

PETROLOGIA ESTRUCTURAL: UN NUEVO METODO DE GEOLOGIA *

EARL INGERSON**

CONTENIDO

- Ideas Fundamentales
- Técnicas en el análisis de la petrofábrica
- Definiciones
- Aplicaciones de los métodos de la petrofábrica a problemas geológicos
 - Geología ígnea
 - Problemas de sedimentación
 - Problemas de rocas metamórficas
 - Problemas de significado económico
 - Menas
 - Lumar
 - Resistencia de los materiales de construcción
- Resumen

ILUSTRACIONES

- Fig. 7.—Método de registrar el eje *c* de un cristal uniaxial. (Corresponde al cristal ilustrado en la Lámina 9).
- Fig. 8.—Proyección de la figura 7 en la posición cero.
- Fig. 9.—Método de contar los puntos para la preparación de un diagrama de la petrofábrica.
- Fig. 10.—Diagrama de la figura 9 con las líneas dibujadas.
- Fig. 11.—Plano general de una masa intrusa situada en la parte Central de Suecia (según Larsson, 1935).
- Fig. 12a.—Diagrama de la petrofábrica correspondiente al eje *c* de 300 granos de hiperstena en una muestra de norita recogida en la parte septentrional de la

* Sometido por su autor en español, fué repasado por Teodoro Flores, Carl Fries Jr., Eduardo Schmitter y A. R. V. Arellano en un esfuerzo para reducir al mínimo los términos nuevos y para ajustar éstos a las mejores normas filológicas.

** Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington. (Actualmente el Dr. Ingerson es Jefe de Geoquímica y Petrología del "Geological Survey" de EE. UU.—Nota Ed.).

intrusión III mostrada en la figura 11. La concentración de los ejes entre las líneas es: (4-3)-2-1 %.

Fig. 12b.—Diagramas esquemáticos de las formas de los cristales de hiperstena (según Larsson, 1935).

Fig. 13a.—Diagrama de la petrofábrica de 280 polos, o normales a las laminillas de periclina correspondientes a la plagioclasa de una anortosita que se encuentra en la parte oriental de la intrusión III, figura 11. (5-4-3)-2-1 %.

Fig. 13b.—Diagramas esquemáticos de las formas de los cristales de plagioclasa (según Larsson, 1935).

Fig. 14.—Diagrama de la petrofábrica de la arenisca Moenkopi con huellas de oleaje, basado en el eje *c* de 300 granos de cuarzo; S_1 plano de sedimentación (bedding plane); R_A eje de las huellas de oleaje (según Ingerson, 1940).

Fig. 15.—Diagrama de la petrofábrica de la arenisca St. Peter, basado en el eje *c* de 155 granos de cuarzo. El plano de sedimentación yace en una posición aproximadamente horizontal, o sea perpendicular a la página (según Wayland, 1939).

Fig. 16.—Plano general del área de granulita en Laponia, que fué estudiada por Sáhama (1936).

Fig. 17.—Diagramas típicos del cuarzo y de la biotita, preparados por Sáhama (1936).

Fig. 18.—Diagramas típicos de la biotita, preparados por Sáhama (1936).

Cuadro 6.—Relación entre la resistencia y fábrica de ciertas rocas.

Lám. 8.—Bandada de pájaros que exhiben una orientación predilecta. (Fot. *Acme Newspictures*).

Lám. 9.—Fotografías que ilustran el método de orientar un cristal uniaxial, colocando su eje *c* paralelo al tubo del microscopio.

A. En una posición cualquiera (orientación fortuita).

B. Con el eje del cristal en el plano vertical N-S del polarizador. El círculo interior de la platina universal indica 304° .

C. Con el eje *c* paralelo al tubo del microscopio. El círculo vertical del eje E-W de la platina universal indica 332° . El punto inicial es 360° (o bien 0°).

Véanse las figuras 7 y 8 para el método de registrar los datos.

INTRODUCCION

En un comentario sobre la nueva edición del libro "Eruptive Rocks" de Shand, Rastall (1944), dice: "El hecho de que un mineral determinado tenga paralelepípedo elemental de determinadas dimensiones no indica necesariamente su origen e historia, así como el hecho de que un sello de medio penique sea verde no dilucida el desarrollo del sistema postal."

Este punto de vista representa la tendencia moderna, en todos los ramos de la petrología, de alejarse de la descripción pura e iniciar estudios interpretativos. En la petrología ígnea, Vogt empezó tales estudios fundamentales durante los últimos años del siglo XIX. En la petrología sedimentaria, Sorby inició los primeros estudios interpretativos.

Durante los primeros decenios del presente siglo, Sander y Schmidt¹ desarrollaron técnicas para el estudio intensivo y la interpretación de las rocas metamórficas. Estos métodos han dado resultados de gran trascendencia, no solamente en cuanto a las rocas metamórficas, sino también en relación con las de origen ígneo y sedimentario y parece que dichos métodos pueden igualmente aplicarse de una manera notable al estudio de los yacimientos minerales. Constituyen también un medio para resolver otros problemas económicos relacionados sólo indirectamente a la Geología.

IDEAS FUNDAMENTALES

Una de las contribuciones principales de Sander y Schmidt es un método de establecer y expresar cuantitativamente la orientación predilecta (preferred orientation) de los minerales que se hallan en las rocas. Por si acaso no esté clara la relación entre la orientación de los minerales y los problemas relativos al origen y a la historia de las rocas, pondremos un ejemplo familiar que demuestra la clase de interpretaciones que pueden hacerse. La fotografía en la lámina 8 muestra una bandada de pájaros reposados en fila sobre unos alambres de fuerza eléctrica. La mayoría de los pájaros se hallan de frente hacia la derecha; es decir, exhiben un alto grado de orientación predilecta.

Es evidente, después de estudiar esta ilustración, que los pájaros estaban en vuelo de la izquierda hacia la derecha. Los que se encuentran so-

bre los alambres en la parte derecha de la fotografía fueron los primeros en posar; al parecer, algunos de éstos que llevaban la delantera, no se dieron cuenta de que estaban por parar en los alambres y volaron más allá de ellos por no haberse apercebido, por lo que tuvieron que regresar para lograr su fin.

Con unos cuantos detalles más es posible hacer otras deducciones interesantes. En primer lugar, se debe advertir que estos pájaros son golondrinas, y sabemos que éstas se juntan así solamente durante sus migraciones semestrales. Por consiguiente, suponiendo que la fotografía se tomó en el otoño, podemos deducir que los pájaros se dirigían hacia el sur y que el fotógrafo estaba mirando hacia el oriente. A la inversa, si se sabe que la fotografía se tomó mirando hacia el oriente, es lógico deducir que la misma fué tomada durante el otoño, porque los pájaros volaban con rumbo hacia el sur.

Si se aplican estos mismo métodos de observación y deducción a la orientación predilecta y al arreglo de los granos minerales en las rocas, pueden hacerse en muchos casos, interpretaciones que no podrían hacerse de otro modo. El estudio estadístico detallado de la orientación de los minerales en las rocas generalmente se considera en la actualidad, como la principal técnica en el *análisis de la petrofábrica*. La definición original de este último término era mucho más amplia, porque el sentido del vocablo *fábrica*, como traducción de la palabra alemana *Gefüge*, incluye todas las relaciones de los elementos en las rocas con el espacio, desde el arreglo

¹ Véanse en particular, Sander, Bruno (1930), y Schmidt, Walter (1932).

reticular de los granos individuales hasta el crucero, la esquistosidad, la delineación, los ejes de plegamiento y las juntas. Sin embargo, cuando en un estudio se incluyen los detalles de las mayores de estas estructuras, hoy se emplea por lo general el término *petrología estructural*.

En algunos casos se puede percibir inmediatamente el origen de la orientación predilecta. Por ejemplo, en muchas geodas, incrustaciones y vetas, los cristales de cuarzo o de calcita se forman comúnmente con sus ejes mayores perpendiculares a la superficie a la que se hallan adheridos. En las rocas efusivas a veces se puede distinguir entre los cristales de forma tabular que están arreglados paralelos a las capas de escurrimiento (flow layers) y los cristales aciculares, o prismáticos que tienen sus ejes mayores más o menos paralelos a las líneas de escurrimiento (flow lines).

En otros tipos de roca, como las rocas metamórficas de gran profundidad, en las cuales la orientación predilecta es producida por movimientos diferenciales y de intrusiones, la relación entre la orientación y el movimiento que la produjo, es mucho menos clara que en los ejemplos que se acaban de mencionar. La manera en la que se exhibe la orientación predilecta en tales rocas depende de los minerales presentes y del grado de su orientación. Tratándose de un mineral alargado como la hornblenda, tal orientación puede apreciarse en forma de una alineación megascópica. Cuando los minerales como el cuarzo tienen un alto grado de orientación predilecta, ésta puede apreciarse examinando láminas bajo el microscopio

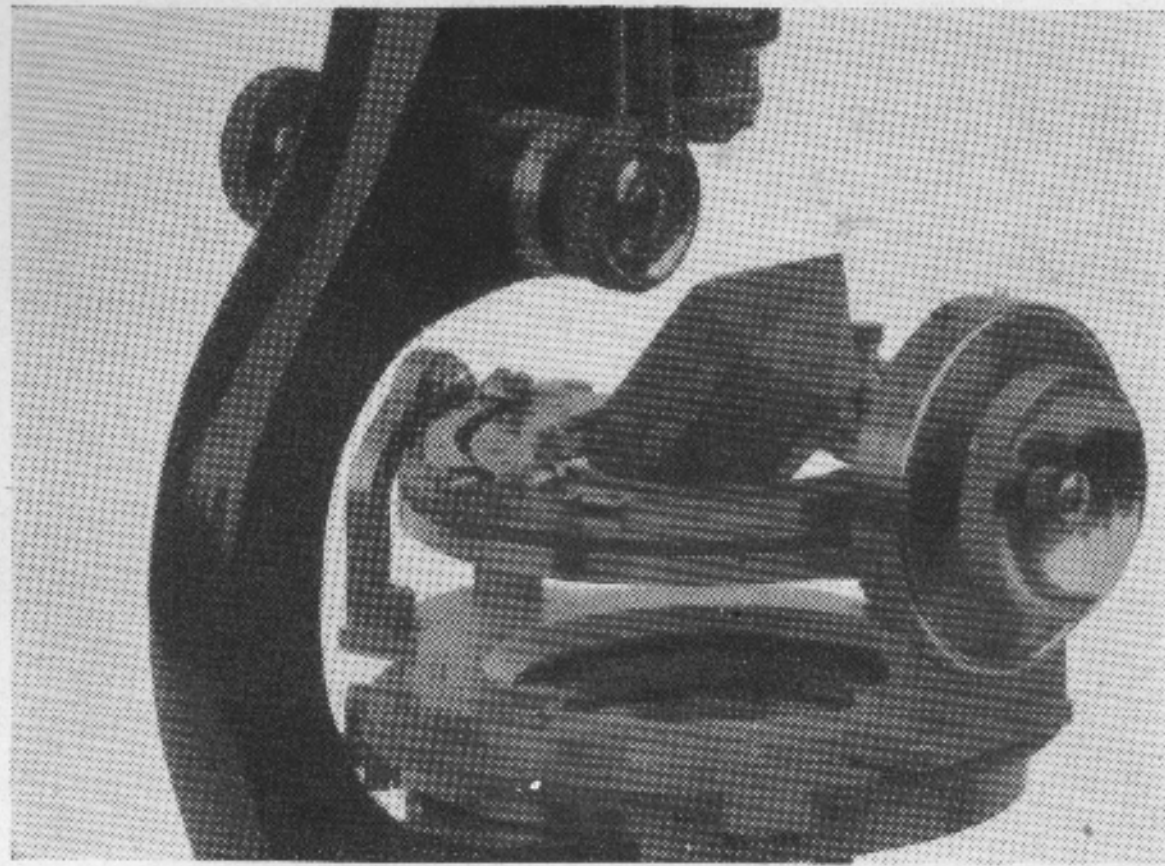
y entre nícoles cruzados. De otro modo, sería necesario hacer un estudio estadístico cuantitativo para demostrarla.

