



T
622.24
MON



CIB-ESPOL

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

FRAGMENTACIÓN DE ROCA CON ARGAMASA EXPANSIVA

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO DE MINAS

Presentada por:

Francisco Javier Montenegro Balarezo

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año

2003



CIB-ESPOL

DEDICATORIA



Este trabajo está dedicado a:

Mi madre y familia;
A la memoria de mi padre;
A todos los que están dispuestos a
superarse para mejorar el mundo.

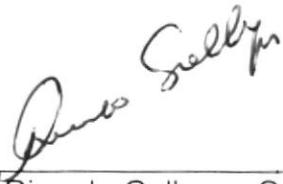
AGRADECIMIENTOS

Al final de la jornada, cuando recogemos los resultados del trabajo, vale la pena revisar cuanto se ha avanzado y reconocer que nada se hubiera conseguido sin la ayuda de quienes estuvieron ahí, para de alguna manera auxiliarnos. Expreso entonces, mi más sincero agradecimiento:

- A Dios, siempre presente para darme una motivación.
- Prof. Jose Aurélio M. da Luz, por su orientación y apoyo incondicional, más que un orientador, un excelente amigo.
- Dr. Paúl Carrión por su ayuda y motivación.
- Ing. Fernando Morante, Ing. Jorge Velasco y Dra. Elizabeth Peña por su confianza.
- Prof. Carlos Alberto Pereira, coordinador de oficina de cantaría.
- Prof. Rodrigo P. Figueiredo por su ayuda en el área de mecánica de rocas.
- Sr. José Raimundo Pereira por su ayuda en la oficina de cantaría.
- Al personal docente y administrativo del DEMIN y DEGEO, por su ayuda y comprensión.
- Al Sr. Antônio Liccardo por su arte fotográfico.
- Al Sr. José Antonio Cauja, por su ayuda con el arte de la escultura en Ecuador.
- A mi familia, por su constante motivación y amor.
- A todos los amigos y profesores del área de Ingeniería de Minas que de alguna manera estuvieron presentes para estimular el desarrollo del presente trabajo.

Este trabajo sólo se tornó posible gracias al convenio entre la Universidad Federal de Ouro Preto y la Comunidad Europea, a través del programa ALFA, red CYTED y red RIMIN, bajo la coordinación interna del profesor Julio César Mendes de la UFOP, y su conexión con la carrera de Ingeniería de Minas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

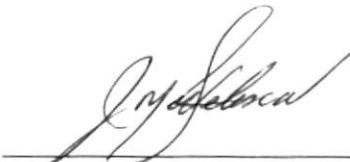
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN.



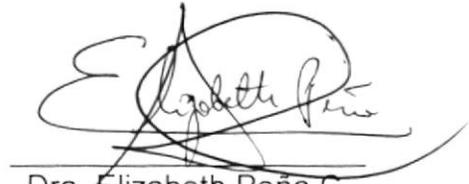
Ing. Ricardo Gallegos O.
DECANO DE LA FICT



Dr. Paúl Carrión M.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Jorge Velasco V.
VOCAL



Dra. Elizabeth Peña C.
VOCAL



CIB-ESPOL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



CIB-ESPOL

Francisco Javier Montenegro Balarezo.

RESUMEN

El presente trabajo es un estudio de la fragmentación de roca con empleo de la argamasa expansiva FRACT-AG[®], para obtener bloques de dimensiones que faciliten su manipulación, con el propósito de realizar esculturas en roca. El arte de escultura en roca es de importancia significativa en Ouro Preto, ciudad donde tuvo lugar el desarrollo del presente estudio.

La fragmentación de roca, como se conoce, se realiza de maneras muy variadas, en este caso la técnica emplea un elemento que, al ser hidratado desarrolla altos esfuerzos, provocando la fragmentación de la roca. Este mecanismo en condiciones *quasi estáticas* es poco conocido, así que este estudio pretende también aportar un poco conocimiento, en base a ensayos realizados en laboratorio.

Se realizaron 10 ensayos de fragmentación, usando una línea de barrenos para cada muestra. Se emplearon tres diámetros de perforación, 13, 16 y 25 mm para la práctica de los barrenos. El espaciamiento entre barrenos es la variable en estudio, esta fue relacionada con el diámetro de perforación. Una vez encontrada la relación ideal entre el diámetro y el espaciamiento, desde el punto de vista técnico, se tendrá un mejor aprovechamiento de esta técnica de fragmentación de roca.

Los elementos empleados en este trabajo, roca y argamasa, fueron caracterizados tecnológicamente, para estudiar como sus características influyen en el fenómeno de la fractura. Este trabajo, a pesar de involucrar varios ensayos no pretende ser algo profundo, sino el portal hacia investigaciones más exhaustivas, ampliando el conocimiento de esta técnica de fragmentación, compatible con el medio ambiente, que actualmente es poco conocida.



INDICE GENERAL

RESUMEN	II
INDICE GENERAL	III
INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS	IX
SIMBOLOGIA Y UNIDADES DE MEDIDAS	X
ABREVIATURAS	XII

CAPITULO I.

I. INTRODUCCION	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del Problema	4
1.3. Hipótesis de Trabajo	5
1.4. Metodología General	6
1.5. Objetivos	8

CAPITULO II.

II. BASE TEORICA	11
2.1. Esfuerzos en Roca	11
2.1.1. Región externa de un barreno circular dentro de un medio infinito	11
2.1.2. Esfuerzos aplicados a la superficie de un barreno circular	16
2.2. Mecánica de la Fractura en Roca	17
2.2.1. Teoría original de Griffith	18
2.2.2. Mecánica de la fractura lineal elástica	20
2.2.3. Esfuerzos en zona cercana a una fractura	28
2.3. Fragmentación Hidráulica	29

2.4. Argamasa Expansiva	32
2.4.1. Características generales	32
2.4.2. Ventajas	33
2.4.3. Principios	33
2.4.4. Usos	34
2.4.5. Preparación	35
2.4.6. Precauciones	37
2.5. Estudios sobre Elementos Expansivos	38

CAPITULO III.

III. METODOLOGIA	45
3.1. Pruebas en Roca	45
3.1.1. Densidad de roca	45
3.1.2. Resistencia a la compresión uniaxial	46
3.1.3. Fragmentación con argamasa expansiva	48
3.2. Pruebas en Argamasa	53
3.2.1. Densidad de la argamasa	53
3.2.2. Granulometría mediante análisis de sedimentación	54
3.2.3. Análisis con microscopio electrónico	58
3.2.4. Coeficiente de dilatación de la argamasa	58
3.2.5. Difracción de rayos-X	59
3.2.6. Argamasa protoindustrial	60

CAPITULO IV.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION	63
4.1. Resultados de Pruebas en Roca	63
4.1.1. Densidad de la roca	63



CIB-ESPOL

4.1.2. Resistencia a la compresión uniaxial	64
4.1.3. Resultados de fragmentación con argamasa expansiva FRACT-AG®	64
4.2. Resultados de Pruebas en Argamasa Expansiva FRACT-AG®	85
4.2.1. Densidad de la argamasa	85
4.2.2. Análisis granulométrico mediante técnicas de sedimentación	86
4.2.3. Análisis con microscopio electrónico	89
4.2.4. Coeficiente de dilatación de la argamasa	91
4.2.5. Difracción de rayos-X	93
4.2.6. Argamasa protoindustrial	95
4.3. Discusión General	98

CAPITULO V.

V. ESTADO DEL ARTE EN GUAYAQUIL	102
---------------------------------------	-----

CAPITULO VI.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
6.1. Conclusiones	108
6.2. Recomendaciones	110

CAPITULO VII.

VII. APENDICES	113
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	113
TABLAS DE DATOS	116
FOTOGRAFÍAS	123

CAPITULO VII.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	132
---------------------------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Piezas realizadas en taller de escultura y maestro escultor	3
Figura 1.2 Estudiantes del taller de escultura	4
Figura 1.3 Esquema de proceso en taller de escultura en roca	5
Figura 1.4 Esquema de la metodología a emplear.....	6
Figura 1.5 Esquema de proceso eficiente para el taller de escultura en roca ...	9
Figura 2.1 Trayectoria de esfuerzos alrededor de un barreno circular	12
Figura 2.2 Zona de esfuerzos de tracción	13
Figura 2.3 Esfuerzos desarrollados bajo la acción de dos esfuerzos principales.....	14
Figura 2.4 Esfuerzos desarrollados por la acción de dos esfuerzos principales y un esfuerzo interno.....	15
Figura 2.5 Barreno con presión radial interna	16
Figura 2.6 Tipos de fractura de sólidos	22
Figura 2.7 Evolución de la fractura	24
Figura 2.8 Sistema de referencia en la punta de la fractura y estado de esfuerzos en coordenadas rectangulares y polares	26
Figura 2.9 Placa infinita, conteniendo una fractura	26
Figura 2.10 Distribución de esfuerzos en las cercanías de una fractura	29
Figura 2.11 Modelo de fragmentación hidráulica	30
Figura 2.12 Superposición de esfuerzos simples para cálculo del factor de intensidad de esfuerzos	30
Figura 2.13 Esquema de reacción de formación de etringita	40
Figura 4.1 Curvas de extrapolación lineal y cuadrática para el espaciamiento entre barrenos	67
Figura 4.2 Resultados de la prueba número 1 de fragmentación de roca	69
Figura 4.3 Distribución de esfuerzos para el ensayo 1	70



Figura 4.4 Resultados de la prueba número 2 de fragmentación de roca	71
Figura 4.5 Distribución de esfuerzos para el ensayo 2	72
Figura 4.6 Resultados de la prueba número 3 de fragmentación en roca	73
Figura 4.7 Distribución de esfuerzos para el ensayo 3	74
Figura 4.8 Resultados de la prueba número 4 de fragmentación de roca	75
Figura 4.9 Distribución de esfuerzos para el ensayo 4 de fragmentación de roca.....	76
Figura 4.10 Distribucion de esfuerzos para ensayo 5 de fragmentación en roca	77
Figura 4.11 Resultados de prueba número 6 de fragmentación de roca	79
Figura 4.12 Distribución de esfuerzos en el ensayo 6	79
Figura 4.13 Resultados de la prueba número 7 de fragmentación de roca	81
Figura 4.14 Distribución de esfuerzos para el ensayo 7	81
Figura 4.15 Distribución de esfuerzos para la prueba 8	82
Figura 4.16 Distribución de esfuerzos para el ensayo 9	83
Figura 4.17 Curva granulométrica en base a la sedimentación de partículas ...	87
Figura 4.18 Ajuste para la distribución de Rosin – Rammler	88
Figura 4.19 Argamasa expansiva no expandida	89
Figura 4.20 Argamasa expansiva expandida	90
Figura 4.21 Detalle de grano de argamasa expandido	91
Figura 4.22 Resultados de coeficiente de dilatación de AE	92
Figura 4.23 Difractograma de FRACT – AG [®] no expandida	93
Figura 4.24 Difractograma de FRACT – AG [®] expandida	94
Figura 4.25 Calcinación de dolomita para argamasa protoindustrial	96
Figura 5.1 Taller de escultura en roca	103
Figura 5.2 Fragmentación de roca con cuñas y martillos	104
Figura 5.3 Preparación de bloque de mármol negro	105
Figura 5.4 Esculturas en mármol negro	106

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Espaciamento en relación al diámetro de perforación	36
Tabla 2.2 Consumo de argamasa por metro de perforación	36
Tabla 2.3 Propiedades físicas y composición química de compuestos expansivos	40
Tabla 3.1 Ensayos de fragmentación de roca	52
Tabla 3.2 Muestras tomadas en la prueba de granulometría	56
Tabla 4.1 Resultados de prueba de densidad de la roca	63
Tabla 4.2 Resultados de ensayo a la compresión uniaxial	64
Tabla 4.3 Resultados estandarizados de la resistencia a la compresión uniaxial	64
Tabla 4.4 Tiempos de perforación en cuarcita blanca	65
Tabla 4.5 Tiempos de perforación en cuarcita roja	65
Tabla 4.6 Velocidad de perforación para broca de 13 mm	66
Tabla 4.7 Velocidad de perforación para broca de 25 mm	66
Tabla 4.8 Resultados de extrapolación lineal y cuadrática	68
Tabla 4.9 Resultados de las pruebas de fragmentación de roca con argamasa expansiva FRACT-AG®	85
Tabla 4.10 Resultados de coeficiente de dilatación de AE	92
Tabla 4.11 Tipos de argamasa protoindustrial desarrollada	95
Tabla 4.12 Proporciones para la mezcla y preparación de la argamasa protoindustrial	96
Tabla 4.13 Comparación de diámetros de perforación	99



SIMBOLOGÍA Y UNIDADES DE MEDIDAS

E:	espaciamiento entre barrenos [cm]
E :	módulo de Young [MPa]
G:	tasa de alivio de energía de deformación o fuerza para abertura de la fractura [J/m ²]
G_I :	tasa de alivio de energía de deformación para el tipo I de fractura [J/m ²]
G_{II} :	tasa de alivio de energía de deformación para el tipo II de fractura [J/m ²]
G_{III} :	tasa de alivio de energía de deformación para el tipo III de fractura [J/m ²]
G_C :	tasa de alivio crítica de energía de deformación [J/m ²]
H:	profundidad del barreno [m]
K:	factor de intensidad de esfuerzos [MPa·√m]
K_I :	factor de intensidad de esfuerzos para el tipo I de fractura [MPa·√m]
K_{II} :	factor de intensidad de esfuerzos para el tipo II de fractura [MPa·√m]
K_{III} :	factor de intensidad de esfuerzos para el tipo III de fractura [MPa·√m]
K_C :	factor de intensidad de esfuerzos crítico [MPa·√m]
K_{IC} :	factor de intensidad de esfuerzos crítico para el tipo I de fractura [MPa·√m]
m:	masa [kg]
M:	masa de argamasa [kg]
N:	número de barrenos [m]
P:	presión aplicada sobre las paredes de un barreno [Pa]
P_1, P_2 :	esfuerzos principales actuando sobre un barreno [Pa]
Q_f :	energía de superficie de la fractura a tracción [J/m ²]
Q_s :	energía de superficie termodinámica [J/m ²]
R:	radio del barreno [m]
R_C :	resistencia a la compresión uniaxial [MPa]
S_{FC} :	factor de densidad de energía de deformación al que se produce la fractura [-]
v:	velocidad de sedimentación de partículas en un fluido newtoniano [m/s]
V:	volumen [m ³]

- V_a : volumen requerido de argamasa [m^3]
 ϕ : diámetro de perforación [mm]
 η : viscosidad [Pa·s]
 ν : coeficiente de Poisson [-]
 ρ : densidad [kg/m^3]
 ρ_{ap} : densidad aparente [kg/m^3]
 ρ_l : densidad del líquido [kg/m^3]
 ρ_p : densidad de la partícula [kg/m^3]
 σ_r : componente esfuerzo radial en sistema de coordenadas polares [Pa]
 σ_θ : componente esfuerzo tangencial en sistema de coordenadas polares [Pa]
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_z$: esfuerzos en la punta de la fractura [Pa]
 $\sigma_{\theta C}$: esfuerzo crítico al que se produce la fractura [Pa]
 θ_m : ángulo al que se propaga la fractura con respecto a la fractura original
 $\tau_{r\theta}$: componente esfuerzo cortante o de cizalla en sistema de coordenadas polares [Pa]

ABREVIATURAS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AE:	Argamasa expansiva.
AEĒ:	Argamasa expansiva expandida.
AEF:	Argamasa expandida fresca.
DEMIN:	Departamento de Ingeniería de Minas.
DEGEO:	Departamento de Geología.
LEFM:	Mecánica de fractura elástica lineal (Linear Elastic Fracture Mechanics)
RCL:	Consumo medio de FRACT-AG [®] por metro de perforación.
UFOP:	Universidad Federal de Ouro Preto.

CAPITULO I.

I. INTRODUCCION.

I. INTRODUCCION.

1.1. Antecedentes.



El uso de cemento demolidor no explosivo en pocos años ha llegado a ser uno de los métodos de extracción de roca más ecológicos, presentándose como una tecnología alternativa a la voladura con explosivos, además de participar en el campo de la construcción cuando se precisa hacer demoliciones en lugares donde los explosivos no serían una alternativa adecuada. Este compuesto presenta varias ventajas que lo colocan como una tecnología innovadora y técnicamente viable. Ha sido probado en la realización de grandes proyectos hasta pequeñas demoliciones, mostrándose en todas ellas efectivo.

Una nueva aplicación de la argamasa expansiva es explorada en este trabajo, la fragmentación de roca para reducir el tamaño de bloques que serán usados para el arte de escultura en roca. Este arte hace parte importante de la historia de la humanidad. En la ciudad en donde se desarrolló el presente trabajo, Ouro Preto, en el estado de Minas Gerais, Brasil, uno de los principales atractivos es el estilo barroco en la arquitectura, capturada en obras hechas en roca, ofreciendo una vista atractiva y singular en sus edificios y calles. Actualmente Ouro Preto posee el título de patrimonio histórico y cultural de la humanidad, por este motivo, la escultura en roca tiene un importante papel principalmente para reparaciones y conservación del patrimonio de esta ciudad histórica.

Con el objetivo de rescatar el arte y darle continuidad, el Departamento de Ingeniería de Minas (DEMIN) de la Universidad Federal de Ouro Preto (UFOP), comenzó en el año 2000 un proyecto, iniciando con la instalación de uno de los talleres de escultura en roca de mayor prestigio en el Estado, entrenando a futuros practicantes de este

arte, bajo la instrucción de uno de los últimos artesanos dominantes del mismo, en Brasil.

El desarrollo de nuevas tecnologías y la búsqueda de aumentar la eficiencia en el taller, ha abierto nuevas líneas de investigación, una de ellas, la aplicación de la argamasa expansiva para la preparación de bloques, para su posterior uso en escultura. DEMIN adquirió la argamasa industrial italiana FRACT-AG® para este estudio, buscando la manera óptima de practicar la reducción de tamaño de bloques.

En escala industrial, la operación de extracción de roca es realizada con explosivos, pero principalmente en este campo la argamasa expansiva está ganando terreno, especialmente en la explotación de rocas ornamentales, debido a su eficiencia y aumento de producción, con un mínimo de pérdidas y buena calidad de la roca extraída. Esta es una razón más para justificar el empleo de la argamasa expansiva en la preparación de bloques para escultura.



Figura 1.1.- Piezas realizadas en el taller de escultura y Sr. Juca, maestro escultor.



Figura 1.2.- Estudiantes del taller de escultura.

1.2. Planteamiento del Problema.

El empleo de elementos expansivos para fragmentación es una idea antigua, ahora se usa esta idea pero con la implementación de tecnología y de compuestos que ofrecen resultados efectivos en poco tiempo una vez comenzada la operación.

En el taller de escultura en roca, la fragmentación para la reducción de bloques, es realizada de manera manual, empleando las herramientas clásicas para este tipo de trabajo: barreta, martillo, cincel. Este método es poco eficiente, ya que presenta inconvenientes como:

- Demanda excesiva de tiempo.
- Desperdicio de energía.
- Pérdidas en el material.
- Aparición de microfisuras.
- Las dimensiones finales no siempre son las deseadas.

Estos inconvenientes hacen de este trabajo una tarea cansada y primitiva. El esquema simple de esta operación es el siguiente:

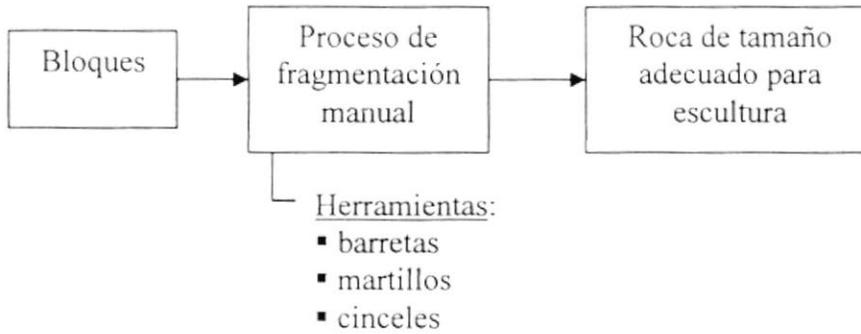


Figura 1.3.- Esquema de proceso en taller de escultura en roca.

Este proceso, aunque es sencillo, cuando es ejecutado de manera manual puede tomar muchas horas o días en su etapa de fragmentación dependiendo de la roca y de quien realice el trabajo. A pesar de contar con un *stock* de bloques, al incrementarse el número de estudiantes del arte de escultura la falta de material será evidente. Para evitar este problema y además hacer más eficiente la etapa de fragmentación de roca, esto es, reducir pérdidas y tiempo del proceso, se experimentará realizar la fractura con argamasa expansiva, técnica que actualmente es más empleada para la extracción de roca ornamental y demoliciones sin vibraciones.

1.3. Hipótesis de Trabajo.

Para solucionar el problema planteado anteriormente, se asume que para provocar la fractura de una roca de manera efectiva, a lo largo de un plano definido por barrenos practicados en la misma, existe un espaciamiento óptimo entre barrenos que permite aprovechar al máximo la argamasa expansiva.

La hipótesis fundamental es que existe una relación espaciamento/diámetro de perforación que indica el espaciamento óptimo y esta relación está comprendida entre valores de 5 y 10. Esta relación es obtenida por extrapolación de datos del fabricante, que emplea diámetros de perforación mayores (32 – 50 mm) propios para trabajos en escala industrial.

1.4. Metodología General.

La metodología empleada para este trabajo es la siguiente:

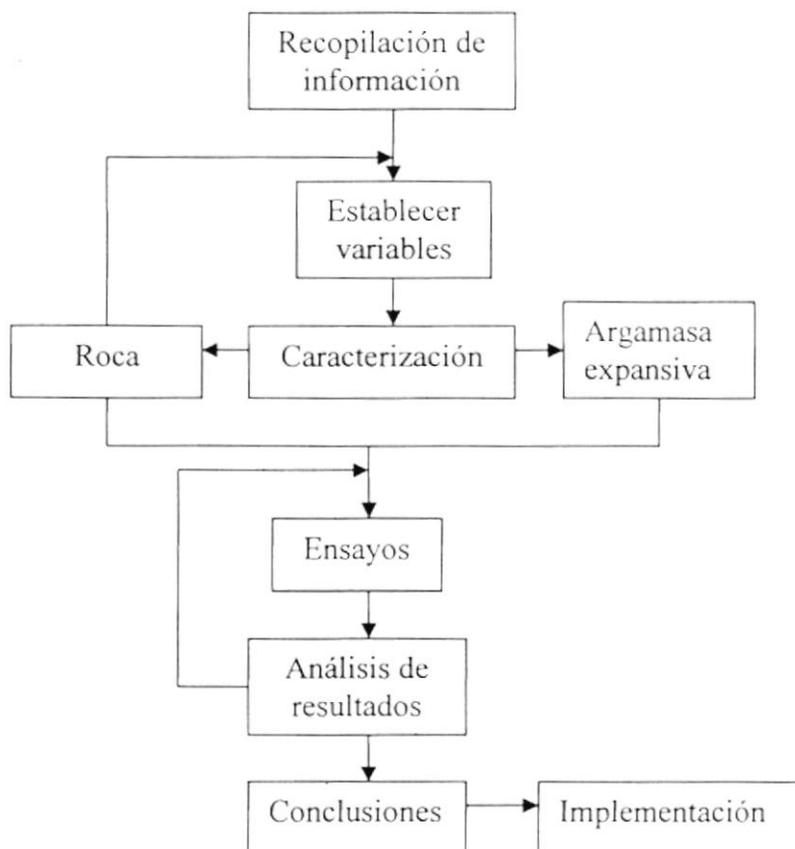


Figura 1.4.- Esquema de la metodología a emplear.

1. *Recopilación de información*, investigando la literatura que aborde temas de fragmentación de roca, elementos expansivos y su aplicación.
2. *Establecer las variables involucradas en el proceso*, considerando la información recopilada.
3. *Caracterización de los elementos de estudio*, la roca que se emplea para escultura (cuarcita) y la argamasa expansiva FRACT-AG[®], determinando sus principales propiedades.

Los ensayos practicados en roca son los siguientes:

- Densidad.
- Resistencia a la compresión simple.
- Fragmentación de roca con argamasa expansiva.

Para la argamasa expansiva FRACT-AG[®] los ensayos practicados son:

- Densidad de la argamasa.
- Granulometría mediante análisis de sedimentación.
- Análisis con microscopio electrónico.
- Coeficiente de dilatación de la argamasa.
- Difracción de rayos-X.
- Desarrollo de argamasa protoindustrial.



Las pruebas de fragmentación de roca son las principales de este estudio, se llevaron a cabo en el taller de escultura en roca, dentro de las instalaciones del campus UFOP. Las pruebas consisten en probar diferentes espaciamientos entre barrenos, considerándolos como un múltiplo del diámetro, empleando tres diferentes diámetros: 13, 16 y 25 mm para obtener el espaciamiento óptimo entre ellos. Las relaciones espaciamiento/diámetro fueron establecidas en base a análisis de los datos del fabricante de la argamasa expansiva.

