FRAGMENTACION DE ROCA CON ARGAMASA EXPANSIVA APLICADA A LA ESCULTURA

Francisco Montenegro B.[1], José M. Da Luz[2], Paúl Carrión M.[3]
[1]Ingeniero de Minas, ESPOL 2003, e-mail: fjmontenegro@mininglife.com
[2]Ph.D. Tratamiento Mineral UFMG (Brasil), Profesor DEMIN, UFOP (Brasil), e-mail: jaurelio@demin.ufop.br
[3]Director de Tesis. Ph.D. en Hidrogeología y Medio Ambiente, Profesor FICT, ESPOL, e-mail: pcarrion@goliat.espol.edu.ec

Resumen

El presente artículo es un estudio de una nueva aplicación de la argamasa expansiva, que consiste en hacer más eficiente la preparación de bloques de roca empleados para escultura. El estudio tiene lugar en la Universidad Federal de Ouro Preto (UFOP), en el estado de Minas Gerais, Brasil. La argamasa expansiva es un polvo parecido al cemento *Pórtland*, que al mezclarse con agua sufre una reacción de hidratación, expandiéndose y desarrollando altos esfuerzos sobre la superficie que la contenga, provocando así la aparición y propagación de la fractura. Para la realización de la fragmentación se emplea una fila de barrenos (perforaciones) practicados en la roca, estos son rellenados con la argamasa. El problema es determinar el espaciamiento efectivo entre barrenos para que la fragmentación sea efectiva. La roca en la cual se efectuaron las pruebas es la cuarcita. Se caracterizó la argamasa con pruebas de granulometría, dilatación, análisis de microscopio electrónico y difracción de rayos X. Se efectuaron 10 ensayos de fragmentación, determinando que el espaciamiento adecuado para esta aplicación es de 5 veces el diámetro de perforación, además de encontrar que la broca de 13 mm es el que optimiza el proceso. La evaluación de esta técnica es positiva ya que elimina todos los inconvenientes propios de la fragmentación empleando cuñas de acero.

1. Introducción.

1.1. Antecedentes.

El tema de conservación y mantenimiento de patrimonio ha cobrado importancia en los últimos años. La ciudad de Ouro Preto, donde se desarrolló el estudio, tiene como principal atractivo su patrimonio histórico, con mayor importancia en su arte en roca. Con el objetivo de conservar este patrimonio cultural, el Departamento de Ingeniería de Minas de la UFOP creó el taller de escultura en roca, donde se entrena personal que continuará con este arte además de restaurar las obras ya existentes. En la figura 1 se muestra algunas piezas de arte realizadas en el taller de escultura. La roca empleada es cuarcita, muy resistente, por eso las labores de preparación de bloques que son realizadas de manera manual toman demasiado tiempo en ejecutarse. Se presentan otros inconvenientes con el empleo de herramientas clásicas para fragmentar roca, como las pérdidas de material, contaminación acústica y un aprovechamiento ineficiente de energía. Para solucionar estos problemas, se propone el empleo de la argamasa expansiva FRACT-AG® en el proceso de preparación de bloques de roca.

1.2. Objetivos.

- Obtener el espaciamiento óptimo entre barrenos de pequeño diámetro, para trabajos en cuarcita.
- Minimizar pérdidas de material por fragmentación durante la preparación de bloques.
- Reducir el tiempo en la preparación de bloques.
- Eliminar la contaminación acústica en el taller de escultura en roca.

▪ Probar el desempeño de la argamasa FRACT-AG® código rojo en esta aplicación.

Figura 1.- Piezas hechas en el taller de escultura.

1.3. Metodología.

Se hacen las perforaciones con una separación (espaciamiento) de 5 y 10 veces el diámetro de perforación en diferentes pruebas.

Los ensayos de fragmentación se llevaron a cabo de acuerdo al siguiente esquema:

Preparación de la muestra → Perforación → Relleno con argamasa → Fractura

Figura 2.- Esquema de las pruebas de fragmentación.

Preparación de la muestra: Se prepara un pequeño bloque cuyas dimensiones dependen del diámetro de broca usada y del número de perforaciones a practicarse. Su espesor es en promedio de 15 cm.

Perforación: Se utilizaron tres diferentes diámetros: 13, 16 y 25 mm

Relleno: Las perforaciones son rellenadas con la mezcla de FRACT-AG® evitando en lo posible la captura de aire.

Fractura: Por efecto de la expansión de la argamasa se produce y propaga una fractura que sigue la línea de perforaciones.

