

Aprovechamiento integral de una cantera de granito ornamental

Total exploitation of an ornamental granite quarry

J. TABOADA, L. R. ALEJANO, F. G^a-BASTANTE, C. ORDÓÑEZ

Universidad de Vigo

Persona de contacto/Corresponding author: tino@lidia.uvigo.es

Fecha de recepción: 29-XI-04

Fecha de aceptación: 29-XI-04

ESPAÑA

RESUMEN

En este trabajo se propone una metodología para estimar el porcentaje de recuperación de cada uno de los productos que se pueden obtener en la explotación de una cantera de granito ornamental: bloque, semibloque, mampostería y perpiños, y material restante destinado a la obtención de áridos. De esta manera se logra un aprovechamiento integral de la cantera, evitándose la generación de estériles y el subsiguiente impacto ambiental producido por éstos. La metodología de análisis se basa en la recopilación detallada y exhaustiva de datos de discontinuidades en los frentes de investigación, que se interpretan estadísticamente y se proyectan sobre los tres planos de debilidad propios del granito ornamental. Con esta información, y las dimensiones mínimas comerciales de referencia para cada tipo de material, se realiza el cálculo de las recuperaciones correspondientes de cada material en cada plano y los resultados de recuperación sobre estos tres planos se integran mediante técnicas espaciales; obteniéndose la evaluación de los recursos en la cantera para su aprovechamiento integral. La metodología ha sido aplicada a una cantera en fase de apertura para realizar una valoración inicial de su viabilidad económica.

SUMMARY

In this paper we propose a methodology to estimate the recovery percentage for each of the products which can be obtained from the exploitation of an ornamental granite quarry: block, semi-block, masonry-transverse stone, and the smaller materials that can be used to obtain construction aggregates. This methodology ensures that quarry exploitation is exhaustive, thereby minimising the production of spoils and the consequent negative impact on the environment. The analysis is based on a detailed and exhaustive compilation of discontinuity data from the research fronts, which are then interpreted statistically and projected over the three weakness planes that are a particular feature of ornamental granite deposits. Using this information, and bearing in mind the minimum commercially viable sizes for each kind of granite, the corresponding recovery rates are calculated for each material in each plane. The results are then integrated using spatial techniques, and the result is an evaluation of quarry contents with a view to total exploitation. This methodology was applied to a quarry in the opening phase in order to carry out an a priori assessment of the economic feasibility of the quarry.

PALABRAS CLAVE: roca ornamental, granito, granito ornamental, áridos, cantera, aprovechamiento integral.

KEYWORDS: ornamental rock, granite, ornamental granite, aggregate, quarry, total exploitation.

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad exige cada día más que el aprovechamiento de los recursos se realice en consonancia con la protección medioambiental. Uno de los problemas más graves de la explotación comercial de canteras de rocas ornamentales ha sido, y es, la elevada generación de estériles que, una vez situados en las correspondientes escombreras, producen un impacto ambiental negativo en forma de modificación fisiográfica e impactos paisajísticos, moderados en el mejor de los casos. Para evitar tales impactos, una de las soluciones más razonables es realizar un aprovechamiento integral de los recursos generados en las explotaciones, de forma que no se genere ningún material estéril.

Para poder llevar a cabo un aprovechamiento integral de este tipo es necesario contar con una metodología que permita conocer los rendimientos de los distintos productos en la cantera antes de ponerla en marcha. Las explotaciones de rocas ornamentales presenta ciertas peculiaridades derivadas del tratamiento posterior al que es sometida la roca, labor necesaria para transformarla en un producto vendible al usuario final. Así, el minero está obligado a extraer un material con unas dimensiones mínimas si quiere que su piedra tenga valor comercial, y de hecho ha de procurar que el tamaño sea el óptimo que le exige la industria transformadora.

Al tratar de obtener piezas de granito ornamental, tanto más caras cuanto más grandes, nos interesa obtener blo-

ques primarios de grandes dimensiones, que más tarde se van escuadrando hasta obtener el bloque paralelepípedo de máxima medida que se puede transportar y serrar en tableros en el telar.

En general se considera bloque susceptible de ser serrado en telar el que tiene las siguientes medidas: longitud entre 1,90 y 3,30 m, anchura entre 1,00 y 1,80 m y altura de 0,90 a 1,60 m. Los tableros que se obtengan después de serrar el bloque tendrán normalmente de 2 a 3 cm de espesor y la máxima superficie posible, para permitir obtener piezas grandes.

Como escalón inmediatamente inferior en el tamaño de los productos de cantera está el semibloque, que, sin alcanzar las medidas anteriormente citadas, permite, después de serrarlo en sierra de disco, obtener piezas de tamaño comercial y resultados económicos aceptables.

Cuando la fracturación natural del macizo rocoso impide obtener semibloques de cierto tamaño, los productos de pequeñas dimensiones se aprovechan para piedra de sillaría y mampostería si permiten obtener varias piezas de dimensiones superiores a los 15 cm de espesor, 42 cm de altura y longitud variable.

En el caso de que la fracturación impida obtener sillares, el aprovechamiento del macizo rocoso se ciñe a piezas de muy pequeña dimensión, tipo adoquín o áridos de construcción (gravas, gravillas y arenas).

Por este motivo, en el análisis económico de este tipo de explotaciones es ineludible tener en cuenta, además de las características físicas y químicas de la roca, el grado de fracturación del macizo, pues, al fin y al cabo, sólo de donde hay se puede extraer (6).

La predicción del tamaño y forma de los bloques extraíbles en una cantera ha sido abordado por diversos autores. Castaing y Rabu (2) consideran un sistema de fracturación simplificado, consistente en dos familias principales verticales y ortogonales entre sí, con una tercera familia horizontal. Wang H. y otros (12) proponen un método que incluye una técnica de estudio de discontinuidades detallada, pero finalmente implementan un algoritmo en el que asumen que todas las discontinuidades son persistentes. Esta suposición afecta a la exactitud del método para predecir los tamaños y formas de los bloques. Wang L.G. y otros (13) han desarrollado un programa de ordenador para simular bloques en tres dimensiones enfocado al estudio de la fragmentación del macizo en minería por hundimiento pero considerando también que las discontinuidades son persistentes. En cambio, el método que proponemos en este trabajo sí tiene en cuenta la impersistencia de las discontinuidades, factor que va a condicionar el tipo de producto extraíble, y, por tanto, el rendimiento económico de la cantera.

