

1
G24. 1833
Rob
C.2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir
Cemento Puzolánico

TESIS DE GRADO



CIB-ESPOL

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:



CIB-ESPOL

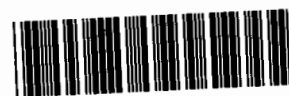
PAOLA ALEXANDRA ROBALINO ESPINOZA

GUAYAQUIL – ECUADOR

2004



CIB



D-32841

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de ésta Tesis de Grado, le corresponde exclusivamente al autor; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”.



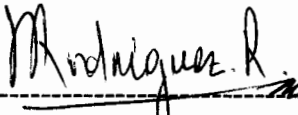
CIB-ESPOL

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

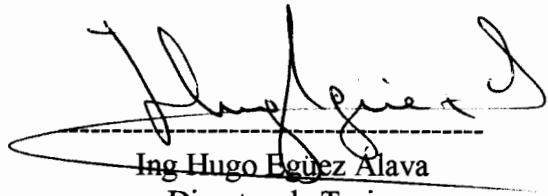
PAOLA ROBALINO

Paola Alexandra Robalino Espinoza

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



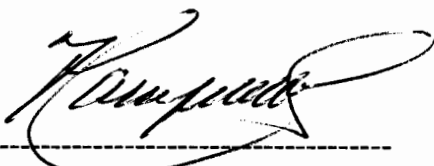
Ing Julio Rodríguez Ríos
Presidente



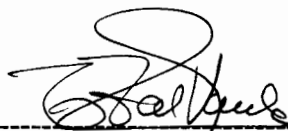
Ing Hugo Egúez Alava
Director de Tesis



CIB-ESPOL



Ing. José Camposano L.
Miembro del Tribunal



Ing. Carmen Terreros de Varela
Miembro del Tribunal

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de estos años, por su esfuerzo, sus consejos y entrega. A mis hermanos por demostrarme con su ejemplo que somos capaces de alcanzar nuestras metas si nos lo proponemos. A Felipe, mi esposo, por su amor y por crear en mi el deseo de ser mejor cada día. A mis amigos por estar junto a mi en los momentos más difíciles y ayudarme a seguir adelante. A mis maestros por compartir sus conocimientos. A mi director de tesis, Ingeniero Hugo Egüez, por su paciencia y apoyo. Y a Dios, por poner a todas estas personas en mi vida, y dejarme aprender un poco de cada una de ellas, gracias.

DEDICATORIA

A mi esposo, por su amor incondicional y cariño. Por ser mi fortaleza y apoyo para alcanzar mis metas. Por ser parte de mi vida y dejarme ser parte de la suya.



CIB-ESPOL

RESÚMEN

Las puzolanas son un material natural o artificial compuesto principalmente por sílice amorfa, que por si solas poseen poco o ningún valor cementante o propiedades hidráulicas, pero que finamente dividido y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio o cal y forman un compuesto que posee propiedades aglomerantes.

El cemento puzolánico es la resultante de la incorporación de la puzolana (zeolita) al cemento portland en una proporción del 20% de la mezcla de la masa. Este producto se realizó bajo las normas de la ASTM C618 – 01 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.

La zeolita es el mineral que se utilizó como adición en la fabricación del cemento puzolánico para esta tesis. Adición incorporada al cemento con el fin de mejorar sus propiedades, y obtener un producto igualmente resistente y más económico. El objetivo es desarrollar la aplicación de las zeolitas naturales como un componente básico de las mezclas de hormigones y morteros. Demostrar mediante ensayos y pruebas las bondades de la zeolita como una adición mineral para producir este material.

Es indiscutible que para la rama de la construcción éste es un valioso recurso. Es por esto que es importante demostrar las ventajas que ofrece este material, no solo desde el punto de vista técnico, sino también económico. Ver también a la zeolita como un nuevo recurso que no ha sido explotado aún, y que esta en espera de ser reconocido.

ÍNDICE GENERAL

	Páginas
RESÚMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	V
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	VI
 CAPÍTULO 1	
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
 CAPÍTULO 2	
2.- PUZOLANAS.....	3
2.1. DEFINICIÓN.....	3
2.2. TIPOS DE PUZOLANAS.....	3
2.2.1. ARTIFICIALES.....	3
2.2.2. NATURALES.....	4
2.3. ZEOLITAS.....	5
2.3.1. USOS Y APLICACIONES INDUSTRIALES.....	5
2.3.2. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS.....	7



CIB-ESPOL

CAPÍTULO 3

3.- CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO.....	10
3.1. DEFINICIÓN.....	10
3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	12
3.3. PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE LOS ELEMENTOS ADICIONADOS.....	13

CAPÍTULO 4

4.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	20
4.1. PREPARACIÓN DE LA ZEOLITA.....	20
4.1.1. MUESTREO.....	20
4.1.2. TRITURACIÓN.....	21
4.1.3. MOLIENDA.....	23
4.2. CARACTERIZACIÓN.....	24
4.2.1. RETENIDO # 325.....	25
4.2.2. DENSIDAD.....	27
4.2.3. ANÁLISIS QUÍMICO.....	28
4.2.4. SUPERFICIE ESPECÍFICA.....	29
4.2.5. DETERMINACIÓN DEL FACTOR b	35

	Páginas
4.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.....	37
4.4. PRUEBAS DE ÍNDICE DE PUZOLANIDAD.....	45
4.5. CONTENIDO DE AIRE ATRAPADO EN MORTERO.....	46