2. Contenido.

2.1. Bases teóricas.

El principio fundamental para la fragmentación y además orientación de la fractura, es aprovechar la zona de esfuerzos de tracción que se forma alrededor de un barreno que está sometido a la acción de un esfuerzo principal [1]. Esta zona se presenta sobre el eje en el que actúa dicho esfuerzo, tal como se indica en la figura 3.

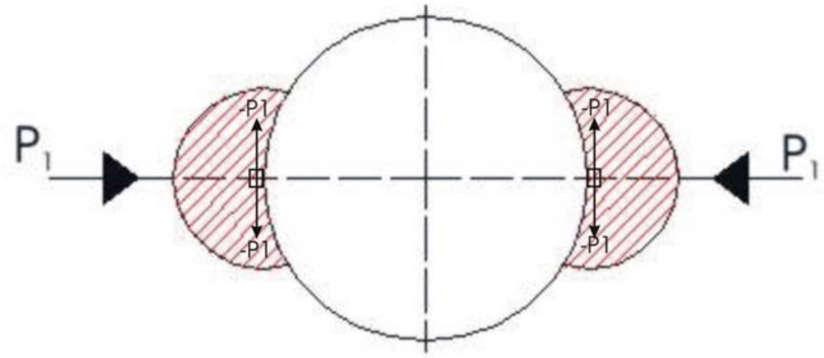

Figura 3.- Zona de esfuerzos de tracción alrededor de un barreno (Jaeger, 1979).

Si el esfuerzo actuante es P_1, el máximo valor de los esfuerzos de tracción en esta zona es $-P_1$. Si un esfuerzo interno P es aplicado de manera radial sobre las paredes del barreno, la acción resultante es $-P_1$-P, resultado que indica esfuerzo de tracción neta. Si este valor supera la resistencia a la tracción de la roca, esta se fracturará de acuerdo con las teorías clásicas.

Actualmente el análisis con mecánica de la fractura lineal elástica (LEFM) [2, 5], es un método válido aunque su aplicación en rocas aún está en etapa de desarrollo. La formación y propagación de la fractura de acuerdo al este abordaje se muestra en la figura 4, mostrando que la formación de una fractura "visible", se debe a la formación y unión de microfisuras en el material. La alta concentración de estas diminutas fracturas da origen a una zona llamada zona de proceso o de microfisuras, en la cual el material pierde sus propiedades elásticas y se comporta de manera plástica. De acuerdo como se desplaza esta zona se propaga la fractura. Este punto de vista considera más que la resistencia a la tracción interviniendo en el proceso de fractura.

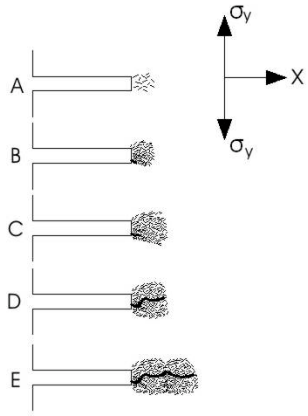

Figura 4.- Formación y Propagación de la fractura en sólidos (Atkinson, 1991).

El éxito de la orientación de la fractura a lo largo de un plano, durante su propagación, es distribuir correctamente los esfuerzos, de tal modo que las zonas que envuelven esfuerzos de tracción alrededor de dos perforaciones vecinas, interactúen. La unión de estas zonas (en teoría, donde se producen microfisuras) determina la formación de una sola fractura a lo largo del plano definido por estas perforaciones. El sistema en conjunto que interviene en la fragmentación con argamasa expansiva se muestra en la figura 5.

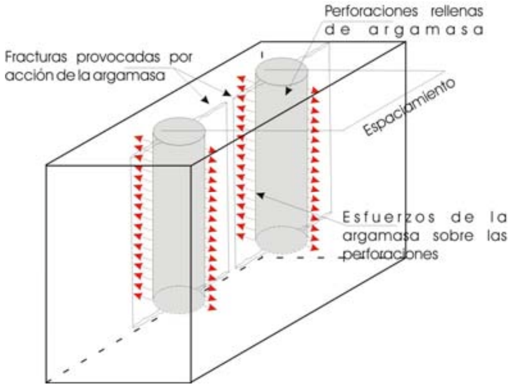

Figura 5. Conjunto de elementos para la fractura con argamasa expansiva.

2.2. Caracterización Tecnológica.

En el taller de escultura se emplean dos tipos de cuarcita, denominadas cuarcita blanca y cuarcita roja, ambas de grano fino. Tiene una densidad promedio de 2257.7 kg/m^3. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión simple se muestran en la tabla I.