Los demás análisis se realizaron en:

- Laboratorio de Tratamiento de Minerales del DEMIN.
- Laboratorio de Rayos – X del DEGEO.
- Laboratorio de Microscopía Electrónica del DEGEO.
- Laboratorio de Estructuras de DECIV.

4. *Análisis de los resultados y conclusiones*, recopilando los datos obtenidos de las pruebas y estableciendo cómo interactúan las variables manipuladas.

1.5. Objetivos.

El presente estudio tiene como objetivos:

- Conseguir la relación óptima de espaciamento-diámetro, con pequeños diámetros para su empleo en el taller de escultura en roca.
- Reducir el tiempo de fragmentación de bloques.
- Minimizar las pérdidas debido a fragmentación de material.
- Probar el desempeño de la argamasa expansiva FRACT-AG[®] código rojo bajo las condiciones ambientales de Ouro Preto.
- Integrar un flujo de procesos más eficiente, reemplazando la fragmentación manual por fragmentación con argamasa expansiva.

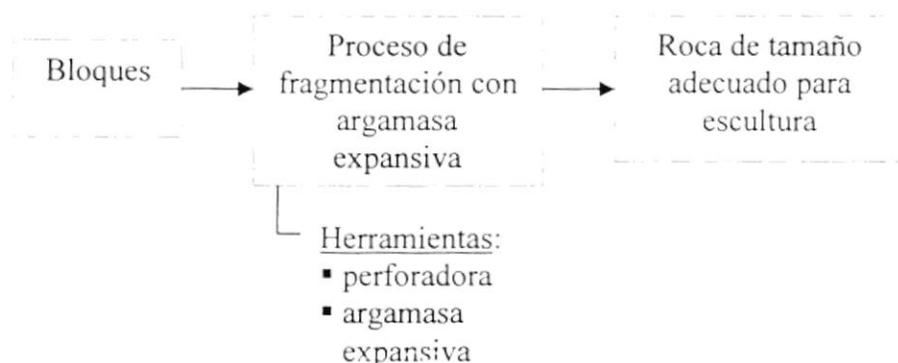


Figura 1.5.- Esquema de proceso eficiente para el taller de escultura en roca.

El fin general de este trabajo es exponer el amplio campo de estudio que aún queda por analizar y trabajar, se expone solo una aplicación de tantas que se pueden dar a los compuestos expansivos.

CAPITULO II.
II. BASE TEORICA.

II. BASE TEORICA.

Se exponen en este capítulo los mecanismos que intervienen en la fragmentación de roca y los estudios realizados sobre elementos expansivos, tratando de explicar su funcionamiento y composición.

2.1. Esfuerzos en Roca.

Para entender mejor el proceso de fragmentación de roca se presenta una revisión de la distribución de los campos de esfuerzos alrededor de un barreno vacío y bajo acción de presiones internas. También un breve abordaje de la distribución de esfuerzos alrededor de una fractura, además de una revisión de las teorías de fragmentación de roca.

2.1.1. Región externa de un barreno circular dentro de un medio infinito.

Este es sin duda uno de los problemas más simples, pero a su vez uno de los más importantes en la mecánica de rocas aplicada en la ingeniería.

Considérese un barreno circular de radio R y un esfuerzo principal P_1 en un medio infinito a lo largo del eje X como se indica en la figura 2.1, en el sistema de coordenadas polares. De acuerdo a Jaeger [7] las ecuaciones fundamentales que definen los esfuerzos σ y τ a lo largo de los ejes radial (r) y tangencial (θ) son:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{2}P_1\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}P_1\left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}P_1\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}P_1\left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{1}{2}P_1\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta\end{aligned}\quad (2.1)$$

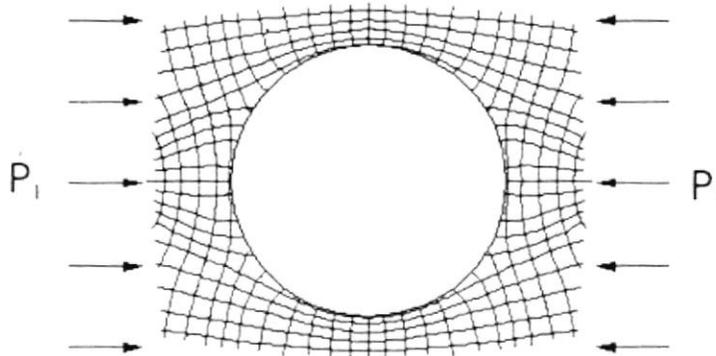


Figura 2.1.- Trayectorias de esfuerzos alrededor de un barreno circular (Jaeger et al., 1978).

Si $r = R$, esto es, en la periferia del barreno, se observa que:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= P_1 - 2P_1 \cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= 0\end{aligned}$$



Entonces, de este análisis se nota que en la periferia del barreno sólo existen esfuerzos a lo largo del eje tangencial. Los valores de estos esfuerzos varían:

Desde $\sigma_\theta = -P_1$, cuando $\theta = 0$;

hasta $\sigma_\theta = 3P_1$, para $\theta = \frac{\pi}{2}$ con respecto al eje X.

Cuando $\theta = 0$ la superficie del barreno está sometida a tracción, mientras que cuando $\theta = \frac{\pi}{2}$ el barreno está sometido a compresión.

Para hallar la zona de esfuerzos de tracción del barreno se analiza el esfuerzo resultante dado por:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = P_1 \left[1 - \frac{2R^2}{r^2} \cos 2\theta \right] \quad (2.2)$$

Luego, la suma de los esfuerzos principales es negativa dentro de la zona

$$r^2 = 2R^2 \cos 2\theta \quad (2.3)$$

Esta zona y los esfuerzos alcanzados se muestran en la figura 2.2.

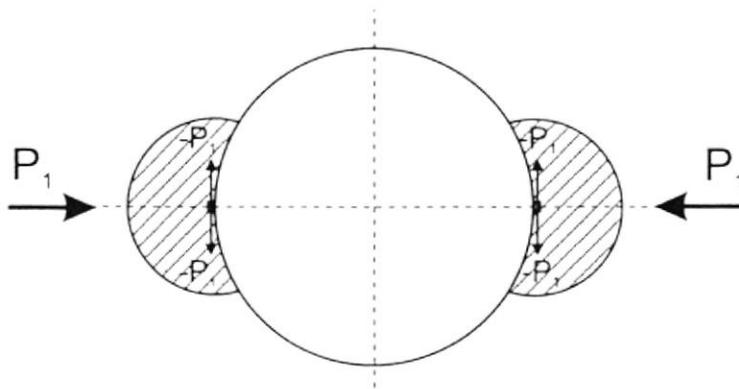


Figura 2.2.- Zona de esfuerzos de tracción (Jaeger et al., 1978).

Esta zona, donde se concentran esfuerzos de tracción resulta de interés, por cuanto constituye un camino para la formación de una fractura.

Asúmase ahora la existiera de un segundo esfuerzo principal P_2 , perpendicular al eje X, las ecuaciones fundamentales cambian a:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{2}(P_1 + P_2)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(P_1 - P_2)\left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(P_1 + P_2)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(P_1 - P_2)\left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{1}{2}(P_1 - P_2)\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta\end{aligned}\quad (2.4)$$

En la periferia el barreno ($r=R$), como antes se mencionó existirán soamente esfuerzos a lo largo del eje tangencial. Si $P_1 > P_2$, entonces:

$$\sigma_\theta = 3P_2 - P_1 \text{ cuando } \theta = 0$$

$$\sigma_\theta = 3P_1 - P_2 \text{ cuando } \theta = \frac{\pi}{2}$$

Esta condición se muestra en la figura 2.3.

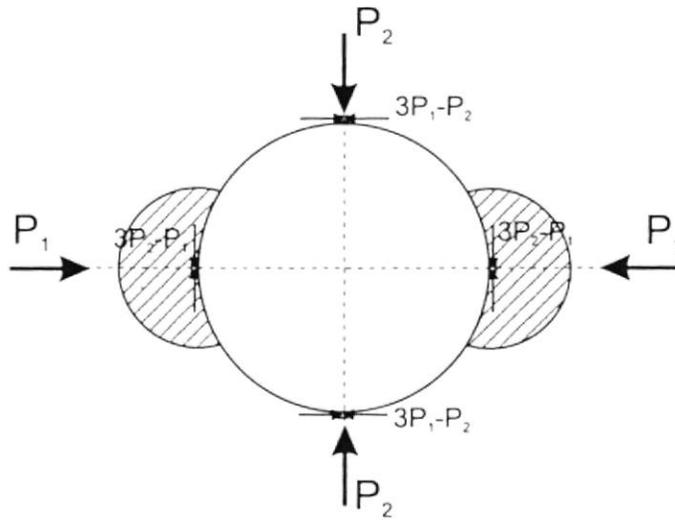


Figura 2.3.- Esfuerzos desarrollados bajo la acción de dos esfuerzos principales.

Si $3P_2 > P_1$ entonces no hay esfuerzos de tracción, condición que limita la formación de una fractura.

Asúmase ahora la acción de un esfuerzo constante P , actuando de manera radial sobre la periferia del barreno ($r=R$). El esfuerzo tangencial en la superficie varía

Desde $\sigma_{\theta} = 3P_2 - P_1 - P$ para $\theta = 0$;

Hasta $\sigma_{\theta} = 3P_1 - P_2 - P$ para $\theta = \frac{\pi}{2}$.

La figura 2.4 muestra la nueva condición de esfuerzos.

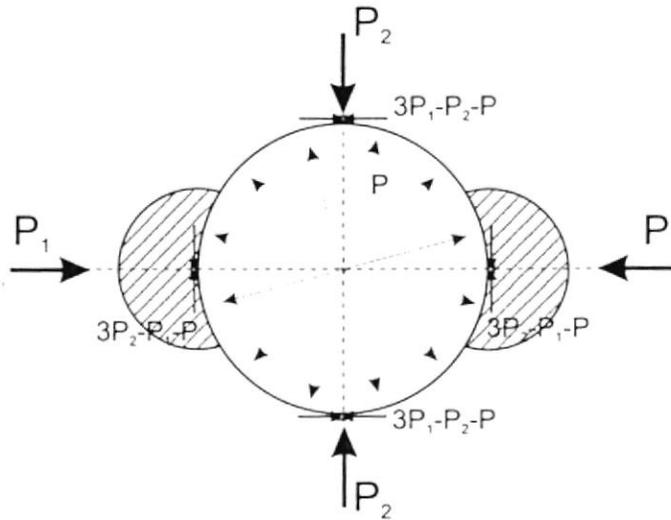


Figura 2.4.- Esfuerzos desarrollados por la acción de dos esfuerzos principales y un esfuerzo interno.

De aquí que, si $P > 3P_2 - P_1$, hay esfuerzos de tracción en la superficie del barreno y pueden aparecer fracturas radiales. Este es el principio de fragmentación hidráulica de Hubert y Willis (1957).

Esta claro que debido a los esfuerzos actuantes, también están asociadas deformaciones en el barreno, pero el análisis de estas es ajeno al objetivo de este estudio.

2.1.2. Esfuerzos aplicados a la superficie de un barreno circular.

Para la explicación de este problema considérese el caso de una presión radial P aplicada en un barreno, sobre los arcos $-\alpha < \theta < \alpha$ y $\pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha$ como se indica en la figura 2.5:

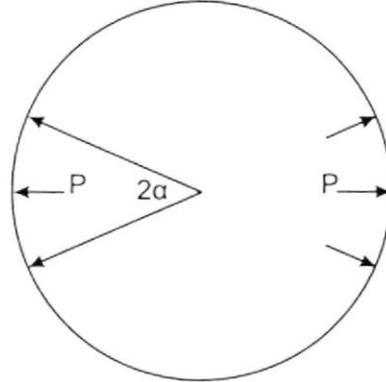


Figura 2.5.- Barreno con presión radial interna (Jaeger et al., 1978).

Los esfuerzos actuantes sobre la superficie del barreno son:

$\sigma_r = P$ para las áreas cargadas y $\sigma_r = 0$ para las áreas sin carga;

$$\sigma_\theta = P - \left(\frac{4P\alpha}{\pi} \right) \text{ para } -\alpha < \theta < \alpha \text{ y } \pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha$$

$$\sigma_\theta = -\frac{4P\alpha}{\pi} \text{ para } \alpha < \theta < \pi - \alpha \text{ y } \pi + \alpha < \theta < 2\pi - \alpha$$

De estos resultados se deduce que existe un esfuerzo de tracción igual a $-\frac{4P\alpha}{\pi}$ en la superficie del barreno, por acción del esfuerzo P sobre el mismo.

Obsérvese que si se superpone esta condición con el esfuerzo causado por una fuerza externa, problema expuesto anteriormente, se puede deducir que un posible camino para la formación de la fractura es la dirección del esfuerzo principal mayor actuante en el medio infinito.

2.2. Mecánica de la Fractura en Roca.

La mecánica de la fractura es un modelo de estudio del comportamiento de los materiales que se sitúa junto a la mecánica del medio continuo, o la mecánica del daño continuo. El estudio de la mecánica de la fractura en roca es un campo reciente, tiene sus inicios en 1979, sin embargo son numerosas las publicaciones al respecto. Surge a partir del análisis de ciertos fenómenos como la dilatación y la presión de poros, que influyen en ensayos de laboratorio. En una etapa primitiva, el fenómeno de la fractura se estudió en vidrio, estructuras de metal y recientemente en materiales cerámicos de ingeniería.

Irwin y de Wit (1983) definen la mecánica de la fractura como:

la fractura del material en términos de leyes de mecánica aplicada y de las propiedades macroscópicas del material. Esto provee un tratamiento cuantitativo, basado en el análisis de esfuerzos el cual refiere la resistencia a la fractura a una carga aplicada y a la geometría estructural de un componente conteniendo defectos.

Entiéndase por defecto una fractura, pero este puede ser también un poro u otro defecto no lineal.

La investigación en mecánica de la fractura en roca ha tocado muchas áreas, incluyendo voladura, fragmentación hidráulica, determinación de esfuerzos *in situ*, fragmentación mecánica, análisis de taludes en roca, mecánica y predicción de sismos, tectónica de placas, intrusiones magmáticas, energía geotérmica, propiedades de transporte de fluidos en macizos rocosos fracturados, propagación de *rift* oceánicos, problemas glaciológicos, varios fenómenos de fractura en la corteza terrestre y modelos tiempo dependientes de fallas en roca (Atkinson, 1987, Whitaker et al., 1992, citados en [22]).



2.2.1. Teoría original de Griffith.

Griffith (1920), trabajó sobre el estudio realizado por Inglis, considerando el problema de la placa bajo tensión, con la diferencia de que, la placa tendría una grieta. Hizo una serie de experimentos sobre alargamiento hasta la ruptura de alambres con y sin fallas, comprobando que en los alambres defectuosos la ruptura era más rápida debido a que las tensiones incrementaban su magnitud hasta el triple o cuádruple. De la misma manera experimentó sobre placas pequeñas de vidrio sometidas a tracción, con una grieta en su interior, perpendicular a la carga. Determinó que las tensiones al final de la grieta eran muy altas y la grieta debilitaba el vidrio significativamente. A partir de estas pruebas concluyó que los materiales que están fracturados, sin importar lo pequeña que sea esa fractura, actúan de manera muy diferente a los que no tienen grietas.

La concepción básica [5] de la teoría de Griffith se basa en el hecho de que, tanto los líquidos como los sólidos, tienen una tensión superficial a lo largo de las superficies de contorno, lo que implica la existencia de energía libre del sistema. Si debido a la acción de un esfuerzo, una fractura es formada o una fractura preexistente se extiende, una cantidad de energía proporcional al área de la nueva superficie debe ser añadida. Este aumento de energía ocurre sin que exista incremento en la energía total del sistema, lo que quiere decir que hay una redistribución de la energía, balanceándose la energía libre de superficie con la energía de deformación y las fuerzas aplicadas. En otras palabras para que una grieta pueda crecer, es necesario tener suficiente energía libre en el sistema para crear la nueva superficie de rotura. En definitiva una fractura será inestable si la energía de relajación desarrollada por la fractura (al crecer la grieta existe un área a su alrededor que se relaja de las tensiones) es mayor que aquella necesaria para crear una nueva superficie de fractura.

Datos experimentales muestran que en rocas, una fractura no se propaga como un simple plano, sino como una zona que contiene un gran número de microfracturas. Entonces es más adecuado hablar de una energía aparente de superficie para distinguirla de la energía de superficie verdadera que puede tener significativamente menor valor [25].

Originalmente esta teoría indica que :

la tensión superficial de cualquier sustancia es cero a una temperatura y presión crítica. Esto indica que la resistencia a la tracción es cero bajo estas condiciones. De aquí que la energía de deformación necesaria para la ruptura bajo esfuerzos de tracción uniformes a una menor temperatura, debe ser similar al trabajo hecho contra la cohesión durante un aumento hacia la temperatura y presión crítica en el material. Si se escoge una sustancia, que no sufre disociación química, este trabajo es muy próximo a la entalpía total necesaria para alcanzar la temperatura crítica. Entonces, en general, se puede decir que, la energía de deformación para la ruptura es del mismo orden de grandeza, que la entalpía total de vaporización. Además de eso, de acuerdo a esta manera de atacar el problema, el esfuerzo de ruptura es comparable con la presión intrínseca del sólido.

El mismo autor comparó valores teóricos de energía para provocar la fractura con valores obtenidos en ensayos de resistencia a la tracción, observando que los resultados en la prueba son menores a los valores teóricos. Esto viola el principio de la conservación de la energía, ya que el trabajo efectuado para la formación de una fractura no puede ser menor que el valor calculado a partir de datos termodinámicos, porque el aumento de trabajo debe hacer aparición como energía de superficie en la fractura. De la comparación de la energía de deformación del ensayo y la energía teórica, se concluye que en el momento de la ruptura, la energía del cuerpo de prueba no está uniformemente distribuida, en los puntos donde se origina la fractura hay una alta concentración de alguna forma de energía.

Griffith explica que esto puede ocurrir si:

1. El material es heterogéneo y puede existir una tensión superficial mutua, de suficiente magnitud, entre dos distintos constituyentes.
2. El material puede contener severos esfuerzos iniciales.
3. El material puede contener pequeñas fracturas formadas durante la manufactura o en el curso de un subsecuente tratamiento.

La razón más probable es la tercera, ya que cumple con el principio de la conservación de la energía, la energía faltante aparece como la energía de superficie de la fractura.

Se sugiere entonces la hipótesis de que la fractura del material se produce por concentración de esfuerzos en las extremidades de pequeñas fisuras preexistentes en el material y no por exceder la resistencia a la tracción.

2.2.2. Mecánica de la fractura lineal elástica.

La mecánica de la fractura lineal elástica o LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics), es un abordaje idealizado pero fundamental. Sus principios, aplicados a los problemas de la ingeniería de rocas están en una etapa inicial [21, 22, 23].

La LEFM describe la aparición y propagación de fracturas en un material isotrópico, homogéneo y linealmente elástico. Se basa en que, la influencia de las cargas aplicadas para la extensión de la fractura, puede ser representada en términos de ciertos parámetros que caracterizan la intensidad de esfuerzos-deformaciones cerca de la punta de la fractura. La iniciación y propagación de una fractura puede ser estimada conociendo la tenacidad de la roca, la forma geométrica de la fractura y el campo de esfuerzos [22,23].

Los principios básicos de la LEFM [16] son los siguientes:

- Con una fractura, esta asociado un factor K , que puede ser medido o calculado.
- Un material que tiene una resistencia a la tracción crítica, también tiene un valor crítico para K .
- El comportamiento del material en la región próxima a la fractura puede ser inelástico y no lineal, pero como es pequeña comparada a las dimensiones de la estructura, su influencia se desprecia. El criterio adoptado para el avance de la fractura es $K = K_C$.
- La extensión de la fractura es controlada por la condición anterior, la fractura se propagará mientras se cumpla la condición y se detendrá cuando $K < K_C$.

Generalmente, la fractura ocurre a un valor crítico K_C . Después de esto la propagación de la fractura es conocida como rápida o catastrófica, pues la velocidad de esta puede llegar a igualar a la velocidad del sonido en el medio.

El factor K es llamado factor de intensidad de esfuerzos (stress intensity factor). Es una propiedad del material, dependiente de la forma geométrica de la fractura, el esfuerzo aplicado y la longitud inicial de la fractura. Tiene unidades de $MPa \cdot \sqrt{m}$. Es un medio para determinar la concentración de esfuerzos en la punta de una fractura en un material que contiene microfisuras de tamaño conocido y orientación con respecto al campo de esfuerzos [21, 22, 23].

Cuando se alcanza el valor crítico de este factor, K_C , éste es denominado tenacidad, es el parámetro más fundamental en la mecánica de la fractura describiendo la resistencia de un material a la propagación de una fractura. Es importante para entender el comportamiento de estructuras que envuelven materiales geológicos, además K_C ha sido aplicado como un parámetro para la clasificación de materiales rocosos, un índice para procesos de fragmentación en roca y una propiedad del

material en la interpretación de formas geológicas y análisis de estabilidad en estructuras rocosas, así como el modelamiento de fractura en roca (Ouchterlony, 1998, citado en [22]).

Hay tres tipos de ocurrencia de una fractura, de acuerdo como se apliquen los esfuerzos sobre el sólido para que se efectúe. En general, el plano de fractura de un material lineal elástico, puede ser sujeta a un esfuerzo normal σ , un esfuerzo de cizalla τ_{xy} , un esfuerzo de cizalla τ_{yz} aplicado en un plano ortogonal a los anteriores.

Los diferentes tipos de fragmentación son ilustrados en la figura 2.6.

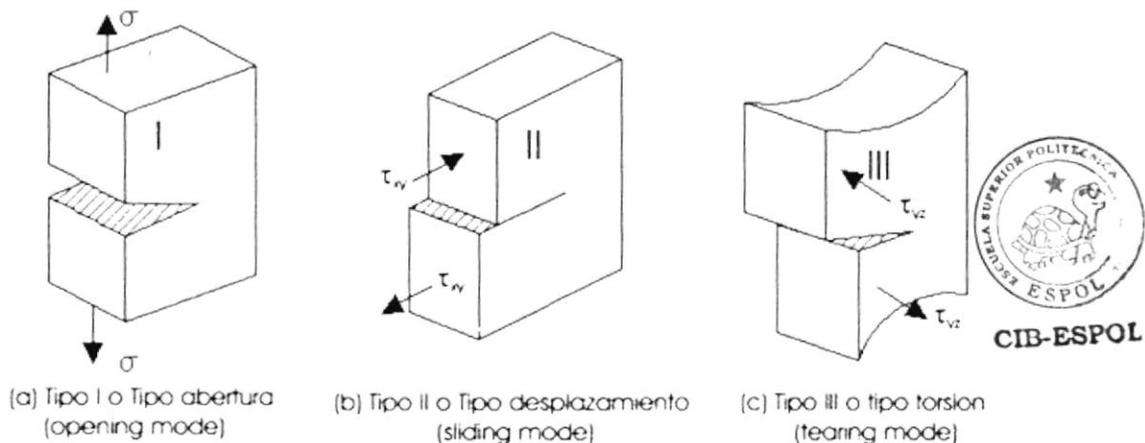


Figura 2.6.- Tipos de fractura de sólidos (Whitaker et al., 1992).

Tipo I: llamado también tipo abertura, la fractura es sujeta a un esfuerzo normal σ , la separación es simétrica con respecto al frente de la fractura, el desplazamiento es perpendicular al plano de fractura. El factor de intensidad de esfuerzos se define para este tipo como:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \cdot \sigma_y \quad (2.5)$$

Siendo r distancia de un elemento infinitesimal hasta la punta de la fractura.

Tipo II: también llamado tipo desplazamiento, las superficies se desplazan relativamente una de la otra, sobre el plano de fractura y de manera perpendicular al frente de la fractura. El factor de intensidad de esfuerzos se define para este tipo como:

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \cdot \tau_{xy} \quad (2.6)$$

Tipo III: o tipo torsión, el sólido está sujeto a un esfuerzo de cizalla anti-plano τ_{yz} , las caras de la fractura se desplazan relativamente una sobre otra, sobre el plano de fractura pero paralela al frente de la misma. El factor de intensidad de esfuerzos en este tipo está dado por:

$$K_{III} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \cdot \tau_{yz} \quad (2.7)$$

En la práctica se presentan combinaciones de estos tipos de fractura, siendo el más complejo el caso de combinación de los tres tipos. Para cada tipo existe una expresión dada por Irwin (1957) que relaciona K con la tasa de relajación de energía (G) de la teoría de Griffith.

El tipo I es el más importante [21], además de ser el más fácil de analizar por la condición de carga presente en muchas situaciones. Sin lugar a dudas el núcleo del análisis es determinar K_I y K_{IC} , fundamentándose en estos valores el establecimiento de un criterio de inicio de la fractura.

La figura 2.7 ilustra el proceso de creación de una fractura para el tipo I.

