenidos (Tabla II), se deduce la existencia de tres órdenes de irregularidades en la superficie granítica estudiada.

— Un primer nivel de irregularidades pequeñas, originadas por el grano de los minerales de la roca, alturas medias entre 0,5 y 1,0 milímetros, medidas de radio 5 centímetros. Corresponden a rugosidades de semiamplitud entre 2,0 y 2,5 milímetros, (ver valores máximos de la Tabla II).

— Un segundo nivel de irregularidades intermedias, de alturas medias entre 1,5 y 3,2 milímetros, medidas de radios 10 a 20 centímetros. Corresponden a pequeñas ondulaciones de la superficie estudiada de semiamplitud entre 4,3 y 8,0 milímetros.

— Un tercer nivel de irregularidades, alturas medias entre 15,1 y 25,3 milímetros, detectado por las medidas de radio 25 y 50 centímetros; ondulaciones de semiamplitud mínima de 36,4 a 64,4 milímetros.

En el gráfico de la Fig. 11, pueden apreciarse para el punto de observación 01 (medidas F-01-05 a F-01-50), los tres órdenes de irregularidades citados. La longitud de onda del primer nivel es inferior a 10 cm, doble del radio de la placa de 5 cm. El segundo nivel, definido en el gráfico de la Fig. 11 por la zona «horizontal» de radios 10, 15 y 20 cm, tendrá una longitud de onda entre 10 cm, que no la detecta, y 40 cm, doble del radio de la placa de 20 cm, última que la capta con claridad. El tercer nivel (medidas de radio 50 cm), tendrá una longitud de onda mayor que 40 cm, doble del radio de la última placa que no la detecta.

En la Fig. 12, se han representado, los polígonos de las áreas de influencia de cada punto de observación y las circunferencias de barrido de la placa de tres apoyos. Sobre estas últimas, se indican las zonas de la superficie que se encuentran sobre y bajo el plano medio calculado de cada punto de observación; deducidas del perfil de rugosidad (figs. 6, 7 y 8). Puede apreciarse, en cada punto de observación, la existencia de unas ondulaciones correlacionables de una a otra circunferencia de barrido, que reflejan las direcciones preferentes de las irregularidades de segundo nivel. Los ejes de estas alineaciones de irregularidades, crestas y valles, se han representado en la Fig. 13, donde se pueden apre-

ciar sus tendencias. Se han representado también, en esta figura, los límites de las zonas sobre y bajo el plano medio, irregularidades del tercer nivel, definidas por las circunferencias de radio 50 cm.

De la Fig. 13, se deducen las semilongitudes de onda de las irregularidades del segundo nivel, distancias entre ejes de crestas y valles, y del tercer nivel, límites entre zonas sobre y bajo el plano medio. En este caso la semilongitud de onda de las irregularidades del segundo nivel oscilaría entre 5,5 y 16 cm. En el tercer nivel la semilongitud de onda oscila entre 26 y 100 cm.

Las desviaciones angulares originadas por las irregularidades del primer nivel, rugosidades de la roca, media de los valores de la Tabla II, es de 0,7° con una desviación standard de 0,6°.

Las desviaciones angulares originadas por las irregularidades del segundo nivel, media de los valores medios de la Tabla II, es de 2,0° con una desviación standard de 1,4°.

De la comparación de los valores de los planos medios de cada estación entre sí, teniendo en cuenta sus áreas de influencia (Fig. 12), se obtienen los resultados de la Tabla V. El valor de la desviación angular obtenida de esa comparación es de 2,0° de desviación media con 0,6° de desviación standard. Estas desviaciones son el reflejo de las ondulaciones de escala más grande. El valor del plano medio obtenido, en este caso, es el que corresponda a la totalidad de la superficie estudiada.

El plano medio solución que se deduce del estudio con la placa de tres apoyos con estaciones adireccionales, direccionales o por giro en un apoyo, es prácticamente idéntico al obtenido con el método de las placas circulares. La desviación angular media obtenida por el método de las placas circulares es de 4,6°; que es igual a la suma de las desviaciones medias angulares calculadas con el método de la placa de tres apoyos en los tres niveles de irregularidades definidos: 0,7° + 2,0° + 2,0° = 4,7°; parece pues un método de medida que tiene gran capacidad de discriminación.

El método propuesto, en conclusión, es un procedimiento de medida objetivo, que precisa de un material de trabajo reducido, es de fácil operación en el terreno y requiere de superficies de afloramiento pequeñas; proporciona un valor promedio de la superficie estudiada; permite detectar la existencia de varios órdenes de irregularidades, definir sus geometrías especifi-

cas, sus orientaciones en la superficie portadora y cuantificar las dispersiones angulares que originan.

BIBLIOGRAFÍA

- Barton, N. y Choubey, V. (1977): The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*. Springer-Verlag. 10, 1 54.
- Barton, N. (Coordinador) (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. Jour. Rock. Mech. and Min. Sci. Geomechanics, Abstracts* 15, 6, 319-368.
- Fecker, E. y Rengers, N. (1971): Measurement of large scale roughnesses of rock planes by means of profilograph and geological compass. *Rock Fracture, Proc. Int. Symp. Rock Mech. Nancy*. Paper I. 18.
- Piteau, D.R. (1970): Geological factor significant to the stability of slopes cut in rock. *Proc. Symp. Plan. Open Pit Mines. Johannesburg*, Balkema, Amsterdam, 33-53.
- Ramírez Oyanguren, P., de la Cuadra Irizar, L., Laín Huerta, R. y Grijalbo Obeso, E. (1984): *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. *Inst. Geol. Min. España*, 362 p.

Recibido el 1 de junio de 1987
Aceptado el 6 de agosto de 1987