TECNICAS EN EL ANALISIS DE LA PETROFABRICA

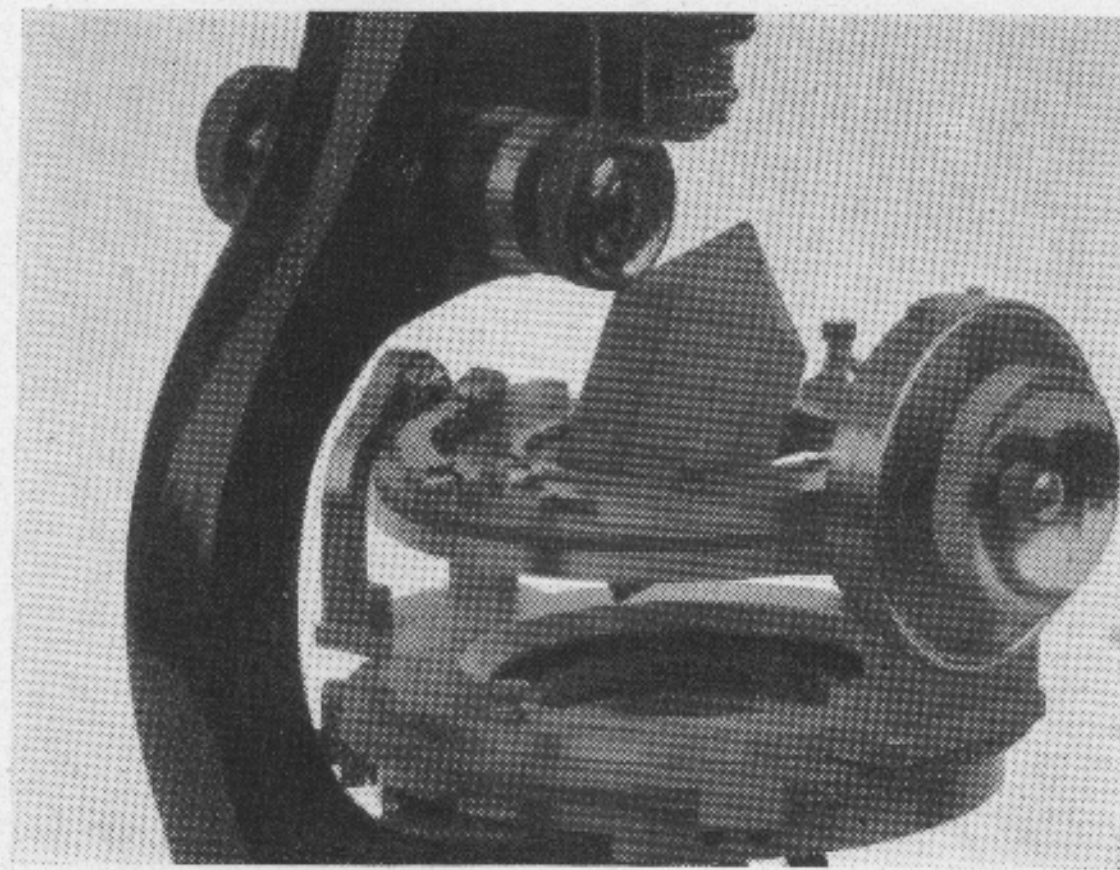
Para saber cómo se hacen las interpretaciones mencionadas, es necesario describir la *técnica empleada* en la determinación y representación de la orientación de los granos minerales. La manipulación varía según el elemento cristalográfico u óptico que se está observando, así como el carácter óptico del mineral (uniaxial o biaxial). El cuarzo se ofrece como un buen ejemplo, ya que la técnica empleada es intermedia entre la determinación de un elemento cristalográfico simple como el crucero, y la de las direcciones ópticas de un mineral biaxial. Además, el cuarzo es muy importante porque el número de las determinaciones practicadas sobre él es casi igual al de las hechas sobre todos los demás minerales en conjunto.

MANIPULACIONES DE LA PLATINA UNIVERSAL. Para hacer determinaciones exactas de los granos minerales que aparecen en una lámina, es preciso usar la platina universal de tres o más ejes de rotación, montada sobre la platina del microscopio. En la lámina 9 se demuestra el método para determinar la orientación de un cristal de cuarzo mediante el uso de la platina de cuatro ejes. La parte A de dicha lámina ilustra un modelo de cristal de cuarzo con orientación fortuita, es decir no orientado de una manera especial respecto a los ejes de la platina. Este cristal se gira sobre el

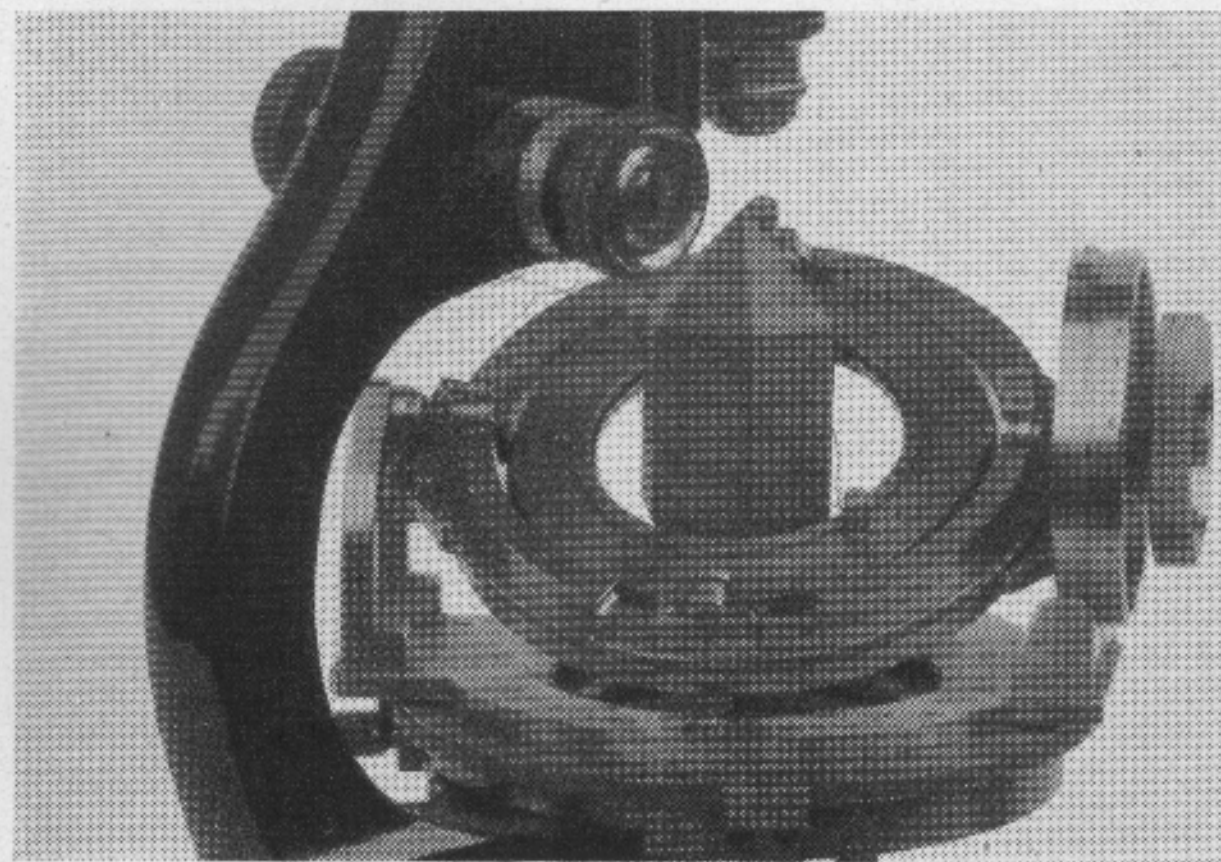
A. En una posición cualquiera (orientación fortuita).



B. Con el eje del cristal en el plano vertical N-S del polarizador. El círculo interior de la platina universal indica 304° .



C. Con el eje c paralelo al tubo del microscopio. El círculo vertical del eje E.W de la platina universal indica 332° . El punto inicial es 360° (o bien 0°). Véanse las figuras 7 y 8 para el método de registrar los datos.



Fotografías que ilustran el método de orientar un cristal uniaxial, colocando su eje c paralelo al tubo del microscopio

eje interior vertical de la platina, hasta que el plano de vibración del rayo lento (ϵ') coincida con la dirección N-S de vibración del nicol polarizador. En esta posición el eje c del cuarzo yace en el plano vertical N-S (lámina 9, B) y, desde luego, el grano se extingue. Entonces la platina del microscopio se gira unos 45° sobre su eje, y en la nueva posición el grano vuelve a iluminarse. Ahora la extinción se vuelve a obtener mediante la rotación sobre el eje E-W horizontal de la platina universal. Esta operación pone paralelos el eje c del cuarzo y el tubo del microscopio (lámina 9, C) y en tal posición el grano queda extinguido al girar la platina del microscopio en cualquier dirección.

EL REGISTRO DE LOS DATOS: Las orientaciones se registran en una red de proyección muy semejante a la red estereográfica, formada por áreas iguales en lugar de la red con valores angulares reales, pues en estudios estadísticos es importante poder comparar las concentraciones de las áreas diversas en diferentes partes del diagrama. El hemisferio inferior de la esfera de proyección se emplea en lugar del superior (que se usa en la mineralogía), para la proyección estereográfica de los cristales porque en la petrología estructural estamos tratando de estructuras que se extienden hacia abajo de la corteza terrestre. Se supone que todos los planos y líneas estructurales pasan por el centro de la esfera de proyección. Sus intersecciones con el hemisferio inferior aparecen en el plano de proyección como líneas, en el caso de los planos, y como puntos en el caso de las líneas.

Los puntos que representan, digamos, los ejes de los granos de cuarzo se registran realmente en una hoja de papel transparente que se pone sobre la red, dibujando en este papel una flecha en la posición del punto cero, o inicial, de la red. Para registrar el eje del grano de cuarzo, cuyo modo de determinación se acaba de demostrar, se gira dicho papel hasta que la flecha mencionada coincida con el número correspondiente al del círculo del eje vertical interior de la platina universal, o sea 304° en este caso (véase la figura 7), el punto se pone en el papel encima del meridiano cero de la red, y sobre el paralelo correspondiente al mismo número de grados obtenido al girar el eje horizontal E-W de la platina para colocar la dirección- c del cuarzo paralelo al tubo del microscopio.

Cuando se vuelve a poner el papel transparente en su posición original, entonces el punto Q_1 de la figura 8 representa la verdadera orientación en el espacio del eje del grano de cuarzo.

Si el eje de un grano de cuarzo hace un ángulo menor de 45° con el plano de la lámina delgada, se le puede girar hasta una posición paralela al eje horizontal E-W de la platina y entonces puede registrarse la proyección del eje empleando una técnica similar a la descrita.