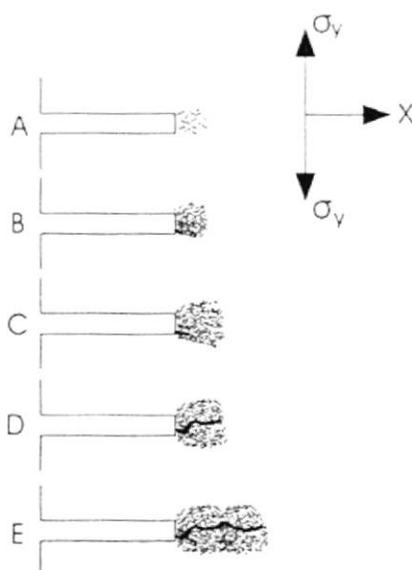


Figura 2.7.- Evolución de la fractura (Andreev, 1995).

Con una muesca en la muestra, esta es sometida a esfuerzos de tracción. Unas cuantas microfisuras aisladas son formadas, el sistema se sigue comportando de manera lineal (Fig. 2.7 A). Bajo la acción de carga, las microfisuras se multiplican, y el comportamiento en la punta de la fractura llega a ser no lineal. Una pequeña región del material, cercana a la fractura se comporta de manera plástica, algo elástico como usualmente es asumida para problemas de mecánica de la fractura. En geociencias esta zona es denominada zona de micro fractura (crack tip microcracking zone) como es indicado por Hardy (1973), Hoagland (1973), Schmidt (1980). Es llamada zona de micro fractura porque, principalmente se forma por la iniciación y propagación de microfisuras en las cercanías de la punta de la fractura, lo cual hace que el material en esta zona se comporte de manera plástica. En el análisis de la mecánica de fractura clásica es llamada zona de proceso. La presencia de esta zona inelástica en frente de la punta de la fractura afecta el comportamiento de la misma. La extensión de una macro fractura ocurre cuando, por efecto del aumento de las microfisuras, estas llegan a unirse entre si, dentro de esta zona no lineal. La macro fractura entonces comienza a propagarse, llevando consigo una nube de fisuras contenidas en la zona de proceso (Fig. 2.7 E).

Dentro del fenómeno de la fractura, se debe conocer que teóricamente, en la punta de la fractura, se alcanza una concentración infinita de esfuerzos, aunque prácticamente es imposible que algún material soporte una carga de ese tipo.

Para determinar K_{IC} , existen diferentes métodos de laboratorio [14], los más comunes son:

- Abrir una fisura ya existente, con una punta o por tracción directa.
- Someter el espécimen a doble torsión.
- Una prueba de flexión.
- Una prueba de tensión con una muestra redonda.

Recientemente Bearman [20], propuso un método para determinar K_{IC} usando el ensayo de carga puntual, mediante las relaciones:

$$\text{Para testigos ensayados diametralmente } K_{IC} = \frac{29.84P}{D^2} \quad (2.8)$$

$$\text{Para piezas irregulares o testigos ensayados de manera axial } K_{IC} = \frac{26.56P}{(WD)^{\frac{3}{4}}} \quad (2.9)$$

Aquí P es la fuerza requerida para romper el testigo,

D es la distancia entre las puntas del ensayo,

W es el ancho mínimo del testigo.

El sistema de referencia adoptado para estudiar la fractura se muestra en la figura 2.8.

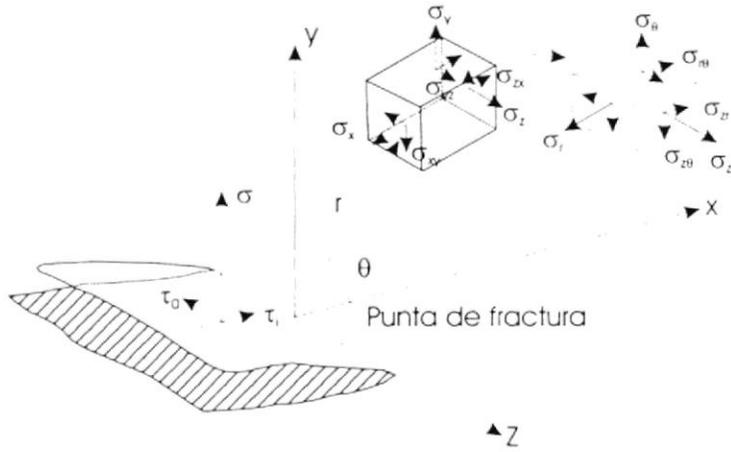


Figura 2.8.- Sistema de referencia en la punta de la fractura y estado de esfuerzos en coordenadas rectangulares y polares (Whitaker et al., 1992).

El modelo adoptado para el análisis de esfuerzos y deformación en la LEFM para el modo I se muestra en la figura 2.9. Se consideran las siguientes condiciones:

- a) $\sigma_y = 0$ cuando $-a < x < a \wedge y = 0$;
- b) $\sigma_y = \sigma$ para $x = \pm \infty$;
- c) $\sigma_y = \infty$ para $x = \pm a$.

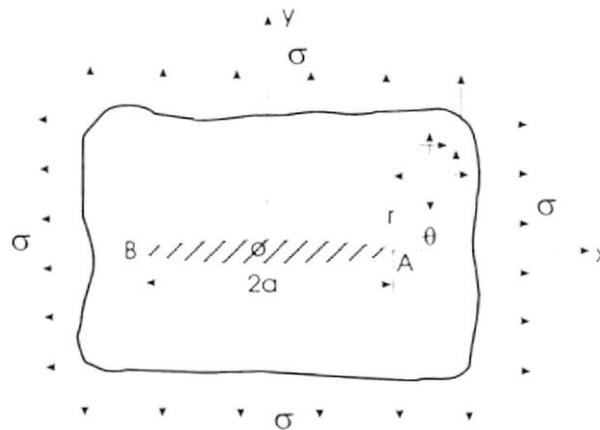


Figura 2.9.- Placa infinita, conteniendo una fractura, (Whitaker et al., 1992).

Las relaciones que definen el campo de esfuerzos, en la punta de la fractura son:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ para deformación plana;}$$

$$\sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \text{ para esfuerzos planos.}$$

Los componentes de desplazamiento para la punta de la fractura, están dados por:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{K_I}{4\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} (2k-1)\cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \\ (2k+1)\sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Donde:

u, v = desplazamiento de la punta de la fractura a lo largo de los ejes x, y respectivamente,

$k = 3 - 4\nu$, para deformación plana, o sea $w = 0$,

$k = \frac{3-4\nu}{1+\nu}$, para esfuerzos planos, o $w = -\left(\frac{\nu}{E}\right) \int (\sigma_x + \sigma_y) dz$.

ν , es el coeficiente de Poisson,

E , es el módulo de elasticidad.



2.2.3. Esfuerzos en zona cercana a una fractura.

A partir de un complejo análisis matemático [7], considerando en roca la punta de la fractura como una elipse, se expone que los esfuerzos se incrementan a razón de $r^{1/2}$ cuando se alcanza esta zona. Resultados similares son hallados haciendo un análisis mediante la teoría de la mecánica de la fractura en metales. La atención es depositada principalmente en el caso de fracturas de tensión normal o en una cizalla pura. Se el esfuerzo de cizalla en la superficie de la fractura es cero ($\tau_{r\theta} = 0$); entonces se puede considerar que σ_θ y σ_r son los esfuerzos principales y el valor del ángulo θ en el que ocurre esto puede ser considerado como la dirección de la fractura.

El caso de una fractura con presión interna P y la superposición de una carga P_2 perpendicular a la fractura es de especial interés, siendo un objetivo principal la determinación de la trayectoria de esfuerzos. La ecuación que define una primera trayectoria de esfuerzos es:

$$r \frac{\partial \theta}{\partial r} = \tan \phi = \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{4} \right) \quad (2.12)$$

Siendo ϕ el ángulo entre el eje principal y la dirección de σ_r . Esta expresión puede ser reducida a:

$$r \cos^4 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{4} \right) = \text{const} \quad (2.13)$$

De modo similar la segunda trayectoria estará dada por:

$$r \cos^4 \left(\frac{3\pi}{4} + \frac{\theta}{4} \right) = \text{const} \quad (2.14)$$

De esta manera los esfuerzos estarán distribuidos como se indica en la figura 2.10.

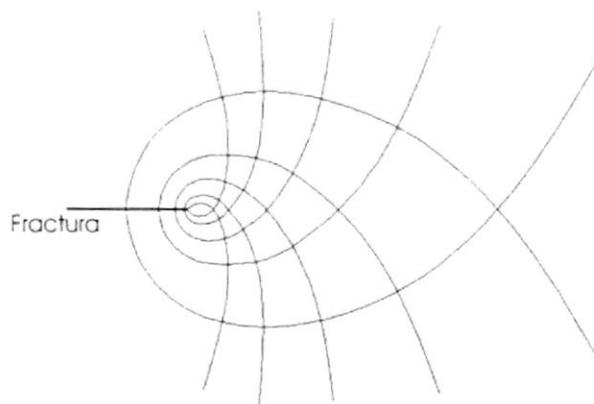


Figura 2.10.- Distribución de esfuerzos en las cercanías de una fractura (Jaeger et al., 1979).

2.3. Fragmentación Hidráulica.

La fragmentación hidráulica, en mecánica de rocas es una operación que crea una fractura por tracción mediante la inyección de un fluido presurizado [15].

Gubert y Willis (1957) establecieron que la fractura en la pared de un barreno se iniciará, si la presión del fluido excede el esfuerzo mínimo tangencial y la resistencia a la tracción del material.

La relación que expresa el fenómeno mencionado es:

$$P_c = 3S_h - S_H + P_{co} - P_o \quad (2.15)$$

Donde:

P_c : es la presión a la que se produce la fractura [Pa],

S_h, S_H : esfuerzos principales [Pa],

P_{co} : es la resistencia a la tracción de la roca [Pa],

P_o : presión de poros [Pa].

Desde luego, la fractura se propagará en la dirección de la menor resistencia.

Un modelo simplificado para análisis se muestra en la figura 2.11.

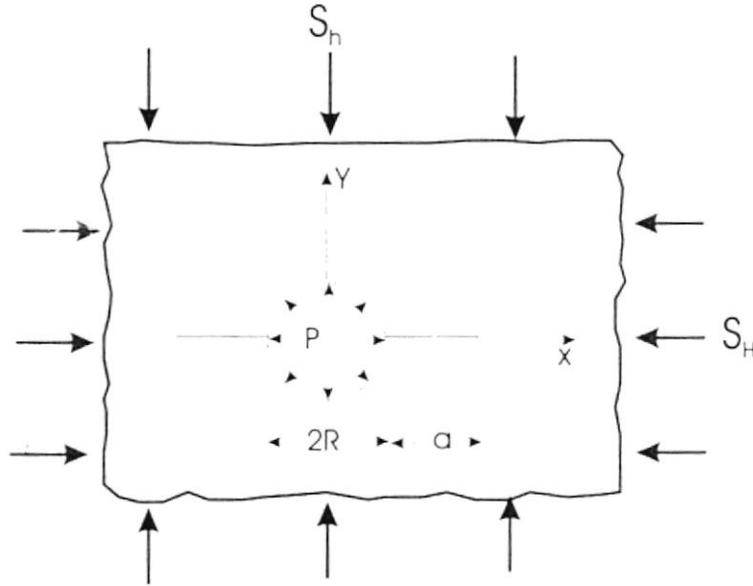


Figura 2.11.- Modelo de fragmentación hidráulica (Rummel, 1991).

El análisis de este complejo sistema de esfuerzos se simplifica aplicando el principio de superposición, calculando el factor de intensidad de esfuerzos para cada fuente de carga, como se muestra en la figura 2.12.

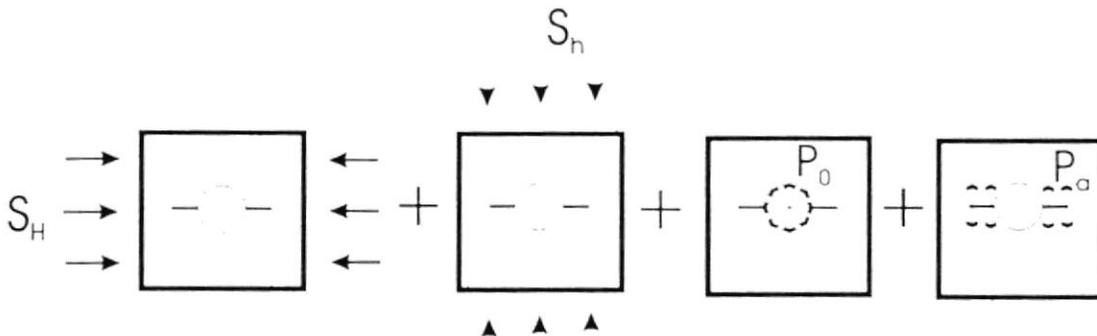


Figura 2.12.- Superposición de esfuerzos simples para cálculo del factor de intensidad de esfuerzos (Rummel, 1991).

De acuerdo a este principio, el factor de intensidad de esfuerzos, puede ser descompuesto así:

$$K_I(S_H, S_h, p, p_a) = K_I(S_H) + K_I(S_h) + K_I(p) + K_I(p_a) \quad (2.16)$$

Aquí p es la presión aplicada por el fluido sobre las paredes del barreno y p_a es una función que caracteriza la distribución de la presión del fluido a lo largo de la fractura desde $x = (R, -R)$ hasta $x = (R+a, -R-a)$.

Se hace el cálculo de cada K_I , para obtener el K_I del sistema. Cada carga simple tiene su modo de calcular K_I . Este modelo se puede ajustar al problema de la fragmentación de roca con argamasa expansiva. Los valores de S_H , S_h , p_a son iguales a 0, pues las pruebas de fragmentación a escala de laboratorio son practicadas en muestras de roca sin confinamiento y la expansión de la argamasa es lenta por lo que no hay penetración de la misma en la fractura. Esta es la diferencia básica entre los dos tipos de fragmentación, el hidráulico y con argamasa expansiva. Existe entonces una marcada diferencia en la distribución de esfuerzos que provocarán la formación y propagación de la fractura. En el caso de la fragmentación hidráulica, el fluido ingresa a la fractura y ejerce una presión sobre las paredes de la misma, causando la propagación. Si se aumenta la presión del líquido, teóricamente podría extender indefinidamente la fractura, pues siempre, en la punta de la misma, estará actuando una fuerza que vence la resistencia a la tracción de la roca. La fragmentación con argamasa se produce por la presión ejercida sobre las paredes del barreno. Una vez provocada la fractura, la argamasa continúa ejerciendo presión solamente sobre las paredes del barreno, entonces la propagación de la fractura queda limitada, hasta alcanzar un punto en que la presión sobre el barreno es insuficiente para vencer la resistencia a la tracción de la roca. La punta de la fractura esta libre de acción de esfuerzos externos.

Entonces, interesa solamente el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos, debido a la presión actuante sobre las paredes del barreno. Este está dado por la siguiente expresión:

$$K_i(p) = pR^{1/2}h_0(b) \quad (2.17)$$

La función $h_0(b)$ está definida por:
$$h_0(b) = 1.3 \frac{b-1}{1+b^{3/2}} + 7.8 \frac{\sin\left[\frac{b-1}{2}\right]}{2b^{5/2}-1.7} \quad (2.18)$$

$$\text{y } b = 1 + \frac{a}{R} \quad (2.19)$$

Siendo:

p : presión efectuada sobre las paredes del barreno [Pa],

R : radio del barreno [m],

a : la propagación de la fractura [m].

Teóricamente este modelo de fragmentación hidráulica está ajustado a las condiciones de fragmentación con argamasa expansiva conociéndose la tenacidad de la roca y la presión aplicada. Su validez para predecir la extensión de la fractura no está comprobada todavía.

2.4. Argamasa Expansiva.

2.4.1. Características generales.

La argamasa expansiva es un AGENTE DEMOLEDOR NO EXPLOSIVO pulverulento y de color grisáceo, cuyo componente base es la cal inorgánica. Es un producto alcalino, su pH es alrededor de 13. Mezclado con el porcentaje adecuado de agua (que no supere los 10 ó 12°C) provoca, por reacción química de alto poder, una enorme tensión expansiva (Chemica Edile S.A.), actúa en base a su propia expansión, ejerciendo contra las paredes del orificio que lo contiene una fuerza

unitaria superior a los 80 MPa (8000 t/m²) creando fracturas, y grietas. Generalmente son suficientes de 5 a 30 MPa para demoler todo tipo de roca (Kayati S.A.) y hormigón, es un producto altamente ecológico puesto que no emana gases y no deja residuos nocivos.

2.4.2. Ventajas

- No requiere permisos especiales de manejo.
- El proceso de demolición puede ser interrumpido.
- No hay vibraciones, ni explosiones o emanación de gases.
- No se produce contaminación (acústica o producción de residuos).
- Velocidad, (20 veces más rápido que las cuñas).
- A diferencia de la maquinaria pesada de demolición, no hay preocupación por el desgaste o fatiga.
- En canteras de granito produce un ahorro significativo de material, pues minimiza las pérdidas, el material esta limpio y sin microfisuras, aumenta la cantidad de roca vendible, aumenta la producción. Según el fabricante su consumo aproximado es de 8 kg por cada metro cúbico de material desmontado.

2.4.3. Principios.

Según un fabricante de AE (Kayati S.A.), la demolición con AE se basa en la tecnología llamada "reacción química de hidratación". Este método fue empleado en la antigüedad para la fragmentación de bloques durante la construcción de las pirámides de Egipto con uso de cuñas de madera. Del mismo modo, la AE se hidrata

y aumenta su volumen de manera rápida, produciendo la fragmentación de la roca en que se está trabajando.

2.4.4. Usos.

De acuerdo a especificaciones técnicas, la AE se puede usar en cualquier formación rocosa, construcción de cemento o de hormigón armado y estructuras de ladrillos, para la ejecución de los siguientes trabajos:

- Excavación de cimientos.
- Demolición de rocas para la construcción de caminos.
- Abertura de zanjas para la ubicación de tubos.
- Excavaciones subterráneas.
- Excavaciones marítimas incluso submarinas.
- Eliminación de roca.
- Demolición en general.



La AE ha demostrado ser viable en demoliciones donde las construcciones adyacentes pueden ser afectadas por vibraciones de explosiones, en precorte de formaciones rocosas, corte de bloques de granito y mármol, operaciones donde el empleo de explosivos resulta antieconómico. Puede desplazar el empleo de maquinaria pesada para demolición, dejando el uso de esta para retirar escombros.

En la demolición de bloques o roca suelta, se orienta la línea de fragmentación basándose en el principio lógico de que está se producirá entre los barrenos más próximos.

2.4.5. Preparación.

La AE debe ser mezclada, antes de su uso, con agua limpia en la proporción del 30% de su peso. La razón recomendada por el fabricante es de 1,5 lts. por cada 5 kg, en el caso del FRACT-AG[®] con el cual se realizaron las pruebas. El resultado es una pasta cremosa, fluida y sin grumos. Esta mezcla es vertida en los barrenos, durante los siguientes 5 – 10 minutos. Las lluvias y filtraciones de agua en los barrenos son importantes, pues, debido a la saturación del medio, se puede perder el efecto deseado en la fragmentación.

El procedimiento de modo general es:

1. Perforación y limpieza de los barrenos.
2. Preparación de la argamasa y vertido en los barrenos (con bombas en caso de barrenos horizontales).
3. Verificar que no haya filtración de argamasa mediante fisuras, puede revestirse el barreno con PVC.
4. En barrenos horizontales sincronizar el relleno del barreno con su taponado, verificando que esté íntegramente lleno.

El tiempo en que se produce la reacción de hidratación de la AE, depende de la temperatura a la que se encuentre operando, puede ser en principio de 1 a 3 horas.

Según especificaciones del fabricante, las distancias óptimas a las cuales se debe hacer los barrenos, en función del diámetro de perforación es:

Tabla 2.1.- Espaciamento en relación al diámetro de perforación
(Chemica Edile S.A.).

ϕ (mm)	E(cm)
32	40
35	50
40	60
45	70
50	80

De igual manera especifica el consumo por metro de perforación, en función del diámetro:

Tabla 2.2.- Consumo de argamasa por metro de perforación (Chemica Edile S.A.).

ϕ (mm)	RCL (kg/m)
30	1.1
32	1.3
34	1.5
38	1.8
40	2.0
45	2.6
50	3.0

El fabricante de FRACT-AG[®], Chemica Edile S. A., indica que los barrenos de mayor diámetro y menor distancia aceleran el tiempo de ruptura.

Como la velocidad de reacción de hidratación es función de la temperatura de la argamasa, se han fabricado varios tipos de argamasa, dependiendo del ambiente de trabajo, reconocidos por un código de colores:

- Rojo: para empleo en temperatura menor a 5°C.
- Verde: para temperaturas entre 5 y 20°C.
- Amarillo: para temperaturas entre 20 y 35°C.
- Oro: para temperaturas entre 35 y 50°C.
- Azul: para temperatura entre 50 y 60°C.
- Plata: para temperatura entre 60 y 70°C.



La AE FRACT-AG[®] con la que se trabajó es de código rojo, que por las condiciones ambientales de Ouro Preto, no es la adecuada (la más adecuada es código verde) sin embargo ofreció resultados satisfactorios en las pruebas.

2.4.6. Precauciones.

Canteras de granito que emplean la AE en sus operaciones de extracción (SIGMA do Brasil S.A.) recomiendan lo siguiente:

- Usar guantes y gafas de seguridad.
- No acercarse a los barrenos luego de haber efectuado la carga.
- No introducir la mezcla en recipientes estrechos o con boca más estrecha que el fondo.

Hay una remota posibilidad que la AE salga súbitamente por el barreno, esto puede acontecer si el agua supera los 15°C, por una masa mal efectuada o si emplea diámetros superiores a los 50 mm con temperaturas mayores a 25°C. Para evitar esto se recomienda trabajar con el tipo adecuado de argamasa, emplear recipientes anchos para la mezcla, evitar formación de grumos, eliminar los residuos de argamasa con abundante agua.

2.5. Estudios Sobre Elementos Expansivos.

En el mundo de los cementos, se han realizado una serie de estudios acerca del mecanismo de expansión y los esfuerzos desarrollados en una mezcla expansiva, sin llegar a un resultado determinante.

Nagataki y Gomi (1998), realizaron estudios en sistemas expansivos, considerando como agente expansivo principal la etringita, un producto formado por reacción de hidratación, que en cementos ordinarios causa aparición de fracturas. En su estudio considera como principal grupo de mezclas expansivas los calciosulfoaluminatos.

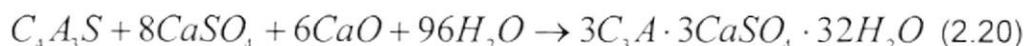
Yamazaki (1975, citado en [1]), expone como los tres componentes básicos de una mezcla expansiva al SO_3 , CaO y Al_2O_3 ; de los compuestos resultantes de la mixtura, son considerados como expansivos :

Etringita: $(CaO)_3Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$,

Monosulfato: $(CaO)_3Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$,

Hidroxido de Calcio: $Ca(OH)_2$,

La reacción:



Siendo C: CaO ; A: Al_2O_3 y S: SO_3 .

representa la formación de la etringita y es de interés por cuanto presenta un alto incremento de volumen: 9.3 veces [1] en el tamaño de las partículas de C_4A_3S .

Algunos mecanismos de expansión han sido propuestos para explicar el aumento de volumen:

1. Absorción de agua de ingredientes expansivos en estado gelatinoso (swelling theory),
2. Expansión por crecimiento de cristales de ingredientes cristalinos expansivos (crystal growth theory),
3. Formación de poros por desintegración de ingredientes expansivos durante la hidratación.

En el caso de expansión que aparece por la formación de etringita, la ocurrencia de reacciones topoquímicas en los ingredientes expansivos es una teoría ampliamente aceptada.

El factor importante para la expansión no es sólo la hidratación de los elementos expansivos, también lo es la formación de componentes hidratados circundantes que transmiten la fuerza de compresión de elementos expansivos.

La tabla 2.3 muestra las propiedades físicas y composición química de la serie etringita y la serie óxido de calcio.

Tabla 2.3.- Propiedades físicas y composición química de compuestos expansivos (Nagataki et al., 1998).

Item		Tipo C – S – A	Tipo CaO
Propiedades Físicas	Gravedad específica (%)	3.00	3.14
	Superficie específica (cm ² /gr)	2500	3500
	Perdidas por ignición (%)	0.8	0.4
Composición química	SiO ₂ (%)	4.0	9.6
	Al ₂ O ₃ (%)	10.0	2.5
	Fe ₂ O ₃ (%)	1.0	1.3
	CaO (%)	51.2	67.3
	MgO (%)	0.6	0.4
	SO ₃ (%)	31.9	18.0
	Total (%)	99.5	99.5

La figura 2.13 ilustra la reacción química durante la formación de etringita.