CAPÍTULO 5

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
---	----

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA



CIB-ESPOL

ÍNDICE DE TABLAS

	Páginas
2.3.2. Requerimientos Físicos y Químicos.....	9
3.1. Tipos de cementos con contenido de puzolanas.....	11
3.2. Características físicas y químicas.....	12
3.3. Proporciones de mezclas de concreto (kg/m ³).....	16
3.4. Esfuerzo a la compresión del concreto como una función del tiempo de curado en el agua a 20 C.....	16
3.5. Retracción del concreto de cenizas volantes.....	17
4.2.3. Análisis químico de la zeolita.....	29
4.2.4.1 Resultados de la prueba de Blaine.....	32
4.2.4.2 Datos para el cálculo de la superficie específica.....	35
4.2.5. Datos para la gráfica del factor b.....	36
4.3.1. Dosificación de las mezclas para 9 cubos.....	37
4.3.2. Dosificación muestra y patrón para 9 cubos.....	38
4.3.3. Resistencias a la compresión simple.....	43
4.3.4. Determinación de la resistencia a compresión de morteros.....	anexos
4.4.1. Dosificación para prueba de índice de puzolanidad.....	45
4.4.2. Índices de puzolanidad.....	46
4.5.1. Dosificación prueba de contenido de aire atrapado en mortero.....	47
4.5.2. Dosificación muestra/patrón para obtencion de contenido de aire.....	48
4.5.3. Porcentajes de contenido de aire en el mortero.....	49

INDICE DE GRÁFICAS

	Páginas
3.1. Curvas de calor de hidratación de algunos cementos puzolánicos.....	14
3.2. Calor total de varias mezclas de cementos durante la hidratación.....	14
3.3. Influencia del esfuerzo a la compresión del concreto en la profundidad carbonatada final esperada.....	19
4.2.5. Gráfica para obtener factor b.....	36
4.3.1. Gráfica de resistencias de la muestra.....	43
4.3.2. Gráfica de resistencias del patrón.....	44
4.3.3. Gráfica comparativa de resistencias muestra/patrón.....	44

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Páginas
4.1.1. Peñón de la Espol de donde se tomaron las muestras de zeolita.....	20
4.1.2. Muestra de zeolita.....	21
4.1.3. Trituradora de quijadas.....	21
4.1.4. Molino de rodillos.....	22
4.1.5. Material triturado.....	22
4.1.6. Molino de bolas.....	23
4.1.7. Zeolita en el horno.....	24
4.2.1. Prueba de finura.....	25
4.2.2. Lavado a presión de $10 \pm 0,5$ psi.....	26
4.2.4.1 Material dentro de la celda.....	31
4.2.4.2 Celda sellada.....	31
4.2.4.3 Instrumento Blaine.....	33
4.3.1. Peso de materiales para la pasta.....	39
4.3.2. Preparación de cubitos.....	39
4.3.3. Mesa de Flujo.....	40
4.3.4. Compactación de cubos.....	41
4.3.5. Cámara Húmeda.....	41
4.3.6. Cubos en la piscina.....	42
4.3.7. Rotura de cubitos en la prensa.....	42

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

1.- INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

A lo largo de los años se ha reconocido que para diversas ramas de la economía, la salud y los servicios, las zeolitas naturales han tenido un gran desempeño y han sido de mucha utilidad. Gracias a diferentes estudios e investigaciones, se ha logrado encontrar mas aplicaciones para el uso de este mineral, y son tantos los diferentes campos que se pueden beneficiar de este, que es sensato pensar que la zeolita podría convertirse en un gran recurso.



CIB-ESPOL

Es un hecho también indiscutible que para la rama de la construcción éste es un valioso recurso, que si bien en nuestro país no ha sido explotado aún, con la correcta visión y empleo racional de estas reservas, podríamos sacarle provecho a este mineral.

El empleo de minerales con contenido de zeolitas naturales en las mezclas con cal en las construcciones antiguas es conocido, así como el amplio empleo que los romanos hicieron de estos minerales en sus grandes obras construidas en la antigüedad. Obras como Coliseos, Acueductos y la extraordinaria Cúpula del Panteón de 42 m. de luz, en el que no solo se emplearon los cementos cal-puzolana, sino también la pómez puzolánica como árido ligero con el fin de disminuir las cargas originadas por el peso

propio de la estructura. Muchas de estas construcciones conservadas hoy en admirables condiciones testimonian una de las propiedades fundamentales de este material como lo es la durabilidad.

1.2. Objetivos

En la actualidad gracias a la moderna tecnología del hormigón se ha podido estudiar mas a fondo las aplicaciones de las zeolitas naturales como una adición mineral. El objetivo de esta tesis es precisamente desarrollar y optimizar la aplicación de las zeolitas naturales como un componente básico de las mezclas de hormigones y morteros. Utilizar un material inorgánico como lo es la zeolita, e incorporarla al cemento nos dará como resultado un cemento puzolánico.

Es también importante mencionar que el cemento puzolánico es otra alternativa de cemento en la construcción, demostrando mediante los ensayos y pruebas realizadas, las bondades de la zeolita como una adición mineral para producir este material. Estas adiciones incorporadas al cemento se las realiza con el fin de mejorar sus propiedades, obteniendo un producto igualmente resistente y más económico.

El propósito entonces, no es sólo mostrar un nuevo mineral para producir este material de construcción, y de las ventajas que ofrece desde el punto de vista técnico como económico, sino mostrar un nuevo recurso que no ha sido explotado aún, y que esta en espera de ser reconocido.

CAPITULO 2

PUZOLANAS

CAPÍTULO 2

2.- PUZOLANAS

2.1. Definición

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales compuestos principalmente por sílice amorfa, que por si solas poseen poco o ningún valor cementante o propiedades hidráulicas, pero que finamente dividido y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio o cal y forman un compuesto que posee propiedades aglomerantes.

2.2. Tipos de puzolanas

Existen dos tipos principales de puzolanas, las puzolanas artificiales y las naturales.

2.2.1. Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales son sub-productos industriales y materiales tratados térmicamente, y existen varios tipos que se mencionaran a continuación:

- **Cenizas volantes (fly ash):** subproducto de centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible. Polvo fino constituido esencialmente de partículas esféricas.