LÍNEAS DE IGUAL CONCENTRACIÓN. Cuando se obtienen suficientes puntos sobre la red para asegurar que el resultado estadístico tenga valor, se les puede contar poniendo un pedazo de papel, o tela transparente, encima de otro papel con una red rectangular cuyos cuadros miden 1 centímetro y

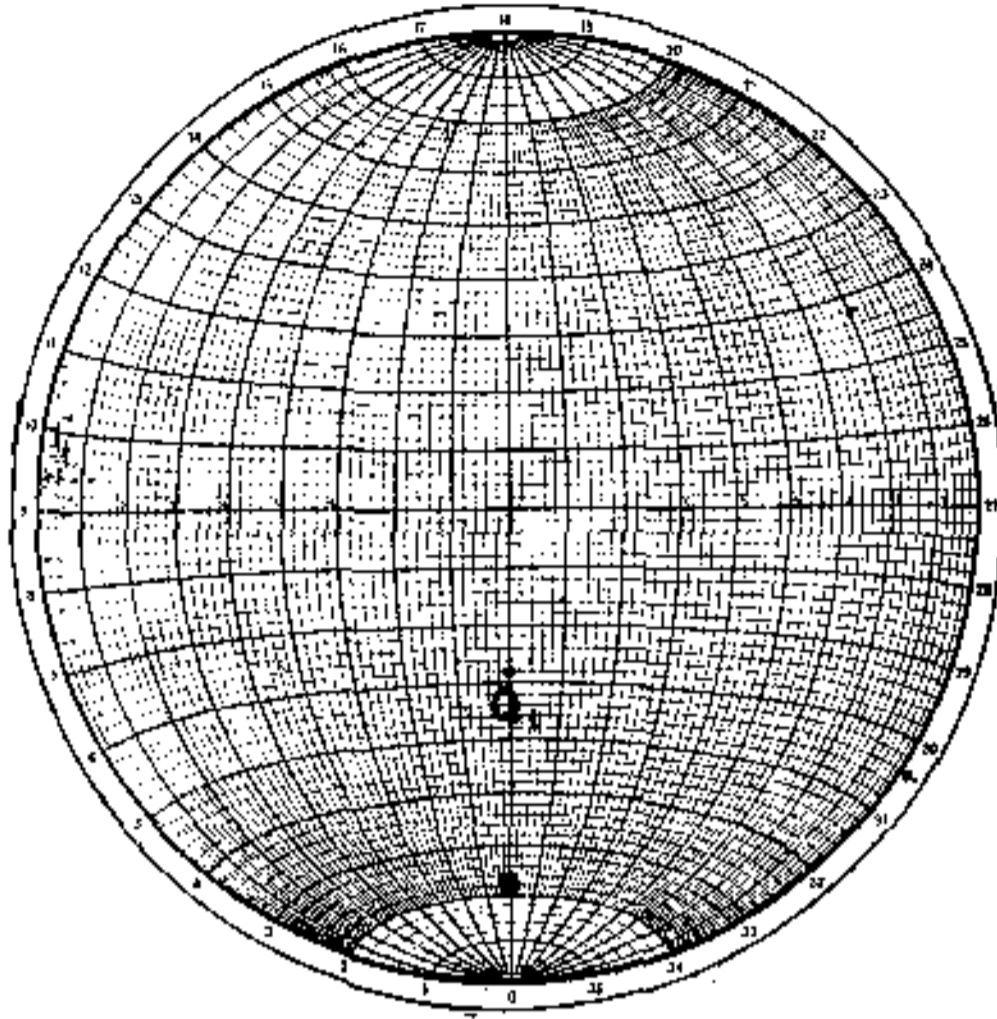


FIG. 7. Método de registrar el eje *c* de un cristal uniaxial. (Corresponde al cristal ilustrado en la Lámina 9.)

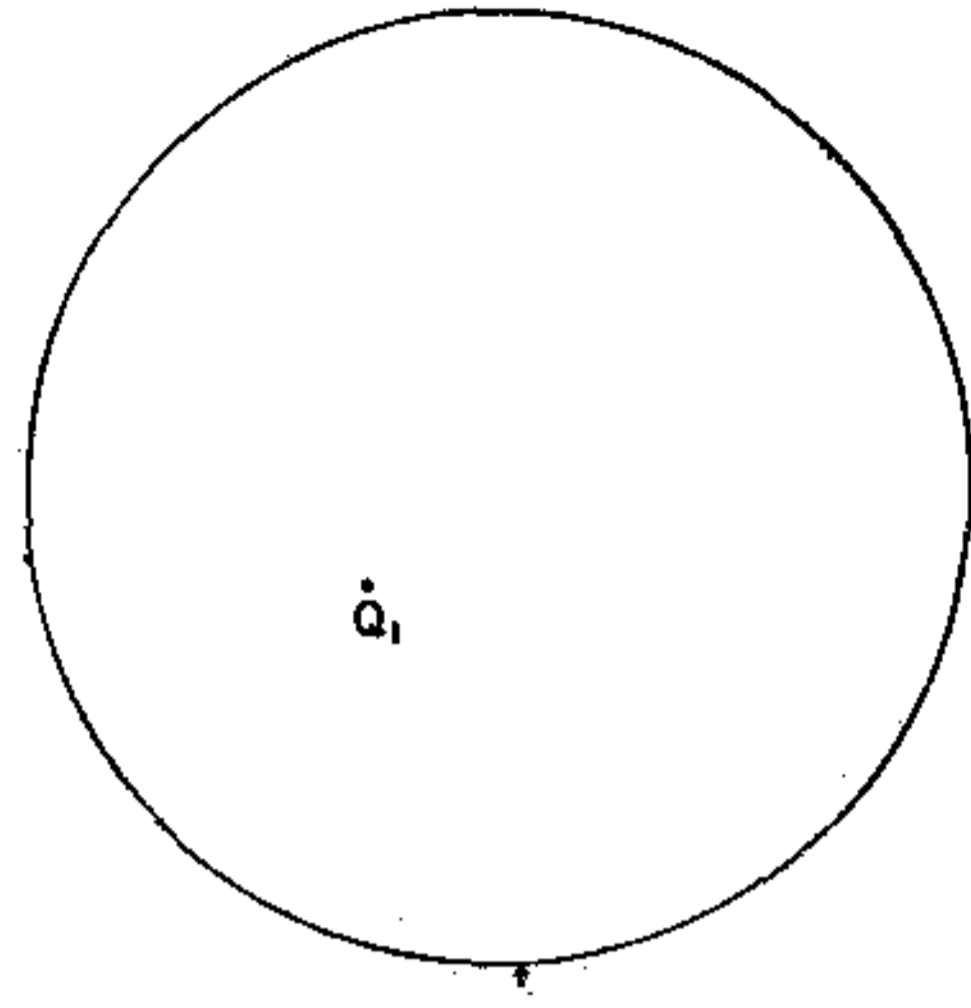


FIG. 8. Proyección de la figura 7 en la posición cero.

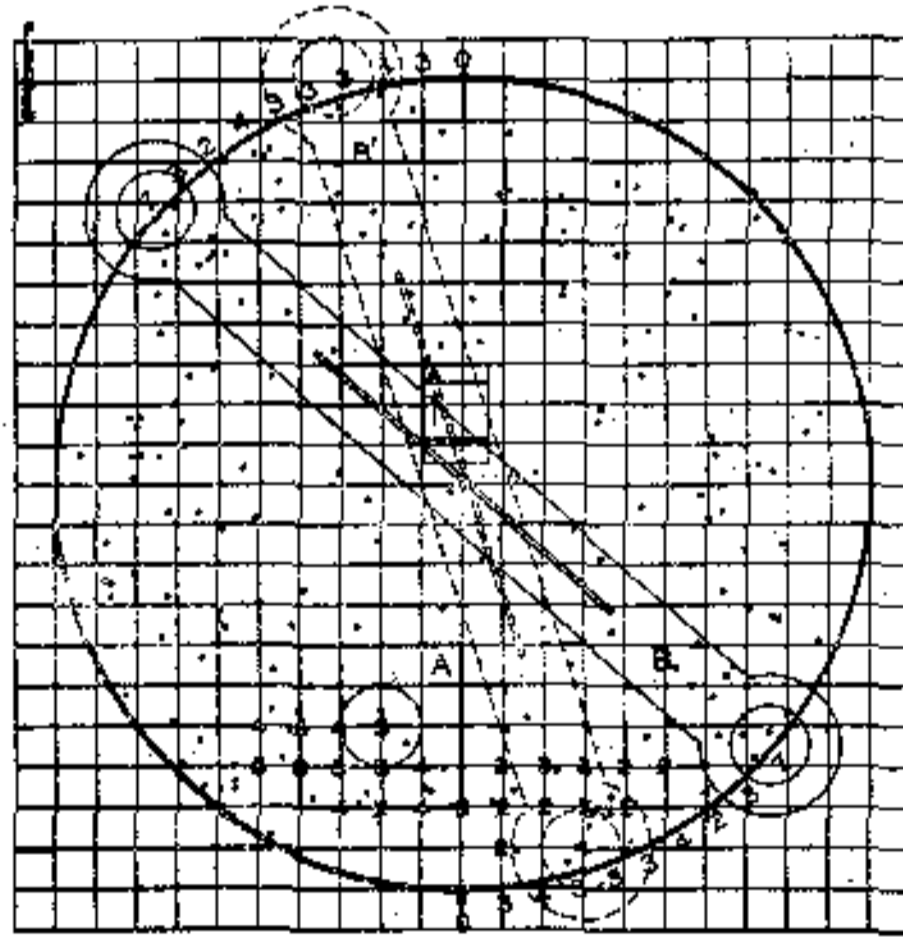


FIG. 9. Método de contar los puntos para la preparación de un diagrama de la petrofábrica.

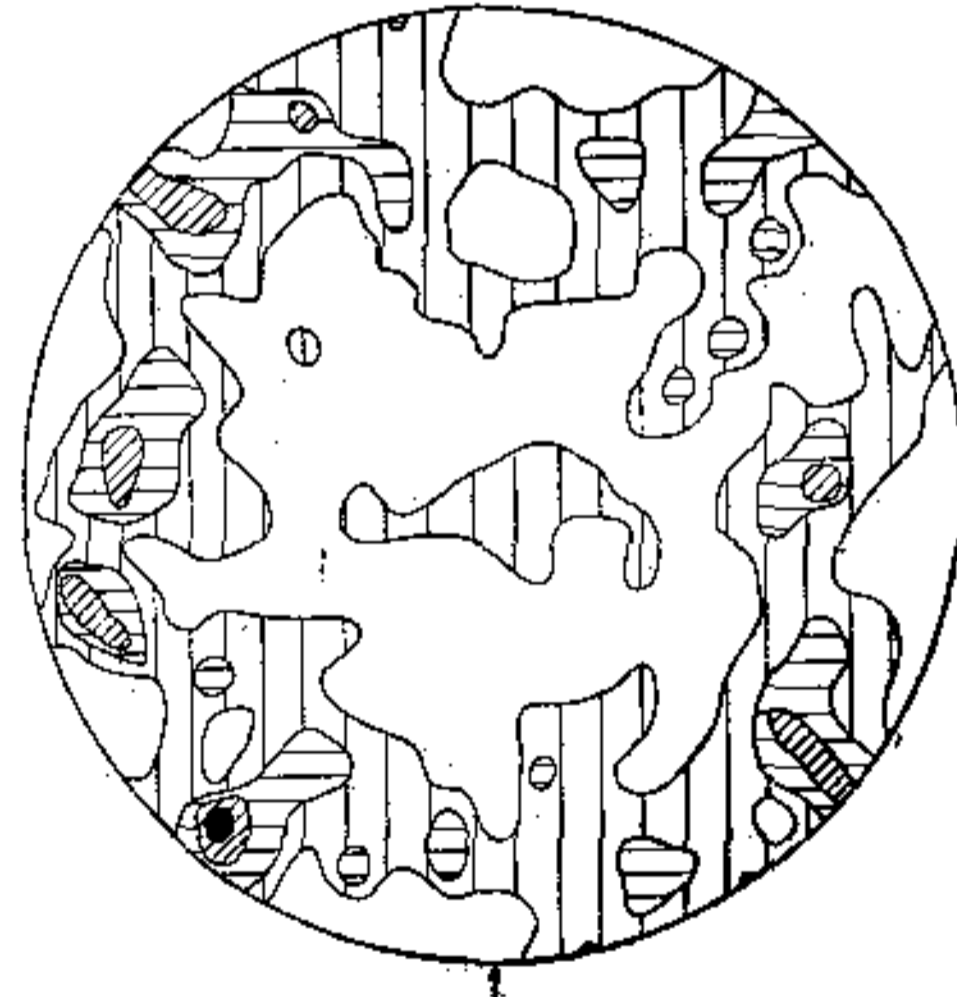


FIG. 10. Diagrama de la figura 9 con las líneas dibujadas.

con la proyección entre los dos. En cada intersección de esta cuadrícula se indica sobre el nuevo pedazo de papel transparente el número de puntos que se hallen dentro de un círculo cuya área corresponde a uno por ciento del área total de la proyección y cuyo centro es la intersección misma (figura 9). Entonces se dibujan las líneas de igual concentración de una manera semejante a la usada en la preparación de un mapa topográfico. El resultado se conoce con el nombre de *diagrama de la petrofábrica* o *diagrama de la orientación de los granos* (figura 10). Las áreas en blanco constituyen los mínimos, es decir, en este caso *las que tienen* menos de uno por ciento del total de los granos en cada área de uno por ciento de la proyección. La mancha negra de la figura 10 representa un máximo e indica que el número de ejes de cuarzo que yacen en una posición casi horizontal y con dirección *NESW*, es mayor al de las que se hallan en cualquiera otra posición.