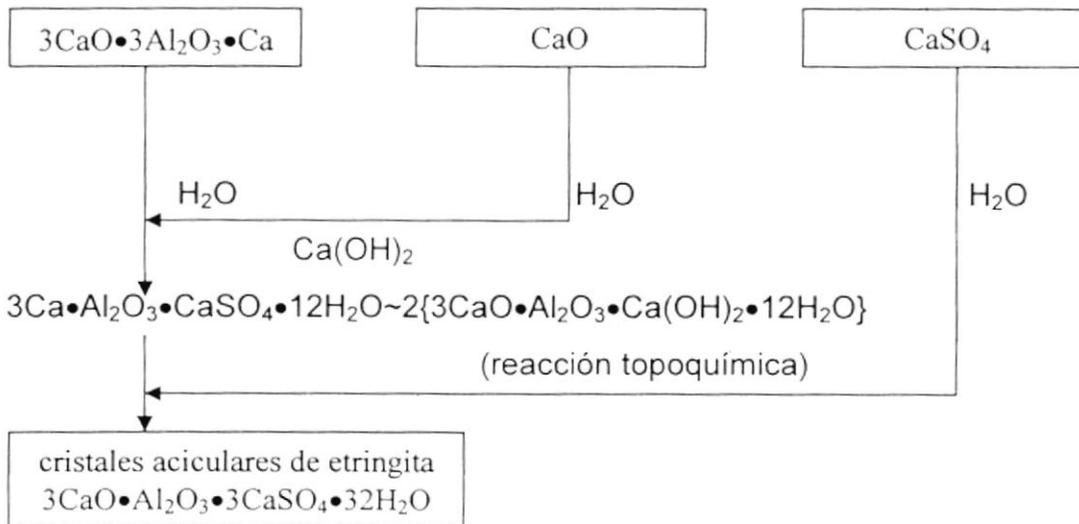


Figura 2.13.- Esquema de reacción de formación de etringita (Nagataki et al., 1998).

Un estudio realizado para demorar la formación de etringita [4] por Peiyu Yan y Xiao Qin (2000), dió como resultado que el efecto de los ingredientes expansivos en el

concreto no ofrece un efecto de contracción de compensación cuando la temperatura de curado es mayor que 70°C. En esta experiencia se usó un agente expansivo perteneciente a los sulfoaluminatos, en una proporción de 8 – 12% en la mezcla. Las fases componentes del agente expansivo fueron principalmente clinker silica-aluminato, alumina y yeso. En sus cuerpos de ensayo, que contenían 10% de agente expansivo y fueron sometidos a proceso de TMC (temperature match condition) se consiguió una expansión en la etapa inicial de hidratación, según sus proyecciones la expansión puede continuar hasta después de un año en el rango de 0.01 – 0.04%, debido al efecto de contracción de compensación. En sus resultados indican que el efecto expansivo fue contrarrestado, debido a la alta temperatura de curado (70 – 80°C).

Un estudio referente a productos de hidratación [3] en cementos ligeros y cementos ligeros expansivos sometidos a temperaturas de endurecimiento de 20 y 75°C, se llevó a cabo usando como agente expansivo “Bulexa” (Bulgarian patent #72240, 1985). Este agente expansivo tiene acción de expansión por hidratación y formación de hidróxidos y fue usado en tres diferentes dosis (1:1.5:2). Para análisis usaron técnicas de espectroscopía infrarroja, difracción de rayos-X, microscopía electrónica, análisis térmico complejo (TDA/DTG). Los resultados de esta investigación muestran la formación de etringita bien cristalizada, luego de 28 días con temperatura de endurecimiento ambiente. Silicatos de calcio hidratado se presentan en los cementos endurecidos a 75°C. También se confirmó que la presencia de agentes expansivos estimulan la formación de productos que son mas estables y descomponen a temperaturas mayores de 600°C. La adición de agentes expansivos conduce también a la formación de una gran cantidad de productos de hidratación en los poros y los vacíos entre partículas separadas, conclusión confirmada por análisis con SEM. De estos análisis deducen que el agente “Bulexa” a temperatura ambiente de endurecimiento causa la formación de etringita bien cristalizada, además presencia de sulfato es firmemente ligada a composiciones con agente expansivo, no es encontrado yeso, a pesar de las elevadas temperaturas.



Huisheng et al. [8] estudiaron la cinética de hidratación del CaO, así como la evolución de la tasa de calor de reacción de hidratación del mismo compuesto, con miras a su aplicación en la fabricación del cemento Pórtland. En sus resultados indica que la actividad de hidratación decrece con la temperatura de calcinación de CaO, el efecto de la temperatura de quemado sobre la acción de hidratación es debido al cambio de la micro estructura, un aumento en esta temperatura implica un crecimiento en los cristales de CaO. Del mismo modo la tasa de hidratación está estrechamente ligada a la temperatura de la reacción de hidratación.

Hansen e Swenson et. al., (citados por Galí [9]), presentan una hipótesis, en cementos altamente alcalinos y agregados de dolomita. Suponen que existe una reacción álcali-carbonática, que acelera el proceso de dedolomitización, que se traduce en un aumento de las fases resultantes, o, alternativamente la expansión de todo el cuerpo a través de un mecanismo indirecto.

En la reacción de dedolomitización:



la dolomita reacciona con la portlandita y produce calcita y brucita. Haciendo un balance de volúmenes molares, se tiene un incremento de 1.13% del volumen original. Otros autores sugieren que la expansión observada se produce por una disolución alcalina de la sílice o de arcilla contenida en el agregado de dolomita.

Dollimore et. al. [6], realizó pruebas de análisis termal de agregados del cemento portland reciclado, identificando componentes como agregados o escoria. Los agregados finos podían ser identificados como dolomita y/o calcita en estado natural. El análisis termo gravimétrico mostró un producto de hidratación, portlandita (Ca

(OH)₂), que como se verá, es un elemento presente dentro de nuestra AE, en su estado expandido.

Otros elementos expansivos son compuestos de yeso y alunita [19], empleados en pruebas para eliminar efectos de contracción del cemento. En estas pruebas también se confirma la reacción de hidratación, generalmente de compuestos de Ca y Mg.

La literatura encontrada, referente a compuestos expansivos conduce a las siguientes conclusiones:

En general estos compuestos estudiados han sido usados para eliminar efectos indeseables en el concreto, pero estudios referentes a su empleo, con fines industriales para demolición son escasos. La información referente a la composición de estos elementos y su preparación es también escasa. Sin embargo, la formación de etringita, parece ser la mejor explicación de la expansión de la argamasa industrial. Es por ese motivo que en las experiencias realizadas se utilizaron óxido de calcio y óxido de magnesio, que intervienen en la formación de etringita. Se muestra la poca investigación publicada al respecto de elementos expansivos que desarrollen altos esfuerzos en poco tiempo. En lo referente a esfuerzos durante la expansión, Colan et al. [24] indica que en sus experimentos, las mezclas que tienen como elemento expansivo compuestos de aluminio desarrollan esfuerzos que alcanzan valores pico de 90 MPa (tal es el caso con sulfato trialuminato tricálcico $4\text{CaO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$ como agente expansivo, que alcanzó esfuerzos de 90 MPa después de 15 días).

CAPITULO III.

III. METODOLOGIA.



III. METODOLOGIA.

Para el desarrollo del presente trabajo el procedimiento empleado fue el siguiente:

- Caracterizar el material rocoso y estudiar los fenómenos de la fragmentación.
- Caracterizar el compuesto causante de la fractura, la argamasa expansiva.

Siguiendo este lineamiento, se decidió realizar pruebas en roca y pruebas en la argamasa, luego integrar el resultado de todos estos análisis para obtener conocimiento sobre la influencia de las variables envueltas en la fragmentación y la interacción entre ellas. El resultado final será el espaciamiento adecuado entre barrenos.

3.1. Pruebas en Roca.

Las experiencias que se realizaron en roca fueron las siguientes:

- Densidad de la roca.
- Resistencia a la compresión.
- Fragmentación de roca con argamasa expansiva.

3.1.1. Densidad de la roca.

La determinación de la densidad de la cuarcita, se realizó con ensayo de desplazamiento de agua, usando muestras de forma cúbica.

La experiencia se repitió con 4 muestras de cuarcita, denominadas: A1, A2, B1, B2. Las muestras A son de cuarcita blanca y las B de cuarcita roja, con las siguientes dimensiones:

A1: 50x50x50 mm,

A2: 50x47.4x57 mm,

B1: 51.8x53.6x48.5 mm,

B2: 51.1x55.2x51.9 mm.

3.1.2. Resistencia a la compresión uniaxial.

El ensayo de resistencia a la compresión se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de estructuras en la Escuela de Minas, Ouro Preto. Este ensayo de acuerdo a la ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) debe realizarse con muestras cúbicas de 70 mm de arista. Las muestras fueron preparadas en el laboratorio de laminación de la UFOP.

Equipo

Se utilizó la máquina de compresión uniaxial KRATOS, con una capacidad de carga nominal de 2000 kN y una carga efectiva de 1800 kN, con regulador de carga.

Ensayo

El ensayo se realizó considerando los siguientes puntos:

- Para las muestras según las normas ABNT:
 - ✓ Las muestras deben ser cúbicas, con aristas de 70 mm.
 - ✓ La deflexión entre las aristas y la vertical no debe exceder los 2 grados.
 - ✓ Las superficie en contacto debe tener como máximo 1 mm de desnivel con respecto a la horizontal.

- Si la resistencia de la muestra era tal que soportaba una carga mayor a 1600 kN, se suspendía el ensayo por razones de seguridad del equipo.
- La tasa de incremento de carga fue de 7 kN/s.

Los cuerpos de prueba para este ensayo fueron los mismos con los que se realizó la prueba de densidad. Considerando que las muestras usadas para la determinación de la resistencia a la compresión estaban fuera de las normas de ensayo, surge la necesidad de padronizar los resultados obtenidos. Para este efecto, se revisó el efecto de la escala sobre la resistencia; Greenwald et al. (1939), Steart (1954), Holland and Gaddy (1957), analizando el comportamiento de pilares rectangulares de minas de carbón, consiguen la siguiente ecuación:

$$C_p = C_1 \frac{w^\alpha}{h^\beta} \quad (3.1)$$

donde:

C_1 : es la resistencia de un cubo de 1 unidad de arista,

w, h : son las dimensiones del pilar, de base cuadrada w y altura h ,

α, β : son constantes que dependen del material, para la cuarcita son 0.5 y 0.75,

C_p : es la resistencia del pilar.

Esta relación, cuando la muestra no es el patrón de 1 unidad de arista, toma la forma:

$$C_p = C_0 \frac{(w/w_0)^\alpha}{(h/w_0)^\beta} \quad (3.2)$$

donde;

C_0 : es la resistencia de la muestra cúbica,

w, h : dimensiones de la muestra,

w_0 : dimensiones de la muestra cúbica, considerada como patrón,

C_p : resistencia de la muestra de dimensiones w, h .

En el presente caso, las muestras cúbicas de aproximadamente 50 mm de arista servirán para obtener la resistencia de la muestra patrón de 70 mm de arista, que es representativa del macizo.

3.1.3. Fragmentación con argamasa expansiva.

Este ensayo constituye el tema principal del presente trabajo, en base a sus resultados se estimará el espaciamiento óptimo para la fragmentación de bloques con argamasa expansiva, además del diámetro óptimo de perforación. Las operaciones relacionadas fueron ejecutadas en el taller de cantaría y en laboratorio de tratamiento mineral.

Para el ensayo, como se ha especificado antes, la cuarcita usada es de dos tipos, llamados “quartzito branco” y “quartzito vermelho”, a manera de bloques disponibles en el taller de cantaría donde se preparan para su posterior uso artístico.

Preparación de la muestra

La elección de los cuerpos de prueba se realizó considerando los siguientes factores:

- **Tamaño de la muestra:** debe ser manipulable, además de permitir la perforación de una línea de barrenos, cuyo número dependerá del diámetro de perforación. El espesor de la muestra debe ser mayor a 12 cm, para poder realizar una perforación mínima de 10 cm.
- **Calidad de la muestra:** libre de fracturas, sin alteración, competente; por ser una roca de origen sedimentario metamórfico, el bandeamento aparente debe ser perpendicular al plano de fractura definido por los barrenos, además de una forma casi uniforme.

- Representatividad de la muestra: considerando que el tipo de roca sea del mismo empleado para los trabajos del taller de escultura, siendo sus propiedades las más comunes dentro de las usadas para el trabajo de escultura.

Cuando el tamaño de la roca es exagerado, poco manipulable, para obtener la muestra se fragmenta el bloque mediante el conocido método de corte con cuñas.

Perforación

Para esta operación, la herramienta usada fue:

martillo perforador BOSCH GBH 2-24 DSE, con funciones de percusión, rotopercusión y rotación, velocidad 0 - 4850 rpm, potencia de 620 W, peso de 2.4 kg, las brocas para perforación en roca tienen diámetros de 13, 16 y 25 mm.

La muestra preparada, es perforada usando la herramienta en modo rotopercusivo. La operación de perforación consiste en realizar una fila de barrenos verticales. El número de barrenos practicados depende del diámetro usado y de las dimensiones de las muestras. Cada barreno tiene como mínimo 100 mm de perforación. Para una medida del rendimiento de la herramienta y de la calidad de la roca se cronometró la perforación.

Para mantener la verticalidad de los barrenos, durante la ejecución de la perforación, la herramienta fue guiada con un accesorio de la misma. Luego de la fragmentación, se encontraron perforaciones con una desviación máxima de 2° con respecto a la vertical.



Preparación de la argamasa expansiva FRACT-AG®

La preparación de la argamasa se realizó en el laboratorio de Tratamiento de Minerales del DEMIN. Para calcular la cantidad de argamasa a usar, se calculó primero la densidad aparente de la argamasa, con ayuda de un vaso de precipitación. La mezcla de polvo y agua, en las proporciones indicadas por el fabricante (30% en peso ó 1.5 l por cada 5 kg) tiene una densidad aparente de 1425 kg/m³ (0.5 kg con un volumen de 351.8 ml).

El volumen de argamasa a preparar viene dada por:

$$V_a = \pi \left(\frac{\phi^2}{4} \right) \times H \times N \quad (3.3)$$

y la masa de argamasa a emplear:

$$M = \rho_{ap} \times V_a \times 0.8 \quad (3.4)$$

Siendo:

ϕ : diámetro de perforación,

H: la profundidad del barreno,

N: el número de barrenos,

M: la masa de argamasa,

V_a: el volumen de los barrenos.

La mezcla se realiza en un vaso de precipitación plástico, para evitar accidentes debido a la dilatación de la argamasa, con ayuda de una espátula metálica, añadiendo agua en pequeñas cantidades hasta alcanzar la mezcla adecuada.

Las características físicas de la argamasa preparada, resultan interesantes para un compuesto cuyo componente principal es la cal inorgánica (absorbente) ya que se presenta fácilmente manipulable, sin formación de grumos, además de una baja absorción, tomando la forma de una mezcla viscosa pero fluída.

La argamasa preparada está lista para la operación de vertido dentro de los barrenos.

Relleno de barrenos

Los barrenos practicados a la roca, una vez limpios, son rellenados con la argamasa expansiva, de manera manual, provocando agitación en el recipiente para evitar la expansión inesperada.

El relleno con argamasa se realiza con cuidado evitando atrapar aire, debido a la viscosidad de la mezcla, así como también por efecto del diámetro de perforación. Los barrenos son llenados íntegramente, evitando el desperdicio debido a excesos.

Pruebas realizadas

Se realizaron 10 pruebas de fragmentación en roca, siendo las especies cuarcita blanca, cuarcita roja y dolomita. El objetivo principal es hallar el espaciamiento óptimo entre los barrenos practicados en la roca.

Las pruebas practicadas son las siguientes:

Tabla 3.1.- Ensayos de fragmentación de roca.

PRUEBA	ROCA	DIAMETRO (mm)	ESPACIAMIENTO (mm)	RELACION E/ϕ
1	Cuarcita blanca	13	65	5
2	Cuarcita blanca	13	130	10
3	Cuarcita blanca	25	125	5
4	Cuarcita blanca	25	125	5
5	Cuarcita blanca	25	250	10
6	Cuarcita roja	16	80	5
7	Cuarcita roja	16	160	10
8	Cuarcita roja	16	128	8
9	Cuarcita blanca	25	125	5
10	Dolomita	13	52	4

Las pruebas 9 y 10 fueron hechas con barrenos intermedios descargados, con el objetivo de encontrar si es o no viable practicar la fragmentación con esa técnica, considerando la distancia de propagación de la fractura.

Según datos del fabricante, dependiendo de las condiciones ambientales, el tiempo en que se producirá la fractura, va desde 4 hasta 24 horas. Para verificar la fractura la revisión de las muestras fue después de 24 horas, considerando que el tipo de argamasa usado fue de código rojo (para temperaturas menores a 5°C), lo que tentativamente produciría un retraso en la fragmentación.

El objetivo principal de los ensayos fue determinar el espaciamiento óptimo entre barrenos cargados con argamasa expansiva, considerando como óptimo aquel espaciamiento que:

- Obtenga un plano de fractura bien definido.
- Obtenga una superficie con un mínimo de imperfecciones.
- Minimice el consumo de argamasa.
- Elimine microfisuras.
- Pérdidas mínimas de material.

3.2. Pruebas en Argamasa.

La argamasa expansiva FRACT-AG[®] fue adquirida por DEMIN con intenciones de aplicarla en fragmentación de grandes bloques para su posterior manejo en el taller de escultura en roca y realizar experiencias a escala de bancada para aplicación en la extracción de roca sin uso de explosivos.

Esta argamasa expansiva presenta características visuales de un cemento Portland ordinario, color gris, polvo ultrafino y ávido de agua.

Las pruebas realizadas para caracterizar la argamasa expansiva son:

- Densidad de la argamasa.
- Granulometría mediante análisis de sedimentación.
- Análisis de microscopía electrónica de barrido.
- Coeficiente de dilatación de la argamasa.
- Difracción de rayos-X.
- Desarrollo de argamasa protoindustrial.

3.2.1. Densidad de argamasa.

La densidad de la argamasa expandida, fue calculada mediante el método con picnómetro de 50 ml. Un picnómetro es un recipiente calibrado, con el cual se puede pesar un volumen de líquido con mucha precisión. El método en general, es para pares sólido/líquido que no reaccionan entre sí.

3.2.2. Granulometría mediante análisis de sedimentación.



CIB-ESPOL

El método de sedimentación resulta ser uno de los más usados porque el equipo es sencillo además de que analiza un amplio rango de tamaños de partículas finas, que pueden ser medidos con alta precisión. La curva granulométrica hallada corresponde al pasante acumulado.

Equipos

Para este análisis se usó la pipeta de Andreasen, diseñada en 1928. Es un instrumento en el cual la pipeta permanece dentro del tubo de sedimentación durante la duración del análisis. El aparato descrito en 1930 por Andreasen y Lunberg es de uso general en la actualidad.

Consiste en un *vessel* de sedimentación graduado (0 – 20 cm) con capacidad de 500 – 600 ml cuando es lleno hasta la marca de 20 cm. La pipeta está fundida a una embocadura de vidrio la cual se ajusta al cuello del *vessel* de sedimentación, de tal manera que el sistema está posicionado en el centro del sistema de sedimentación y este punto es la marca cero. Sobre la embocadura hay una válvula de dos vías, de tal manera que de la suspensión se puede extraer una alícuota hacia un pequeño reservorio de 10 ml, luego esta puede ser retirada y colocada dentro de un *beaker* pequeño o en un tubo de centrifuga.

Ensayo

La distribución de tamaños de partículas puede ser determinada examinando una suspensión sedimentándose, el polvo puede ser introducido como una capa sobre la superficie de una columna de líquido limpio o puede ser dispersado en un líquido [11]. La técnica empleada para este análisis es la segunda, llamada técnica de suspensión homogénea (homogeneous suspension technique). Este método determina la distribución de tamaños a partir de la obtención de cambios de la concentración o de densidad de la suspensión.

Si $m_s = \rho_s V_s$ y $m_f = \rho_f V_f$, son las masas, densidades y volúmenes de sólido y fluido.

Una alícuota tomada a $t=0$ y a profundidad h , tendrá concentración:

$$C(h,0) = \frac{m_s}{V_s + V_f} \quad (3.5)$$

Si a una profundidad h se considera una capa horizontal, las partículas que se están sedimentando y salen de esta son reemplazadas por las partículas que entran a la misma desde arriba. Cuando las partículas más grandes, dejan el elemento, no hay partículas similares reemplazándolas. De aquí que la concentración dentro de este elemento es igual a la concentración de partículas menores a D en la fase suspendida. D es el tamaño de partícula que cae con velocidad h/t .

A un tiempo t y profundidad h , la suspensión tendrá concentración:

$$C(h,t) = \frac{m'_s}{V'_s + V_f} = \int_{D_{\min}}^D F(D) dD \quad (3.6)$$

También

$$C(h,0) = \frac{m_s}{V_s + V_f} = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} F(D) dD \quad (3.7)$$

Asumiendo que la variación en el volumen del sólido es insignificante en comparación al volumen del fluido podemos decir que:

$$\frac{C(h,t)}{C(h,0)} = \frac{m'_s}{m_s} = \frac{\int_{D_{\min}}^D F(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} F(D) dD} \quad (3.8)$$

Entonces, si se realiza un gráfico D vs. $100 \frac{C(h,t)}{C(h,0)}$, tendríamos el porcentaje del pasante acumulado por peso.

Tabla 3.2.- Muestras tomadas en la prueba de granulometría.

Muestra	Hora	t [s]
1	11:00:30	30
2	11:02:00	120
3	11:08:00	480
4	11:15:00	900
5	11:40:00	2400
6	12:30:00	5400
7	13:30:00	9000

Las alícuotas tomadas son de 10 ml, la suspensión fue preparada con 550 ml de agua y 29 g de argamasa expandida, es decir, una concentración másica de 5%. El dispersante usado fue metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 0.6g (0.1%).

El número de muestras y los tiempos en que fueron tomadas se muestran en la tabla 3.2.

Con los datos obtenidos de estas experiencias se obtiene una tabla de diámetros y concentraciones. El porcentaje del pasante de la masa de polvo en la alícuota tomada esta dado por:

$$P = 100 \frac{m_t V_s}{V m_s} = K m_t \quad (3.9)$$

Siendo:

m_t : masa de polvo en la alícuota de volumen V ,

m_s/V_s : concentración de sólido en la suspensión homogénea inicial.

Luego se hace un ajuste, encontrando una distribución estadística, a la cual obedezca la información recolectada. La distribución estadística que más se emplea para ajustar los datos es la de Rosin-Rammler (1933), preferida por los investigadores que manipulan material ultrafino [11, 13]. La distribución para el porcentaje del pasante acumulado está dada por:

$$y = 1 - 100 \exp(-bx^n) \quad (3.10)$$

$$\text{También } y = 1 - 100 \exp\left(-\frac{x}{k}\right)^m \quad (3.11)$$

Siendo:

x : el diámetro de la partícula,

b : medida del rango de tamaño de partícula presente,

n : constante característica de la sustancia siendo analizada,

k : parámetro de escala de la curva de distribución,

m : parámetro de distribución que depende del sistema particulado.

3.2.3. Análisis con microscopio electrónico.

Para una visión más a fondo se realizó una prueba de microscopio electrónico, este ayudará a analizar el mecanismo de expansión de la argamasa, observando el patrón de las partículas antes y después de la expansión, además de tener una visión preliminar de la variación de tamaño de los granos.

Equipo

Para este análisis, el equipo empleado fue un microscopio electrónico JEOL JSM-5510, de 0.5 a 30 kV, con resolución de 3.5 a 48 nm. Las muestras fueron metalizadas con grafito, para tornar conductoras las partículas y así evitar distorsión de imagen por la electricidad estática.

Ensayo

Se realizaron 10 tomas, a diversas escalas, tratando de capturar las imágenes que ayuden a explicar el fenómeno de la expansión de la argamasa. La muestra de la argamasa sin expandir, era fresca, evitando absorción de agua del ambiente.

3.2.4. Coeficiente de dilatación de la argamasa.

Para esta prueba, los elementos utilizados son muy simples, se emplearon vasos de plástico de 100 ml, pequeños cilindros de plástico y un embudo. En total siete muestras fueron preparadas, 3 en cilindros plásticos, 2 en vasos pequeños de 100 ml, una en vaso plástico de 300 ml y una en un embudo plástico.

Para una correcta toma de datos, la metodología empleada es la siguiente:

- indicar un volumen conocido en el reservorio, usando agua,
- adicionar la AE hasta el volumen conocido,
- luego de la expansión, esto puede ser luego de 10 horas, marcar el nivel alcanzado por la argamasa expandida,
- retirar la argamasa,
- cuantificar el volumen final con agua.

Con ese procedimiento, de manera sencilla fue calculado el coeficiente de dilatación de la argamasa. De los resultados obtenidos se obtendrá un valor promedio considerando la influencia de la geometría del reservorio.

3.2.5. Difracción de rayos-X.

Este análisis se realizó para dos muestras:

- AE fresca (AEF)
- AE expandida (AEE)



El ensayo se realizó buscando principalmente componentes calcáreos.

La técnica de difracción de rayos-X es de singular auxilio para análisis, ayuda al investigador a identificar los minerales presentes dentro de una muestra de algún compuesto. El método empleado fue el denominado método del polvo, consistente en tomar una muestra de argamasa y adherirla a una placa de vidrio, la cual va a rotar. Sobre esta va a incidir un haz de rayos-X monocromático, que se va a difractar de acuerdo a como incida con los diferentes planos cristalográficos. El registro de la intensidad y el ángulo 2θ graficado, muestra el difractograma del compuesto, este es comparado con varios difractogramas patrones, pertenecientes a varios minerales. El difractograma es analizado y se obtienen los difractogramas que superpuestos lo

componen. Así se identifican los minerales a los cuales pertenecen aquellos difractogramas componentes.