Tabla I.- Resultados de resistencia a la compresión simple.

MUESTRA	RESISTENCIA [MPa]
A	94.45
B	40.49

Muestras A: cuarcita blanca.
Muestras B: cuarcita roja.

Para la caracterización de la argamasa expansiva se realizaron pruebas de densidad, granulometría por sedimentación, coeficiente de dilatación máxima, análisis de microscopio electrónico y difracción de rayos-X.

La argamasa expansiva tiene una densidad de 2090.59 kg/m^3. Sus partículas tienen diámetros comprendidos entre 24 y 200 µm, siendo el D_{80} 98 µm. El coeficiente de dilatación promedio de la argamasa es de 2.8 veces su volumen inicial. La argamasa empleada es del tipo código rojo, aplicada para fragmentación a baja temperatura ambiente. El análisis de microscopio electrónico, ayuda a entender el mecanismo de expansión, en la figura 6 se puede observar un grano de la argamasa expandida a un aumento de 430 veces. La imagen muestra rasgos que indican la acción de esfuerzos que actúan de manera radial hacia el exterior del grano, evidencia de hidratación.

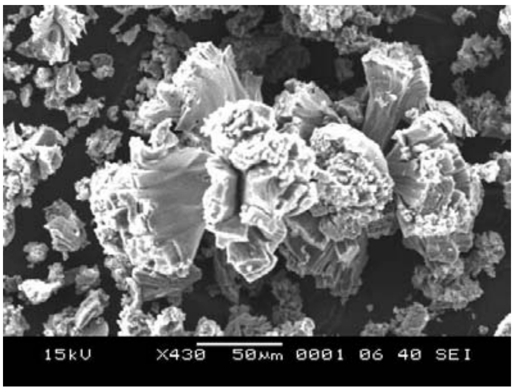

Figura 6- Imagen de un grano de argamasa expandida.

El análisis de difracción de rayos-X se practicó para la argamasa sin expandir y la argamasa expandida. Los resultados, de acuerdo a los difractogramas de la figura 7 indican que:

En la argamasa sin expandir, los componentes son:
- Oxido de cálcio, CaO.
- Calcita, $CaCO_3$.
- Biotita, $KMg_3(SiAl)O_{10}(OH)_2$.

En la argamasa expandida, los componentes son:
- Portlandita, $Ca(OH)_2$.
- Calcita $CaCO_3$.

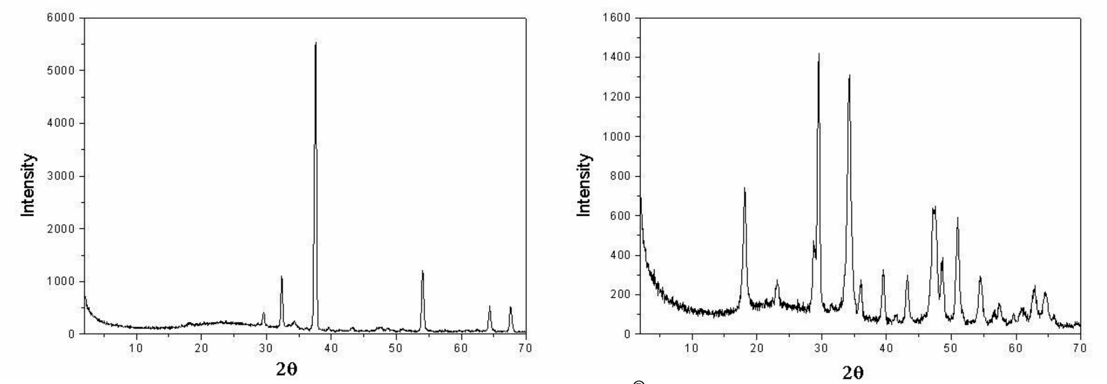

Figura 7.- Difractograma de la argamasa FRACT-AG® no expandida (izq.) y expandida (der.).

2.3. Ensayos de fragmentación.

Se realizaron 10 pruebas de fragmentación, con dos tipos de cuarcita, empleando tres diferentes diámetros de perforación. El espaciamiento entre barrenos se evaluó con 5 y 10 veces el diámetro.

Los materiales y equipos utilizados en estas pruebas son:
- Roca cuarcita.
- Argamasa expansiva.
- Martillo perforador BOSCH GBH 2-24 DSE.
- Brocas para perforación en granito con diámetros de 13, 16 y 25 mm.