MARCAS DE ORIENTACIÓN. Para que tal diagrama tenga un significado en las interpretaciones geológicas, su orientación geográfica tiene que ser conocida.² En el análisis de la petrofábrica, debe siempre mantenerse la orientación fijada de la muestra, por lo que, es preciso marcarla en el campo, para que se sepa la orientación geográfica después de llevarla al laboratorio. También es necesario saber y marcar la orientación de la lámina cortada de la muestra, para eli-

² En algunas clases de problemas es suficiente conocer la relación del diagrama con alguna estructura, o estructuras de la roca.

minar más tarde el peligro de equivocarse.

Para descripciones más detalladas se recomiendan las obras siguientes: Ingerson (1938) y Fairbairn (1942), en inglés; Sander (1923-26), (1930) y Schmidt (1932), en alemán; y Andreatta (1932, 37), en italiano.

DEFINICIONES

Con objeto de entender de mejor manera los ejemplos dados en los párrafos a continuación es conveniente definir algunos términos. Las *tectonitas* son rocas que han experimentado un movimiento diferencial y de penetración. La orientación predilecta de sus minerales se debe a este tipo de movimiento. Las *atectonitas* fueron depositadas, o consolidadas, en un ambiente estancado. Muchas rocas ígneas intrusivas y rocas sedimentarias pertenecen a este grupo. Estas pueden también mostrar una orientación predilecta, pero con distinta clase de simetría de las que exhiben las tectonitas.

s designa a un plano cualquiera de discontinuidad, ya sea de sedimentación, resvalamiento, disyunción, esquistosidad, corte (shear), etc.

ab es el plano de movimiento que generalmente es el más prominente de una tectonita. En el plano ab, a es la dirección del movimiento, y b es su normal, siendo esta última el eje de plegamiento en regiones de rocas plegadas. La dirección perpendicular al plano ab se denomina c. Estas tres direcciones coinciden con las principales direcciones, o ejes petrofábricos de Sander.

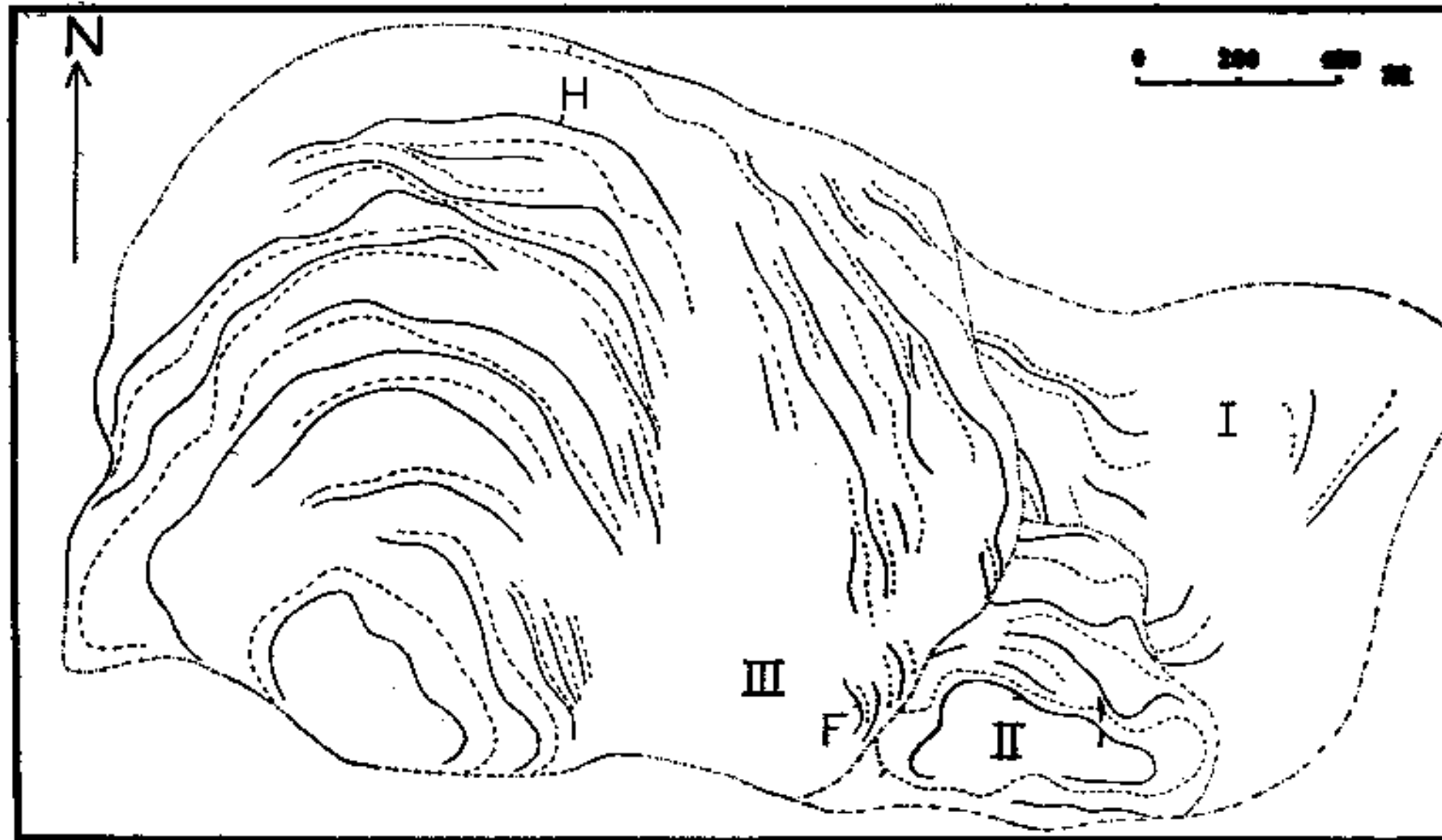


FIG. 11. Plano general de una masa intrusa situada en la parte Central de Suecia (según Larsson, 1935).

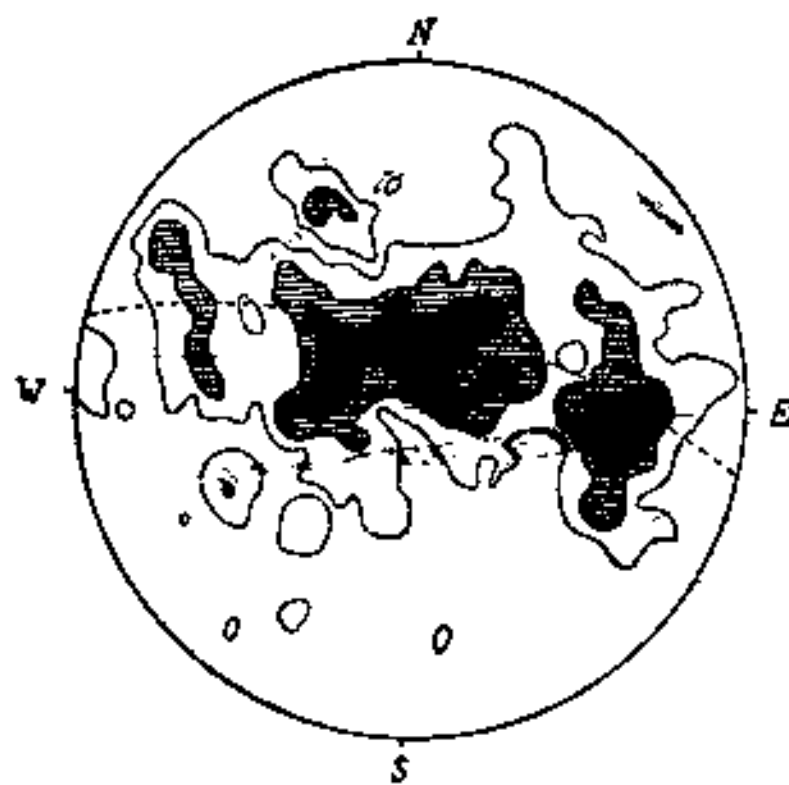


FIG. 12a. Diagrama de la petro-fábrica correspondiente al eje c de 300 granos de hiperstena en una muestra de norita recogida en la parte septentrional de la intrusión III mostrada en la Fig. 11. La concentración de los ejes entre las líneas es: (4-3)-2-1 %.

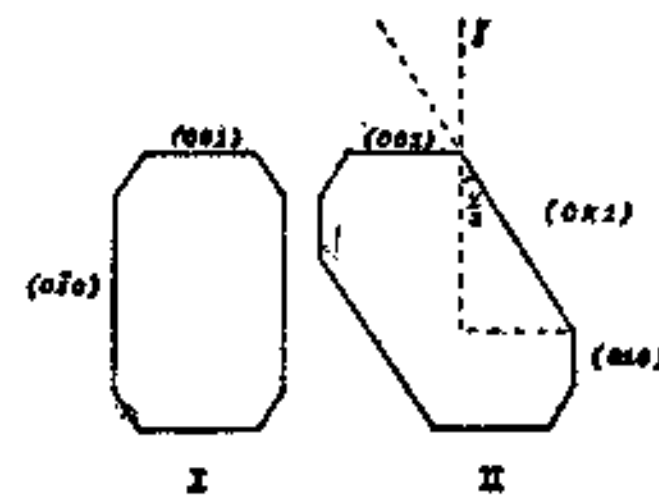


FIG. 12b. Diagramas esquemáticos de las formas de los cristales de hiperstena (según Larsson, 1935).

APLICACIONES DE LOS METODOS DE LA PETROFABRICA A PROBLEMAS GEOLOGICOS

Para obtener mejor idea del carácter de los problemas a cuya resolución pueden contribuir los diagramas petrofábricos se mencionan con brevedad algunos problemas que tales diagramas han ayudado a resolver.

GEOLOGÍA ÍGNEA. Walter Larsson (1935) hizo una aplicación muy interesante de los métodos de la petrología estructural a los problemas de diferenciación e intrusión, relacionando los diagramas petrofábricos con los datos estructurales y químicos. Hizo un detallado estudio geológico, petrográfico y químico de una pequeña intrusión básica y compleja de la parte central de Suecia.

Esta intrusiva parecía compacta y simple pero cuando Larsson levantó un mapa de ella se vió que había tres intrusiones distintas, separadas por zonas de brecha (figura 11). Las rocas de esta intrusión son en su mayor parte noríticas, pero contienen capas, o masas tabulares de piroxenita, gabro y anortosita.