Los rendimientos económicos a partir de los productos obtenidos en una cantera de granito son proporcionales al tamaño del bloque obtenido (8).

2. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE LA RECUPERACIÓN EN CANTERAS

A continuación se presenta la metodología desarrollada para conocer el porcentaje de recuperación de los distintos materiales de construcción en una cantera de granito ornamental a partir de los datos de discontinuidades en los frentes, su representación en los planos de laboreo de la piedra, la estimación de la utilidad del granito en cada uno de estos planos y la integración final en el espacio de la recuperación de cada material.

2.1. Recopilación e interpretación de datos de discontinuidades

El primer paso consiste en determinar la estructura del macizo rocoso a través de la toma de datos de discontinuidades, para lo cual es necesario tener abierto un frente experimental y realizar varias visitas a medida que avance el frente. En cada una de las visitas se miden todas las discontinuidades que afloran en el frente. Las medidas incluirán las características geomecánicas principales, prestándose especial atención a las geométricas, que incluyen la orientación (buzamiento y dirección de buzamiento), la continuidad (según rumbo y buzamiento) y el espaciado. Las medidas se realizarán de acuerdo con las indicaciones de la ISRM (1) y en un número mínimo de cincuenta discontinuidades.

También es preciso realizar medidas en campo de los espaciados en las direcciones perpendiculares a las familias más destacadas, a partir de las cuales se estima el índice volumétrico J_v .

En la minería de granito se realiza la extracción de la roca en bloques teniendo en cuenta los tres planos de debilidad de la roca. Estos tres planos, aproximadamente ortogonales entre sí, se denominan, en el argot minero, andar, norte y trinquete, y son planos en los que la roca puede cortarse con mayor facilidad (3) (7).

El plano del andar es subhorizontal, y a través de él se realiza el levante o despegue de la roca; es el plano según el cual se serrarán los bloques en el telar por ofrecer menos resistencia. Debido a esto interesa que la cara más grande del bloque corresponda a este plano, con el fin de aumentar los rendimientos de tabla obtenida en el telar. El andar tiene su causa en la orientación de los minerales de la roca que presentan sus planos de exfoliación más extensos paralelos al plano horizontal.

El plano del trinquete es vertical, perpendicular al andar, y en él la roca rompe peor que en el anterior. Su origen posiblemente es estructural (3).

El plano del norte, vertical y ortogonal a los otros dos, es el de mínima debilidad de los tres, aún siendo un plano de debilidad, y su causa está en una microfracturación, originada posiblemente por esfuerzos de compresión tectónicos.

Andar o levante, norte y trinqué marcan la orientación de la explotación. Por este motivo parece coherente relacionar los tres planos de debilidad con la fracturación del macizo rocoso, ya que ambas están directamente ligadas a la tectónica sufrida por el macizo en su historia geológica.

Los datos de discontinuidades se interpretan utilizando la plantilla equiangular meridional de Wulf (9) (10), que permite la representación en proyección estereográfica de orientaciones y el agrupamiento guiado de las discontinuidades en familias. En primer lugar, se representan los polos correspondientes a todos los planos medidos en proyección estereográfica equiangular sobre el hemisferio inferior. A partir de la concentración de polos se obtiene su distribución porcentual sobre la plantilla. Posteriormente se calcula la orientación media de las orientaciones obtenidas en cada una de ellas (Figura 1).

Una vez identificadas las familias de juntas existentes se vuelve sobre las fichas de campo para asignar cada discontinuidad a la familia que pertenece. Las juntas se reordenan por familias y se obtienen los valores medios y desviaciones típicas de los buzamientos, direcciones de buzamiento, continuidades según rumbo y buzamiento, y espaciados de cada una de las cinco familias identificadas.

2.2. Representación de las discontinuidades en los planos de trabajo

Una vez estudiados los principales parámetros geométricos de las juntas se pasa a analizar cómo va a ser su distribución en los planos específicos que marcan el laboreo del granito ornamental. Para ello se utilizó el programa UDEC (4), que genera automáticamente una representación gráfica aproximada de las discontinuidades en el plano que se haya seleccionado, considerando que éstas siguen una distribución normal, a partir de los siguientes datos para cada familia de discontinuidades:

- La inclinación de las juntas en dicho plano (valor medio y desviación estándar).
- La continuidad de las juntas de la familia en dicho plano (media y desviación estándar).
- La separación en una misma línea de discontinuidades consecutivas o "gap" (media y desviación estándar).
- El espaciado aparente de la familia en dicho plano (valor medio y desviación estándar).

Si los datos introducidos son suficientemente representativos del macizo rocoso analizado, cabe esperar que la representación también sea representativa de la distribución de discontinuidades en dicho plano, por lo que se podrá utilizar para conocer, de manera estimativa, el porcentaje de elementos rectangulares de unas determinadas dimensiones que se encontrarán en dicho plano y que no estén atravesados por discontinuidades.