La tabla II muestra los parámetros bajo los cuales se realizaron las pruebas. Como se puede ver en la tabla III, los resultados satisfactorios se dan cuando la relación entre el espaciamiento entre barrenos y el diámetro de perforación (E/d) es 5. Ensayos como el número 1 y número 4 (figuras 8 y 9) demuestran la capacidad de fragmentación de la argamasa FRACT-AG® con pequeños diámetros de perforación. El plano de fractura que se obtiene presenta características consideradas muy buenas para la escultura, las pérdidas son nulas y no hay presencia de fracturas secundarias.

Tabla II.- Pruebas de fragmentación.

Prueba	Roca	d (mm)	E (mm)	E/d
1	CB	13	65	5
2	CB	13	130	10
3	CB	25	125	5
4	CB	25	125	5
5	CB	25	250	10
6	CR	16	80	5
7	CR	16	160	10
8	CR	16	128	8
9	CB	25	125	5
10	Dm	13	52	4

CB: cuarcita blanca,
CR: Cuarcita roja,
Dm: dolomita,
d: diámetro de perforación,
E: espaciamiento entre barrenos.

Tabla III.- Resultados de los ensayos de fragmentación.

Muestra	d [mm]	E/d	Resultado
CB	13	5	Fractura
CB	13	10	Fractura
CB	25	5	Fractura
CB	25	5	Fractura
CB	25	10	No fractura
CR	16	5	Fractura
CR	16	10	No fractura
CR	16	8	No fractura
CB	25	5	No fractura
Dm	13	4	No fractura

La presencia de un barreno intermedio sin carga no dio resultados satisfactorios (Prueba número 9), pero ciertamente, un espaciamiento menor hará efectiva esta técnica. En este aspecto resulta fundamental el estudio de la propagación de la fractura dentro de la roca. Los esfuerzos involucrados en esta prueba se indican en la figura 10. El ensayo número 10, a pesar de tener espaciamiento menor resultó no satisfactorio, esto es debido al tipo de roca, en la cual la propagación de la fractura es en diversos planos, efecto del clivaje.

Figura 8.- Prueba 1 con su correspondiente estado de esfuerzos.

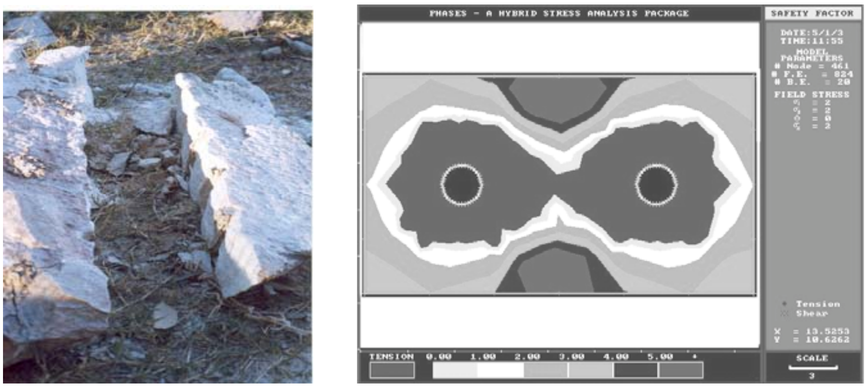

Figura 9.- Prueba 4 con su correspondiente estado de esfuerzos.

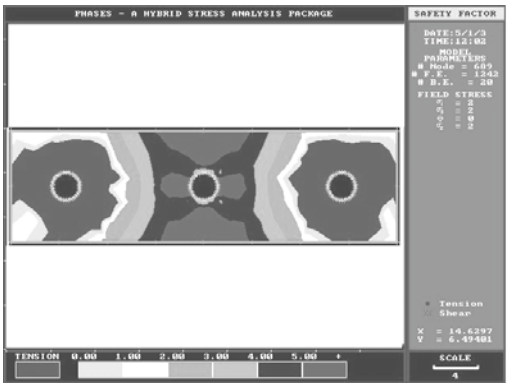

Figura 10.- Estado de esfuerzos en la Prueba 9.

En las figuras 7, 8 y 9, en los gráficos del estado de esfuerzos la zona de interés es la circundante a los barrenos. Esta representa los esfuerzos de tracción. Los gráficos de estados de esfuerzos se realizaron empleando el *software* Phases®, de Rock Engineering Group de la Universidad de Toronto, para análisis de excavaciones subterráneas. Obviamente este análisis no es dinámico y tiene sus limitaciones, como omitir la redistribución de esfuerzos cuando ocurre la fractura. Sin embargo, los resultados del modelamiento se ajustan bien a los resultados obtenidos en la práctica.