Los contactos intrusivos sugieren sus edades relativas y Larsson mantiene que los datos químicos, mineralógicos y estructurales comprueban el mismo orden. Por ejemplo:

- 1) Las intrusiones I, II y III contienen sucesivamente mayores proporciones de sílice.
- 2) Las intrusiones más antiguas son más uniformes en composición química, es decir, no se han diferenciado tanto como la III, que es la más joven.
- 3) Las diferentes capas entre las

primeras intrusiones tienen echados más inclinados que los de la última. Larsson cree que quizá pueda ser esto una regla general y la emplea en la interpretación de los diagramas del feldespató.

Larsson determinó la orientación de 300 granos de hiperstena en una muestra que recogió cerca del borde septentrional de la intrusión III; igualmente la de 300 granos de plagioclasa en una muestra recogida cerca del borde oriental de la misma intrusión.

En la figura 12a se presenta el diagrama correspondiente al eje *c* de los granos de hiperstena. El rumbo de las capas es casi E-W y su echado es al sur. El diagrama demuestra 3 máximos distintos: el principal yace en la línea de escurrimiento, o flujo y puede suponerse que esto se debe al flujo de los cristales alargados en dirección del eje *c*; los dos máximos menores también yacen en el plano de las capas y están arreglados simétricamente en relación con el máximo principal. Estos máximos pueden explicarse suponiendo que algunos de los granos estaban alargados en dirección paralela al plano cristalográfico (011), es decir paralelos al eje *a* (figura 12b).

Antes de considerar la interpretación de este diagrama en términos de diferenciación e intrusión es conveniente examinar el diagrama de los granos de feldespató (figura 13a) que es muy parecido al de la hiperstena, con la diferencia de que se presentan dos grupos máximos en dos planos que se cruzan. El plano cuyo rumbo es aproximadamente E-W quizás sea

el más antiguo porque, primero, sus máximos son menos claros lo que indica, cuando menos, un poco de movimiento subsecuente y segundo, porque su inclinación es más fuerte que la del otro plano.

Los máximos de este diagrama se explican de la misma manera, es decir que los máximos principales coinciden con las líneas de flujo correspondientes a los cristales alargados en dirección paralela a sus ejes *c* y los submáximos a cristales alargados paralelamente a sus ejes *a*. Las relaciones angulares son propias para tal interpretación ya que el ángulo entre los submáximos en el diagrama es de 126° ; $v/2 = 63^\circ 57'$ (figura 13b).

Podría uno preguntarse ¿qué significado sugieren estos datos respecto a la diferenciación e intrusión? Es probable que debido al hecho de que existen dos formas distintas en los cristales, hubo un cambio de condiciones físico-químicas que pudiera haber sido efectuado por la intrusión del magma a un nivel más alto después de que la cristalización y diferenciación a profundidad habían comenzado. Es probable que los cristales más numerosos alargados sobre su eje *c* se formaron durante este período de cristalización; los otros durante la siguiente época de intrusión.

Larsson cree que se efectuó la diferenciación por el ascenso de los cristales de plagioclasa hacia la parte superior de la cámara del magma, así como por el hundimiento de los de piroxena hacia el fondo. Su concepto, pues, es de una intrusión estratiforme que se diferenció "pari passu". La capa inferior consistió de piroxenita con líquido intersticial. Si esto es la

verdad, entonces ¿qué desarrollo podemos anticipar durante la intrusión subsecuente? Ciertas posibilidades que se pueden verificar por medio de estudios de campo, o de laboratorio, son las siguientes:

- 1) Primero debe haberse introducido la anortosita (más o menos sólida) la cual debe haber estado pracialmente brechada.
- 2) La plagioclasa de la anortosita debe haber contenido más An (anortita) y la hipertena menos MgO (magnesia) de lo que estos minerales contienen donde se encuentran en otras rocas de la misma intrusión.
- 3) La plagioclasa de la piroxenita debe haber contenido más Ab (albíta) y la hiperstena menos fierro.
- 4) La piroxenita debe haber sido la última roca en introducirse.

¿Cuáles son los hechos?

- 1) Las primeras capas de la intrusión III, se introdujeron cerca del borde septentrional, lejos del centro de la intrusión. Estas consisten de norita con fragmentos de anortosita. Donde la norita está pseudo-estratificada, las capas intermedias más delgadas son de anortosita. Las capas tienen más piroxena hacia la parte sur-poniente de la intrusión donde se encuentran capas y trozos de piroxenita.
- 2) La plagioclasa de la anortosita contiene más An (anortita) y la hiperstena menos MgO (magnesia) que lo que se encuentra en estos minerales en

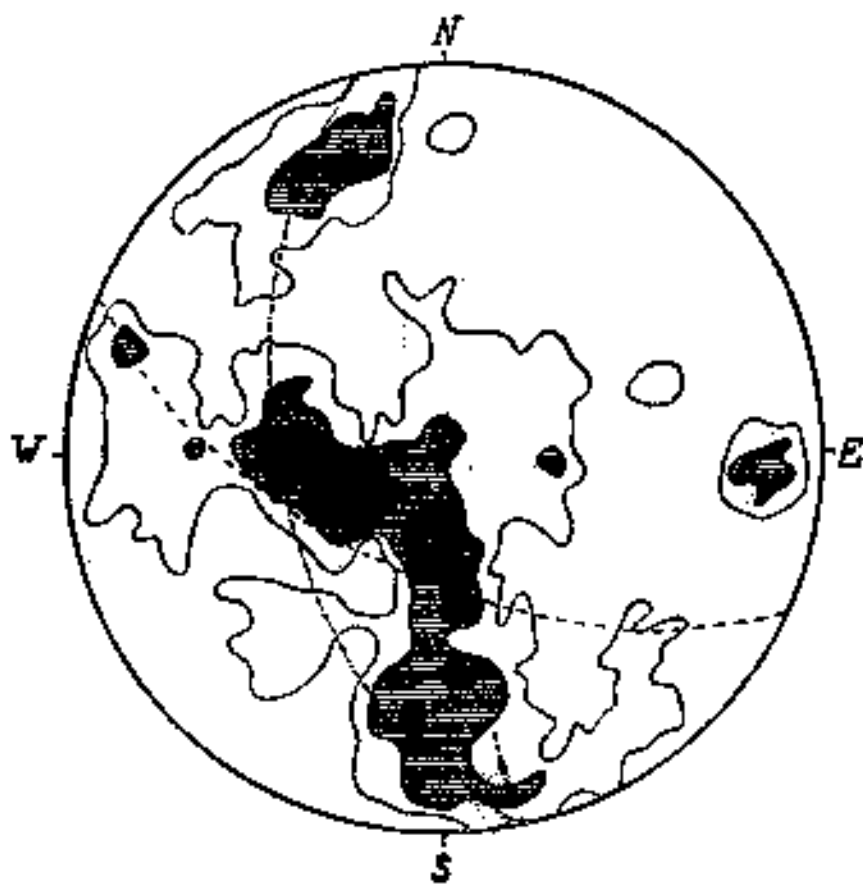


FIG. 13a. Diagrama de la petrofábrica de 280 polos, o normales a de laminillas de periclina correspondientes a la plagioclasa de una anortosita que se encuentra en la parte oriental de la intrusión III, Fig. 11. (5-4-3)-2.1 %.

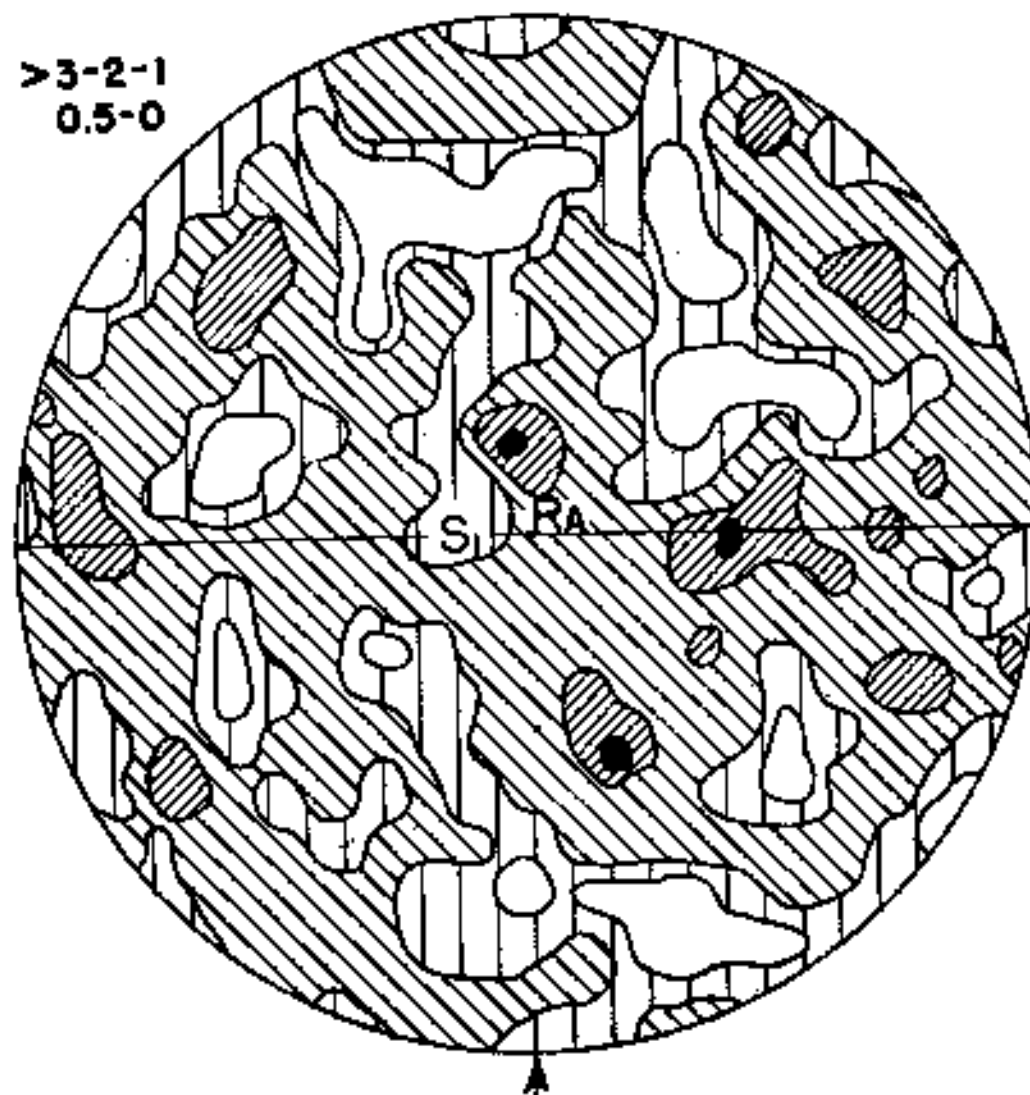


FIG. 14. Diagrama de la petrofábrica de la arenisca Moenkopi con huellas de oleaje, basado en el eje *c* de 300 granos de cuarzo; S_1 plano de sedimentación (bedding plane); RA eje de las huellas de oleaje (según Ingerson, 1940).