Equipo

Difractómetro Rayos-X marca RIGAKU, modelo GEIGERFLEX D/MAX con goniómetro horizontal, tubo de Cu, velocidad de barrido 1.2 y 0.6° por segundo y con barrido de 2 a 35°.

3.2.6. Argamasa protoindustrial.

Conociendo los resultados del análisis de difracción de rayos-X, surgió la idea de preparar una argamasa experimental en laboratorio, con el objetivo de confirmar los resultados de la difracción y desarrollo de la misma para investigaciones.

De los resultados de la difracción de rayos-X se conoce que la argamasa demoledora expansiva FRACT-AG[®], contiene en su estado pre-expansión, biotita y óxido de calcio. Basados en este análisis se resolvió emplear la roca carbonatada disponible en la región, la dolomita, para un ensayo inicial.

Material

- Biotita, aproximadamente 600 g
- Dolomita, aproximadamente 15 kg

Equipo

Para la producción del polvo, se usaron los siguientes equipos de conminución:

- Trituradora de mandíbulas.
- Molino de rodillos.
- Pulverizador.

Procedimiento

Para reducir la muestra de biotita a polvo, por debajo de malla 300 ASTM, se realizó el siguiente proceso:

- Trituración primaria, empleando trituradora de mandíbulas.
- Trituración secundaria con molino de rodillos.
- Pulverización.

La cantidad de agua a añadir, inicialmente fue la misma sugerida por el fabricante de FRACT-AG[®], 30% de agua en masa.

CAPITULO IV.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION.

Se presentan a continuación los resultados de las experiencias realizadas, luego se integrará la información obtenida para un análisis más extenso.

4.1. Resultados de Pruebas en Roca.

4.1.1. Densidad de la roca.

Los resultados de esta experiencia se listan en la siguiente tabla:

Tabla 4.1.- Resultados de prueba de densidad de la roca.

Muestra	Masa [kg]	Volumen final [m ³]	Volumen inicial [m ³]	Densidad [kg/m ³]
A1	0.33458	0.001	0.000843	2131.1
A2	0.32100	0.001	0.000856	2229.2
B1	0.34372	0.001	0.000846	2231.9
B2	0.38040	0.001	0.000844	2438.5
Media				2257.7
Desviación				129.3

La densidad real promedio, para el cuarcito usado en este ensayo, como se aprecia en la tabla 4.1 es de 2257 kg/m³, poco menos del valor estándar para una cuarcita (2700 kg/m³).

Nótese que las muestras A y B, a pesar de no ser originarias del mismo sitio, presentan baja variabilidad en su densidad.

4.1.2. Resistencia a la compresión uniaxial.

Los resultados estandarizados, es decir, una aproximación a los resultados esperados en el ensayo con las muestras de dimensiones de 70 mm de arista, se obtuvieron usando la relación indicada en el apartado 3.1.2. Los resultados de la estandarización de la resistencia de las muestras está dada en la tabla 4.2:

Tabla 4.2.- Resultados de la resistencia a la compresión uniaxial.

Muestra	Rc [MPa]	Dimensiones [mm]	W ₀ promedio [mm]	H [mm]	Rc estándar [MPa]
A1	97.48	51x52.5x50	51.625	50.00	89.61
A2	108.00	50x50x50	50.00	50.00	99.29
B1	44.00	50x50x50	50.00	50.00	40.45
B2	44.09	56.6x53.7x50	55.15	50.00	40.53

La resistencia promedio para estos valores estandarizados, para las muestras catalogadas como A y B se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3.- Resultados estandarizados de la resistencia a la compresión uniaxial.

MUESTRA	RESISTENCIA [MPa]
A	94.45
B	40.49

4.1.3. Resultados de fragmentación con argamasa expansiva FRACT-AG®.

Dentro de este análisis, como se indicó antes, se tomaron los tiempos de perforación, como se indica en las siguientes tablas:



Tabla 4.4.- Tiempos de perforación en cuarcita blanca.

PERFORACION			
Herramienta	Martillo perforador universal BOSCH GBH 2-24 DSE		
Roca	Quartzito branco (cuarcita blanca)		
Barreno	Diámetro [mm]	H [mm]	t [s]
1	13	115	36
2	13	115	38
3	13	115	45
4	13	115	45
5	13	115	46

Tabla 4.5.- Tiempos de perforación en cuarcita roja.

Roca	Quartzito vermelho (cuarcita roja)		
Barreno	Diámetro [mm]	H [mm]	t [s]
1	25	75	110
2	25	65	124
3	25	58	105
4	25	61	120
5	25	55	105
6	13	98	55
7	13	85	35

Las velocidades de perforación para los diámetros de 13 y 25 mm están dadas en las tablas 4.6 y 4.7:

Tabla 4.6.- Velocidad de perforación para broca de 13 mm.

	H [mm]	T [s]	V [mm/s]
	115	36	3.194
	115	38	3.026
	115	45	2.555
	115	45	2.555
	115	46	2.500
	98	55	1.782
	85	35	2.429
Media			2.577
Desviación			0.455

Tabla 4.7.- Velocidad de perforación para broca de 25 mm.

	H [mm]	t [s]	V [mm/s]
	75	110	0.682
	65	124	0.524
	58	105	0.552
	61	120	0.508
	55	105	0.524
Media			0.558
Desviación			0.071

Se observa que la broca de 13 mm resulta más conveniente que usar broca de 25 mm, hay una diferencia de 2 mm/s en la perforación. Perforar con diámetros de 13 mm es 4.6 veces más rápido que con brocas de 25 mm. El tipo de roca, (sea cuarcita blanca o roja) no tuvo mayor influencia en el desempeño del equipo de perforación.

En las pruebas de fragmentación de roca con AE, las variables que influyen en la calidad de la fragmentación son: el diámetro de perforación, el espaciamiento entre barrenos, la profundidad de los barrenos, el distanciamiento (distancia desde la cara libre hasta la línea de barrenos), el número de barrenos.

Para determinar el espaciamiento de prueba, se efectuó una extrapolación con los datos suministrados por el fabricante (tabla 2.1). Los resultados de esta extrapolación se muestran en la figura 4.1:

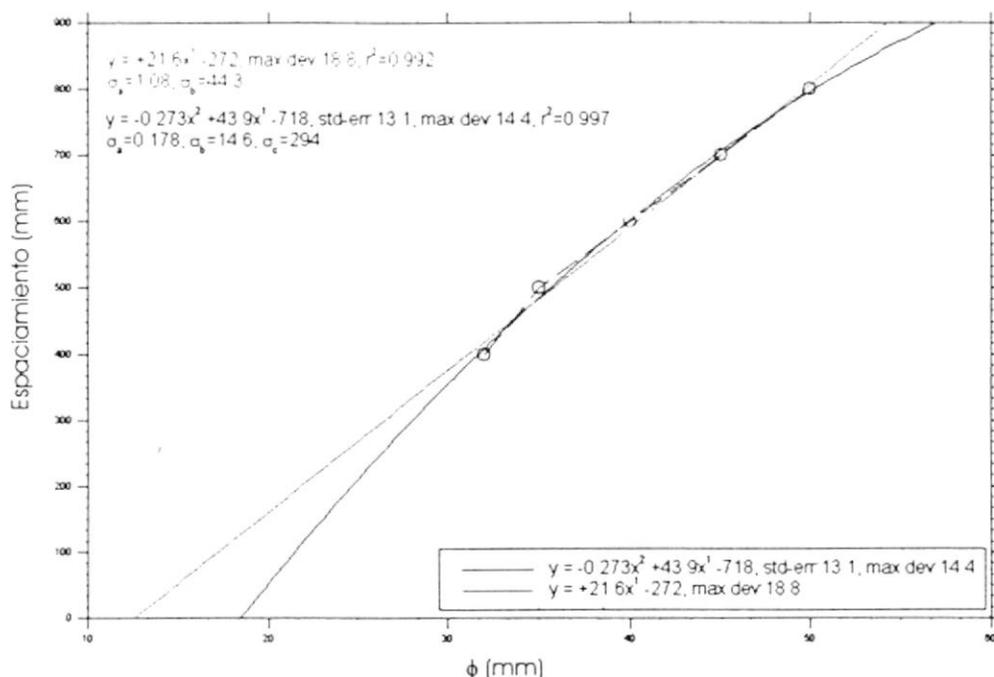


Figura 4.1.- Curvas de extrapolación lineal y cuadrática para el espaciamiento entre barrenos.

Las expresiones obtenidas de la extrapolación lineal y cuadrática para el espaciamiento son las siguientes:

$$E = 21.6\phi - 272 \quad (4.1)$$

$$E = -0.273\phi^2 + 43.9\phi - 718 \quad (4.2)$$

Los valores obtenidos por estas relaciones se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8.- Resultados de extrapolación lineal y cuadrática.

	D (mm)	E (mm)	E/ ϕ
	32.00	400.00	12.50
	35.00	500.00	14.29
	40.00	600.00	15.00
	45.00	700.00	15.56
	50.00	800.00	16.00
EXTRAPOLACION LINEAL	13.00	8.80	0.68
	16.00	73.60	4.60
	25.00	268.00	10.72
EXTRAPOLACION CUADRATICA	13.00	-193.44	-14.88
	16.00	-85.49	-5.34
	25.00	208.88	8.36

De estos resultados se obtuvieron las relaciones espaciamento/diámetro (E/ϕ) mostrados en la misma tabla. Como se observa, los valores más aceptables son dados por la extrapolación lineal, indicando un rango para el espaciamento comprendido entre 5 y 10 veces el diámetro de perforación. Este es el rango escogido para comenzar las pruebas.

Los resultados de las pruebas de fragmentación en roca se describen a continuación:

PRUEBA 1

Muestra: cuarcita blanca
 Diámetro de perforación: 13 mm
 Espaciamento entre barrenos: 5 veces el diámetro, 65 mm
 Profundidad de los barrenos: 115 mm
 Distanciamiento: 150 mm
 Número de barrenos: 6
 Mezcla de argamasa: 130.5 g de argamasa, 40 ml de agua

Para la preparación de la muestra a emplear, se fragmentó el bloque con ayuda de una línea de barrenos muy próximos y colocando cuñas dentro de ellos se procede

al corte de una muestra de dimensiones adecuadas. En este caso la muestra es de 480 x 330 x 130 mm. La operación de relleno de barrenos manualmente resulta un poco difícil, pues se debe evitar el ingreso de aire, que puede quedar atrapado dentro de los barrenos entre la argamasa, esto no altera la composición o el efecto de expansión de la argamasa, pero puede disminuir el efecto fracturador sobre la roca, así como puede crear irregularidades en la superficie del plano de fractura, debido a un desequilibrio en los esfuerzos actuantes. Procurando cumplir con las recomendaciones del fabricante, la muestra quedó lista para la fragmentación. Luego de 17 horas los resultados fueron visibles, mostrando un plano de fractura perfecto, sin pérdidas de la roca por fisuramiento secundario, mostrando un desempeño excelente de la AE, con el inconveniente del tiempo en que se presenta la fractura.



Figura 4.2.- Resultados de prueba número 1 de fragmentación de roca.

Un modelamiento matemático de la distribución de esfuerzos actuantes se muestra en la figura 4.3:

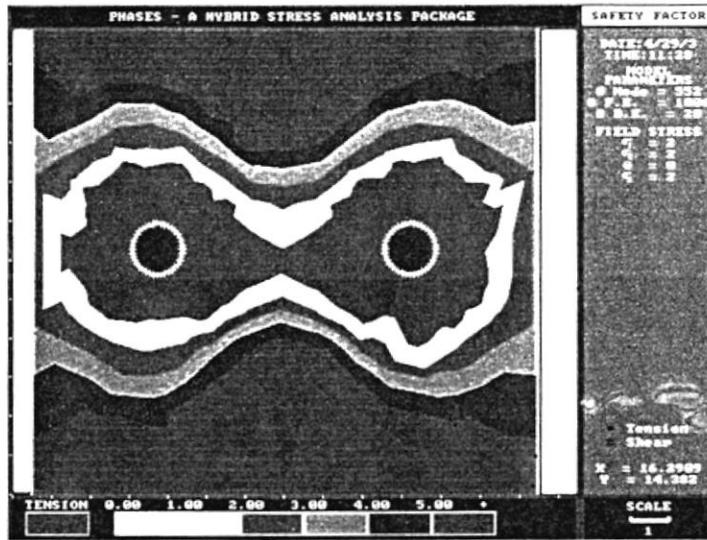


Figura 4.3.- Distribución de esfuerzos para el ensayo 1.

Esta imagen es lograda con 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 programa se ajustan bien a los resultados prácticos. En este primer ensayo se observa que los esfuerzos de tracción (color rojo) que actúan en cada barreno, interactúan entre sí, dando lugar a una zona de tracción a lo largo de la cual se formará la fractura. Para este análisis se ingresó como presión interna de los barrenos el esfuerzo desarrollado por la AE según el fabricante, aproximadamente 80 MPa.

PRUEBA 2

Muestra:	cuarcita blanca
Diámetro de perforación:	13 mm
Espaciamiento entre barrenos:	10 veces el diámetro, 130 mm
Profundidad de los barrenos:	115 mm
Distanciamiento:	150 mm
Número de barrenos:	3
Mezcla de argamasa:	65 g de argamasa, 19.5 ml de agua



La muestra a emplear se preparó del mismo modo que para la prueba anterior. La muestra de este ensayo tiene dimensiones de 390 x 300 x 140 mm. Los resultados del efecto demolidor de la AE fueron visibles después de más de 24 horas, mostrando una ruptura eficiente, con óptimas características del plano de fractura, sin pérdidas de roca durante la fragmentación, pero el tiempo de fractura es nuevamente un inconveniente.



Figura 4.4.- Resultados de prueba número 2 de fragmentación de roca.

PRUEBA 3

Muestra:	cuarcita blanca
Diámetro de perforación:	25 mm
Espaciamiento entre barrenos:	5 veces el diámetro, 125 mm
Profundidad de los barrenos:	115 mm
Distanciamiento:	150 mm
Número de barrenos:	6
Mezcla argamasa:	500 g de argamasa, 150 ml de agua

La muestra empleada para este ensayo es de 750 x 330 x 140 mm, después de la operación de relleno de barrenos con AE, luego de 20 horas la ruptura de la roca se hace efectiva, mostrando un plano de fractura óptimo, con superficies homogéneas, de igual modo con pérdidas de roca nulas.

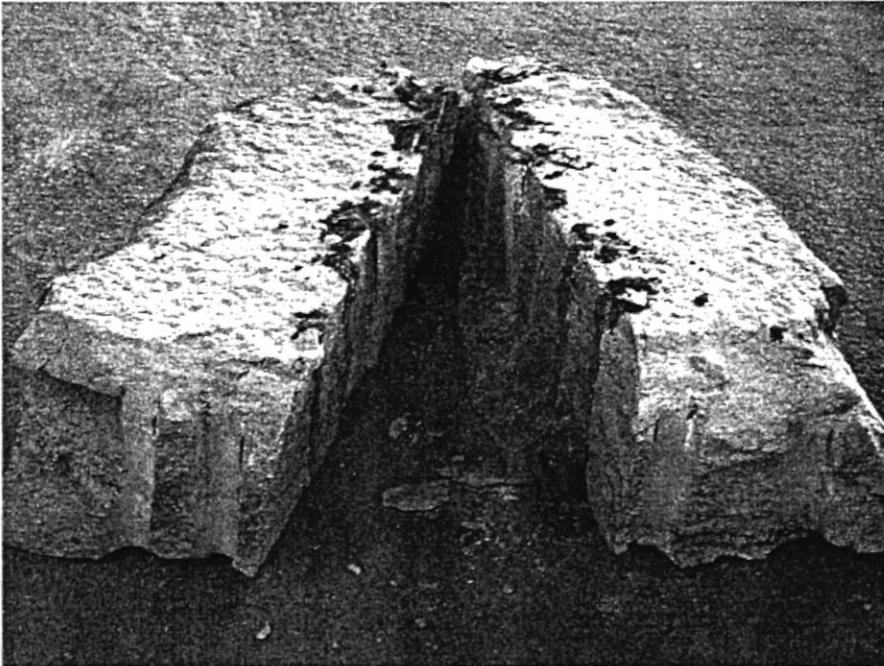


Figura 4.6.- Resultados de prueba número 3 de fragmentación de roca.

El análisis de esfuerzos para este ensayo se muestra en la figura 4.7:

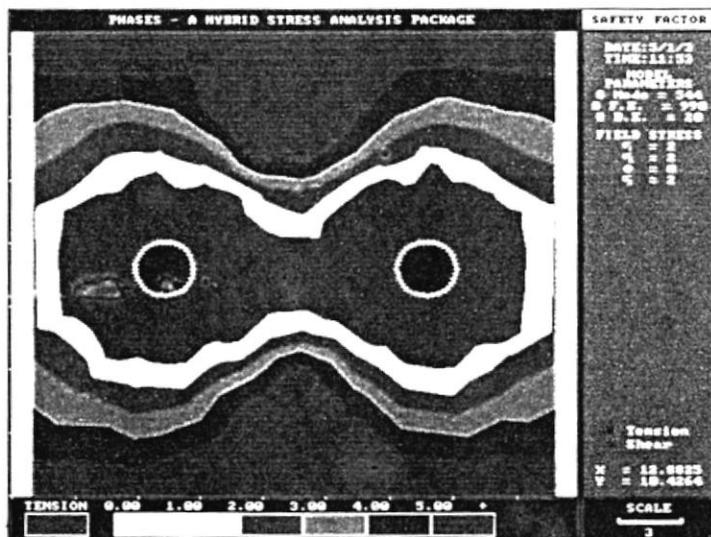


Figura 4.7.- Distribución de esfuerzos para el ensayo 3.

Este modelo se ajusta muy bien al resultado obtenido en el ensayo. La interacción de estas zonas de tracción, como se aprecia, tiene una orientación preferencial, que es por donde se propagará la fractura.



PRUEBA 4

Muestra:	cuarcita blanca
Diámetro de perforación:	25 mm
Espaciamiento entre barrenos:	5 veces el diámetro, 125 mm
Profundidad de los barrenos:	115 mm
Distanciamiento:	70 mm
Número de barrenos:	2
Mezcla de argamasa:	165 g argamasa, 50 ml agua

Esta prueba se desarrollo simultáneamente con la prueba 5, perforando en el mismo bloque de roca los barrenos para los dos ensayos, separados por una hilera de barrenos de 13 mm, sin partir la muestra. La fragmentación de la roca ocurrió en un tiempo mayor a 20 horas. Se muestra un plano de fractura muy definido, pero con superficies un poco irregulares, sin pérdida de material por fisuramiento secundario.



Figura 4.8.- Resultados de prueba número 4 de fragmentación de roca.

La figura 4.9 muestra la distribución de esfuerzos para el ensayo 4:

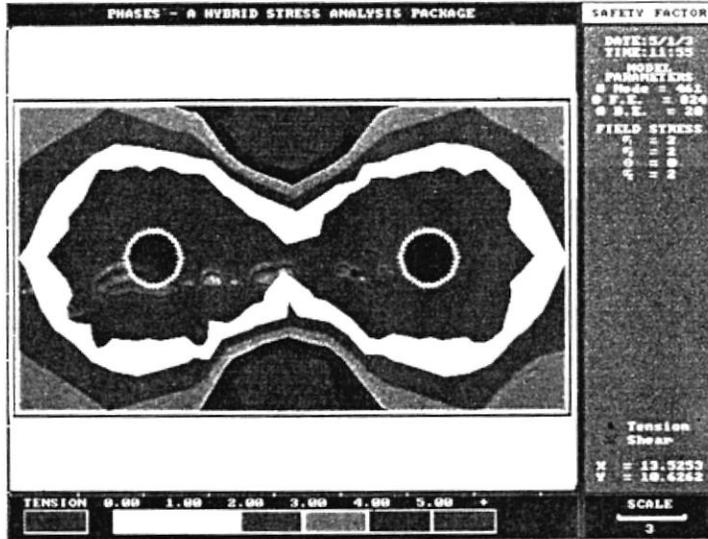


Figura 4.9.- Distribución de esfuerzos para el ensayo 4 de fragmentación de roca.

Al igual que el caso anterior, este modelo se ajusta muy bien a los resultados obtenidos en el ensayo. La zona de esfuerzos de tracción define la dirección por donde se propagará la fractura. Obsérvese que la zona de esfuerzos de compresión (color morado) pudo haber ocasionado fracturas entre los barrenos en un sentido perpendicular al esperado.

PRUEBA 5

Muestra:	cuarcita blanca
Diámetro de perforación:	25 mm
Espaciamiento entre barrenos:	10 veces el diámetro, 250 mm
Profundidad de los barrenos:	115 mm
Distanciamiento:	70 mm
Número de barrenos:	3
Mezcla de argamasa:	245 g de argamasa, 74 ml agua

En este ensayo, debido a la distribución de esfuerzos combinados con el escaso distanciamiento de la muestra y el espaciamento entre barrenos de 10 veces el diámetro de perforación, los resultados fueron no satisfactorios, la fractura se produjo en sentido perpendicular al esperado, formando tres planos de fractura, uno por cada barreno. Este ensayo se observa también en la figura 4.8.

La figura 4.10 muestra los esfuerzos para este ensayo:

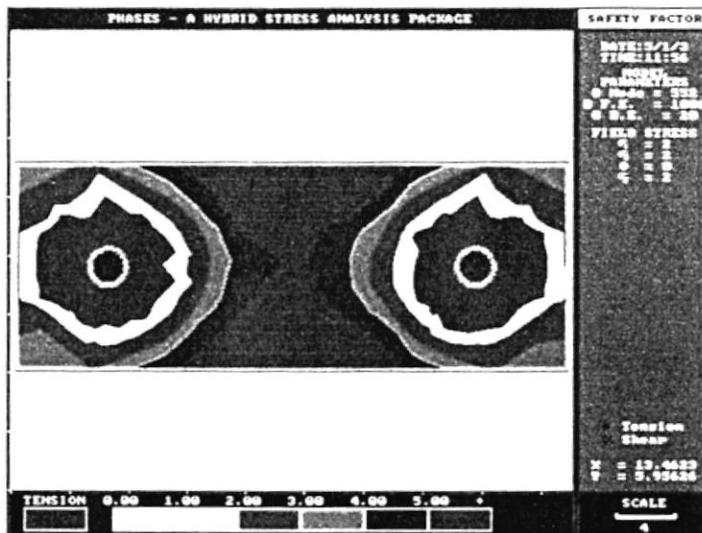


Figura 4.10.- Distribución de esfuerzos para el ensayo 5 de fragmentación en roca.

Como se observa, en este modelo las zonas de tracción no interactúan entre ellas. Se nota que por el contrario hay una pequeña orientación de estas zonas sobre otro eje. En el ensayo esto ocurrió, la fractura se produjo en sentido perpendicular al esperado.

PRUEBA 6

Muestra:	cuarcita roja
Diámetro de perforación:	16 mm
Espaciamiento entre barrenos:	5 veces el diámetro, 80 mm
Profundidad de los barrenos:	350 mm
Distanciamiento:	160 mm
Número de barrenos:	4
Mezcla de argamasa:	410 g de argamasa, 125 ml de agua

La muestra empleada en esta prueba tenía dimensiones de 320 x 320 x 355 mm, en este ensayo, la AE mostró resultados en un tiempo menor a las 24 horas, a pesar de que los barrenos estaban húmedos, hubo un desempeño óptimo, con un plano de fractura perfecto, con pocas irregularidades. Se notó la existencia de barrenos desviados de la vertical (2°), además de que la mezcla durante su vertido en los barrenos atrapó aire.



Figura 4.11.- Resultados de prueba número 6 de fragmentación de roca.

La distribución de esfuerzos se muestra en la figura 4.12:

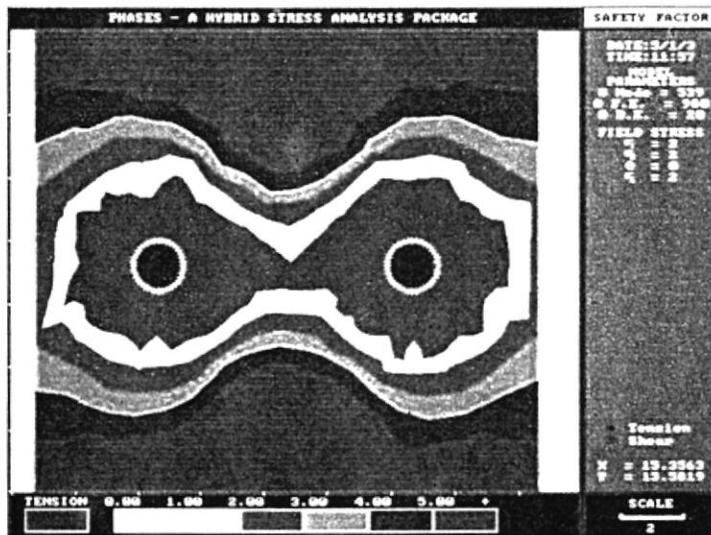


Figura 4.12.- Distribución de esfuerzos en el ensayo 6.