- **Arcillas activadas térmicamente:** las arcillas naturales no presentan actividad puzolánica a menos que su estructura cristalina sea destruida mediante un tratamiento térmico a temperaturas de orden de 600 a 900 C.
- **Microsilice:** subproducto de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio. Una vez que este material esta extremadamente fino, es colectado por filtración de los gases de escape del horno, en filtros de mangas.
- **Cenizas de cáscara de arroz:** producida por la calcinación controlada de la cáscara de arroz. Esta consiste básicamente de sílice amorfa > 90%, y posee gran actividad puzolánica.

2.2.2. Puzolanas Naturales

Para fines de la construcción, las puzolanas naturales son consideradas en general como materiales de naturaleza silíceo. A continuación se mencionaran algunos tipos de estas puzolanas

- **Cenizas volcánicas:** estas se forman por erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo.
- **Tobas volcánicas o zeolitas:** producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación.

- **Diatomitas:** puzolanas de origen orgánico. Depósito de caparazones silíceos de microscópicas algas acuáticas unicelulares (diatomeas).

2.3. Zeolitas

Las zeolitas naturales son un grupo de alumino-silicatos hidratados de metales alcalino y alcalino-terreos. El término zeolita se utiliza para designar a una familia de minerales naturales con propiedades particulares como el intercambio de iones y la desorción reversible de agua. Esta última propiedad es la que da origen a su nombre, que se deriva de dos palabras griegas, *zeo*: que ebulle, y *lithos*: piedra.

En los materiales con contenido de minerales de zeolitas naturales, están presentes las reacciones hidráulicas de puzolanidad con la cal y el contenido alcalino presente en la reacción. En general se adopta el término de tobas volcánicas a los minerales que se combinan con la cal hidráulica mediante reacciones de intercambio iónico.

2.3.1. Usos y aplicaciones industriales

Las zeolitas son de gran interés industrial ya que poseen diversas propiedades lo que da como resultado diferentes aplicaciones. Estas rocas o minerales se utilizan para diversas actividades como la nutrición animal, agricultura, control de malos olores,

construcción, entre otros. Las zeolitas naturales poseen diversas propiedades, las mismas que se pueden agrupar en tres categorías fundamentales:

- Capacidad de cambio iónico.
- Adsorción/desorción de agua.
- Adsorción de gases.

A continuación se explicara como se aprovechan estas propiedades en las diferentes a actividades antes mencionadas.

- Nutrición animal

Mediante la adición de la zeolita al alimento del ganado vacuno como balanceado, se logra mejorar la eficacia alimenticia de este alimento, mejorando así tanto la calidad de la carne como la producción de leche y huevos. Esta adición también logra mejorar el apetito de los animales y la resistencia a las enfermedades.

- Agricultura

En la agricultura por ejemplo se la utiliza para el tratamiento de suelos gracias a su capacidad de intercambio iónico y retención de agua. Al aumentar la capacidad de intercambio iónico hace que se logre mejorar la capacidad de retención de nitrógeno del suelo.

- *Control de malos olores*

Es aquí donde se demuestra la capacidad de la zeolita para el intercambio iónico y la selectividad por el amoniaco. Es por esto que las zeolitas se las puede utilizar para el control de los olores en diversas situaciones, desde las camas de los gatos hasta las plantillas para los zapatos.

- *Adsorción/desorción de agua y gases*

Una de las propiedades de este mineral es su capacidad de adsorción, tanto con el agua como con el gas. Gracias a su elevada afinidad por el agua, las zeolitas son de gran utilidad en el control de los niveles de humedad. En el caso de los gases, las zeolitas son utilizadas para tratamientos en la purificación de gases naturales.



CIB-ESPOL

- *Construcción*

La zeolita es utilizada en la producción de cementos puzolánicos. Es justamente el aprovechamiento de este mineral en la construcción lo que se quiere demostrar en esta tesis.



CIB-ESPOL

2.3.2. Clasificación y características

Las puzolanas se dividen y clasifican en tres tipos según la norma ASTM C 618-01^{CIB-ESPOL}

“Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete”.



Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas.

Clase F: Ceniza volante producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Estas cenizas poseen propiedades puzolánicas.

Clase C: Ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánicas, también tiene propiedades cementicias.

Esta especificación cubre tanto las cenizas volantes como las puzolanas naturales, y su uso como una adición mineral al cemento y concreto cuando se desee una actividad puzolánica. A continuación se mostrarán las tablas 1 y 2 con las características físicas y químicas requeridas para los tres tipos de puzolanas.

Es importante mencionar que para esta tesis el tipo de puzolana a utilizar es la clase N, ya que se trata de la zeolita, que es una puzolana natural.

Tabla 2.3.2. "Requerimientos Físicos y Químicos para las puzolanas naturales según la norma ASTM C618-01"

REQUERIMIENTOS QUÍMICOS

	CLASE DE ADICION MINERAL		
	N	F	C
Oxido de silicio(SiO ₂), oxido de Aluminio(Al ₂ O ₃), Oxido férrico (Fe ₂ O ₃), min, %	70	70	50
Anhídrido sulfúrico (SO ₃), max, %	4	5	5
Contenido de humedad, max, %	3	3	3
Pérdida al fuego, max, %	10	6	6

Tabla A

REQUERIMIENTOS FÍSICOS

	CLASE DE ADICION MINERAL		
	N	F	C
Finura:			
Cantidad retenida en el tamiz No.325, max,%	34	34	34
Indice de Esfuerzos:			
Con Cemento Portland, a 7 días, min % de control	75c	75c	75c
Con Cemento Portland, a 28 días, min % de control	75c	75c	75c
Requerimiento de agua, max,% de control	115	105	105
Autoclave, expansión o retracción, max, %	0,8	0,8	0,8
Requerimientos de uniformidad:			
La densidad y finura de las muestras individuales no debe variar de las establecidas en las 10 muestras siguientes por mas de:			
Densidad, max variación de la promedio, %	5	5	
Porcentaje retenido en tamiz No.325, max variación de % del promedio	5	5	

Tabla B

CAPITULO 3

CEMENTO PORTLAND PUZOLANICO

CAPÍTULO 3

3.- CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO

3.1. Definición

Los cementos adicionados son aglomerantes hidráulicos, producidos por la molienda de un material conocido como puzolana que se ha incorporado al cemento. Estas pastas hidratadas bajo ciertas condiciones generan soluciones de hidróxido de calcio que alcanzan todavía niveles de saturación. Es precisamente este nivel de saturación el que nos da una de las características más importantes que marca la diferencia entre los dos cementos.