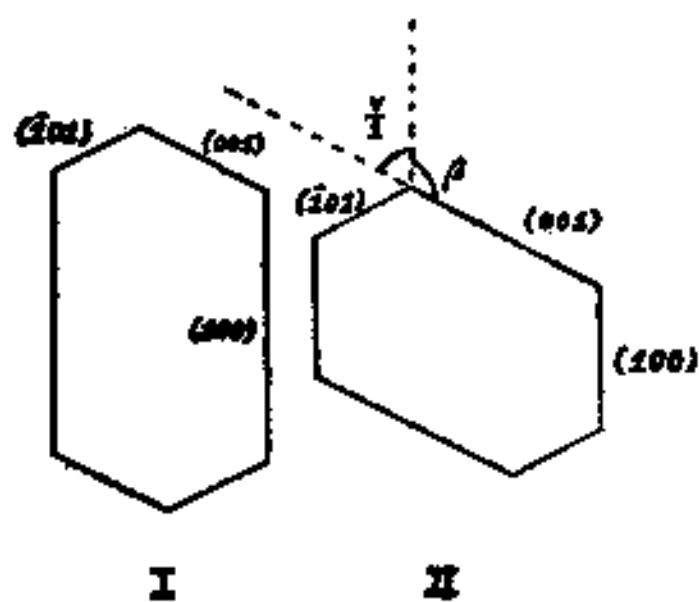


FIG. 13b. Diagramas esquemáticos de las formas de los cristales de plagioclasa (según Larsson, 1935).

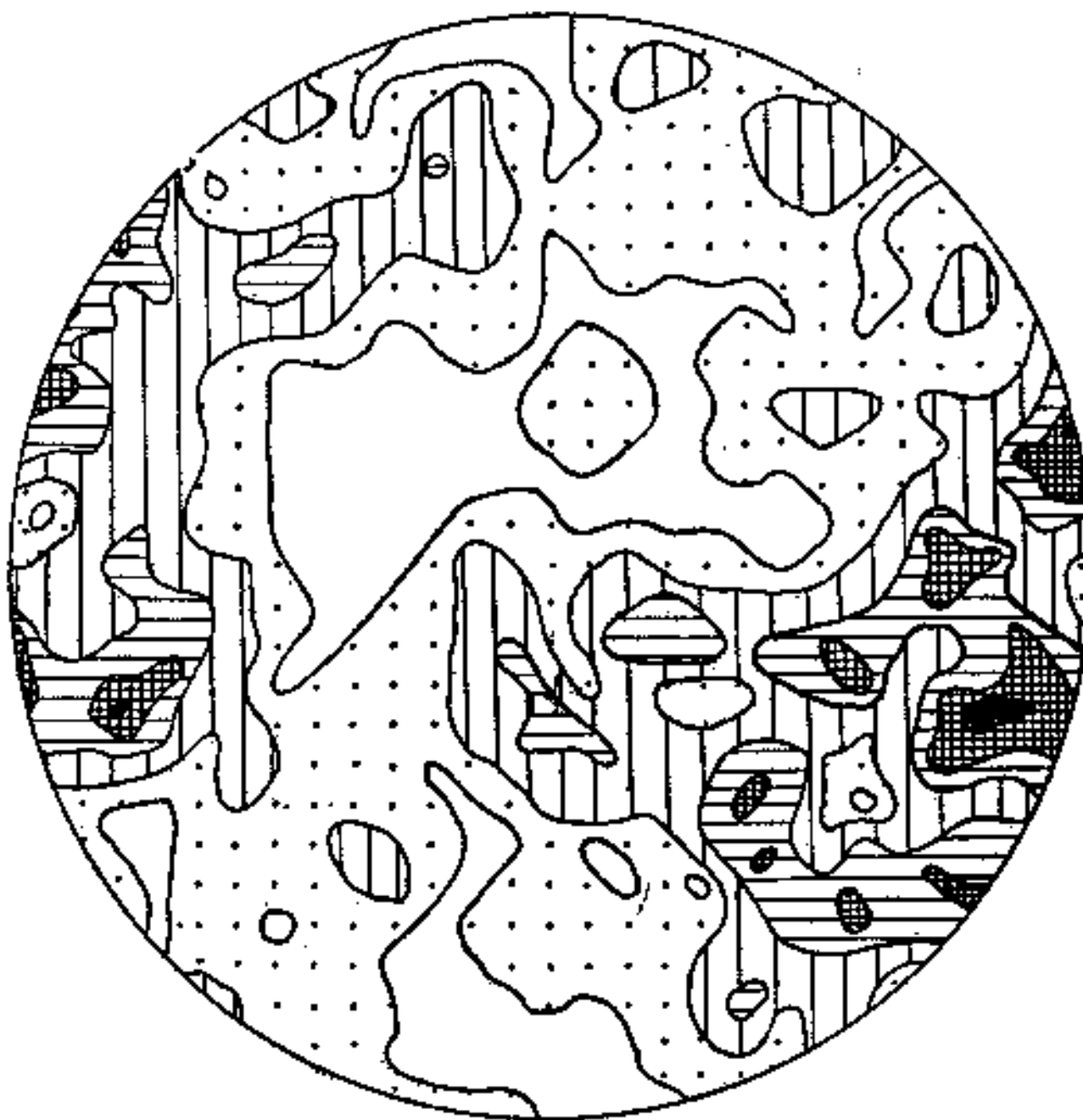


FIG. 15. Diagrama de la petrofábrica de la arenisca St. Peter, basado en el eje *c* de 155 granos de cuarzo. El plano de sedimentación yace en una posición aproximadamente horizontal, o sea perpendicular a la página (según Wayland, 1939).

otras rocas de la misma intrusión. Estas relaciones se invierten en el caso de la piroxenita.

- 3) En las rocas intermedias (norita y gabro) la plagioclasa y la hiperstena demuestran composiciones intermedias.
- 4) Así pues consta que los diagramas petrofábricos refuerzan los datos químicos y estructurales para la presentación de una historia concisa y lógica de la diferenciación y emplazamiento de una intrusión básica y estratiforme.

PROBLEMAS DE SEDIMENTACIÓN.

Hasta el presente todavía no se han realizado muchos estudios de petrofábrica sobre sedimentos y rocas sedimentarias. Krumbein (1930-40) estudió depósitos fluviales y Scharf (1932) y Richter (1933) también hicieron uso de estos diagramas en estudios de geología glacial.

Ingerson (1940) demostró que los granos de cuarzo en arenizas con señales de oleaje (ripple-marks) suelen tener el eje *c* paralelo al eje de dichas señales (figura 14). Wayland (1939) demostró que aun en arena con granos de cuarzo bien redondeados, muchos de estos son esferoides alargados y que los ejes mayores de estos esferoides generalmente coinciden con el eje *c* cristalográfico. Demostró también que el eje *c* yace en el plano de sedimentación, o forma un pequeño ángulo con él y que su orientación predilecta se halla paralela a dicho plano (figura 15).

Ingerson y Ramisch (1942) sugirieron que la forma alargada de estos

granos probablemente se debe a su forma original y no a fracturas ni a desgaste diferencial. También demostraron la existencia de otra dirección de alargamiento característica del cuarzo, o sea la paralela al romboedro, que pudiera ser la forma original de los granos, o bien producida por su rompimiento.

Los informes mencionados indican que es probable que estudios de la orientación del cuarzo en rocas arenosas puedan revelar la dirección de la corriente de agua cuando se depositaron los granos, aún cuando las estructuras primarias, por ejemplo las señales de oleaje y la estratificación entrecruzada, estén ausentes.

PROBLEMAS DE ROCAS METAMÓRFICAS. La mayor parte de los diagramas que se han publicado hasta la fecha se refieren a rocas metamórficas. Los movimientos diferenciales durante la formación, o deformación, de tales rocas producen un mayor grado de orientación predilecta de lo que comúnmente exhiben otra clase de rocas. Por esta razón es más fácil demostrar e interpretar la orientación predilecta en rocas metamórficas.

Existen numerosas clases de problemas referentes a las rocas metamórficas, para cuya resolución pueden usarse diagramas petrofábricos y efectivamente muchas de estas aplicaciones ya se han llevado a cabo. En el curso de un estudio Sáhama (1936) demostró el uso de la petrofábrica para obtener el plan de deformación en un trabajo de reconocimiento de un área grande donde había muchas unidades geológicas diferentes. Demostró también como se pueden separar, o distinguir, diferentes períodos.

de metamorfismo y como se determinan sus edades relativas.

Sáhama hizo su estudio de un área enorme de granulita en Laponia (300 kms. por de 40 a 90 kms.). Esta área se extiende de norte a sur en un arco grande con su lado convexo hacia el oeste (figura 16). Las unidades varían muchísimo y es casi increíble que una persona pudiera realizar con éxito el estudio completo de un área tan tremenda acerca de la cual casi nada se sabía hasta entonces. Sáhama no trató de preparar ningún mapa geológico en el sentido ordinario, es decir, escogiendo unidades reconocibles en el campo y demostrando su distribución; lo que hizo fué medir la inclinación y el rumbo tanto de la foliación como del lineamiento (lineation) en un gran número de localidades en dicha área.

Al organizarse estos datos se vió claramente que el área se puede dividir en dos partes más o menos homogéneas. En la parte septentrional el lineamiento yace casi horizontal con dirección casi norte sur. La foliación

se inclina al oriente con valores de cero a noventa grados. En la parte meridional la dirección del lineamiento sigue el borde del arco y por eso varía del norte-poniente cerca de la parte septentrional de la sub-área, al norte-oriente en la parte más meridional del arco.

Sáhama publicó ochenta diagramas petrofábricos entre los cuales no hay más variación que la que existe entre los datos megascópicos. Este hecho indica que el área, aunque contiene muchas diferentes unidades litológicas, cuenta con una historia tectónica más o menos simple y homogénea.

Los diagramas del cuarzo (figura 17) son triclinicos, respecto a los ejes de la fábrica megascópica; los de la mica (figura 18) son monoclinicos. Sáhama opina que estas relaciones indican que se verificaron dos períodos de metamorfismo. El primero fué más intenso que el segundo, imprimiendo sobre las rocas las fábricas que ahora caracterizan a su cuarzo y mica. El movimiento del segundo período no fué paralelo al movimiento del prime-

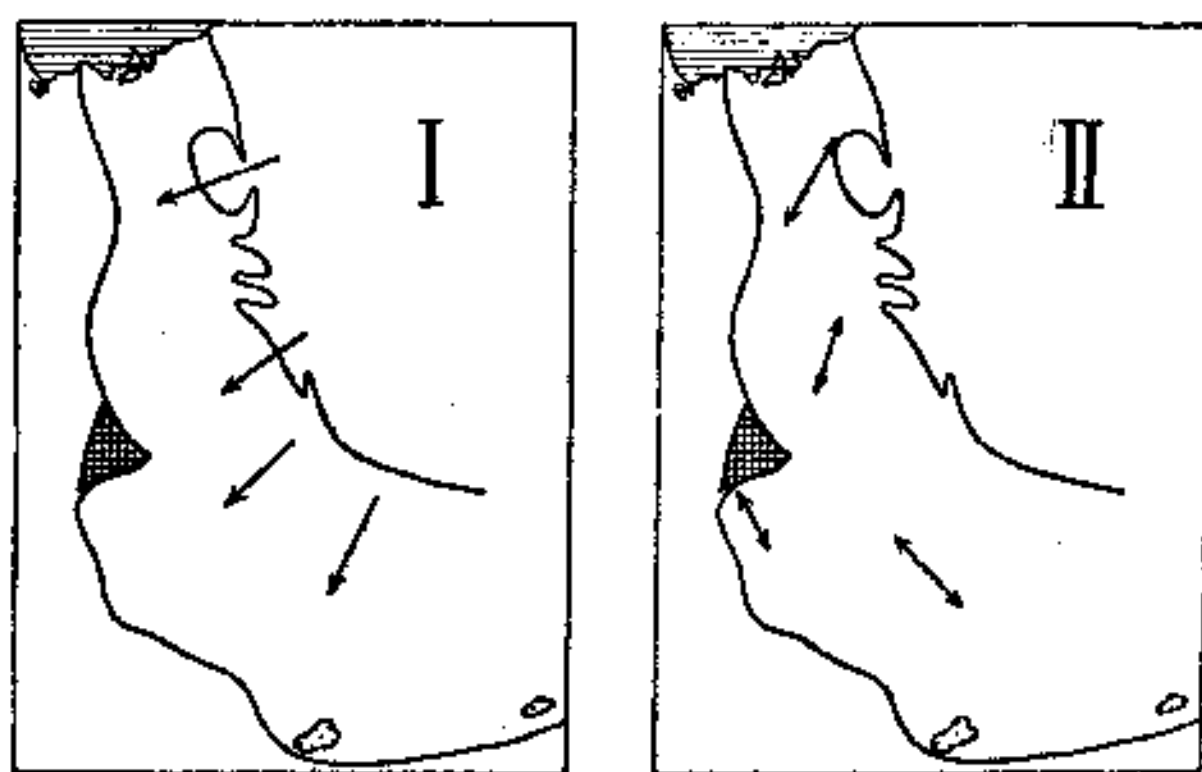


FIG. 16. Plano general del área de granulita en Laponia, que fué estudiada por Sáhama (1936).

ro, por lo que reacomodó el cuarzo casi por completo produciendo otro grupo de ejes. Esta última deformación no fué suficientemente intensa para reorientar la mica; por eso los ejes estructurales que se ven en el campo son los que fueron producidos por la primera deformación. El eje *b*, determinado de los diagramas petrofabrics de la mica, coincide muy bien

con los ejes estructurales observados en el campo.