En esta figura se observa que los esfuerzos de tracción interactúan entre sí, dando lugar a una zona de fractura. Obsérvese que las dimensiones de la muestra permiten una distribución uniforme de esfuerzos de compresión.

PRUEBA 7

Muestra:	cuarcita roja
Diámetro de perforación:	16 mm
Espaciamiento entre barrenos:	10 veces el diámetro, 160 mm
Profundidad de los barrenos:	350 mm
Distanciamiento:	140 mm
Número de barrenos:	4
Mezcla de argamasa:	410 g de argamasa, 123 ml de agua

Las dimensiones de esta muestra son 640 x 280 x 360 mm, con un tiempo de inspección mayor a 30 horas. La roca no fracturó. Hay evidencia de fragmentación superficial en la misma, indicando que la argamasa trabajó, pero no de manera efectiva, lógicamente los esfuerzos desarrollados por la misma no fueron suficientes para prolongar la fractura.



Figura 4.13.- Resultados de prueba número 7 de fragmentación de roca.

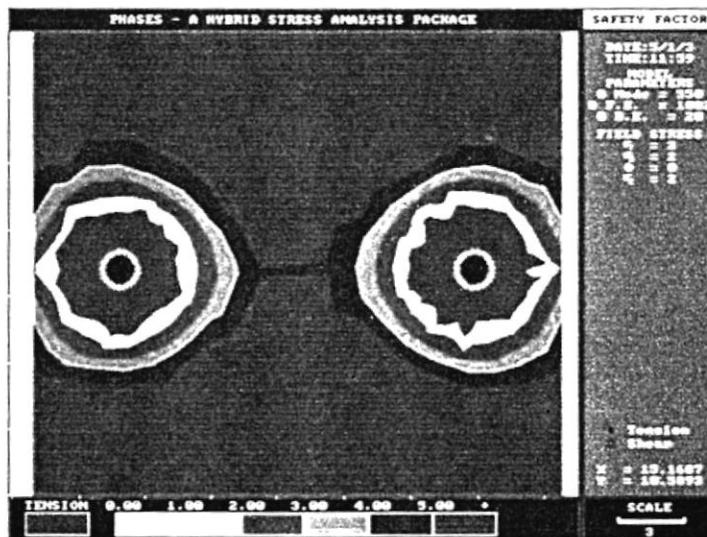


Figura 4.14.- Distribución de esfuerzos para el ensayo 7.

Se observa que las zonas de tracción se presentan como dos regiones aisladas. Entre los barrenos se tiene una zona de compresión que no tiene efecto alguno para la formación de la fractura.

PRUEBA 8

Muestra:	cuarcita roja
Diámetro de perforación:	16 mm
Espaciamiento entre barrenos:	8 veces el diámetro, 128 mm
Profundidad de los barrenos:	320 mm
Distanciamiento:	70 mm
Número de barrenos:	4
Mezcla de argamasa:	380 g de argamasa, 115 ml de agua

Los resultados de esta prueba no fueron satisfactorios, después de 30 horas de iniciado el ensayo, no hubo fragmentación de la roca, sin evidencias superficiales de ruptura, siendo muy probable que el efecto de expansión de la argamasa haya sido retardado por factores climáticos.

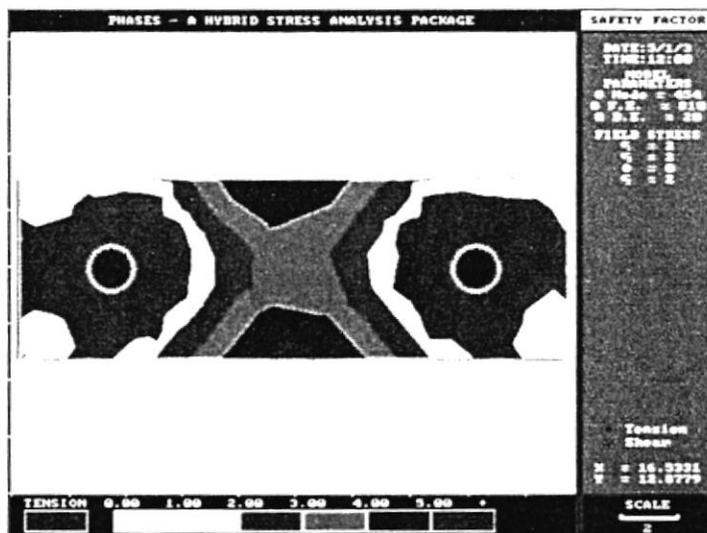


Figura 4.15.- Distribución de esfuerzos para la prueba 8.

En esta distribución de esfuerzos se observa que las zonas de tracción pueden provocar fracturas, desde la periferia de la muestra hasta el barreno, de una manera

caótica. Sin embargo, en la práctica los resultados son distintos, indicando que los esfuerzos actuantes no provocan fractura.

PRUEBA 9

Muestra:	cuarcita blanca
Diámetro de perforación:	25 mm
Espaciamiento entre barrenos:	5 veces el diámetro, 125 mm
Profundidad de los barrenos:	100 mm
Distanciamiento:	70 mm
Número de barrenos:	5
Barrenos cargados:	3
Barrenos de alivio:	2
Mezcla de argamasa:	350 g de argamasa, 105 ml de argamasa



CIB-ESPOL

En esta prueba los resultados no fueron satisfactorios, la fuerza desarrollada por la argamasa, no fue suficiente para propagar la fractura hasta los barrenos de alivio, el tiempo para la revisión de esta muestra superó las 24 horas.

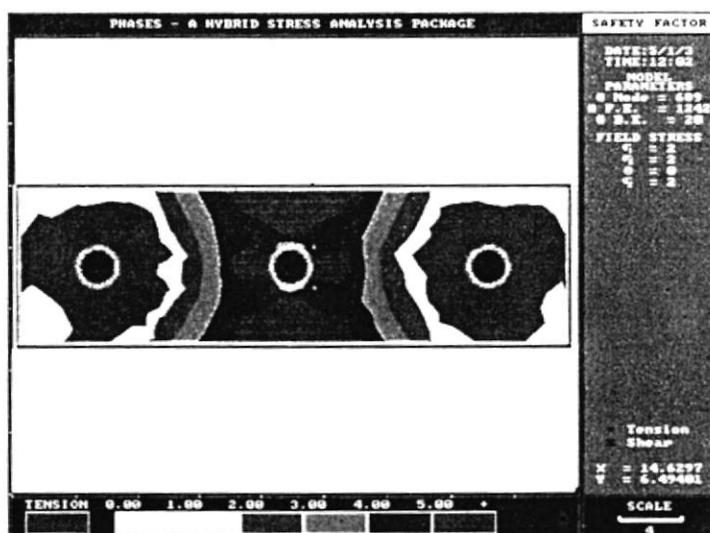


Figura 4.16.- Distribución de esfuerzos para el ensayo 9.

Se observa en esta imagen que el barreno descargado, no aprovecha el aumento de los esfuerzos de compresión a su alrededor para fracturar la roca. El espaciamiento tomado para este ensayo debe ser menor para poder conseguir una fractura efectiva.

PRUEBA 10

Muestra:	dolomita
Diámetro de perforación:	13 mm
Espaciamiento entre barrenos:	4 veces el diámetro, 52 mm
Profundidad de los barrenos:	240 mm
Distanciamiento:	100 mm
Número de barrenos:	6
Barrenos cargados:	3
Barrenos descargados:	3
Mezcla de argamasa:	280 g de argamasa, 85 ml de agua

Resultados no satisfactorios, la resistencia baja y la tendencia de la dolomita a fracturarse en planos sin orientación definida, causó que la fuerza ejercida por la argamasa fragmente la roca en diferentes planos, sin orden alguno.

De manera general, los resultados se pueden expresar como se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9.- Resultados de las pruebas de fragmentacion de roca con argamasa expansiva FRACT - AG[®].

Muestra	Diametro broca [mm]	Relación E/ ϕ	Barrenos descargados	Resultado
Cuarcito blanco	13	5	-	Fractura
Cuarcitoblanco	13	10	-	Fractura
Cuarcitoblanco	25	5	-	Fractura
Cuarcito blanco	25	5	-	Fractura
Cuarcito blanco	25	10	-	No fractura
Cuarcito Rojo	16	5	-	Fractura
Cuarcito rojo	16	10	-	No fractura
Cuarcito rojo	16	8	-	No fractura
Cuarcito blanco	25	5	2	No fractura
Dolomita	13	4	3	No fractura

4.2. Resultados de Pruebas en Argamasa Expansiva FRACT – AG[®].

4.2.1. Densidad de la argamasa.

Los resultados de esta experiencia indican que para la argamasa expandida, la densidad real, es de 2090.59 kg/m³. Los datos obtenidos para el cálculo de la densidad mediante el método descrito en la sección 3.2.1, son mostrados en el apéndice 2. La densidad del polvo de la argamasa sin expandir, resulta impracticable por la absorción de agua.

4.2.2. Resultado de análisis granulométrico mediante técnicas de sedimentación.

La preparación de la suspensión para este análisis fue hecha con 29 g de argamasa expandida en 550 ml de agua, o sea una concentración másica de 5% añadiendo 0.6g o 0.1% (1g/l) de dispersante metasilicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

La temperatura ambiente fue monitoreada para verificar cambios en la viscosidad del agua, factor influyente en la velocidad de sedimentación de las partículas.

Las tablas 6 y 7 del apéndice 2 muestran los datos colectados durante el desarrollo de la experiencia, en ella se exponen los tiempos de muestreo, pesos de las muestras, velocidad de sedimentación, diámetro de acuerdo a Ley de Stokes, excepto el tamaño máximo (200 μm), que fue obtenido con tamiz; concentraciones de las soluciones, así como también la relación de concentraciones, en base a la cual se obtiene un gráfico que indica la distribución granulométrica.

La figura 4.17 muestra la curva de distribución granulométrica realizada con Microsoft EXCEL XP, tomando los datos obtenidos de este análisis. Como se aprecia, en el análisis de sedimentación se logra encontrar partículas por debajo de 120 μm , mientras que con análisis con tamices sólo se pudo hallar el tamaño máximo de partícula, 200 μm .



CIB-ESPOL

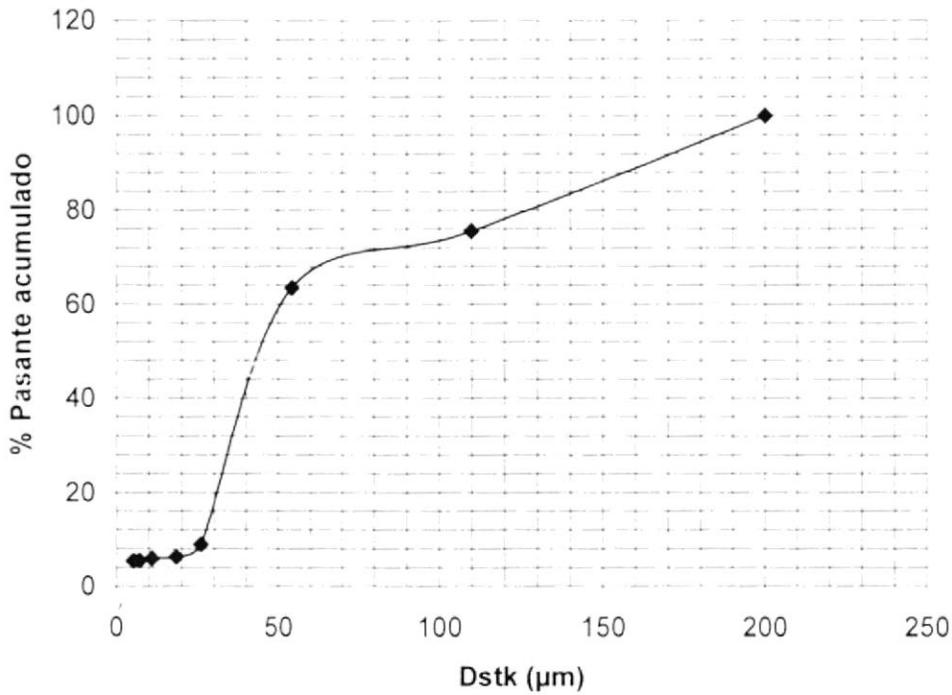


Figura 4.17.- Curva granulométrica en base a la sedimentación de partículas.

Para obtener una distribución estadística que represente de mejor manera la distribución granulométrica, se usó el software EasyPlot 4.0.4 de Spiral Software. Con este software, los datos obtenidos son ajustados de acuerdo a la distribución estadística de Rosin-Rammler, para partículas finas, previamente obtenido el máximo tamaño de grano. El resultado se muestra en la figura 4.18:

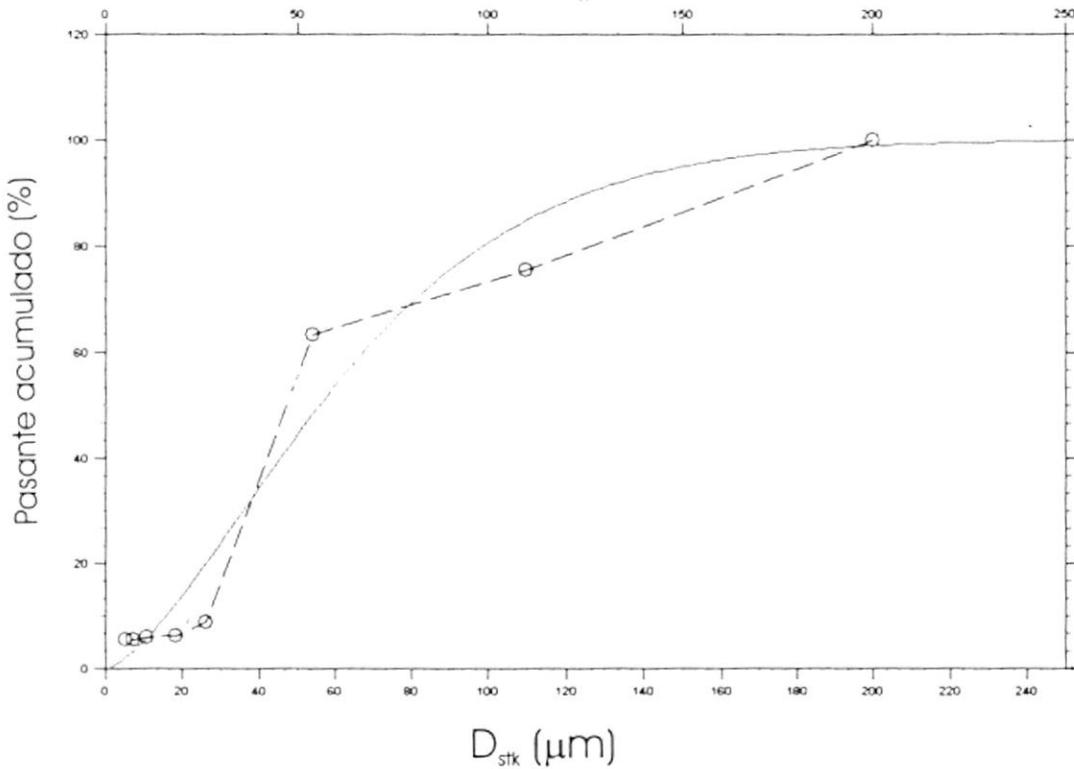


Figura 4.18.- Ajuste para distribución de Rosin Rammler.

Este ajuste de curva tiene un coeficiente de correlación de 95.5% y está dado por la relación:

$$y = 100 \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{71.6} \right)^{1.49} \right) \right) \quad (4.3)$$

En donde:

y: es el porcentaje de pasante acumulado,

x: diámetro de partícula en μm.

De este análisis se ve que el 80 % de las partículas de la AE FRACT-AG® está por debajo de 98 μm.

4.2.3. Análisis con microscopio electrónico.

Se analizaron muestras de argamasa no expandida y argamasa expandida. Se realizó un barrido de las mismas para examinar el fenómeno de expansión de los granos de la AE FRACT-AG®.

Las figuras 4.19 y 4.20 muestran el efecto expansivo de la argamasa:

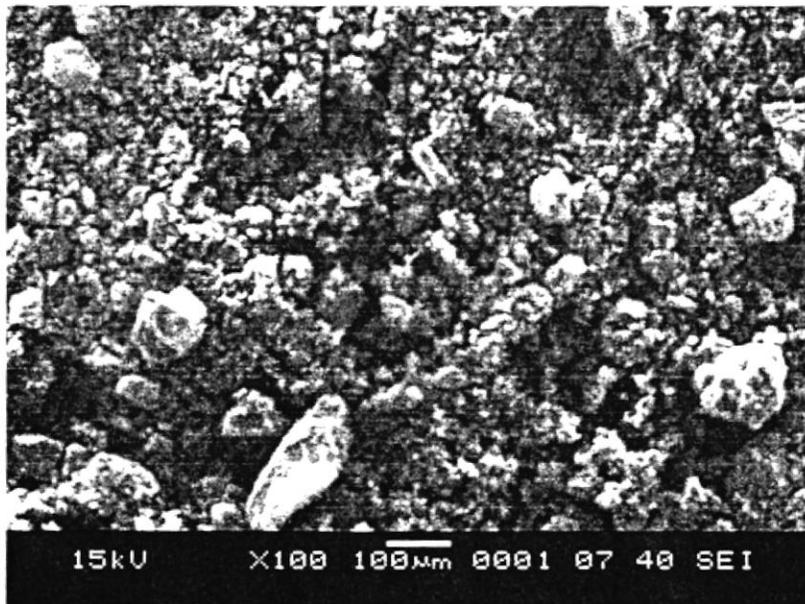


Figura 4.19.- Argamasa expansiva no expandida.



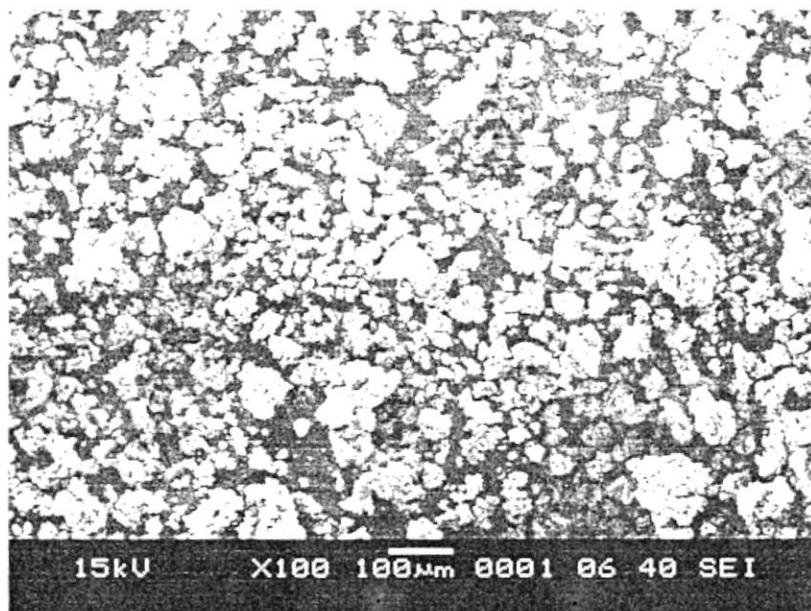


Figura 4.20.- Argamasa expansiva expandida.

En estas imágenes se puede observar, con un aumento de 100 veces, una visión global del fenómeno de expansión de la AE, obsérvese que en la argamasa expandida, el tamaño de granos resulta ser, en modo general mayor a $50\ \mu\text{m}$, mientras que en la no expandida, el diámetro promedio, esta por debajo de $20\ \mu\text{m}$, con casos excepcionales de tamaño de grano superior a $80\ \mu\text{m}$. Los granos de argamasa sin expandir tiene una forma más regular. Nótese la dilatación de los granos, con formas que indudablemente exponen un fenómeno de hidratación. La foto 4.21 muestra en detalle la forma de un grano expandido, visto con aumento de 430 veces.

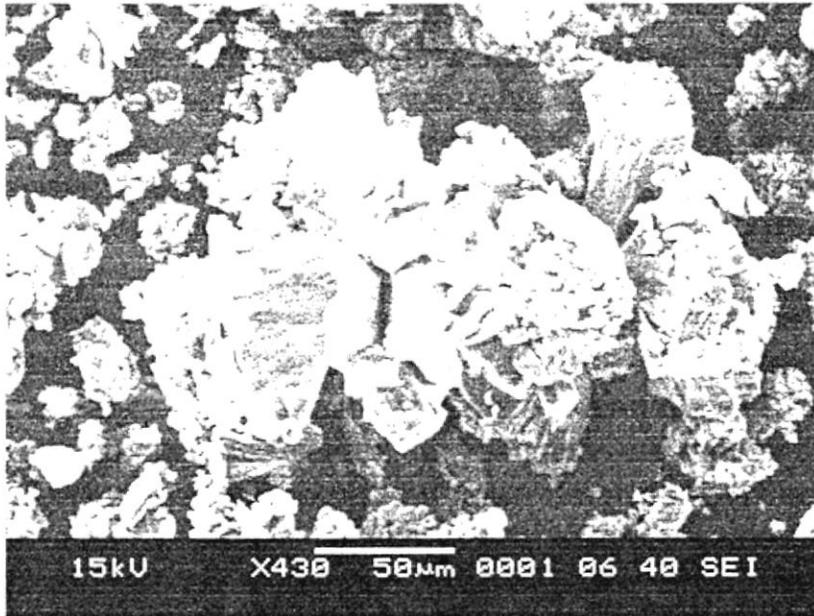


Figura 4.21.- Detalle de grano de argamasa expandido.

Como se puede ver el grano es dilatado, presenta una especie de microfoliación, para esto es preciso el desarrollo de esfuerzos internos que actúen de manera radial y dirigidos hacia el exterior del grano, dando al grano ese aspecto parecido a una flor. En la foto, este grano dilatado supera las 100 μm . En general los granos de la argamasa expandida presentan esta forma de flor.

4.2.4. Coeficiente de dilatación de la argamasa.

Para medir este coeficiente, como se indicó en la sección 3.2.4, se emplearon recipientes plásticos, como se muestra en la figura 4.22:





Figura 4.22.- Ensayo de medición de coeficiente de dilatación.

Los resultados de este ensayo son tabulados a continuación:

Tabla 4.10.- Resultados de coeficiente de dilatación de AE.

MUESTRA	V_0 [ml]	V_f [ml]	ΔV [ml]	V_f/V_i
Recipiente 1	11.02699	26	14.97301	2.357851
Recipiente 2	10.39082	24.9	14.50918	2.396347
Recipiente 3	7.63407	18	10.36593	2.357851
Cono	15	52.5	37.5	3.5
Recipiente 4	50	160	110	3.2
Vaso Pequeño 1	10	30	20	3
Vaso Pequeño 2	10	27.7	17.7	2.77
Media				2.797436
Desviación				0.455482

La dilatación media de la argamasa es aproximadamente 2.8 veces su volumen inicial. Estos resultados, son obtenidos considerando la condición de no confinamiento de la AE, sólo en los recipientes plásticos; en el caso del cono, la geometría del mismo facilitó el desplazamiento de la AE, con un menor grado de confinamiento, obteniéndose el mayor índice de expansión, 3.5 veces el volumen

inicial. En general, para todas estas muestras el índice de expansión es mayor a 2. En el caso de los tres primeros recipientes, su geometría cilíndrica ayudó a la distribución uniforme de los esfuerzos, ofreciendo condiciones iguales para todas estas muestras, de tal modo que los resultados son muy similares. El efecto de la deformación de los cuerpos contenedores de la argamasa debido a la temperatura de la reacción es mínimo, en comparación al efecto de deformación debido a los esfuerzos desarrollados. Estas condiciones de confinamiento en recipientes plásticos no es representativo de la expansión dentro de la roca, no obstante nos indica la máxima expansión de la AE FRACT-AG®.

4.2.5. Difracción de rayos-X.

En el análisis de difracción de rayos-X, los resultados se muestran en los siguientes difractogramas, para la AE no expandida y para la AE expandida:

La figura 4.23 muestra el difractograma de la AE no expandida.

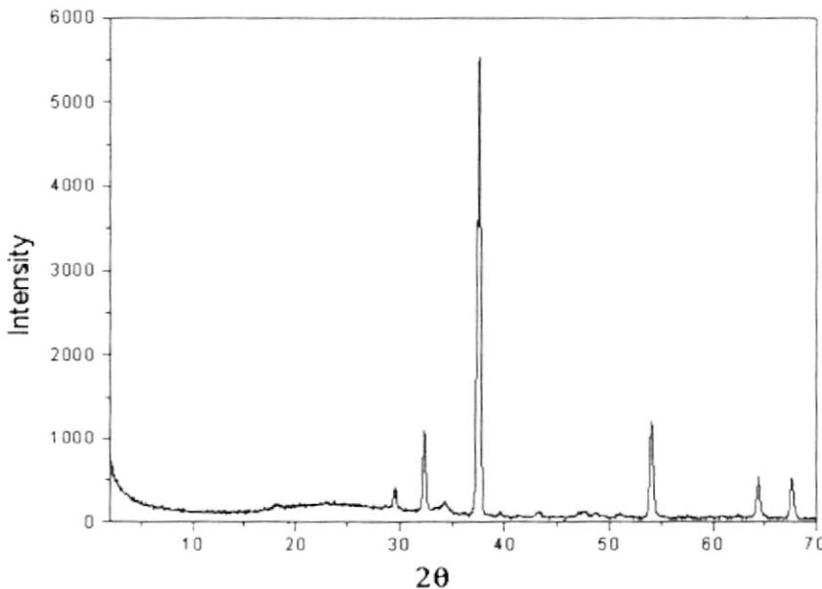


Figura 4.23.- Difractograma de la FRACT-AG® no expandida.