Los cementos Portland Puzolánicos Tipo IP de acuerdo al Comité Europeo de Normalización (Tabla 3.1) son cementos con adición puzolánica natural o industrial que posee de 15 - 40% de puzolana, y bajo ciertas condiciones produce una pasta hidratada no saturada con respecto al hidróxido de calcio debido a la cantidad de sílice reactiva, mientras que los Cementos Puzolánicos, denominados Tipo IPM según la ASTM C595, poseen un porcentaje menor al 15% de puzolana, lo que hace que si produzca una pasta saturada debido a una menor presencia de adición. El contenido residual de portlandita depende de la reactividad de la puzolana, de la cantidad generada por el clinker patrón durante su hidratación, así como de la reacción puzolana/cemento. Para este caso en particular, el porcentaje adicionado de puzolana fue del 20%.

Tipo de cemento	Designación	Notación	Clinker K	S	Silica D	Puzolana		Cenizas volantes		Constituyentes adicionales	
						natural P	industrial Q	silicea V	calcareo W	silicea V	adicionales
II	Cemento Portland Silica Fume	II/A-D	90-94	-	6 10	-	-	-	-	-	0-5
		II/A-P	88-94	-	-	6 20	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland Puzolanico	II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		II/A-Q	80-94	-	-	-	6 20	-	-	-	0-5
		II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		II/A-V	80-94	-	-	-	-	6 20	-	-	0-5
Cemento Portland Ceniza volante	II/B-V	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
	II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	-	6 20	0-5	
	II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	II/A-M	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	
Cemento Portland Composite	II/B-M	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	
	IV	Cemento Puzolanico	65-89 45-64	-	-	-	11-35 36-55	-	-	-	0-5 0-5
V	Cemento Composite	V/A	40-64	18-30	-	-	18-30	-	-	-	0-5
		V/B	20-39	31-50	-	-	31-50	-	-	-	0-5

Tabla 3.1 Tipos de cementos con contenido de puzolanas de acuerdo con el ENV 197.1 (Ref. 1)

3.2. Características generales

El cemento puzolánico es la resultante de la incorporación de la puzolana (zeolita) al cemento portland en una proporción que debe ser del 15-40% de la mezcla de la masa según la norma **ASTM C595**. Es esta incorporación la que lo provee de diversas características y propiedades, las mismas de las cuales hablaremos a continuación. Es por muchas de estas características que este cemento puzolánico puede ser utilizado para construcciones de concreto en general.

A continuación se presentan algunas características físicas y químicas de varios cementos producidos por la Cemento Nacional (Tabla 3.2)

Fecha De muestreo	Tipo De cemento %	Residuo Insoluble %	C3A %	Blaine m ² /Kg	Resistencias Mpa			
					Dias			
					1	3	7	28
97 - 07 - 30	I	3.9	9.9	312.8	9.2	17.3	23.6	33.3
97 - 07 - 11	IE	14.3	12.4	376.8	5.1	15.9	20.8	28.3
97 - 07 - 03	II	0.34	5.2	303.3	5.8	14.0	20.0	29.2
99 - 09	IP	15.0	11.3	418.0	8.7	19.2	24.8	32.5

Tabla 3.2 "Características físicas y químicas" (Ref.2)

Como se puede observar en la tabla 3.2, el cemento IP se diferencia de sus predecesores el I y IE principalmente en la finura que posee, probablemente la adición puzolánica utilizada en la actualidad debe ser acondicionada para reaccionar con un clinker muy reactivo y los niveles de resistencia obtenidos y similares a los del cemento tipo I se alcanzan incrementando la molienda de la mezcla niveles superiores a los 400 m²/Kg (Blaine). Bajo estas condiciones existe un comportamiento

importante en cuanto al incremento de la retracción del hormigón confeccionado con cemento IP con relación a la generada por los tipos anteriores. Si a esto le sumamos el efecto de la finura y de la puzolana en el calor de hidratación previamente analizado, los hormigones confeccionados con este cemento estarían más propensos a presentar fisuración a menos que se controlen los factores externos que las eviten.

Es importante mencionar que a la adición (zeolita) se le realizaron diversas pruebas según las normas y especificaciones de la **ASTM C 311-98b** “*Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete*”.

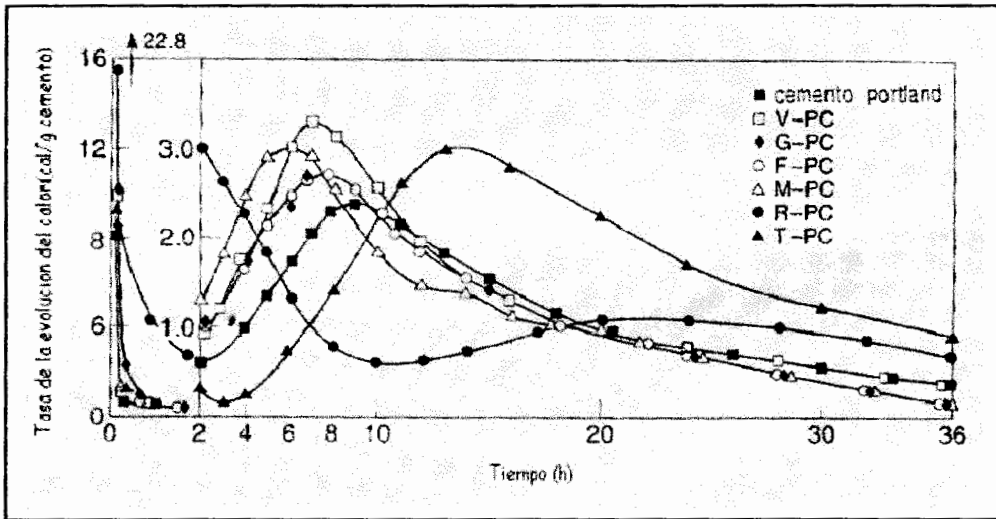
3.3. Propiedades fundamentales de los elementos adicionados