La figura 16 demuestra estas dos direcciones de movimiento: la del primer período fué radial con respecto al arco y probablemente ayudó en el desarrollo de la forma del área; la del segundo fué periférica, pero el movimiento fué mucho menos intenso y afectó solamente al cuarzo.

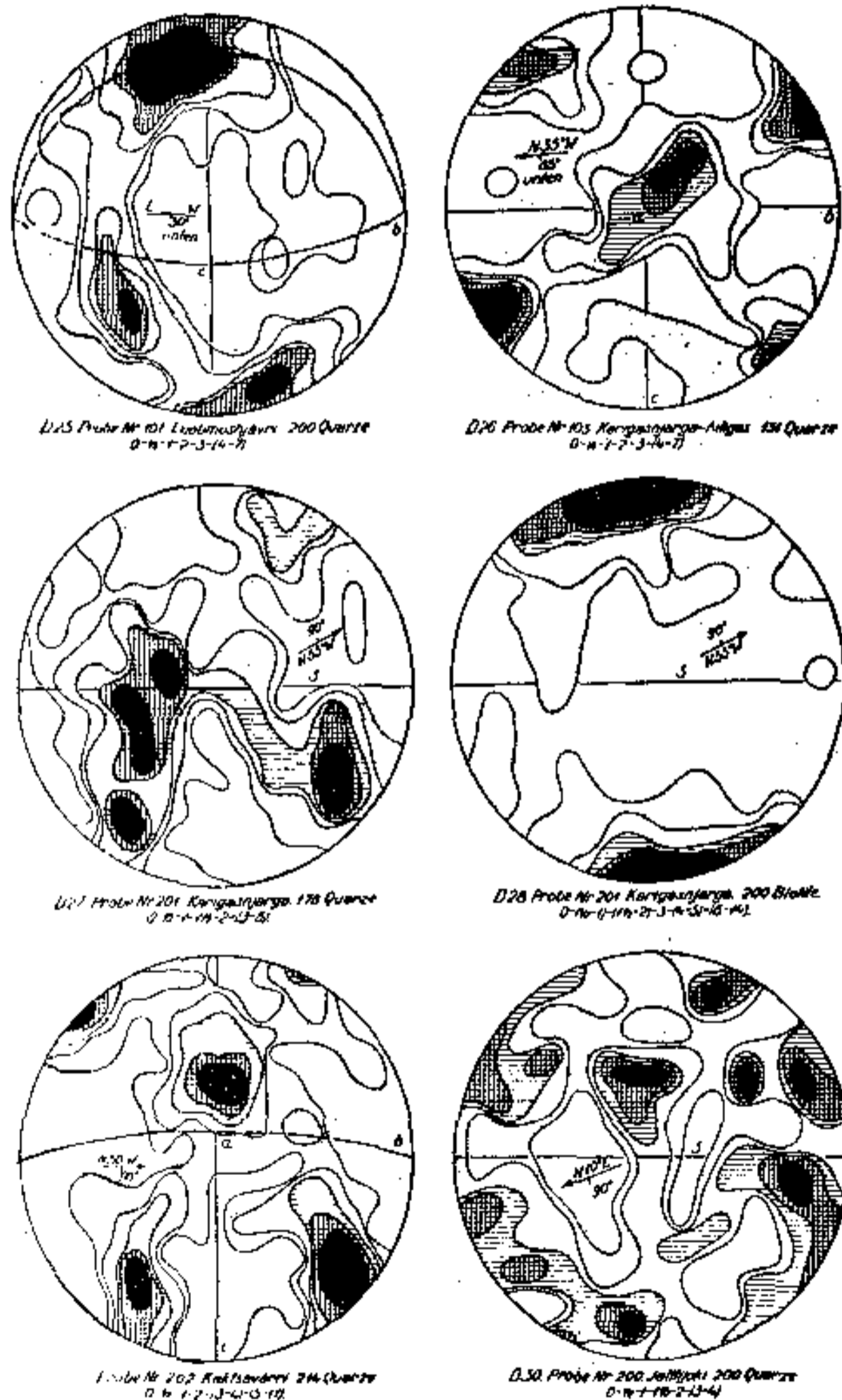


FIG. 17. Diagramas típicos del cuarzo y de la biotita, preparados por Sáhama (1936).

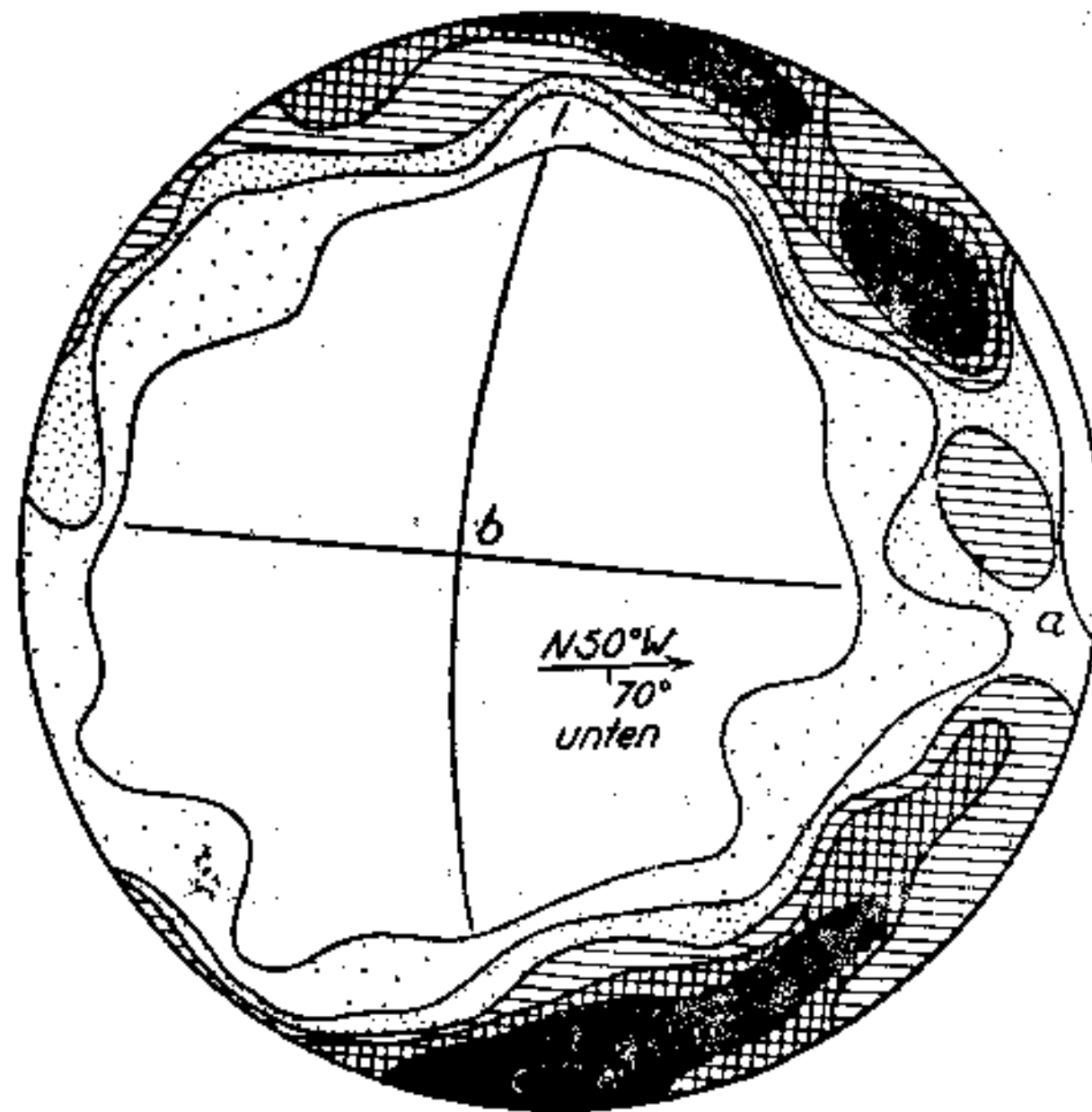
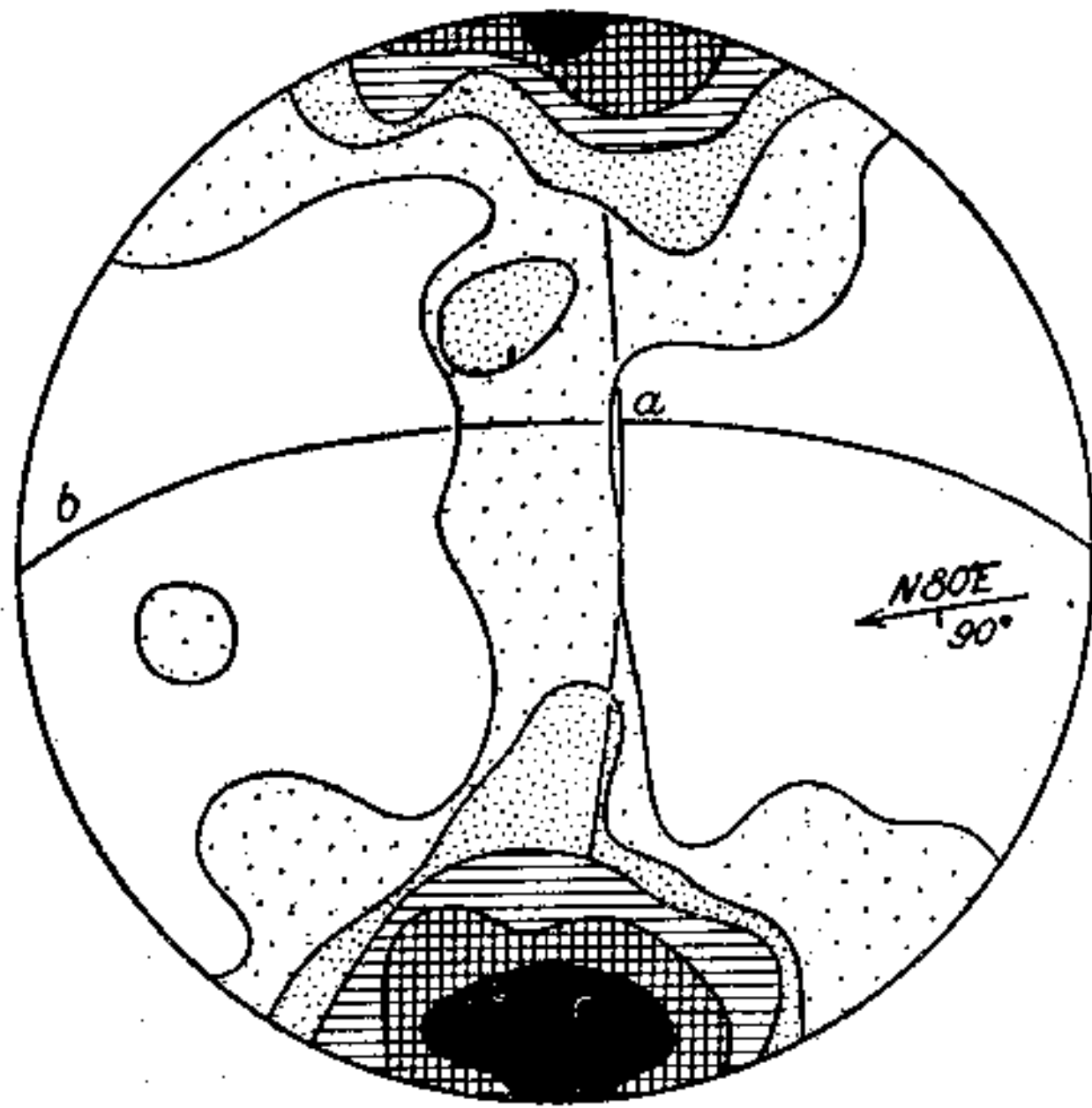


FIG. 18. Diagramas típicos de la biotita, preparados por Sáhama (1936).

