

# Procedimiento estereológico para la cuantificación del tamaño medio de grano de rocas en 2-D: aplicación a la interpretación petrofísica de la velocidad de corte de granitos con útiles diamantados

A. RODRÍGUEZ REY, L. CALLEJA, L. M. SUÁREZ DEL RÍO, V. G. RUIZ DE ARGANDOÑA,  
I. DÍEZ SARRIÁ y N. SÁNCHEZ DELGADO

*Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. C/ Jesús Arias de Velasco s/n. 33005 Oviedo, España.  
Dirección actual de I. Díez Sarriá: Eurocontrol S.A. C/ Zurbano, 48. 28010 Madrid.*

---

**Resumen:** El tamaño de grano es fundamental en muchos aspectos de la Petrología determinándose mediante técnicas muy diversas. En este trabajo se propone un procedimiento estereológico de cuantificación en 2-D, para estimar de forma rápida y eficiente la densidad numérica, porcentaje superficial y área media de las secciones de cada mineral en láminas delgadas. Se describe pormenorizadamente mediante un ejemplo aplicado a la estimación del área media de las secciones de biotita de una lámina delgada de tonalita. También se presentan algunos resultados de la aplicación de este método en un estudio sobre la cortabilidad del granito Rosa Porriño.

**Palabras Clave:** Tamaño de grano, rocas, estereología, cortabilidad, granitos, Rosa Porriño.

**Abstract:** Grain size is a fundamental rock-forming characteristic of rocks that can be estimated under very different techniques. In this paper a simple and efficient 2-D stereological procedure for estimating the numerical density and the mean area of crystal sections as well as the area percentage of minerals in thin sections of rocks is presented. An example applied to the estimation of the mean section area and numerical density of the biotite crystals in a thin section of a tonalite is described in detail. Some results of the procedure application in a research project about Pink Porriño granite sawability are also presented.

**Keywords:** Grain size, rocks, stereology, sawability, granite, Pink Porriño.

---

Desde un punto de vista petrofísico, es bien conocido que las características petrográficas de las rocas (mineralogía, textura y espacios vacíos) condicionan sus propiedades físicas y, por tanto, su posible utilización en diferentes aplicaciones (áridos de carretera y para el hormigón, rocas ornamentales, elementos estructurales, etc). Dentro de las características texturales (tamaño de grano, orientación morfológica de los minerales, características de los bordes de grano, etc.) el tamaño de grano es una de las que más influye en el comportamiento de los materiales; en este sentido, ya desde hace años ha sido puesta de manifiesto su influencia en propiedades físicas muy importantes para definir el comportamiento de las rocas, tales como la resistencia a los esfuerzos compresivos (Houpert, 1968; Ordaz, 1973; Montoto,

1983, etc.), la velocidad de propagación de ondas elásticas (Lama y Vutukuri, 1978), etc.

Por otra parte, el tamaño de grano de las rocas tiene unas claras implicaciones petrogenéticas, por lo que su cuantificación es muy importante en el estudio de los procesos de génesis de las rocas. Es también una característica fundamental para la clasificación de las mismas.

Existen métodos de muy distinto tipo para la medida del tamaño de grano de las rocas, desde físicos hasta microscópicos. Los métodos físicos pueden ser especialmente adecuados en el caso de algunas rocas sedimentarias poco consolidadas en las que pueden separarse fácilmente los granos y determinar su tamaño por tamizado, velocidad de sedimentación, medida de turbidez de suspensiones, etc.