2.4. Perspectivas de uso en Ecuador.

Ecuador posee yacimientos de roca que pueden ser utilizadas con fines ornamentales, como granito, basalto, travertino, mármol y muchas otras. Una operación de extracción con uso de la argamasa expansiva es una alternativa viable, por cuanto es de menor costo que otras operaciones. También se puede aplicar con fines de trabajos de escultura. En Ecuador de mayor uso es el mármol negro del oriente. Con esta roca se realizan esculturas que han llegado a exhibirse en museos extranjeros. Sin embargo para la preparación de las mismas el método empleado es muy antiguo, la fragmentación de roca con cuñas. La figura 10 muestra dicho proceso. Este método provoca muchas imperfecciones y desperdicio de material, además de emplear demasiado tiempo para la fractura.

Figura 10.- Bloque de mármol negro fragmentado con cuñas.

La fragmentación con argamasa expansiva evitaría una serie de contratiempos durante la ejecución de la pieza de arte. Pruebas con estos fines están en curso, ya que la idea ha sido acogida con entusiasmo por artistas locales.

La técnica con argamasa expansiva permitirá el aprovechamiento de muchas rocas que son arrancadas mediante voladura (explosivos) y usadas para relleno. Esto constituye un subempleo del material rocoso, que correctamente trabajado puede ser muy valioso para fines ornamentales.

3. Conclusiones.

- El uso de FRACT-AG® para la fragmentación de roca en el taller de escultura se expone como una alternativa técnicamente viable, debido a la calidad final del producto, listo para su uso. Hay un bajo consumo de argamasa, además de minimizar el tiempo de preparación de los bloques, y de ofrecer un mínimo desperdicio de material. La operación de perforación deja como residuo un polvo fino, que también es aprovechado para hacer una pasta con resina que es ideal para colar piezas hechas en roca.
- El espaciamiento óptimo, para la operación de fragmentación con la argamasa expansiva, bajo las condiciones en que se efectuaron todos los ensayos, es 5 veces el diámetro de perforación.
- En la operación de perforación, el diámetro óptimo resulta ser de 13 mm, con un espaciamiento de 65 mm entre perforaciones. Presenta fragmentación óptima de la roca, además de un menor consumo de argamasa y menor tiempo de perforación.
- Una disminución en el espaciamiento entre barrenos, hace viable la aplicación de barrenos descargados de modo alternado, disminuyendo el consumo de argamasa, pero aumentando el tiempo y costos de perforación.
- En Ecuador la técnica de argamasa es una alternativa viable para el arte de la escultura. Esta aplicación puede constituirse como la entrada de esta técnica para su empleo en la industria de las rocas ornamentales.
- El modelamiento de esfuerzos con *Phases* puede predecir la formación y la *dirección con mayor posibilidad de ocurrencia* de la fractura, pues el programa no considera los criterios de la mecánica de la fractura.

4. Recomendaciones

- Definitivamente el tipo de argamasa empleada en estas pruebas, del tipo código rojo, influye en el proceso. El tipo adecuado de argamasa a usar, de código verde, ofrece mejores resultados.
- Para la práctica de la argamasa en el taller de escultura en roca, se puede usar varias líneas de barrenos, cuidando que la distancia entre ellas sea mucho mayor que el espaciamiento entre barrenos.
- Se pueden probar diversas configuraciones en la manera de perforar, ya que con una correcta distribución de esfuerzos se puede dar a la roca una forma definida.
- Posteriores ensayos pueden ser realizados, considerando que el espaciamiento máximo es de 10 veces el diámetro y el mínimo de 5 veces el diámetro, valores intermedios pueden ser evaluados.
- La fragmentación de roca con FRACT-AG® abre una nueva línea de investigación, para estudio de las propiedades físico-mecánicas de la roca.

5. Referencias.

[1] J. C. Jaeger, N. G. W. Cook; Fundamentals of rock mechanics, 3 ed.; London: Chapman and Hall, 1979, 300 p.

[2] B. Atkinson editor, Fracture mechanics of rock, Academic Press, Geology series: London, Cap. 6, p. 217 – 241, 1991

[3] Manual de manejo de Argamasa expansiva CRAS®, Kayati S. A., 2001

[4] Manual de manejo de argamasa expansiva FRACT-AG®, Chemica Edile S. A., 2001

[5] B.N. Whittaker, R.N. Singh e G. Sun, Rock fracture mechanics - principles, design and applications, Elsevier (Developments in Geothecnical Engineering n. 71), Amsterdam, The Netherlands, (1992); 570 p.