La adición de la puzolana confiere propiedades ventajosas para los cementos, tales como mayor resistencia a mayor edad, menor calor de hidratación, durabilidad, entre otras. A continuación se explicará mas a fondo, cada una de estas propiedades.

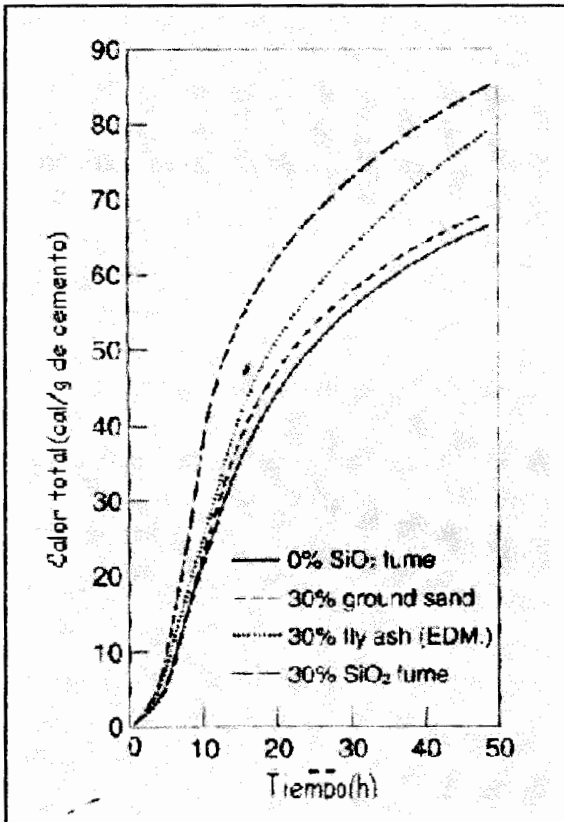
- Calor de hidratación

La cinética de hidratación de un clinker Portland mas yeso, es modificada por la presencia de puzolana, mientras se reconoce que el calor de hidratación de un cemento puzolánico a los 28 o 7 días es inferior a la de un Portland puro (clinker mas yeso), la generación de calor durante las primeras horas es acelerada y superior a la de

éste en la presencia de puzolana, las gráficas se muestran a continuación.



Gráfica 3.1 "Curvas de calor de la hidratación de algunos cementos puzolánicos w/s= 0,4 temperatura =20 C" (Ref.3)



Gráfica 3.2 "Calor total de varias mezclas de cementos durante la hidratación. Calor referido de la fracción de Cemento Portland" (Ref.4)

- Fraguado

El fraguado de cementos que contienen puzolanas naturales no difiere de los valores típicos encontrados en los cementos Portland, por el contrario, cementos compuestos con ceniza volante o humo de sílice tienden a prolongar el fraguado.

- Fluencia

Esta propiedad se relaciona estrictamente con la resistencia, relación agua-cemento y el curado del hormigón. Ya que la adición de puzolanas retarda la ganancia temprana de resistencias es de esperar que la fluencia específica de cementos puzolánicos sea mayor que la de los Portland si el hormigón ha sido cargado tempranamente; esta condición puede tener un efecto positivo ya que permitirá el asentamiento de estructuras masivas antes de que el hormigón se vuelva rígido.

- Resistencia

El desarrollo de resistencia en hormigones que contienen puzolanas tienen como regla general el incremento en las resistencias finales comparadas con los de los cementos Portland puros.

A continuación se presentan las características de varias mezclas de hormigón en las Tablas 3.3 y 3.4

Serie No.	Agua	Cemento	Ceniza volante	Arena < 4mm	Grava < 4mm
0	163	181	0	736	1280
1	154	167	146	570	1322
2	154	125	146	604	1331
3	154	107	146	619	1334
4	154	94	146	633	1333
5	154	83	146	644	1333

Tabla 3.3 "Proporciones de mezclas de concreto (kg/m^3)" (Ref.5)

Serie No.	Esfuerzo a la compresión (Mpa) después de:					
	Tiempo en semanas					
	2	4	16	181	362	R 362/ R4
0	13,4	14,8	20,8	23,8	26,3	1,8
1	19,0	25,4	39,4	55,1	56,1	2,2
2	12,0	17,1	29,2	46,4	45,9	2,7
3	8,8	13,4	25,2	39,8	42,2	3,1
4	6,9	10,5	22,1	36,0	37,9	3,6
5	5,8	8,4	20,6	34,2	33,9	4,0

Tabla 3.4 "Esfuerzo a la compresión del concreto como función del tiempo de curado en el agua a 20 C" (Ref.6)

- Retracción

La retracción es sensible cuando se reemplaza puzolana por cemento Portland, solamente cuando el curado inicial del hormigón se limita a menos de 3 días, en este caso la retracción aumenta con el incremento de la adición, por el contrario la retracción no se afecta hasta por reemplazos del 40% si el hormigón ha sido curado por lo menos 28 días antes del secado. Esto lo podemos observar en la Tabla 3.5 a continuación.