En el caso de otras rocas sedimentarias y prácticamente en todas las rocas endógenas es muy difícil la separación de los cristales, y los métodos utilizados consisten generalmente en la medida del tamaño de las secciones de los minerales en láminas delgadas, siempre que el tamaño de grano alcance unos tamaños adecuados y dependiendo de la resolución y aumentos del microscopio utilizados. En estos casos, a partir de medidas realizadas en estas secciones 2-D, se obtienen parámetros que caracterizan el tamaño de grano de los minerales. Uno de los más sencillos y utilizados es el índice granulométrico de Chayes (Chayes y Fairbairn, 1951) que sólo informa del tamaño medio expresado en unidades de longitud. Otros métodos más laboriosos proporcionan distribuciones de tamaño como por ejemplo, las distribuciones de tamaño de cristales (Crystal Size Distributions, CSD) utilizadas por Marsh (1988). El análisis digital de imágenes permite determinar tanto el tamaño medio como la distribución de áreas de secciones de granos (Nistal, 1993). En todos estos métodos lo que se mide, en realidad, es el tamaño de las secciones de grano y no el tamaño de los cristales propiamente dicho.

Por su parte, los métodos estereológicos suministran información cuantitativa 3-D a partir de datos 2-D obtenidos en secciones; es decir, se puede estimar el volumen y el tamaño real de los granos a partir del área de sus secciones. Aunque ésta es la característica esencial y el punto fuerte de la Estereología, hay muchas situaciones sin embargo, en las que son más adecuados métodos simples, rápidos y de confianza para la cuantificación de características bidimensionales, como el área de las secciones de grano, ya mencionado.

En este trabajo se proponen unos métodos sencillos de cuantificación en 2-D, para estimar rápida y eficientemente en láminas delgadas observadas mediante microscopía óptica de polarización, las siguientes características de los cristales:

- densidad numérica (número de secciones de cristales por área de lámina).
- porcentaje superficial (igual al porcentaje volumétrico).
- tamaño medio de sección de cada mineral.

Aunque alguna etapa de este método se utiliza en estudios biológicos o patológicos para determinar, por ejemplo, el denominado “índice de celularidad”, su aplicación a la cuantificación de características texturales de materiales rocosos es aún novedoso. También se sigue alguna etapa de este tipo de procedimientos en las normas ASTM<sup>1</sup> para calcular el tamaño de grano

<sup>1</sup> ASTM E112-96e1 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

standard, utilizado frecuentemente en estudios metalográficos.

Para ilustrar el uso de estos métodos se presenta un ejemplo de estimación del tamaño de grano de secciones minerales realizado dentro de un proyecto de investigación sobre el corte de rocas ornamentales con discos diamantados, que se está desarrollando por nuestro grupo de investigación y que trata de interpretar la cortabilidad de las rocas (en lo que respecta a la velocidad de corte) en función de sus características petrográficas. Es, por tanto, imprescindible considerar el papel de la composición mineralógica y el del tamaño de grano de los distintos minerales en esa velocidad de corte, sin olvidar la presencia de espacios vacíos (poros y/o fisuras). Este es un caso particularmente apropiado para el uso de estos métodos, porque lo que realmente influye en el proceso es el tamaño de la sección del cristal seccionada por el útil de corte: por lo tanto, los datos interesantes son el porcentaje de cada fase mineral y el tamaño y número de las secciones de cristales de cada fase. Algunos autores (Birle y Ratterman, 1986; Perrier, 1993) han puesto de manifiesto la influencia que el tamaño de grano tiene en la abrasividad de la roca sobre el disco y, por tanto, sobre la vida media del disco. Esta información es muy útil para la industria de rocas ornamentales donde el proceso de corte mediante sierras o hilos diamantados supone una parte importantísima de los costes de producción. Aunque es un tema que está siendo ampliamente investigado, los resultados obtenidos hasta ahora no son concluyentes.

### Procedimiento Operatorio

El procedimiento se aplica superponiendo una malla de contaje sobre imágenes de láminas delgadas obtenidas mediante microscopía de polarización por luz transmitida. El procedimiento consta de 3 etapas:

1. Determinación de la densidad numérica de cada fase mineral.
2. Determinación del porcentaje superficial ocupado por cada fase mineral.
3. Cálculo del área media de las secciones de cada fase mineral a partir de los datos obtenidos en las 2 etapas anteriores.