Dentro de la muestra de FRACT-AG[®] no expandida, el difractograma revela la presencia de:

1. Oxido de calcio, CaO.
2. Calcita, CaCO₃.
3. Biotita, KMg₃(SiAl)O₁₀(OH)₂.

La figura 4.24 muestra el difractograma de la AE expandida:

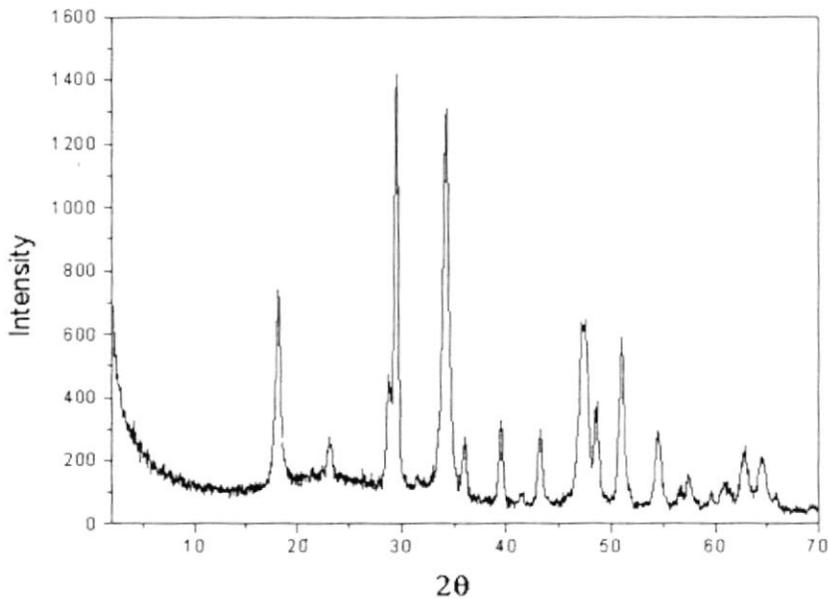


Figura 4.24.- Difractograma de la FRACT-AG[®] expandida.

Dentro de la muestra de FRACT-AG[®] expandida, el difractograma indica la presencia de:

1. Portlandita, Ca(OH)₂.
2. Calcita CaCO₃.



De estos resultados se puede observar que el óxido de calcio desaparece después de la expansión, siendo reemplazado por portlandita, de igual manera parte de la

calcita debe ser hidratada. La presencia de biotita en la etapa de pre-expansión, resulta interesante, pues no tiene parte, aparentemente, dentro de una reacción de hidratación. Estos resultados no están libres de error, pues el equipo para identificar minerales, toma picos del difractograma para compararlos con los difractogramas estándares, de este modo se puede confundir con un difractograma, perteneciente a otro mineral.

4.2.6. Argamasa protoindustrial.

Se prepararon cuatro tipos de compuestos, calcinando primero la dolomita en mufla, hasta 950 °C con un tiempo de calcinación de seis horas y media. Luego se hizo la mezcla con biotita.

Los tipos de compuestos preparados se muestran en la tabla 4.11:

Tabla 4.11.- Tipos de argamasa protoindustrial desarrollados.

TIPO	% DOLOMITA	% BIOTITA
I	100	0
II	95	5
III	90	10
IV	85	15

Se prepararon las muestras de la argamasa de laboratorio con las proporciones de componentes que se muestran en la tabla 4.12:

Tabla 4.12.- Proporciones para la mezcla y preparación de la argamasa protoindustrial.

TIPO	MASA DOLOMITA [g]	MASA BIOTITA [g]	MASA TOTAL [g]
I	200	0	200
II	190	10	200
III	180	20	200
IV	170	30	200

Al final de la calcinación, las muestras tomaron un color oscuro, en diferencia al color blanco inicial, manteniendo su forma de polvo fino, sin aglomeraciones, con densidad aparente de 1.0215 g/ml. El producto es alcalino, con pH 13.2 parecido al de la argamasa FRACT-AG®.

La figura 4.25 muestra la calcinación de las muestras:

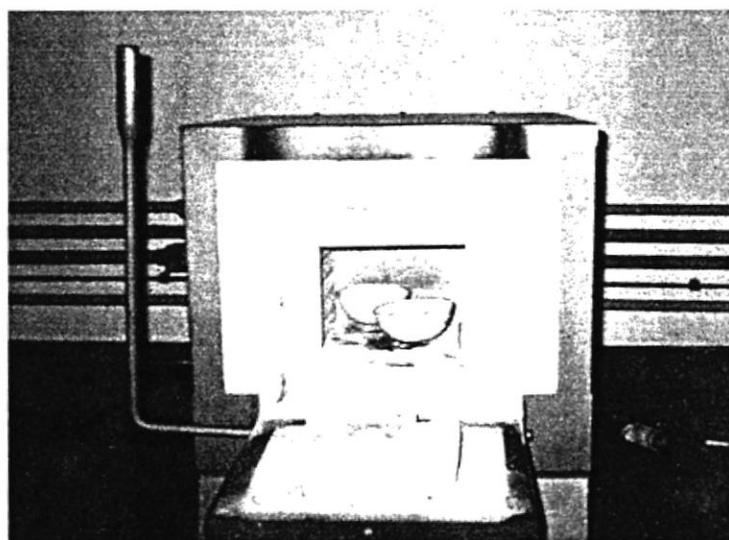


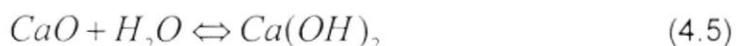
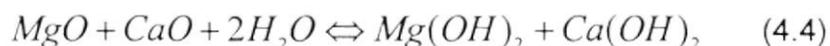
Figura 4.25.- Calcinación de dolomita para argamasa protoindustrial.

La primera experiencia se realizó con el tipo I de argamasa, tomando una masa de 50 gr, con 6.2 ml de agua, a una temperatura ambiente de 19.5° C. Esta mezcla presentó una reacción instantánea de hidratación, con desprendimiento alto de calor,

alcanzando temperatura superior a 70° C, deformando el recipiente plástico donde se realizó el experimento.

Debido a problemas en la manipulación de la argamasa, se añadió agua, hasta hacerla más fácil de manipular. La reacción duró apenas tres minutos, sin expansión aparente, quedando como resultado una mezcla sin consistencia.

Para una segunda experiencia se realizó un cálculo estequiométrico de la cantidad de agua que se debe añadir, considerando las reacciones:



Haciendo un balance de masas se observa que para la primera reacción, posiblemente propia del FRACT-AG[®], la relación agua sólido es de 33% de agua. Sin embargo el fabricante recomienda un 30%. Entonces, si:

$\frac{\text{agua}}{\text{CaO}} = 0.33$ y $\frac{\text{agua}}{\text{CaO} + X} = 0.3$ se puede observar que existe un compuesto X (biotita posiblemente) en cantidad igual a 10% la masa de CaO, que no reacciona con el agua.

Haciendo el balance para la segunda reacción, la proporción agua/(CaO, MgO) será 35%, considerando de la misma manera un 30% la proporción agua/sólidos, la masa del compuesto que no reacciona con agua (biotita en nuestro caso) debe ser 17% de la masa del CaO y MgO. Los tipos de argamasa que cumplen con esa condición, aproximadamente son las de tipo III y IV.

La segunda experiencia se realizó con 20 g de argamasa de tipo III, a temperatura ambiente de 18°C, añadiendo 6.35 ml de agua. La mezcla se realizó en un crisol de

porcelana, luego vertida en un cono de vidrio para verificar una posible expansión. Se produjo reacción inmediata con calentamiento de la argamasa. La manipulación de la argamasa exigió un poco más de agua, llegando a una proporción de 80% para obtener una facilidad en el manejo, sin presentar alteración en la reacción. Durante los siguientes dos minutos hubo reacción química, luego la mezcla empieza a enfriarse, sin aparente expansión.

De estos resultados se deduce que; el agente expansivo de la FRACT-AG[®] debe ser de un tipo que no absorba tan rápido agua, además de contener algún aditivo que retarde la reacción de hidratación e incluso mejore la manipulación de la misma.

En la argamasa protoindustrial esta reacción es instantánea, además de una rápida absorción de agua, el calentamiento también es excesivo, en comparación al calor desprendido por la reacción de la AE industrial.



4.3. Discusión General.

Haciendo una integración de los datos obtenidos se puede observar que, para la fragmentación de roca, el espaciamiento óptimo entre barrenos es de 5 veces el diámetro de perforación, considerando que los diámetros usados para la fragmentación de roca en el taller de escultura son pequeños, además de que el fabricante, no hace referencia al tipo de material para el cual ofrecen sus datos de espaciamiento, mientras que la roca que se trabaja en el taller de escultura tiene propiedades geomecánicas definidas.

Como se observó también, la presencia de un barreno intermedio sin carga no dio resultados satisfactorios, pero ciertamente, un espaciamiento menor hará efectiva esta técnica, involucrando previamente un análisis económico. En este aspecto resulta fundamental el estudio de la propagación de la fractura dentro de la roca.

El espaciamiento entre los barrenos, igual a diez veces el diámetro de perforación aunque no resultó óptimo, ofrece información valiosa, pues, a pesar de no haber conseguido una fragmentación efectiva de la roca en todas las pruebas donde se practicó, en la prueba número 2 se fracturó la roca, lo mismo en la prueba número 7, donde se produjo una fragmentación superficial de la roca. Esto indica que con un espaciamiento comprendido entre 5 y 10 veces el diámetro, por ejemplo 8 veces puede resultar muy efectiva. La prueba número 8 no dio resultados satisfactorios por las condiciones climáticas bajo las cuales fue hecho el ensayo, también se puede pensar en una influencia del diámetro de perforación, es decir la existencia de una relación diámetro y fuerza desarrollada por la argamasa, recordemos que la propagación de la fractura es también gobernada por ese parámetro, además del tiempo de compactación que tiene la argamasa en la roca antes de fracturarla.

Si se quiere fragmentar un bloque de 1 m de largo, el número de barrenos necesarios, asumiendo un espaciamiento de 5 veces el diámetro del barreno; la cantidad de argamasa necesaria y el tiempo de perforación por cada metro de barreno, se muestran en la tabla 4.13:

Tabla 4.13.- Comparación de diámetros de perforación.

ϕ [mm]	N	Q [kg]	t
13	15	2.183	1:37:00
16	12	2.646	-
25	8	4.308	3:59:00

En lo referente a la AE FRACT-AG[®], esta tiene una densidad no muy aproximada a la del cemento *Pórtland* (2.7), pero es similar en su granulometría (110 – 5 μm), lo que ayuda a inferir acerca de su fabricación. La difracción de rayos-X confirma la similitud de su composición con el cemento *Pórtland*, predominantemente carbonática. El coeficiente de expansión encontrado para la AE, aproximadamente 3 veces el volumen inicial, es la dilatación máxima que puede tener la argamasa, esto

es sin confinamiento, pero en condiciones dentro de un barreno practicado en roca este índice de expansión es un indicador predominante de la propagación de la fractura.

La dilatación de la AE, una vez que se ha iniciado la fractura, es el fenómeno que provee la fuerza necesaria para la propagación de la fractura. Otro factor que juega un papel importante en el mecanismo de la fractura, es el tiempo necesario para el inicio de la fractura, mientras más rápido se inicie la fractura, será mejor, considerando que este tiempo es menor que el tiempo empleado por la argamasa para el alcance de su máximo estado de dilatación.

Nuevamente el tipo de argamasa resulta ser de interés para el desarrollo efectivo de este proceso, pues recordemos que la AE empleada en las pruebas es del tipo empleada para trabajar a bajas temperaturas, sin duda este es uno de los factores que más influenciarán en los resultados obtenidos.

La argamasa protoindustrial, a pesar de no haber dado resultados satisfactorios, ofrece información de los parámetros a mejorar, como la manipulación de la mezcla, además de controlar el tiempo de absorción de agua en la misma. Una opción en cuanto a la manipulación de la argamasa es que esta debe estar recubierta por un agente retardador de la absorción, además de que el óxido de magnesio no ofrece buenas propiedades como elemento expansivo, como se pensaba sería para estas pruebas.

El calor de reacción generado con la argamasa protoindustrial es también mucho mayor que el producido por la argamasa industrial, posiblemente debido al retardo en la absorción de agua. La no expansión de la argamasa protoindustrial permite inferir que dentro de la mezcla de compuestos (MgO y biotita) hace falta un elemento que otorgue la expansión de la misma.

CAPITULO V.
V. ESTADO DEL ARTE EN
GUAYAQUIL.



CIB-ESPOL

V. ESTADO DEL ARTE EN GUAYAQUIL.

La fragmentación de roca con argamasa expansiva es desconocida en Ecuador. Una aplicación muy rústica que existe en cuanto al uso de elementos expansivos es la extracción de mármol llevada a cabo por mineros informales. Los pequeños mineros aplican cal (óxido de calcio, CaO) en barrenos practicados en la roca. Al añadir agua, este compuesto se dilata y fragmenta la roca con poca eficiencia. La técnica es similar, pero el elemento es diferente. Estas explotaciones son muy ineficientes por cuanto el tiempo que toma la preparación de la roca para su fractura con óxido de calcio, no compensa económicamente la cantidad de material extraído.

Ecuador posee yacimientos de roca que puede ser usada con fines ornamentales, como el granito, tonalita, basalto, mármol, travertino y muchas más. Es conocido que la técnica para la explotación de rocas de alta dureza resulta costosa. Una de las técnicas más empleadas es el corte con hilo diamantado. La técnica del desmonte con argamasa expansiva aparece como la competencia de esta técnica. Las condiciones climáticas y topográficas de Ecuador favorecerían la explotación de este tipo. El desconocimiento de las nuevas tecnologías es el principal impedimento para la implementación de las mismas, tanto en la explotación como en el procesamiento. En otro aspecto, la aplicación a pequeña escala de la fragmentación con argamasa es también aplicable, dentro del mismo marco expuesto en este trabajo, la aplicación en talleres de escultura para preparación de roca.

La ciudad de Guayaquil actualmente se encuentra dentro de una etapa de regeneración urbana, literalmente cambiando su rostro para estar al mismo nivel de importancia turística y cultural de otras grandes ciudades. Parte del atractivo de Guayaquil lo forman los monumentos. Muchos de estos emplean la roca ornamental como parte de su atractivo, sin embargo son pocos los monumentos hechos en roca, por el desconocimiento de las herramientas adecuadas y lo difícil de trabajarlas sin estas. Hay variedad de gustos en cuanto al material usado para esculpir: mármol en

todas sus variedades, ónix, granito, cuarcita, entre otras. Los escultores locales han desarrollado una preferencia por el mármol, particularmente el mármol negro traído del oriente ecuatoriano. El factor predominante para esta preferencia es el gasto en herramientas que se produce con otras rocas. Aún así el trabajo en mármol exige una alta demanda de herramientas, como discos diamantados, brocas cinceles y demás.

El Municipio de la ciudad de Guayaquil, dentro de su plan de regeneración urbana, contempla el mantenimiento de monumentos y la adición de nuevas obras trabajadas en roca. Un proyecto de este tipo es colocar una escultura de seis metros de altura en la entrada de los nuevos túneles de la ciudad. El problema fundamental en este proyecto al igual que en otros de este tipo es el manejo del bloque de roca y su preparación.

En el ambiente local, la técnica empleada para la preparación de roca es la fragmentación empleando cuñas de acero y martillos. Está claro que este método es muy ineficiente, produce desperdicio de material y el producto final posee muchas imperfecciones. Un taller de escultura local se muestra en la figura 5.1.



Figura 5.1.- Taller de escultura en roca (cortesía Sr. José Cauja).

En la figura 5.2 se muestra el método empleado para la fragmentación. Primero se delimita las dimensiones de la pieza que se desea. Esto se puede hacer con cincel o con disco diamantado. Posterior a esta etapa se perfora la roca hasta una profundidad que corresponda al largo de la cuña. La cuña es un conjunto de dos pequeñas chapas de hierro de forma alargada para que entren en el barreno practicado. Una vez colocadas las cuñas, se procede a abrirlas mediante la penetración de un pequeño cincel de hierro. Como es de esperarse, el hecho de que la aplicación de esfuerzos para la fragmentación no sea uniforme provoca la formación de fracturas en sentidos no deseados.



Figura 5.2.- Fragmentación de roca con cuñas y martillo (cortesía Sr. José Cauja).

Se puede apreciar una pieza de mármol negro preparándose con cuñas en la figura 5.3. Como se observa, el producto final no es de la calidad deseada. En lugar de obtener una superficie plana, lo que frecuentemente ocurre al emplear este método es que el conjunto de fracturas provocadas en el material se propagan en una dirección impredecible.





Figura 5.3.- Preparación de bloque de mármol negro, defecto resaltado en rojo
(Cortesía Sr. José Cauja).

La técnica de fragmentación con argamasa expansiva aparece una vez más como el camino adecuado para evitar la formación de estos defectos en el material. En este caso en particular, en lugar de perforaciones pequeñas y dispuestas de forma radial se puede emplear menos perforaciones pero más largas, dispuestas en fila. La fragmentación de este material con empleo de FRACT-AG[®] es algo comprobado, pero no aplicado con fines artísticos. Esta técnica puede disminuir considerablemente el tiempo empleado para la ejecución de obras como las que se muestran en la figura 5.4.



Figura 5.4.- Esculturas en mármol negro. Desde la izquierda, "Erase una Vez", parte de la colección del Museo Ralli, Uruguay; en el centro, esculturas de la colección personal del artista; a la derecha, "Réquiem a los Amates de Sumpa", Bienal Internacional de Venecia. (Cortesía Sr. José Cauja).

La aplicación de la fragmentación de roca con argamasa expansiva en un taller de escultura se probará considerando los resultados obtenidos en este trabajo, aplicando una metodología similar. En Simposios Internacionales de escultores nunca se ha mencionado este elemento como una herramienta útil al servicio del artista. La argamasa expansiva aparte de facilitar el trabajo en roca, evitaría el desperdicio de muchos bloques de roca que pueden servir con fines ornamentales, como es el caso de granitos que son fragmentados con empleo de explosivos para uso en relleno. Esto constituye sin duda alguna un subempleo de la roca y un desperdicio económico.

CAPITULO VI.
VI. CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo, basados en la información recolectada durante los ensayos y con el respaldo de la revisión bibliográfica, se exponen las conclusiones del presente trabajo, considerando que la aplicación de la AE será en el taller de escultura en roca.

6.1. Conclusiones.

- El uso de FRACT-AG[®] para la fragmentación en el taller de escultura en roca se expone como una alternativa técnicamente viable, debido a la calidad final del producto, listo para su uso en escultura. Económicamente es viable, por el poco consumo de argamasa, además de minimizar el tiempo de preparación de un bloque, y de ofrecer un mínimo de 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, de acuerdo a los resultados obtenidos, es 5 veces el diámetro de perforación. Con espaciamiento entre 5 y 8 veces el diámetro de perforación, de igual forma se obtendrán resultados eficaces, con superficie del plano de fractura muy regular. El espaciamiento entre barrenos se dará de acuerdo al producto que se precise. Este resultado es válido para los trabajos en cuarcita.
- Una disminución en el espaciamiento entre barrenos, hace viable la aplicación de barrenos descargados de modo alternado. El aumento del esfuerzo principal actuante en la dirección de la línea de barrenos iniciará una fractura, haciendo efectivo el desmonte de roca. Un estudio de costos de perforación es necesario, para verificar hasta que distancia se puede considerar, como viable en términos económicos.

- En la operación de perforación, el diámetro óptimo para trabajo es de 13 mm, de acuerdo a la comparación presentada en la tabla 4.27, pues aparte de presentar fragmentación óptima de la roca, también resulta en un menor consumo de argamasa, y de mayor importancia el tiempo de perforación, es mucho menor. Este pequeño diámetro facilita la variación en la disposición de los barrenos, por lo que se puede experimentar diversas configuraciones, incluso para la escultura.
- La propagación de la fractura se ve afectada por el tiempo que emplea la argamasa para alcanzar un esfuerzo máximo, factor que se ve influido también por la compresión interna de la argamasa, efecto de su expansión y confinamiento en los barrenos. Este tiempo empleado por la AE para alcanzar un grado máximo de compactación se suma al tiempo empleado en desarrollar el esfuerzo necesario para la fragmentación.
- Definitivamente el tipo de argamasa empleada en estas pruebas, (código rojo), influye en la propagación de la fractura, el tipo adecuado, de código verde, ofrecería mejores resultados. La temperatura mínima alcanzada en Ouro Preto, en el periodo de mayo hasta agosto, donde se realizaron las pruebas fue de 12° C, por encima de los 5° C que se especifican para la AE de código rojo, retardando el tiempo de expansión.
- Dentro de los compuestos expansivos, el CaO resulta la más adecuada para el desarrollo de una mezcla expansiva, sin embargo un agente expansivo adicional debe estar agregado en el FRACT-AG[®] que no fue detectado en el análisis de difracción de rayos-X, por eso el MgO y CaO obtenidos en la calcinación de dolomita no resultaron efectivos para desarrollar una mezcla expansiva. Sin duda también algún compuesto extra está presente en la argamasa industrial retardando la absorción de agua y facilitando la manejabilidad de la misma.



- El uso de la argamasa expansiva como herramienta del taller de escultura resulta ser muy eficiente, evita pérdida de tiempo, produce una contaminación nula, los planos de fractura de las caras de la roca fracturada son lisas y sin imperfecciones como microfisuras y desviaciones del plano de fractura deseado.

6.2. Recomendaciones.

- Para la práctica de la AE en el taller de escultura, se puede usar varias líneas de barrenos, cuidando que la distancia entre ellas sea mucho mayor que el espaciado entre barrenos. Una técnica empleada en demoliciones y también viable en el taller de escultura, es el relleno de los barrenos en tiempos distintos, de esta manera una primera fila de barrenos es rellena y una segunda fila puede ser rellena dos o tres horas después, esta práctica se emplea para evitar desviaciones del plano de fractura. También es posible practicar barrenos en configuraciones determinadas para facilitar la ejecución de una escultura en roca.
- Posteriores ensayos pueden ser realizados considerando que, el espaciado máximo es de 10 veces el diámetro y el mínimo de 5 veces el diámetro, de ahí que valores intermedios pueden ser evaluados, además de usar el tipo de argamasa adecuada dependiendo de la temperatura ambiente. Con estos parámetros establecidos se puede entonces evaluar con mayor precisión la extensión de la fractura y la práctica de un barreno intermedio descargado.
- La fragmentación de roca con FRACT-AG[®] abre una nueva línea de investigación, para estudio de las propiedades físico-mecánicas de la roca, como por ejemplo, un ensayo de resistencia *in situ*, o desarrollar más el conocimiento de la fragmentación en roca con AE, usando diferentes tipos de roca para relacionar espaciado con parámetros geomecánicos de la misma.



- El campo de la mecánica de la fractura es extenso, pero aún así, no se ha hallado en la literatura un estudio concentrado en la formación y extensión de fractura en roca, bajo condiciones estáticas como es el caso de la AE. Se sugiere un estudio considerando las variables involucradas como diámetro de barreno, espaciamiento, resistencia de la roca, esfuerzo efectivo desarrollado por la argamasa, tipo de roca considerando sus planos de debilidad.

CAPITULO VII.
VII. APENDICES.

APENDICE 1.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

A. Densidad de la roca.

- Secar la muestra a temperatura moderada.
- Pesar la muestra (m).
- Sumergir la muestra en agua hirviendo para eliminar la presencia de burbujas.
- Registrar el volumen de agua desplazada (V).

La relación $\rho = \frac{m}{V}$ nos da la densidad real de la muestra.