MEDIDAS DE RETRACCION					
Curado inicial por 7 días en agua			Curado inicial por 91 días en agua		
Mezcla No	Duración del secado (días)	Perdida de humedad (%)	Retracción (x 10)	Perdida De humedad (%)	Retracción (x 10)
Control 2	224	55,0	422	53,7	453
F1	224	57,5	447	47,9	365
F2	224	57,3	354	45,4	280
F3	224	56,9	411	56,2	405
F4	224	54,7	379	49,2	387
F5	224	58,8	404	51,1	403
F6	224	60,6	475	56,4	454
F7	224	64,3	397	54,1	433
F8	224	56,3	400	-	327
F9	224	58,2	390	49,3	361
F10	224	58,4	642	55,2	500
F11	224	49,5	454	48,9	362

Tabla 3.5. "Retracción del concreto de cenizas volantes"



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

- Durabilidad

La capacidad del hormigón de mantener el desempeño estructural con el paso del tiempo no depende exclusivamente de las propiedades del cemento, mas bien influyen en esta toda una gama de propiedades del hormigón.

Existen varios parámetros que influyen en mayor o menor grado para lograr

hormigón durable, estos son:

1. Duración del periodo de curado
2. Relación agua – cemento
3. Contenido de humedad

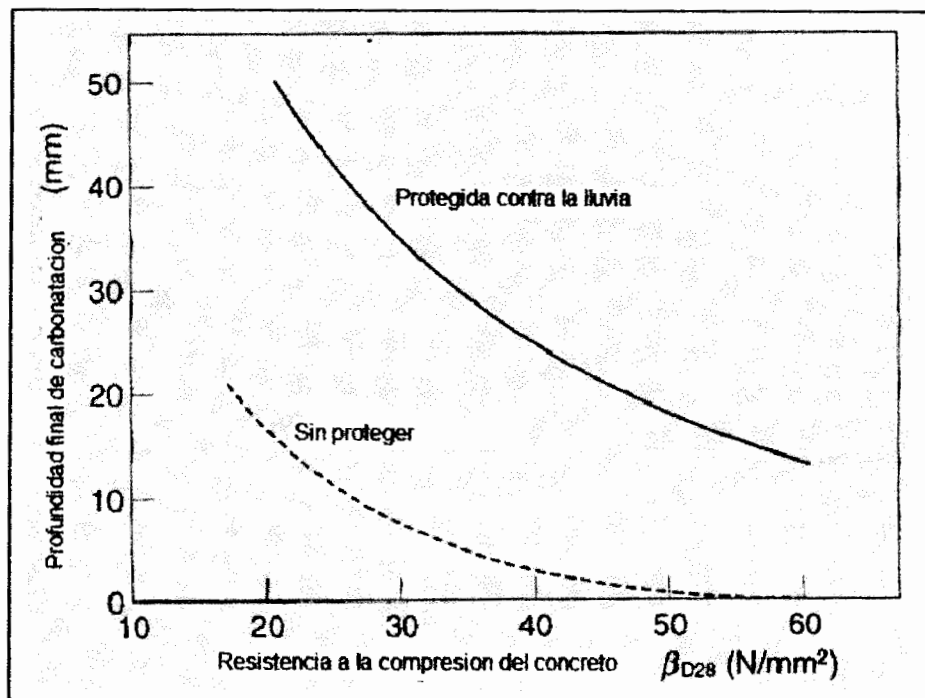


CIB-ESPOL

4. Humedad ambiente
5. Temperatura
6. Otros

Asumiendo que se han tomado en consideración para el diseño todos los parámetros para lograr un hormigón durable, de todos los parámetros, el que le afecta en mayor proporción al cemento puzolánico es el primero de ellos, por una razón sencilla, la reacción de puzolanas naturales, como es el caso del cemento IP, con el hidróxido de calcio producido por el clinker, es una reacción que no se genera de manera inmediata luego de la hidratación del cemento y necesita de agua para su evolución.

La bibliografía internacional cita varios ejemplos del efecto del tiempo de curado en la durabilidad del hormigón cuando se utilizan cementos con adiciones puzolánicas, como se muestra en la gráfica 3.3 y hace énfasis en este parámetro, comparándolo con la influencia que se presenta en cementos Portland puros a los cuales no les afecta mayormente el tiempo de curado.



Gráfica 3.3 “Influencia de la resistencia a la compresión del sin concreto puzolánico en la profundidad final de carbonatación” (Ref 2)

CAPITULO 4

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 4

4.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1. Preparación de la zeolita

El cumplimiento de especificaciones para el empleo de las zeolitas naturales como aditivo es regulado por normas internacionales. Para ésta tesis la clasificación de la zeolita se la determinó de acuerdo a la norma ASTM C 618-01 "*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*". Dando como resultado una puzolana de clase N, ya que el material utilizado es la zeolita que es una puzolana natural.

4.1.1. Muestreo



Para el muestreo, la zeolita se la obtuvo del peñón de la Espol, que está ubicado en la zona sur del Campus Prosperina.

Foto 4.1.1 "Peñón de la Espol de donde se tomaron las muestras de zeolita"



Foto 4.1.2 "Muestras de zeolita"

Se tomaron muestras de diversos tamaños, sin importar que algunas de estas rocas eran bastantes grandes ya que luego serian llevadas al laboratorio para ser trituradas.