El método da resultados no sólo del tamaño medio de las secciones de grano, sino también de la densidad numérica y de los porcentajes superficiales ocupados por las secciones de las distintas fases. Estos porcentajes superficiales son equivalentes a los volumétricos, de manera que, siguiendo este procedimiento, se determina simultáneamente la composición modal de la roca.

Existe la posibilidad de simplificar el procedimiento si se hace uso de datos previos ya conocidos (la composición mineralógica en volumen de la roca) aunque los datos obtenidos solo pueden aplicarse, en este caso, al conjunto de la roca y no a cada sección en particular.

#### *Determinación de la densidad numérica ( $Q_A$ )*

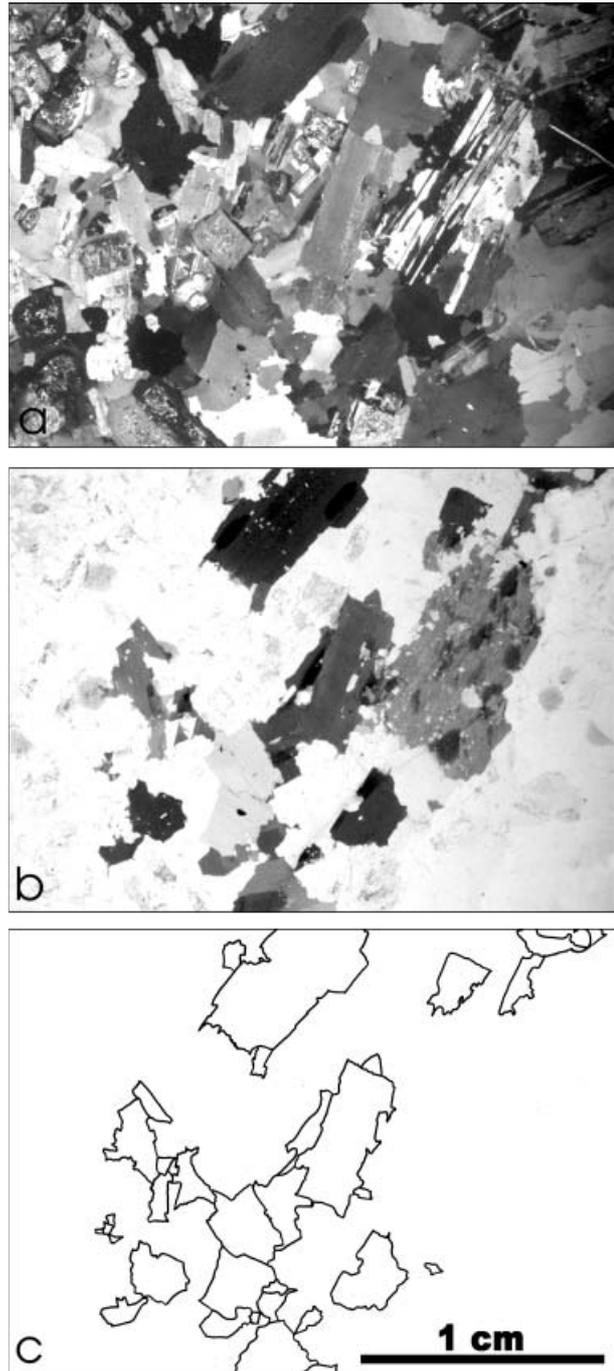
La densidad numérica es el número de secciones de cristales por unidad de superficie, que en la terminología usada en Estereología se representa como  $Q_A$ . Para calcularla hay que determinar el número de secciones de cristales de los distintos minerales que hay en la imagen y dividirlo por el área de dicha imagen. Aunque la determinación puede parecer trivial hay que tener en cuenta algunas normas. Gundersen et al. (1988) explican con detalle los problemas que surgen cuando nos enfrentamos a un problema aparentemente sencillo como éste.

En la Figura 1 pueden observarse las imágenes de una zona de una lámina delgada de tonalita observada mediante microscopía de polarización por luz transmitida (con luz polarizada y analizada -1a- y sin analizador -1b-). La Figura 1c es un esquema en el que sólo se representan las secciones de cristales de biotita para facilitar la descripción del procedimiento y siguiendo la propuesta de Gundersen et al. (1988).