Se pueden aplicar estos métodos también a problemas de estructuras en muy pequeña escala. Ingerson (1940) por ejemplo, estudió detalladamente una muestra de mica-esquistos del tamaño de un puño recogida en el Gran Cañón del río Colorado, en Arizona. Esta muestra tenía una estructura que se suponía representar marcas de oleaje. Comparando la fábrica de su cuarzo y mica con la correspondiente a la de marcas de oleaje ya conocida, tanto metamorfoseada como no metamorfoseada y además a pliegues de arrastre, pudo demostrarse que la estructura era realmente debida a pliegues de arrastre.

PROBLEMAS DE SIGNIFICADO ECONOMICO

Son escasos los análisis petrofábricos que se han aplicado directamente a problemas económicos. Fairbairn (1935) mencionó algunas posibilidades para el futuro.

1) *Menas.* Robertson (1942) determinó la orientación de la esfalerita y demostró una relación entre ésta y la orientación de la dolomita que incluye dicho mineral. Esta relación sugirió el origen y la deformación del yacimiento. Tuttle (1943) determinó la orientación de la ilmenita.

2) *Lumar.* La aplicación comercial más notable que se ha hecho hasta la fecha es un estudio del mármol por Bain (1936). Lumar es un mármol que tiene una brillantez magnífica bajo luz transmitida. Bain demostró una relación íntima entre la fábrica y propiedades del mármol tales como su transparencia, brillantez, actuación bajo el intemperismo, resistencia y ri-

gidez. Descubrió que la transparencia y brillantez dependen de la orientación de los granos de calcita, así como del carácter del espacio entre los granos y de la composición mineral, especialmente de los componentes de color. Las otras propiedades también dependen de la fábrica.

Estos estudios son de utilidad práctica para determinar el uso de un mármol desconocido, y ayudan al geólogo a levantar mapas de canteras en actividad. Además, eliminan la experimentación para determinar las direcciones más apropiadas con respecto a la orientación de losas cortadas para diversos usos.

RESISTENCIA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Desde el punto de vista económico, otro gran provecho que ofrece el análisis de la petrofábrica es un modo de determinar la relación entre la fábrica y la resistencia de las rocas que se usan en las obras de construcción. En la literatura se encuentran varios ejemplos. En 1929 Sander, con la ayuda de algunos de sus discípulos, publicó el primer estudio de esta clase. Se tomó una muestra de un mármol de fábrica desconocida y con una estructura poco definida, cortando una lámina sin orientación especial, aunque se conocía su orientación con el resto de la muestra. El diagrama preparado de esta lámina reveló claramente la posición del eje b. En dirección paralela a este eje, pudo distinguirse una foliación muy débil, y así se reconocieron los tres ejes de la fábrica del mármol.

Se cortaron trozos cúbicos de la muestra con sus lados perpendiculares a los ejes de la fábrica, los que se

CUADRO 6

RELACION ENTRE LA RESISTENCIA Y LA FABRICA DE UNAS ROCAS

Investigador	Material	A compresión			A impacto		
		<u>a</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>c</u>
Sander, et al.	Mármol	1118	1291	1470			
Holler	Diabasa	1876	1705	1607			
"	Granulita	3467	3225	1778	79.22	36.23	21.33
"	Granulita piroxénica	2655	2650	1924	31.88	26.33	18.46
"	Basalto	3209	3208	2508	49.2	13.4	17.35
"	Hornfels diorítico	H 3260	K 2990	L 2000	L, K, y H son las mejores, peores, e intermedias superficies de separación (parting surfaces), respectivamente.		
"	"	H' 2700	K' 3300	L' 2800	K' es una foliación microscópica casi paralela a K. H' y L, son normales a K' y también entre sí.		
Bell	Granito	<u>ab</u> 2090	<u>b</u> 2430	<u>c</u> 2170	<u>ab</u> = foliación; <u>c</u> es normal a <u>ab</u> <u>a</u> = dirección del movimiento <u>b</u> es normal a <u>a</u> en <u>ab</u>		

sujetaron a pruebas de resistencia a compresión. Los resultados aparecen en cuadro 6. La resistencia mayor se halla en dirección paralela al eje c.

Holler (1935) puso a prueba varias clases de rocas, tanto por impacto como por compresión. Halló variaciones hasta en un 50 por ciento en la resistencia a la compresión y hasta en un 70 por ciento al impacto, en la muestra más anisotrópica, dependiendo de la relación entre la fábrica y la dirección de aplicación de los impactos y de la compresión. Los resultados de las investigaciones de Holler también aparecen en cuadro 6.

Bell (1936) hizo un estudio semejante de un granito de moscovita y biotita con una foliación débil. Sus resultados (cuadro 6) son comparables con los de Holler, pero Bell no determinó la resistencia en dirección paralela al eje a. El granito es más fuerte en dirección paralela a b que paralela a c. En el tercer grupo de sus experimentos, Bell utilizó cubos cuyos lados formaban un ángulo de 45° con ab, y estos cubos eran más débiles que los otros, lo cual no es sorprendente porque las placas de mica yacen en ab.

En el mármol, c es la dirección de más resistencia; en cambio en el granito es a. Probablemente esto se deba a que la calcita tiene tres planos de deslizamiento (glide planes) mientras que la mica tiene solamente uno.

Bell también midió las fracturas en el granito deformado y halló que sólo un 17 por ciento de la longitud total de la fractura se encuentra entre los granos, lo cual es contrario a lo

que anteriormente se creía. Descubrió también que la proporción de fracturas que atraviesan a la mica es mayor a la correspondiente a cualquier otro mineral, teniendo en cuenta el porcentaje de cada uno de los minerales en la roca. Esto quiere decir que en los lugares donde se requiere una gran resistencia, se debe evitar el uso de las rocas que contienen un porcentaje alto de minerales en forma de placas. Estos resultados demuestran también que la forma de las partículas usadas en la mezcla de hormigón es de importancia para su resistencia, y que la relación entre la orientación de un bloque de hormigón durante su fraguado y durante su uso puede ser significativo.

RESUMEN

En las páginas anteriores se han presentado muy brevemente la historia, las opiniones y creencias, y las técnicas de la petrología estructural, especialmente las técnicas que se emplean para preparar y orientar los diagramas de la petrofábrica.

Se han dado a conocer ejemplos ilustrativos que abarcan y describen las diversas aplicaciones de estos métodos para resolver los numerosos problemas de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, así como los problemas de significado económico. Los ejemplos citados nos demuestran que estos métodos de petrología estructural contribuyen un gran número de datos importantes no obtenibles por los métodos antiguos, en relación con distintas clases de problemas geológicos.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREATTA, Ciro (1932): *Analisi strutturale di rocce metamorfiche*, I. Per. di Min., 3, p. 1-18.
- (1937): *Petrografia strutturale e petrotettonica*, Bol. Soc. Geol. Ital., 56, pp. 515-530.
- BAIN, Geo. W. (1936): *Lumar, a new development in the stone industry*, Mining and Met., v. 17, pp. 287-288.
- BELL, James Forbes (1936): *Festigkeit und Gefügeregel am Beispiel eines Granits*, Neues Jahrb. Mineral. Geol., BB 71, Abt. A, pp. 193-213.
- FAIRBAIRN, H. W. (1935): *Petrofabric analysis and some possible applications*, Can. Min. Jour., July.
- (1940): *Structural Petrology*, Addison-Wesley Press, Cambridge, Mass., 143 p.
- HOLLER, K. (1935): *Über die Abhängigkeit der technologischen Gesteinseigenschaften von der Gefügeregelung*, Z. Deut. Geol. Gesell., Bd. 87, pp. 447-452.
- INGERSON, Earl (1938): *Laboratory technique of petrofabric analysis*, Pt. II, Mem. 6, Geol. Soc. Amer., p. 209-262.
- (1940): *Fabric criteria for distinguishing pseudo ripple marks from ripple marks*, Bull. Geol. Soc. Amer., v. 51, pp. 557-570.
- and RAMISCH, Joseph L. (1942): *Origin of shapes of quartz sand grains*, Amer. Mineral., v. 27, pp. 595-606.
- KRUMBEIN, W. C. (1939): *Preferred orientation of pebbles in sedimentary deposits*, J. Geol., v. 47, pp. 673-706.
- (1940): *Flood gravel of San Gabriel Canyon, California*, Bull. Geol. Soc. Amer., v. 51, pp. 639-676.
- LARSSON, Walter (1935): *Der Nygård Pluton*, Bull. Geol. Inst. Upsala, 25, pp. 13-134.
- RASTALL, R. H. (1944): *Review of Eruptive Rocks* by S. J. Shand, Geol. Mag., 81, pp. 137-138.
- RICHTER, Konrad (1933): *Gefüge und Zusammensetzung des norddeutschen Jungmoranegebietes*, Abh. Geol.-Pal. Inst. Greifswald, pp. 1-63.
- ROBERTSON, Forbes (1942): *Sphalerite-dolomite orientation relations* (Abs.), Amer. Mineral., v. 27, p. 232.
- SÄHAMA, Th. G. (1936): *Die Regelung von Quarz und Glimmer in den Gesteinen der Finnisch-Lapplandischen Granulitformation*, Bull. Geol. de Finlande, N° 113.
- SANDER, Bruno (1923-26): *Zur petrographisch-tektonischen Analyse*, Jahrb. Geol. Bund., Wien, 74, pp. 183-253; Pt. II, 75, pp. 181-236; Pt. III, 76, pp. 323-406.
- (1930): *Gefügekunde der Gesteine*, Julius Springer, Vienna.
- FELKER, F., und DRESCHER, F. K. (1929): *Festigkeit und Gefügeregel am Beispiele eines Marmors*, Neues Jahrb. Mineral. Geol., BB 59, Abt. A, pp. 1-26.
- SCHARF, Willi (1932): *Das norddeutsche Diluvium in eistektonischer Betrachtung vom Standpunkte der Gefügekunde*, Jahrb. Preuss. Geol. Landesanstalt, Bd. 53, pp. 828-850.
- SCHMIDT, Walter (1932): *Tektonik und Verformungslehre*, Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- TUTTLE, O. F. (1943): *Orientation of ilmenite and andesine from the St. Urbain, Quebec, titaniferous iron-ore deposit* (Abs.), Trans. Amer. Geophys. Union, Pt. I, pp. 280-281.
- WAYLAND, Russel G. (1939): *Optical orientation in elongate clastic quartz*, Amer. J. Sci., v. 237, pp. 99-109.

(Recibido Feb. 21 de 1947.)