Para conocer los valores de inclinación, continuidad, distancia entre discontinuidades (gap) y espaciado de cada

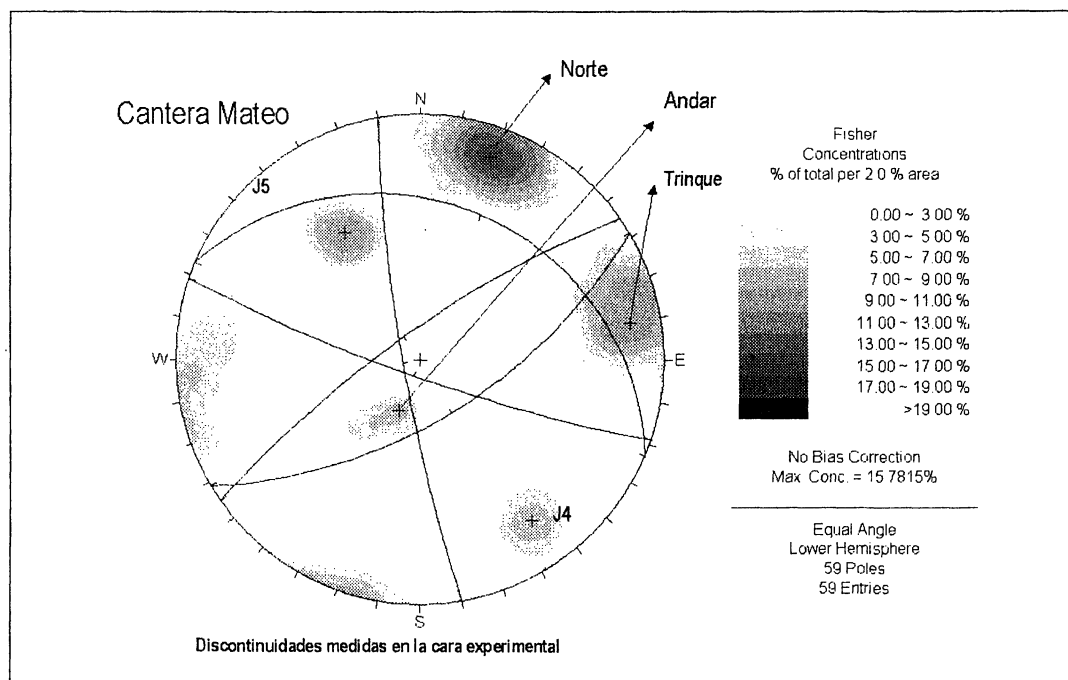
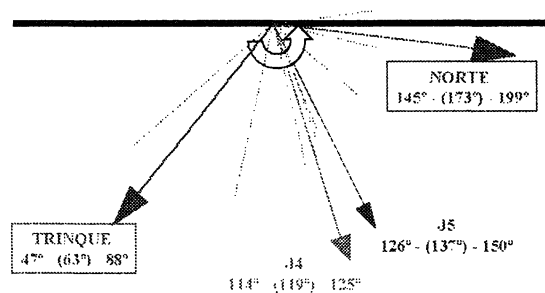


Figura 1.- Representación de la distribución de polos y estimación de las familias de discontinuidades.

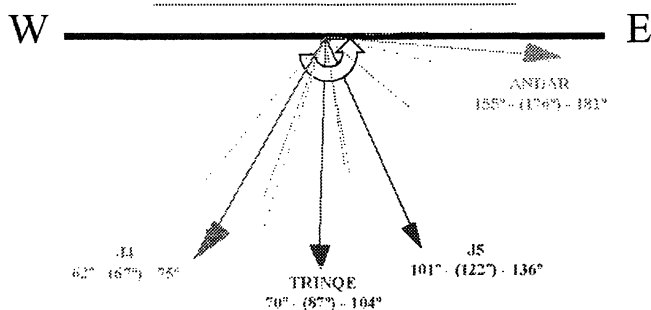


PLANO ANDAR



	Gap (media)	Gap (desviación típica)	Continuidad (media)	Continuidad (desviación típica)
NORTE	1,6	0,8	20	12
TRINQUE	2	1,35	6	6
J4	7	6	4	1,6
J5	6	7	11	5

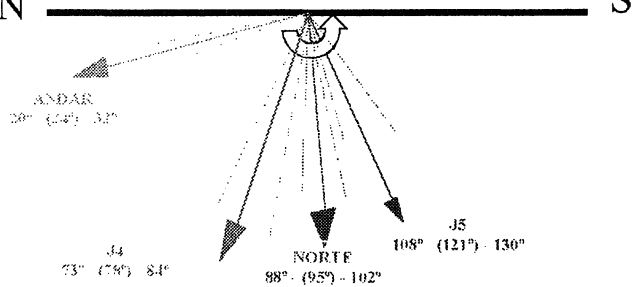
PLANO NORTE



	Gap (media)	Gap (desviación típica)	Continuidad (media)	Continuidad (desviación típica)
ANDAR	1,5	0,8	13	8
TRINQUE	1,6	0,8	6	3
J4	8	6	3,5	1,5
J5	6	7	7	3



PLANO TRINQUE



	Gap (media)	Gap (desviación típica)	Continuidad (media)	Continuidad (desviación típica)
ANDAR	1,5	0,8	13	8
NORTE	1,6	0,8	6	3
J4	5,2	4,4	3	1,6
J5	4	4,5	4	2,3

Figura 2.- Orientación y estimación del espaciado y la continuidad de cada familia en cada plano.

una de las familias de discontinuidades encontradas sobre un plano específico, se representan todos los planos en proyección estereográfica equiangular, junto con los valores medios, y se observa la orientación y la continuidad (persistencia) en los planos de interés de cada una de las familias de discontinuidades, así como las variaciones de la misma. Lógicamente, los planos de interés en los que se quiere conocer esta distribución de juntas son el del andar, el del trinquete y el del norte. La orientación media de cada familia, junto con la mínima y la máxima, se proyectan sobre cada plano de representación (andar, trinquete y norte). Los gráficos resultantes (Figura 2) son la base para estimar, en cada plano de referencia, los valores geométricos de representación de las familias que aparezcan y, en último caso, de las discontinuidades individuales que se observen. Los datos de espaciados aparentes se calculan proyectando los valores de los espaciados reales sobre los planos de trabajo. En cuanto a la persistencia, se estima mediante la proyección en cada plano de un vector que es la suma de dos: uno en la dirección del rumbo y otro del buzamiento, y cuyo módulo es, para

cada uno de ellos, el valor medio de las medidas realizadas en esas direcciones.