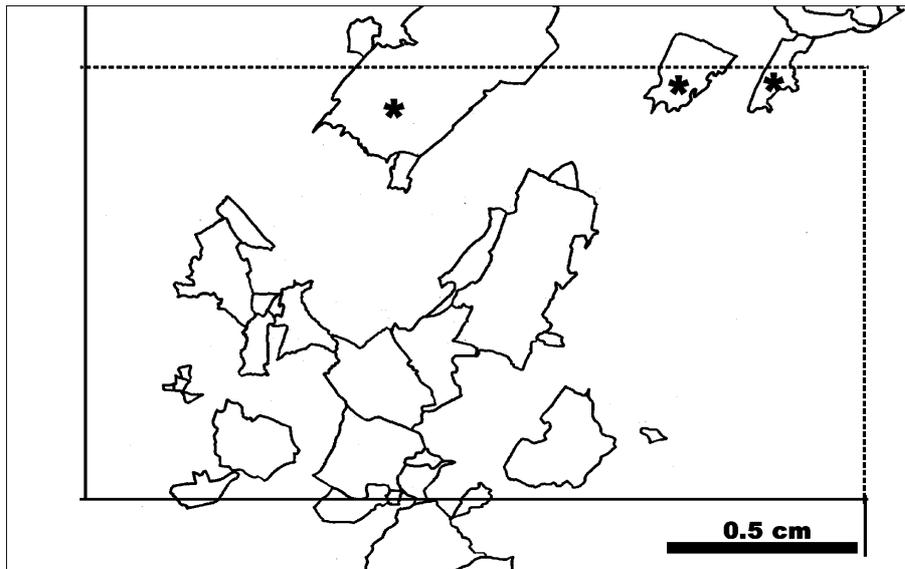
En este esquema se observa que aparecen 29 secciones completas y 4 secciones incompletas de biotita, en total 33 secciones; la cuestión es: ¿todas ellas deben ser consideradas a la hora de estimar la densidad numérica de la biotita en esta sección?

Para determinar sin sesgo el número correcto de secciones, Gundersen et al. (op. cit.) proponen colocar un marco de referencia sobre la imagen; dicho marco está formado por un rectángulo con dos lados adyacentes de líneas continuas y los dos lados opuestos de líneas discontinuas, tal como se observa en la Figura 2. El número de secciones que hay que contar sería la suma de todas las secciones situadas completamente dentro del marco de referencia más las secciones que tengan alguna porción dentro del marco siempre que no corten a las líneas continuas del marco. En el ejemplo de la Figura 2 este número de secciones de biotita sería: 20 completas + 3 secciones incompletas (señaladas con un asterisco) que no cortan a las líneas continuas, en total 23 secciones.

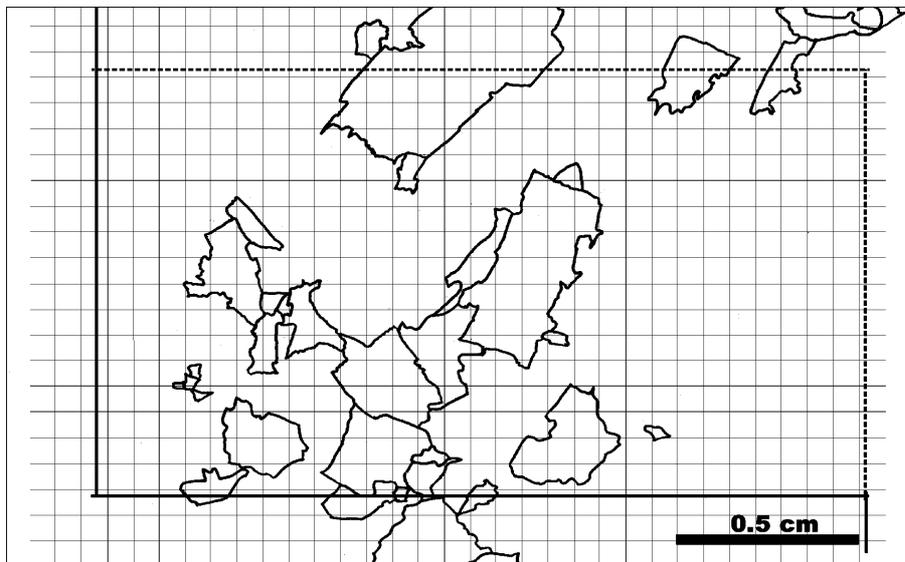
Una vez obtenidas las imágenes, el procedimiento es muy rápido y permite contar fácilmente el número de secciones de cualquiera de las fases minerales presentes en la roca. Teniendo en cuenta el área del marco de referencia,  $233,5 \text{ mm}^2$  en el ejemplo, la densidad numérica de la biotita sería:



**Figura 1.** Imagen de una tonalita observada mediante microscopía de polarización, nicoles cruzados (1a) y nicoles paralelos (1b); esquema en el que aparecen solamente los cristales de biotita cuyo tamaño medio de grano se va a estimar (1c).



**Figura 2.** Marco de conteo superpuesto al esquema de la Figura 1c, para el conteo de cristales y posterior determinación de la densidad numérica de la biotita. Se cuentan todos los cristales cuyas secciones están completamente dentro del marco (20) más las 3 secciones incompletas que no cortan a las líneas continuas, marcadas con un asterisco en la figura.



**Figura 3.** Malla para el conteo de puntos superpuesta a la Figura 2 para estimar el porcentaje superficial ocupado por las secciones de biotita.

$$Q_A (\text{biotita}) = n.^\circ \text{ secciones} / \text{área marco} = 23 / 233,5 = 0,1 \text{ secciones} / \text{mm}^2$$

A pesar de su importancia descriptiva, la densidad numérica debería venir acompañada de otra magnitud, como el tamaño medio de grano. De hecho, dos rocas pueden tener la misma densidad numérica de un mineral dado (por ejemplo, pueden tener ambas una densidad numérica de 0,1 secciones de biotita por  $\text{mm}^2$ ) y sin embargo, tener un tamaño muy distinto de las secciones de los cristales en una y otra roca, con todo lo que ello comporta.

#### *Determinación del porcentaje superficial ocupado por cada fase ( $A_A$ ).*

Si en el interior del marco de referencia antes descrito se dispone, además, una malla de puntos, tal como la que puede verse en la Figura 3, puede llevarse a cabo la determinación del porcentaje de superficie que ocupa cada fase mineral en la imagen; este valor corresponde, como ya se ha mencionado, al porcentaje mineralógico volumétrico.

En el ejemplo de la figura, hay 510 puntos dentro del marco, de los cuales 107 están situados dentro de secciones de biotita. Por lo tanto, el porcentaje superficial ocupado por las secciones de biotita es:

$$A_{(A)}(\text{biotita}) = 100 \times 107 / 510 = 21\%$$

*Cálculo del tamaño medio de grano de cada fase mineral ( $\bar{a}$ ).*

Se calcula a partir de los datos obtenidos en las dos etapas anteriores, dividiendo el área de la lámina ocupada por cada fase mineral entre su densidad numérica.

En nuestro ejemplo, si la biotita ocupa el 21% de la superficie de la lámina delgada, es decir, 21 mm<sup>2</sup> de cada 100 y su densidad numérica es de 0,1 secciones por mm<sup>2</sup>, su tamaño medio de grano expresado como superficie media de las secciones de biotita, sería:

$$\bar{a}(\text{biotita}) = 21 / 0,1 = 210 \text{ mm}^2$$

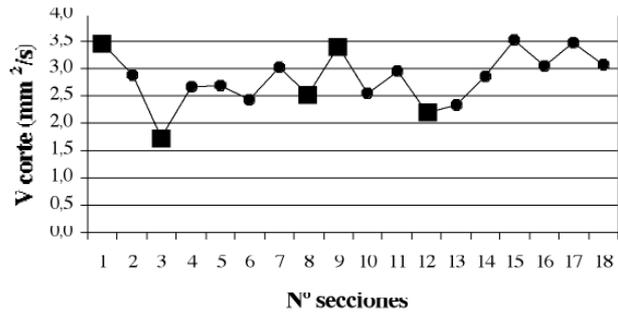
**Aplicaciones**

Este procedimiento suministra datos importantes en varios campos de investigación geológicos, especialmente en el campo de la Petrología, tanto en sus aspectos petrogenéticos, como petrofísicos.

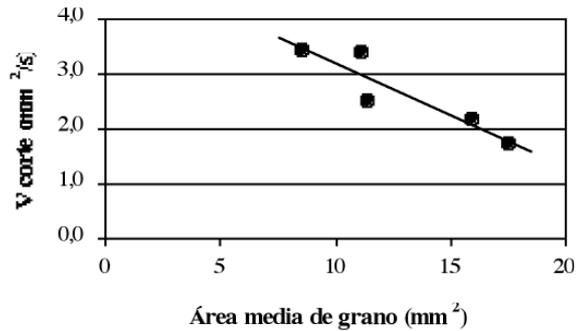
Como ejemplo de la aplicación de los procedimientos estereológicos explicados, se presentan algunos resultados preliminares de la investigación ya mencionada anteriormente sobre la interpretación petrofísica de la velocidad de corte de granitos con discos diamantados.

Las rocas estudiadas son granitoides españoles utilizados como rocas ornamentales. A partir de bloques de cantera se extraen en el laboratorio testigos cilíndricos de 25 mm de diámetro y de unos 40 mm de altura. Cada uno de estos cilindros se corta perpendicularmente a su eje utilizando una sierra de disco diamantado de laboratorio, que permite controlar tanto la velocidad de rotación del disco como la presión de corte; el espesor del disco de corte utilizado es de 300 μm. Las condiciones de corte se mantienen constantes durante todos los cortes con el fin de minimizar la influencia de los factores externos, de manera que las diferentes velocidades de corte obtenidas puedan ser interpretadas petrográficamente. Para comprobar el posible desgaste sufrido por el disco de corte, periódicamente se cortó un cilindro patrón isótropo (un mármol monomineralico), comprobándose que la velocidad de corte del mármol no había variado.

Para medir la velocidad de corte se cronometró el tiempo que el disco tardaba en cortar la sección completa (unos 491 mm<sup>2</sup>). A partir de los cilindros cortados, la superficie cortada por el disco diamantado se pegó directamente a un portamuestras, preparándose entonces una lámina delgada pulida de 30 μm. De esta forma se pueden estudiar las características petrográficas de la superficie realmente cortada por la sierra.



**Figura 4.** Velocidad de corte (mm<sup>2</sup>/s) de las 18 secciones de granito Rosa Porriño cortadas con sierra de disco diamantado en el laboratorio. Se señalan las cinco secciones seleccionadas para la cuantificación del tamaño de grano de las secciones de los cristales.



**Figura 5.** Relación entre la velocidad de corte y el tamaño medio de grano de las cinco secciones seleccionadas de Rosa Porriño.

Una de las rocas estudiadas en esta investigación es el Rosa Porriño, un granito gallego mundialmente conocido por su amplia utilización como roca ornamental.

En la Figura 4 se muestran las velocidades de corte de 18 secciones de esta roca procedentes de cuatro cilindros distintos. Aunque todas las secciones son del mismo bloque, sus velocidades de corte son bastante distintas debido a las diferentes características petrográficas de cada sección.

Para estudiar la influencia de estas características petrográficas en la velocidad de corte se seleccionaron cinco secciones, señaladas en la Figura 4, cuya velocidad de corte cubría todo el rango de variación observado, tanto los valores extremos como los medios.