4.1.2. Trituración

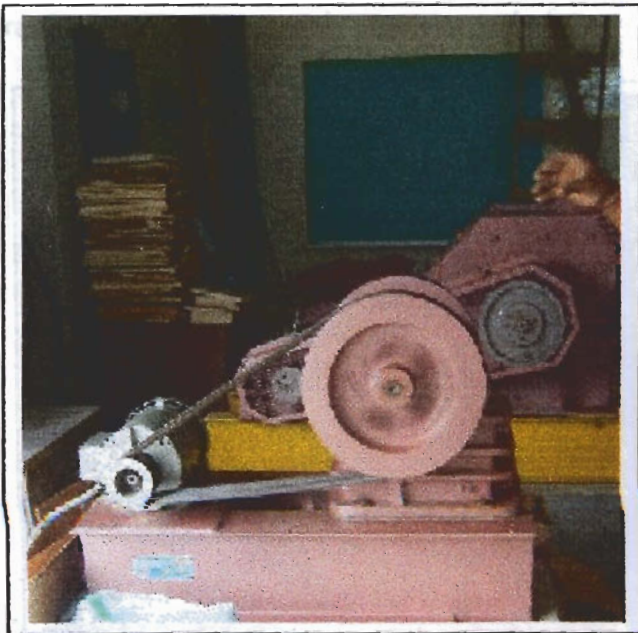


Foto 4.1.3 "Trituradora de quijadas"

La primera etapa de la trituración y molienda de esta roca se la realizó en el laboratorio de la FICT. Esta consistió en tomar la roca y colocarla en la trituradora de quijadas, (Foto 4.3).

Una vez que la roca fue triturada, se tomó este material para luego pasarlo por el molino de rodillos (Foto 4.4), con esto obtuvimos un material mucho mas pequeño, sin embargo todavia faltaba la segunda etapa.

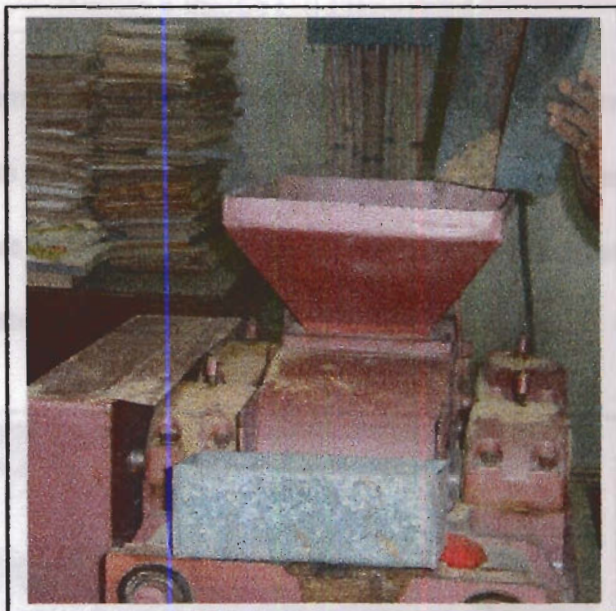


Foto 4.1.4 "Molino de rodillos"

Una vez que la roca fue triturada y molida, obtuvimos un material todavia de gran tamaño como se puede apreciar en la foto.



Foto 4.1.5 "Material triturado"

Luego se recolectó este material en sacos y fue transportado al Centro Técnico del Hormigón para seguir con el proceso de pulverización.

4.1.3. Molienda

Una vez en el Centro Técnico se tomaron las medidas del tambor del molino para calcular la cantidad de material que se podrían triturar en una sola molienda. Una vez determinada la cantidad de zeolita que se trituraría, se colocó el material en bandejas para secarlo en el horno a 100C durante 24 horas.



Foto 4.1.6 "Molino de bolas" Mineral Admixture in Portland

proceso de estas pruebas fue encontrar todas aquellas

zeolita para conocer más a fondo el material a

Ahora ya con el material seco, se procedió a poner el material en el molino de bolas para empezar el proceso de pulverización. La zeolita estuvo en el molino hasta que alcanzó la finura deseada.

estas estas pruebas de laboratorio

de



Foto 4.1.7 "Zeolita en el horno"

4.2. Caracterización

Para la caracterización de este material se realizaron diversas pruebas tomando en cuenta la norma ASTM C 311-98b "Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland - Cement Concrete". El propósito de estas pruebas fue encontrar todas aquellas características importantes de la zeolita para conocer mas a fondo el material a utilizar en la preparación de nuestro cemento. Algunas de las pruebas que se realizaron son el análisis químico, pruebas para hallar la finura del material, su densidad, su superficie específica, entre otras. Todas estas pruebas que hemos mencionados, así como sus resultados se mostraran a continuación con mas detalle.

4.2.1. Retenido # 325

La norma *C430 de la ASTM* establece el ensayo del retenido en el tamiz #325 como uno de los métodos que determina la finura en base al material retenido en dicho tamiz.