El valor medio y la desviación típica del gap estimado se calculan considerando que cuando en el afloramiento se observan muchas discontinuidades de una determinada familia (por ejemplo en la gama de entre el 25% ó 35% de todas las observadas), entonces el valor del gap será relativamente pequeño, por ejemplo entre 1,5 y 2 veces los valores correspondientes de continuidad de las juntas de esa familia en su plano de proyección; mientras que si, por el contrario, una familia se observa relativamente poco (por ejemplo en la gama de entre el 5% ó 15% de todas las observadas), entonces el valor del gap será relativamente grande, por ejemplo entre 4 y 5 veces los valores correspondientes de continuidad de las juntas de esa familia en su plano de proyección.

De este modo se construyen los modelos de los planos de proyección de andar, trinquete y norte para simular una distribución de juntas (Figura 3) en cada uno de dichos pla-

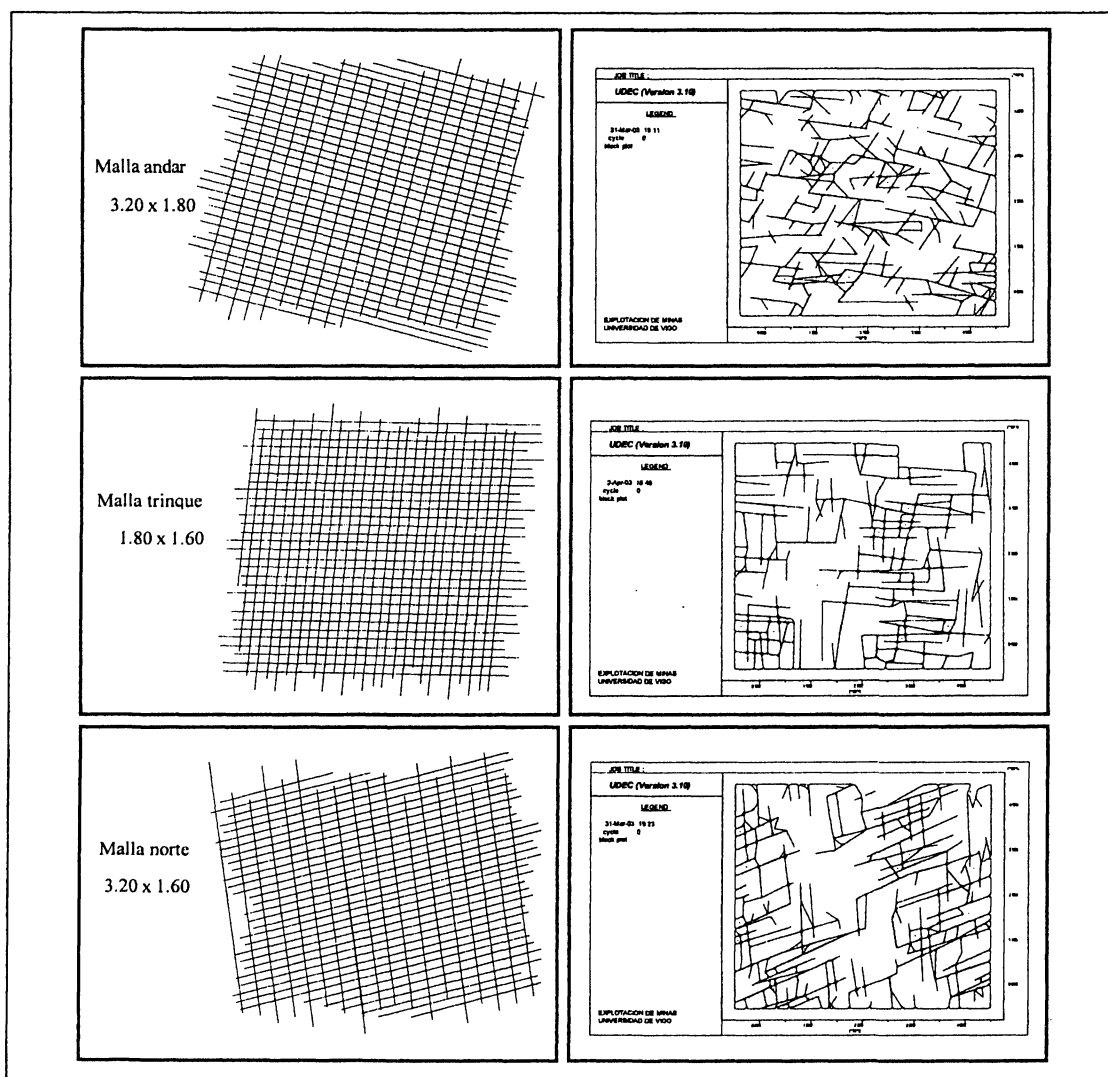


Figura 3.- Mallas de control de acuerdo con el tamaño de bloque definido en cada uno de los planos de debilidad del granito, junto con la representación de las discontinuidades en cada uno de dichos planos.

nos (y en una extensión suficientemente representativa de acuerdo al tamaño de la cantera estudiada) que se ajuste a las características geométricas de cada una de las familias de juntas, por lo que se puede obtener como resultado el aspecto que tendrían las supuestas secciones del macizo rocoso en cada una de las direcciones de los planos de debilidad principales. Estas representaciones de las discontinuidades en cada plano de debilidad, aparte de dar una idea de la estructura del macizo, son la base del método propuesto para estimar los porcentajes extraíbles del macizo en los diferentes tamaños aprovechables, a través de la superposición de plantillas orientadas según las direcciones de cada uno de estos planos y con un espaciado tal que permita la obtención de bloques. En este sentido, debemos tener en cuenta las definiciones de bloque, semibloque y material para mampostería o perpiños, y las orientaciones en las que se suelen obtener estas unidades, y recordar que la explotación del granito ornamental se realiza en las tres direcciones de debilidad principales, y que la unidad de explotación ideal que se vendería al precio más caro posible sería la de bloque.

2.3. Estimación de la recuperación por planos de trabajo

Se define el bloque de granito ornamental como una porción extraída del macizo con forma de paralelepípedo y ángulos rectos, y tal que no presente ni discontinuidades ni defectos que puedan hacer inviable su posterior tratamiento (típicamente serrado de tableros en un telar) y que tenga las dimensiones citadas anteriormente.