En las láminas delgadas que se prepararon a partir de las secciones se determinó la composición mineralógica y el tamaño medio de grano de cada una de ellas mediante el procedimiento estereológico descrito en el apartado anterior.

En la Figura 5 se representa la velocidad de corte frente al tamaño medio de grano de las cinco láminas estudiadas. Se observa cómo la velocidad de corte dis-

minuye a medida que aumenta el tamaño medio de grano de la roca.

Es evidente que la velocidad de corte de las rocas depende de muchos factores y que se debe ser prudente a la hora de las interpretaciones petrográficas de esta velocidad (véase por ejemplo la revisión de Rodríguez-Rey et al., 1998). Por lo tanto, se necesitan muchos más datos para la modelización de la cortabilidad de rocas con útiles diamantados. De todas formas, el procedimiento estereológico descrito en este trabajo ofrece muchas ventajas para la obtención de estos datos.

### Conclusiones

Los procedimientos estereológicos utilizados en este trabajo suministran información cuantitativa sobre caracte-

rísticas texturales importantes (densidad numérica, porcentaje superficial y tamaño de grano), muy útiles en gran diversidad de estudios petrológicos desde petrogenéticos hasta petrofísicos. Por otra parte, el procedimiento descrito es de sencilla y rápida aplicación, lo que facilita los estudios petrográficos a realizar.

Concretamente, en la comparación entre el tamaño de grano determinado por este procedimiento sobre varias secciones del granito Rosa Porriño obtenidas por corte con una sierra de borde diamantado, y las velocidades de corte de cada una de ellas, se encuentra una relación inversa entre ambos parámetros.

### Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia y Tecnología por la subvención concedida para la realización del proyecto MAT2001-3594.

### Referencias

BIRLE, J. D. and RATTERMAN, E. (1986): An approximate ranking of the sawability of hard building stones based on laboratory tests. *Dimen. Stone Mag.*, 4:3-29.

CHAYES, F. and FAIRBAIRN H. W. (1951): A test of the precision of the thin sections analysis by point counter. *Amer. Miner.*, 36:704-712.

GUNDENSEN, H. J. G., BENDTSEN, T. F., KORBO, L., MARCUSSEN, N., MOLLER, A., NIELSEN, K., NYENGAARD, J. R., SORENSEN, F. B., VESTERBY, A. and WEST, M. J. (1988): Some new, simple and efficient stereological methods and their use in pathological research and diagnosis. *Acta Pathologica, Microbiologica et Immunologica Scandinavica (APMIS)*, 96:379-394.

HOUPERT, R. (1968): La resitence à la rupture des roches. *Industrie Minerale.*, n.º Espec.: 21-23.

LAMA, R. D. and VUTUKURI, V. S. (1978): *Handbook on mechanical properties of rocks. Testing techniques and results*. Vol. II. Series on Rocks and Soil Mech. Trans. Tech. Pub., Alemania. 482 pp.

MARSH, B. D. (1988): Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99:277-291.

MONTOTO, M. (1983). Petrophysics: The petrographic interpretation of the physical properties of rocks. *Proc. 5<sup>th</sup> Congress of the Int. Soc. Rock Mech., Melbourne*, Section B: 93-98.

NISTAL, A. M. (1993): *Discriminación, cuantificación y cartografiado de componentes petrográficos mediante proceso digital de multi-imágenes microscópicas*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 235 pp.

ORDAZ, J. (1973): *Estudio petrográfico del comportamiento mecánico de los mármoles bajo esfuerzos uniaxiales*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 228 pp.

PERRIER, R. (1993): Le diamant dans le sciage circulaire des roches. 3<sup>me</sup> partie. *Le Mausolée*, 5(93):44-49.

RODRÍGUEZ REY, A., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., CALLEJA, L. y Ruiz de ARGANDOÑA, V. G. (1998): El corte de rocas ornamentales con discos diamantados: influencia de las características petrográficas de la roca. *Materiales de Construcción*, 48, 251:49-55.