B. Densidad de la argamasa con picnómetro.

El procedimiento experimental es el siguiente:

1. el picnómetro seco es cuidadosamente pesado,
2. se llena con polvo hasta casi la mitad y se pesa,
3. el picnómetro es llenado hasta $\frac{3}{4}$ con dispersante disuelto en agua destilada (0.1%) y es colocado a hervir para eliminar burbujas,
4. es llenado completamente con el dispersante disuelto, es pesado,
5. la tapa de Gay Lussac es retirada y el picnómetro llenado nuevamente para ser pesado, se repite esta experiencia seis veces,
6. luego, el picnómetro es lavado y llenado sólo con dispersante líquido, para luego ser pesado,
7. retirar la tapa y llenar de nuevo para pesar, repetir la experiencia seis veces,
8. el picnómetro es lavado y el ejercicio es repetido nuevamente, seis veces,

Si:

M1: masa del picnómetro vacío,

M2: masa del picnómetro + dispersante,

M3: masa del picnómetro + polvo,

M4: masa del picnómetro + polvo + dispersante,

M5: masa del picnómetro + agua destilada,

ρ : densidad de la solución,

ρ_w : densidad del agua,

ρ_d : densidad del dispersante,

ρ_p : densidad del polvo,

ρ_a : densidad del aire a temperatura ambiente,

La densidad del polvo viene dada por:

$$\rho_p - \rho_a = \frac{M3 - M1}{(M2 - M1) - (M4 - M3)} (\rho - \rho_a) \quad (B.1)$$

$$\text{Donde: } \rho - \rho_a = \frac{M2 - M1}{M5 - M1} (\rho_w - \rho_a) \quad (B.2)$$

Alternativamente, cuando no se usa dispersante, se puede usar:

$$\rho_p = \frac{M3 + M1}{M5 + M3 - M1 - M4} \quad (B.3)$$

C. Análisis de sedimentación con pipeta de Andreasen.



CIB-ESPOL

- Tomar una muestra representativa del material a analizar.
- Preparar una suspensión de concentración volumétrica entre 0.2% y 5%.
- Añadir a esta suspensión un agente dispersante en cantidad de 1g/l o 0.1%.
- La suspensión es vertida en la probeta y se coloca la pipeta.

- Se somete a agitación, recomendablemente 1 minuto.
- Al parar la agitación, comienza el análisis, se marca como $t=0$.
- Es recomendable tomar muestras después de 10 segundos, para evitar errores por la heterogeneidad de la suspensión.
- El intervalo de la toma de alícuotas de 10 ml, aumenta progresivamente, generalmente en relaciones de 2:1.
- La velocidad de sedimentación es calculada por la ecuación del movimiento uniforme.
- El diámetro D de la partícula, es calculado a partir de la ecuación de Stokes

$$v = \frac{2g(\rho_p - \rho_l)d_{stk}^2}{9\eta} \quad (C.1)$$

- Las alícuotas, una vez acabado el ensayo, son secadas a temperatura moderada.
- Se calcula la concentración de la alícuota, conociendo el peso del sólido en la misma.
- Con estos datos se traza una curva granulométrica, conociendo el diámetro de partícula y la relación de concentraciones, que indica el porcentaje de pasante acumulado.

APENDICE 2.

TABLAS DE DATOS.

Tabla 1.- Datos de masas para prueba de densidad con picnómetro.

M1 [g]	37,36
M3 [g]	46,84
M4[g]	91,63
	91,98
	92,03
	92,09
	92,14
	92,1
Media M4	91,995
M5 [g]	87,29
	87,25
	87,27
	87,26
	87,24
	87,25
Media M5	87,26
M2 [g]	87,09
	87,03
	87
	86,98
	86,96
	87,02
Media M2	87,01333

Tabla 2.- Datos adicionales para cálculo de densidad y resultado.

T [°C]	23
ρ_w [g]	0,997554
ρ_a [g]	0,001193
P - ρ_a [g]	0,991436
$\rho_p - \rho_a$ [g]	2,089399
Densidad de argamasa ρ_p [gr/ml]	2,090591657

Tabla 3.- Densidad del agua en función de la temperatura.

Temperatura [°C]	Densidad [Kg/m ³]
5	1000
10	999,7
15	999,1
20	998,2
25	997,1
30	995,7
35	994,1
40	992,2



CIB-ESPOL

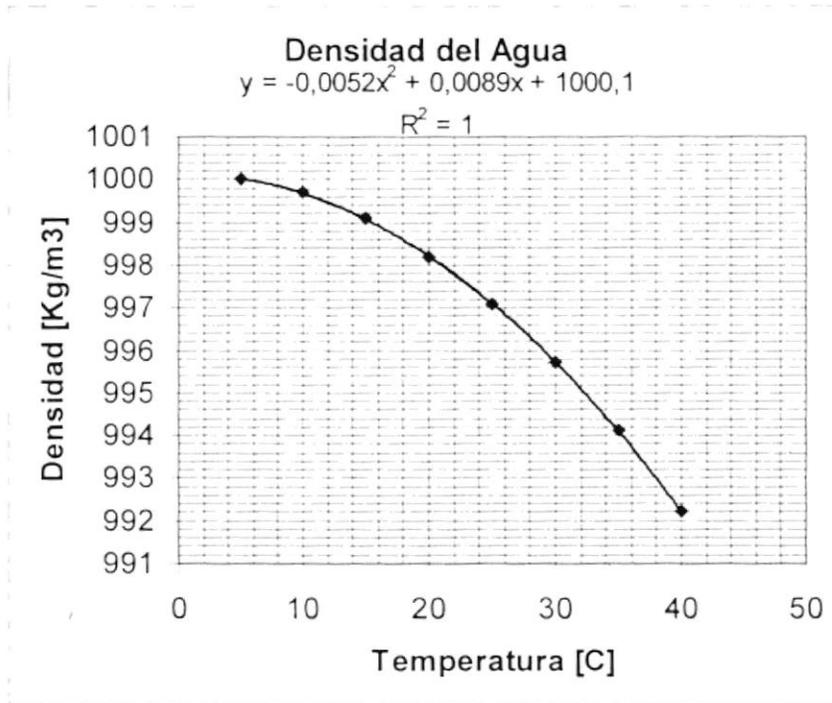


Figura 1.- Curva de densidad del agua.

Tabla 4.- Densidad del aire en función de la temperatura.

Temperatura [°C]	Densidad [Kg/m ³]
10	1,247
15	1,225
20	1,204
25	1,184
30	1,165

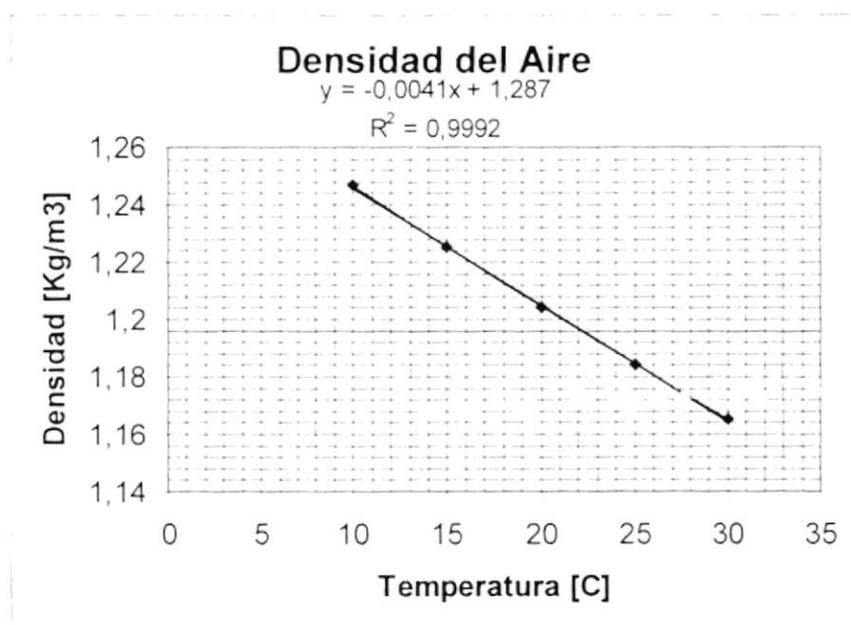


Figura 2.- Curva de densidad del aire.

Tabla 5.- Viscosidad del agua en función de la temperatura.

Temperatura [°C]	Viscosidad [10 ³ Pa s]
0	1,792
5	1,519
10	1,308
15	1,14
20	1,005
25	0,894
30	0,801
35	0,723
40	0,656

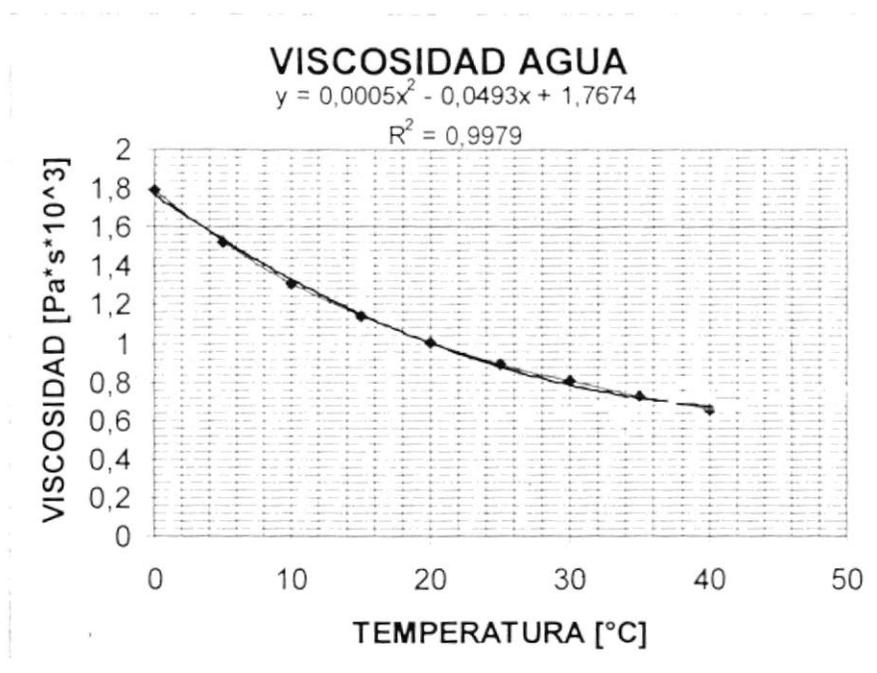


Figura 3. Curva de viscosidad del agua.

Tabla 6.- Datos de muestras tomados en análisis granulométrico mediante sedimentación.

Muestra	T [s]	W ₀ [gr]	W _t [g]	W _t - W ₀ [g]
1	30	15.8652	16.2252	0.3600
2	120	16.4741	16.8080	0.3339
3	480	15.9017	15.9486	0.0469
4	900	16.2666	16.2997	0.0331
5	2400	17.1067	17.1379	0.0312
6	5400	16.5477	16.5763	0.0286
7	9000	15.4422	15.4707	0.0285
	h [cm]	V _t [m/s]	D _{stk} [μm]	C _t [g/ml]
1	20	0.006666667	109.7455031	0.036
2	19.5	0.001625	54.18250078	0.03339
3	18.5	0.000385417	25.99379972	0.00469
4	17.8	0.000197778	18.34331991	0.00331
5	16.6	6.91667E-05	10.84769878	0.00312
6	16	2.96296E-05	7.099901201	0.00286
7	15	1.66667E-05	5.324925901	0.00285

Tabla 7.- Datos de concentraciones de muestras en análisis granulométrico.

Muestra	C _t /C ₀ [%]
1	-
2	68.2758621
3	63.3258621
4	8.89482759
5	6.27758621
6	5.91724138
7	5.42413793



CIB-ESPOL

En las tablas 6 y 7 la simbología es:

t : tiempo de muestreo [s].

W_0 : peso del bécker [g].

W_f : peso del becker con la muestra después de secado [g].

h : distancia entre la superficie del fluido y la boca de la pipeta [cm].

V_t : velocidad terminal de la partícula según ley de Stokes.

D_{stk} : diámetro de la partícula según Stokes [cm].

C_t : concentración de la muestra [g/ml].

C_t/C_0 : relación entre concentración de la muestra y la concentración inicial de la pulpa.

APENDICE 3. FOTOGRAFÍAS.

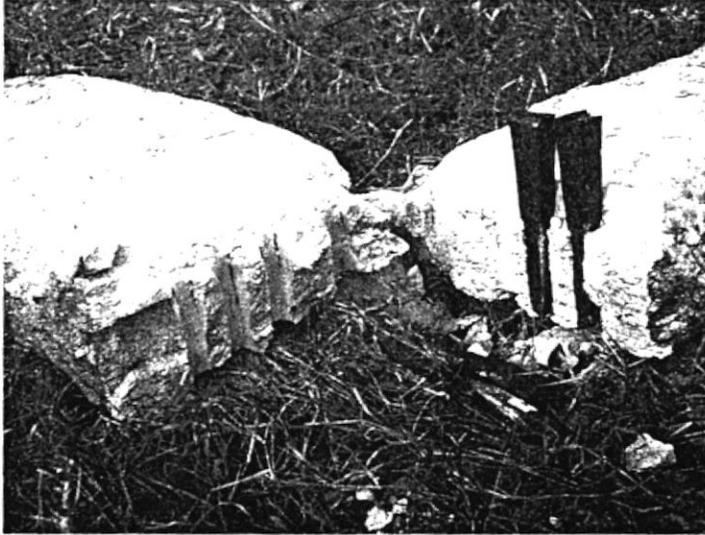


Figura 1.- Preparación de muestras de roca.

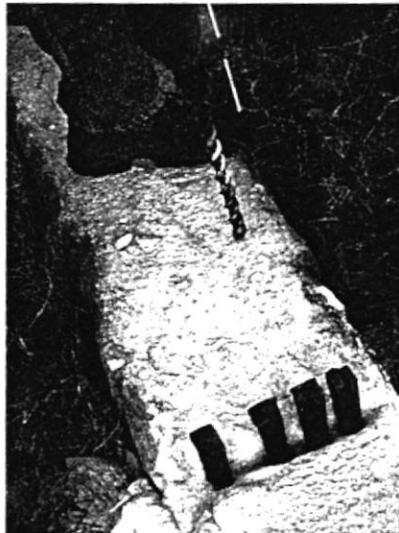


Foto 2.- Perforación de muestras para fragmentación con AE.



Foto 3.- Detalle de plano de fractura, ensayo número3.



Foto 4.- Relleno de barrenos con argamasa expansiva.



CIB-ESPOL



Foto 5.- Fragmentación con espaciamento igual a 10 veces el diámetro de perforación, ensayo número 2.



Foto 6.- Resultado de prueba numero 3, espaciamento igual a 5 veces el diámetro.



Foto 7.- Resultado de ensayo número 6, espaciamiento igual a 5 veces el diámetro.

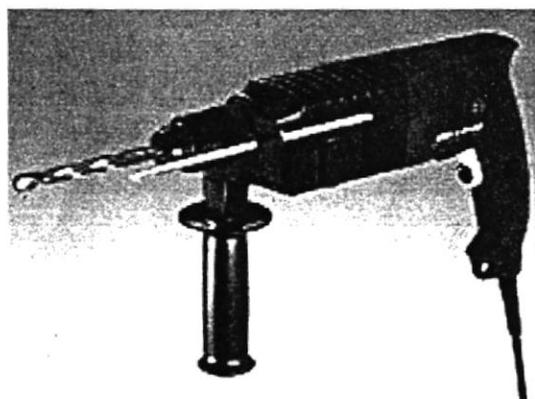


Foto 8.- Martillo perforador BOSCH GBH 2 – 24 DSE.

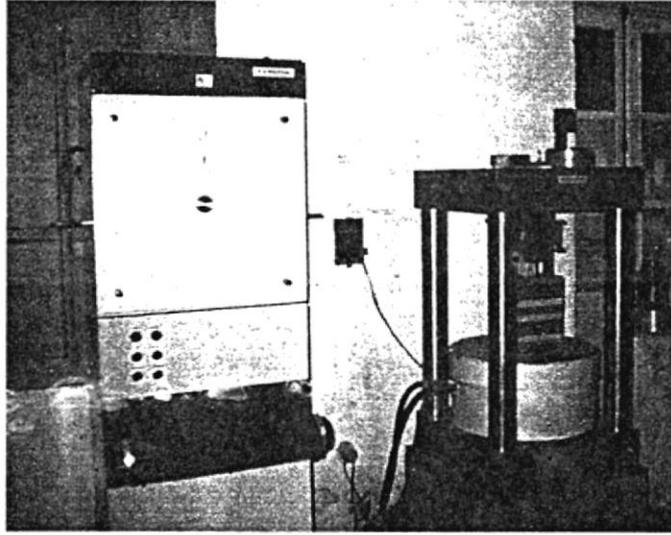


Foto 9.- Equipo para determinación de resistencia a la compresión simple.

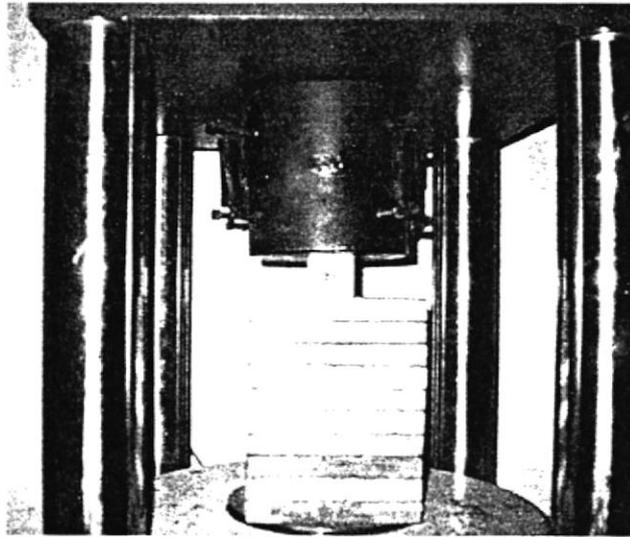


Foto 10.- Ensayo de resistencia a la compresión, muestra B1.



CIB-ESPOL



Foto 11.- Dilatación de la argamasa expansiva, en condiciones sin confinamiento.

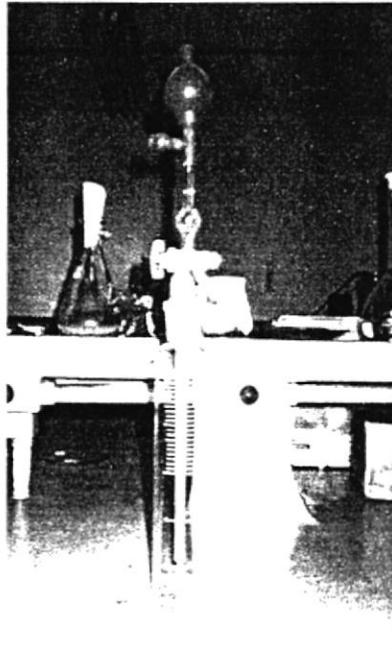


Foto 12.- Pipeta de Andreasen, para análisis granulométrico.

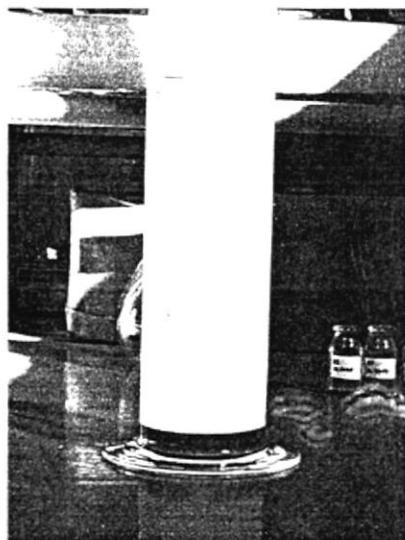


Foto 13.- Ensayo de granulometría mediante sedimentación.



Foto 14.- Pulverizador para preparación de argamasa protoindustrial.



Foto 15.- Pícnómetros.

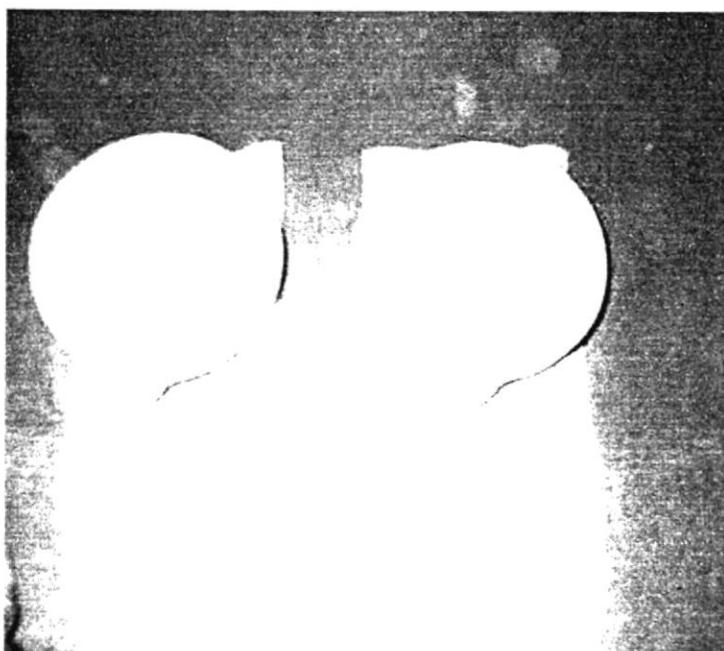


Foto 16.- Dolomita, lista para calcinación y posterior preparación de argamasa protoindustrial.



CIB-ESPOL



Foto 17.- Dolomita calcinada, lista para mezcla con biotita.



CAPITULO VIII.
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] S. Nagatki; H. Gomi; Expansive Admixtures (mainly ettringite); Cement and Concrete Composites; **20** (1998) 163 – 170.
- [2] Y. Yamazaki, Mechanism of expansion of concrete with expansive admixture. Cement & Concrete, **352** (1975) 10 – 18.
- [3] V. Likov, N. Djabarov, G. Bechev, O. Petrov; Properties and hydration products of lightweight and expansive cements, Part II: Hydration products. Cement and Concrete Research, **29** (1999) 1641 – 1646.
- [4] Peiyu Yan, Xiao Qin; The effect of expansive agent and possibility of delayed ettringite formation in shrinkage-compensating massive concrete, Cement and Concrete Research, **31** (2001) 335 – 337.
- [5] A. A. Griffith, The theory of rupture. Proc. 1th Congr. Appl. Mech., Delfth, 1924, 55-63.
- [6] D. Dollimore, J.D. Gupta, S. Lerdkanchanaporn, S. Nippani, “A thermal analysis study of recycled portland cement concrete aggregates”, Termochimica Acta, 31 – 40, 2000.
- [7] J. C. Jaeger, N. G. W. Cook; Fundamentals of rock mechanics, 3 ed.; London: Chapman and Hall, 1979, 300 p.
- [8] Huisheng Shi, Yujing Zhao, Wenwen Li, Effects of temperature on the hydration characteristics of free lime, Cement and Concrete Research **32** (2002) 789–793.
- [9] S. Galí, C. Ayora, P. Alfonso, E. Tauler, M. Labrador, Kinetics of dolomite – portlandite reaction. Application to Portland cement concrete. Cement and concrete research **31** (2001) 933 – 939.



- [10] I. Azevedo, E. Marques; Introdução à mecânica das rochas, Viçosa: UFV, Cap. 2, 96-99, 2002.
- [11] T. Allen; Particle size measurement; 3 ed. London, New York: Chapman and Hall; Cap. 4, p. 133-146, Cap. 9, p. 267-277, 1981.
- [12] Orr Clyded, J. M. Dallavalle; Fine particle measurement: size, surface and pore volume; 1. ed. New York: The Macmillan Company; Cap. 2, p. 31-33, Cap. 3, p. 43-55, 1959.
- [13] A. B. Yu, N. Standish, A study of particle size distribution, Powder Technology, V. 62, p. 101 – 118, 1990.
- [14] G. E. Andreev, Brittle failure of rock materials: Test results and constitutive models, A. A. Balkema: Rotterdam, Cap. 3, p. 15 – 128, Cap. 4, p. 180 – 190, 1995.
- [15] B. Atkinson Ed., Fracture mechanics of rock, “Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurement” by Rummel F., Academic Press, Geology series: London, Cap. 6, p. 217 – 241, 1991.
- [16] B. Atkinson Ed., Fracture mechanics of rock, “Theory of crack initiation and propagation in rock” by Anthony R. Ingraffea, Academic Press, Geology series: London, Cap. 3, p. 71 – 110, 1991.
- [17] Manual de manejo de Argamasa expansiva CRAS[®], Kayati S. A., 2001.
- [18] Manual de manejo de argamasa expansiva FRACT-AG[®], Chemica Edile S. A., 2001.



- [19] H. Shuguang, L. Yue, Research on the hydration, hardening mechanism, and microstructure of high performance expansive concrete, *Cement and concrete research*, **29** (1999) 1013 – 1017.
- [20] R. A. Bearman, The use of the point load test for the rapid estimation of Mode I fracture toughness, *International journal of rock mechanics and mining science*, **36** (1999) 257 – 263.
- [21] B.N. Whittaker, R.N. Singh e G. Sun, *Rock fracture mechanics - principles, design and applications*, Elsevier (Developments in Geotechnical Engineering n. 71), Amsterdam, The Netherlands, (1992); 570 p.
- [22] S.-H. Chang, C.-I. Lee, S. Jeon, Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed mode by using disc-type specimens, *Engineering Geology*, **66** (2002) 79 – 97.
- [23] T. Backers, O. Stephansson, E. Rybacki, Rock fracture toughness testing in mode II punch-through shear test, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, ARTICLE IN PRESS, accepted 8 may 2002.
- [24] J.C. Subauste, I. Odler, Stresses generated in expansive reactions of cementitious systems, *Cement and Concrete Research*, **32** (2002) 117 – 122.
- [25] B. H. Brady, E. T. Brown, *Rock Mechanics for Underground Mining*, George Allen & Unwin Ltd., London UK, 1985.