La experiencia ha demostrado que para obtener el número mayor posible de bloques de este tipo en un yacimiento, la explotación del mismo se deberá hacer de tal forma que las caras más grandes de dichos bloques coincidan con la dirección del andar y las más pequeñas con la dirección del norte. Lógicamente, proyectando este bloque sobre las tres direcciones de explotación, y en particular sobre sendas mallas con un espaciado igual al del tamaño del bloque, se puede determinar el porcentaje de bloques que se obtendrían a priori en cada uno de estos planos, entendiéndose como bloque aquellas zonas de la malla en las que no haya discontinuidades (Figura 4).

En el ámbito de las explotaciones de granito ornamental se suele llamar semibloque a toda aquella pieza de material de la que se puedan obtener piezas grandes o tableros pero que no alcance las dimensiones de bloque tal y como ha sido definido. Se trata de una definición no demasiado exacta desde el punto de vista técnico aunque, en general, los canteros saben diferenciarlo bien. Si se trabaja con las mallas indicadas en el apartado anterior, en cada uno de los planos de proyección se propondrá la definición de semibloque cuando en un elemento de la malla se pueda obtener la mitad del área del mismo cortada y escuadrada sin presencia de discontinuidades. Todos los elementos de las mallas que no sean bloques o semibloques se consideraran por ahora resto de material sobre cada uno de los planos.

Los bloques y semibloques se envían al telar para producir tablero y chapas, que son los productos de mayor rendimiento económico. Del resto de material en cantera se

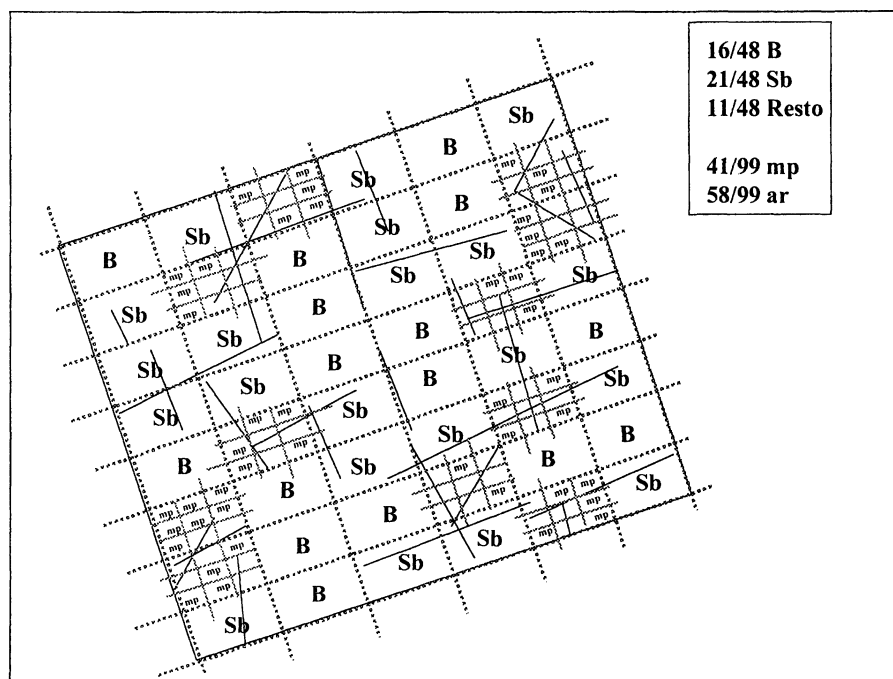


Figura 4.- Método estimación de porcentajes de material para un área pequeña de un macizo en el plano de proyección de una de las direcciones principales (B-bloque, Sb-semibloque, mp-material para mampostería o perpiño y ar-áridos) a través de recuento en una cuadrícula.

procura obtener pequeños elementos prismáticos que se pueden vender para mampostería (típicamente utilizada en pequeños muros de contención) o que pueden ser tallados por canteros para producir pequeños bloques casi perfectamente ortogonales (piedra de sillería) y que se conocen tradicionalmente como perpiaños.

En cuanto al tamaño mínimo de pieza prismática de granito que se podría utilizar como base para producir este tipo de materiales, es algo que puede variar según canteras, tradiciones y zonas. Tras consultar con canteros y personas especializadas en el comercio de material de mampostería y perpiaño, se consideró una pieza prismática mínima razonable de más de 1 x 0,6 x 0,5 m, para poder tratar y vender como mampostería o tallar para perpiaños.

La misma malla que ha servido para diferenciar los elementos que se consideraban en el plano como bloque, semibloque o resto, se utiliza para diferenciar lo que es material para mampostería o perpiaño (cuando la correspondiente unidad de malla no contenga ninguna discontinuidad) de lo que no sería válido para obtener estos materiales, y que, por lo tanto, habrá que machacar para vender como árido (cuando en la correspondiente cuadrícula se observe alguna discontinuidad). Así, en cada uno de los planos de proyección se divide cada cuadrícula que se consideraba como resto en nueve (todas ellas de igual tamaño) y se va realizando un recuento sobre las cuadrículas señalando las zonas válidas para mampostería o perpiaño de las que no lo son (figura 4). De esta manera queda estimado sobre cada plano el porcentaje sobre el mismo de bloques, semibloques, material para mampostería y perpiaño y resto de material que sólo se podrá utilizar para producir áridos sobre el total de granito que se encuentra en el yacimiento a explotar.

2.4. Integración espacial de la recuperación de los distintos materiales en cantera

A partir de los porcentajes estimados para cada tipo de producto en cada plano de debilidad se procede a la estimación en el espacio de los porcentajes de recuperación de los distintos productos (bloque, semibloque, para mampostería o perpiaños y para áridos) que marcarán la viabilidad y, en su caso, éxito económico de la cantera en cuestión.

Se considera que existe bloque recuperable en el espacio cuando los tres componentes en los planos sean bloque.

Por tanto, la recuperación total de bloque en la cantera será:

$$R_{\text{bloque en cantera}}(\%) = \frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} \cdot \eta^B$$

donde η^B es el rendimiento estimado para los bloques, que se determina como un valor medio de los rendimientos obtenidos en diferentes canteras de granito de la zona, y $\%_{AND}^B$, $\%_{TRIN}^B$, $\%_{NOR}^B$ los porcentajes de recuperación de bloque estimados en los planos andar, trinquete y norte, respectivamente.

Análogamente, se considerará semibloque cuando:

1. los tres componentes en los planos sean semibloque (R_{sb-1})
2. se tengan dos componentes semibloque y una de bloque (R_{sb-2})
3. se tenga una componente de semibloque y dos de bloque (R_{sb-3})

Por tanto, las recuperaciones parciales serán:

$$R_{sb-1}(\%) = \frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} \cdot \eta^{sb-sb-sb}$$

$$R_{sb-2}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} \right) \cdot \eta^{B-sb-sb}$$

$$R_{sb-3}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} \right) \cdot \eta^{B-B-sb}$$

donde $\eta^{sb-sb-sb}$, $\eta^{B-sb-sb}$ y η^{B-B-sb} son, respectivamente, los rendimientos de material en cantera en los casos en que los tres componentes en los planos sean semibloque, en que se tengan dos componentes semibloque y una de bloque, y en que se tenga una componente de semibloque y dos de bloque. Estos rendimientos, al igual que el rendimiento de los bloques, se obtienen promediando los valores de los rendimientos en las canteras de granito de la zona.

De esta manera la recuperación de semibloque en cantera será:

$$R_{\text{Semibloque en cantera}}(\%) = R_{sb-1}(\%) + R_{sb-2}(\%) + R_{sb-3}(\%)$$

Finalmente, habrá que estimar el porcentaje de material total del yacimiento que pueda ser vendido como mampostería o perpiaño, lo cual exigirá una cuadrícula más fina. Según la división de las distintas proyecciones en

los planos principales se considerará el material mampostería o perpiaño cuando:

1. se tengan dos componentes bloque y una “mampostería-perpiaño” (R_{mp-1})

2. se tengan una componente bloque, una semi-bloque y una “mampostería-perpiaño” (R_{mp-2})

3. se tengan dos componentes semi-bloque y una “mampostería-perpiaño” (R_{mp-3})

4. se tenga una componente de bloque y dos “mampostería-perpiaño” (R_{mp-4})

5. se tenga una componente de semi-bloque y dos “mampostería-perpiaño” (R_{mp-5})

6. se tengan tres componentes de “mampostería-perpiaño” (R_{mp-6})

Por tanto, las recuperaciones parciales serán:

$$R_{mp-1}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} \right) \cdot \eta^{B-B-mp}$$

$$R_{mp-2}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} \right. \\ \left. + \frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} \right) \cdot \eta^{B-sb-mp}$$

$$R_{mp-3}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} \right) \cdot \eta^{sb-sb-mp}$$

$$R_{mp-4}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^B \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^B \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^B}{10.000} \right) \cdot \eta^{B-mp-mp}$$

$$R_{mp-5}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^{sb} \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^{sb} \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} + \frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^{sb}}{10.000} \right) \cdot \eta^{sb-mp-mp}$$

$$R_{mp-6}(\%) = \left(\frac{\%_{AND}^{mp} \cdot \%_{TRIN}^{mp} \cdot \%_{NOR}^{mp}}{10.000} \right) \cdot \eta^{mp-mp-mp}$$

Donde $\eta^{*-\alpha-\beta}$ son los rendimientos de material en cantera para cada uno de los casos indicados (estimados experimentalmente, como los del bloque y del semibloque).

De esta manera, la recuperación total de mampostería y perpiño en cantera será:

$$R_{mp-en\ cantera}(\%) = R_{mp-1}(\%) + R_{mp-2}(\%) + R_{mp-3}(\%) + R_{mp-4}(\%) + R_{mp-5}(\%) + R_{mp-6}(\%)$$

En términos generales, todo el material restante, junto con el que se elimine por escuadras a través de los rendimientos, se considerará útil para la producción de áridos.

3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN CASO REAL

La metodología descrita se ha aplicado al estudio de la cantera de granito “Mateo de Cotobade”, situada en la provincia de Pontevedra, y abierta en fase experimental. Pontevedra pertenece a la Comunidad Autónoma de Galicia (Noroeste de España), uno de los principales productores mundiales de granito.

El producto que se obtiene es de la variedad comercial “Pedra Vella de Rebordelo”, con un color que correspon-

de al “Silvestre Moreno”, presente en muchos puntos de Galicia, por lo que se conoce como “Pedra do País”. En la Tabla 1 se muestran los valores medios obtenidos en diferentes ensayos realizados sobre muestras de granito de la cantera.

La Figura 5 es una fotografía obtenida en el frente de la cantera.

3.1. Marco geológico

La zona de estudio pertenece al cuadrante NO de la hoja nº 186 (11), Pontecandelas, siendo la roca a beneficiar un granito alcalino de dos micas con abundante proporción de megacrístales de feldespato. La orogenia principal a que han sido sometidos los materiales de la zona es la hercínica, que se divide en tres fases principales (I, II, III) y una posterior denominada fase tardía de deformación (5). Sobre el granito objeto de la explotación actuaron la fase III y la fase tardía. La fase III regional es paralela a la I y tiene una dirección N 130-170° E. Los planos del Norte y Andar, tanto a escala regional (a nivel foto aérea y geología Magna) como a escala local a partir de datos del frente, se orientan según rumbos N 110-120° E. La fase tardía de deformación desarrolla fracturas de dos tipos: en primer lugar, fracturas de tensión N 70° E, que coinciden con gran exactitud con las denominadas fracturas J4 y J5, observables en la foto aérea y en la cartografía Magna, así como con mediciones de las mismas en

TABLA 1
Valores medios para diferentes ensayos realizados en muestras tomadas en la cantera Mateo de Cotobade

ENSAYO	NORMA	VALOR MEDIO
Densidad aparente	UNE-EN 1936: 1999	2586,1 kg/m ³
Porosidad abierta	UNE-EN 1936: 1999	2,69%
Resistencia a compresión	UNE-EN 1926: 1999	116 MPa
Resistencia a flexión bajo carga concentrada	UNE-EN 12372: 1999	8,4 MPa
Resistencia al choque	UNE 22-179-85	63,75 cm
Resistencia a las heladas	UNE 22-174-85	0,00 %
Absorción de agua a presión atmosférica	UNE-EN 13755	1%
Coefficiente de absorción de agua por capilaridad	UNE-EN 1925	8,24 g/m ² · s ^{1/2}

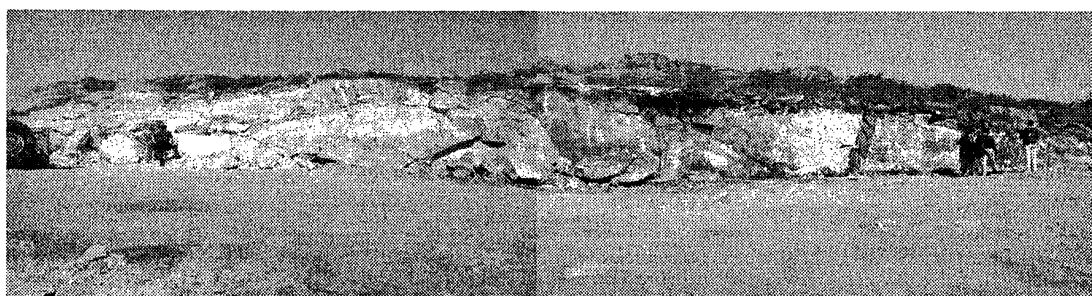


Figura 5.- Vista del frente de la cantera Mateo de Cotobade.

forma de discontinuidades en la cantera; en segundo lugar, fracturas de cizallamiento, de dirección N 30-40 ° E, que han permanecido activas hasta épocas recientes. Estas fracturas se observan en la fotografía aérea y en la geología Magna, con una dirección más bien N 20 ° E. Sin embargo, en la cantera, y en forma de discontinuidades que marcan el denominado trinque, parecen algo más desviadas de la general con un rumbo medio N 10-20 ° W (Figura 6). Como se observa a partir de estas consideraciones, la geología estructural regional se correlaciona razonablemente con la tectónica local y con las discontinuidades observadas en el frente experimental.

3.2. Resultados

En el trabajo de campo se observó que existen tres familias de discontinuidades principales asociadas a los tres planos de debilidad buscados en la obtención de bloques en minería ornamental, esto es, el andar, el trinque y el norte. De los datos de espaciado entre juntas se estimó que el índice J_v está entre 1 y 2, o, lo que es lo mismo, que se pueden encontrar entre 1 y 2 discontinuidades por cada metro cúbico de macizo rocoso.

En la Figura 1 se representan, en proyección estereográfica equiangular, los polos correspondientes a todos los pla-

nos de discontinuidad medidos. A partir de la concentración de polos se obtiene su distribución porcentual sobre la plantilla y se calculan las orientaciones medias, quedando representadas cinco familias de discontinuidades, tres de las cuales se consideran principales (por su mayor continuidad y menor espaciado) y coinciden con las direcciones del andar, el trinque y el norte, y las dos restantes se consideran secundarias, y se han denominado J4 y J5.

En la Tabla 2 se representan los valores medios y las desviaciones típicas de los principales parámetros geométricos de las cinco familias de discontinuidades.

Proyectando la orientación media, junto con la máxima y la mínima de cada familia de discontinuidades, sobre cada uno de los tres planos de debilidad, se obtienen los diagramas de la Figura 2, en los que se indican, además, los valores de continuidad y espaciado (medias y desviaciones típicas).

Con estos datos, junto con el gap estimado, se generan las distribuciones de discontinuidades en cada plano principal, que se representan en la Figura 3 junto con las mallas de control. Realizando el recuento sobre las mallas se estiman los porcentajes de cada producto, en cada plano de debilidad, que se muestran en la Tabla 3.

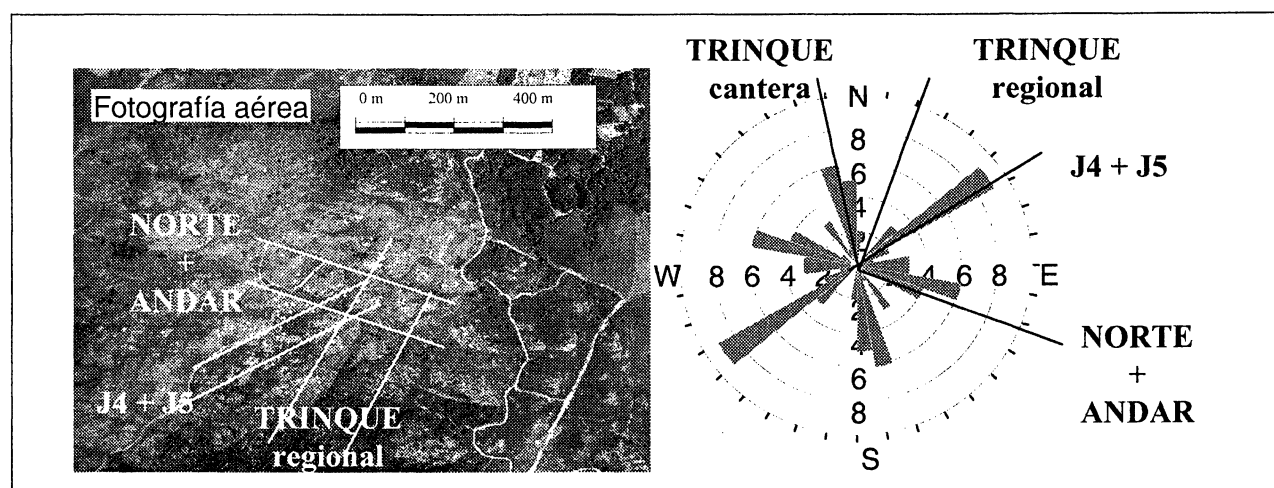


Figura 6.- Comparación entre la fracturación regional (sobre la foto aérea) y la local (roseta de juntas del frente experimental) en el área de estudio.

TABLA 2
Valores medios y desviaciones típicas de los principales parámetros geométricos de las familias de discontinuidades identificadas en el macizo rocoso

Media/Desv. est.	Buzamiento	Dirección de buzamiento	Continuidad según rumbo	Continuidad según buzamiento	Espaciado	% observaciones
FAMILIAS						
TRINQUE	90 / 7,5	199 / 13	10,5 / 6,8	5,5 / 2,7	1,6 / 0,8	30,5
NORTE	85 / 10	265 / 13	4 / 4	3,8 / 2	1,8 / 1,3	28,8
ANDAR	34 / 11	032 / 10	15 / 6	13 / 8	1,5 / 0,8	13
J4	77 / 4,3	329 / 3	3,6 / 0,9	3,2 / 1,6	5,2 / 4,4	8,5
J5	63 / 7,2	153 / 7	11 / 4,6	4,5 / 2,1	3,9 / 4,6	15

TABLA 3

Porcentajes de bloque, semibloque y resto de material para mampostería o perpiaño sobre resto y sobre total, y de material para áridos sobre total en los planos de proyección en la cantera Mateo

PRODUCTO	PLANO		
	ANDAR (%)	TRINQUE (%)	NORTE (%)
BLOQUE	26,87	44,95	34,32
SEMIBLOQUE	44,93	40,2	37,77
RESTO	28,2	14,85	27,91
TOTAL	100	100	100
MAMPOSTERÍA-PERPIAÑO/RESTO	46	57	56
MAMPOSTERÍA-PERPIAÑO/TOTAL	12,97	8,46	15,63
ESTERIL	15,23	6,39	12,28

TABLA 4

Resultados finales de recuperación de bloque, semibloque, material para mampostería o perpiaños y áridos para la cantera, según la metodología desarrollada

BLOQUE (%)	SEMIBLOQUE (%)	MAMPOSTERÍA – PERPIAÑO (%)	ARIDOS (%)	TOTAL (%)
3,94	32,77	23,61	39,68	100

A continuación, utilizando las fórmulas del factor recuperación del apartado 2.4, se calculan los porcentajes de recuperación para cada producto. Los resultados se recogen en la Tabla 4.

Finalmente, y a modo de resumen, se concluye que la recuperación esperada en la cantera Mateo de Cotobade es de un 4% de bloque, un 33% de semibloque, un 23% de material que se podrá vender como mampostería o piedra en rama, y un 40% de áridos que habrá que machacar para vender.

4. CONCLUSIONES

La metodología planteada permite realizar una estimación de los diferentes productos que se pueden extraer en una cantera de granito ornamental, tanto en su fase de investigación como en la de explotación, teniendo en cuenta

el método de extracción de bloques a partir de planos de debilidad utilizado en estas explotaciones. Una característica positiva de este método frente a otros es que tiene en cuenta la impersistencia de las discontinuidades.

En realidad el método tiene una base análoga al desarrollado por Castaign y Rabu (2), si bien éste está más enfocado al caso de macizos rocosos con sólo tres familias de discontinuidades. Aunque se podría decir a priori que nuestro método es menos riguroso, también es cierto que es más realista, en el sentido de que tiene la posibilidad de contemplar tantas familias de discontinuidades cuantas sean reconocidas a partir de los datos de campo.

Uno de los parámetros que conviene estudiar con más profundidad es el gap, tanto en el método para estimarlo a partir de los datos de campo como en su influencia sobre los resultados, por lo que se plantea como reto en futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Brown E. T. (ed.). *ISRM. Suggested Methods*, Pergamon Press, Oxford, 1981.
- (2) Castaign C. & Rabu D.: *Apports de la géologie à la recherche et à l'exploitation de pierres de taille (roches ornamentales et de construction)*. Bull. Bur. Rech. Geol. Min., 2nd series, Section III, nº.: (1980), pp. 81-97.
- (3) Chen Y., Nishiyama T., Kusuda H., Kita H., Sato T.: *Correlation between microcrack distribution patterns and granitic rock-splitting planes*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36 (1999), pp. 535-541.
- (4) ITASCA. UDEC. *User's Guide V. 3. 1.*, pp. 3-9 – 3-11. Minneapolis, Minnesota, 2000.
- (5) ITGE. Libro Jubilar J. M. Ríos. *Geología de España. Tomo I*. ITGE, Madrid, 1983.
- (6) J. M. Carilho Lopes, J. L. Lisboa, J. V. Vieira Lisboa: *Caracterização Petrográfica e Estrutural dos Granitos Roóseos de Complexo Plutónico de Monforte-Sta. Eulália* (NE Alentejo Portugal). Estudos, Notas e Trabalhos: Tomo 39 (1997). Instituto Geológico e Mineiro, pp. 141-156.
- (7) J. M. Toyos, J. Taboada, M. Lombardero, J. A. Romero, A. Menéndez: *Estudio de las discontinuidades en yacimientos de roca ornamental*. Boletín Geológico y Minero, Vol. 105 (1994), pp. 110-118.
- (8) J. Taboada, A. Vaamonde, A. Saavedra: *Evaluation of the quality of a granite quarry*. *Engineering Geology*, Vol. 53 (1999), pp. 1-11.

- (9) Lisle, R. J. & Lesión, P. R.: *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*. 2nd Ed. Cambridge University Press, 2004.
- (10) Philips, F. C.: *The use of Stereographic projection in Structural Geology*, Arnold Publishers, 1954.
- (11) V. Monteserín, A. Pérez.: *Mapa geológico y memoria explicativa de la Hoja núm. 186 (5-10) Pontecandelas*. Publicaciones del IGME (MAGNA), 1981.
- (12) Wang H., Latham J. P., Poole B.: *Predictions of block size distribution for quarrying*. Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 24 (1991), pp. 91-99.
- (13) Wang L. G., Yamashita S., Sugimoto F., Pan C., Tan G.: *A Methodology for Predicting the In Situ Shape. Distribution of Rock Blocks*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 36, nº 36 (2003), pp. 121-142.

* * *