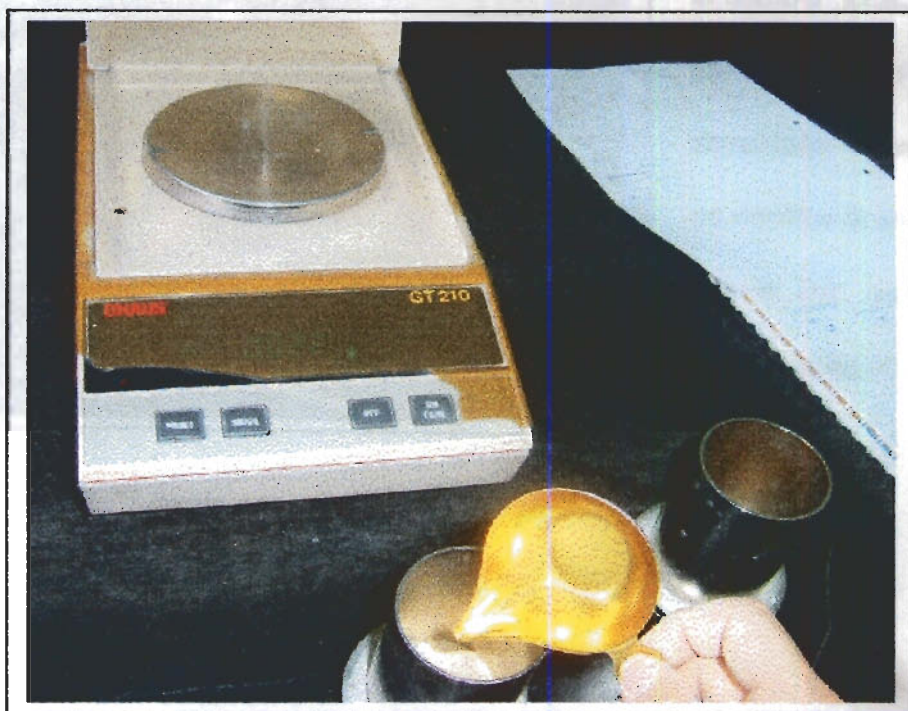
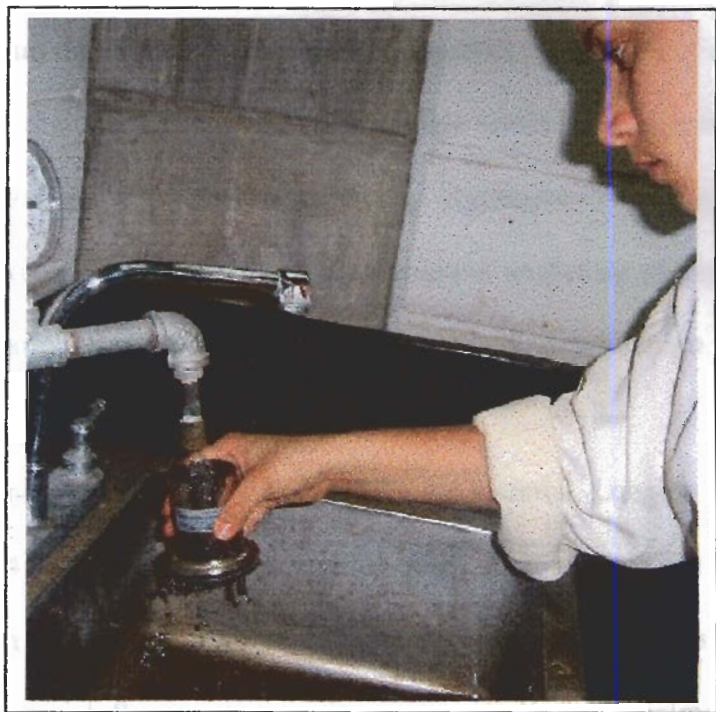


Foto 4.2.1 "Prueba de finura"

El primer paso es pesar una muestra de 1g de zeolita en la balanza de precisión, y lo colocamos en el tamiz # 325 que debe estar limpio y seco. Luego este material es lavado con agua a una presión de 10 ± 0.5 psi, durante 1 minuto lavando el material con un movimiento circular.



Una vez que este material ha completado su ciclo de lavado, es llevado al horno a secar. Tomando en cuenta no calentar demasiado el tamiz para no debilitar la soldadura ya que si esto ocurre, parte del material puede perderse.

Foto 4.2.2. "Lavado a presión de 10 ± 0.5 psi"

Ahora el material ya está seco y con una brocha se obtiene el material retenido en el tamiz y lo pesamos en la balanza de precisión donde se determinará la masa retenida por el tamiz.

En este caso nos dio una lectura de 15%. Con este resultado nos dirigimos a la tabla donde están los requerimientos físicos de la especificación *C618-01* para poder revisar que los valores efectivamente están dentro de la norma.

4.2.2. Densidad

Para determinar la densidad del material es necesario realizar las pruebas de acuerdo al método **C128-01** “*Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*”. La densidad de este material se la expresa en la masa de este material por unidad de volumen de partículas de agregado.

Para obtener este dato se utilizó el método gravimétrico.

Para esto necesitamos pesar 1Kg del material. Luego este se sumerge en agua durante 24 ± 4 h para que se llenen los poros. Una vez que el material esta listo, se lo coloca en un recipiente no absorbente para desechar el agua que no fue absorbida por el material. Se toma un picnómetro y se lo llena parcialmente con agua. En el mismo se introducen 500 ± 10 g del material ya saturado, y se termina de llenar el recipiente aproximadamente al 90% de su capacidad. Luego el picnómetro es agitado manualmente de 15 a 20 min. para eliminar todas las burbujas de aire dentro del recipiente. Una vez que las burbujas de aire han sido removidas, se ajusta la temperatura del picnómetro a 23 ± 2 C y se toma el valor total de la masa del picnómetro, la muestra y el agua.

El material es removido del picnómetro para secar al horno a 100 ± 5 C y se deja enfriar al medio ambiente durante $1 \pm \frac{1}{2}$ h para luego determinar su masa. Finalmente con todos los datos, utilizamos la fórmula para calcular la densidad de este material.

Donde:

A = masa de la muestra seca, g

B = masa del picnómetro lleno de agua hasta su calibración, g

C = masa del picnómetro lleno de la muestra y agua hasta su calibración, g

S = masa de la muestra saturada superficialmente seca, g

$$D = 997,5 \times \frac{A}{(B+S-C)}$$

$$D = 2423 \text{ Kg/m}^3$$



CIB-ESPOL

4.2.3. Análisis químico

Para realizar el análisis químico se tomó una muestra del material ya molido. Esta muestra de zeolita fue enviada al laboratorio de la Cemento Nacional Industrias Rocacem S.A. donde se utilizó la técnica de espectrometría de rayos X. para analizar la muestra.



CIB-ESPOL

Una vez terminada la prueba, se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla

4.2.3.1. a continuación.

Industrias Rocacem S. A.			
REPORTE DE ANALISIS			
MUESTRA		ZEOLITA	
FECHA		11/03/03	
P. Fuego	%	10,00	
SiO₂	%	63,10	
Al₂O₃	%	14,30	
Fe₂O₃	%	5,70	
CaO	%	2,40	
MgO	%	1,77	
SO₃	%	0,01	
K₂O	%	0,97	
Na₂O	%	1,31	
Total	%	99,40	
Res. Insoluble	%	52,00	

Tabla 4.2.3.1 "Análisis químico de la zeolita"

4.2.4. Superficie específica, Blaine ASTM C204-96a

La superficie específica o Blaine como se la conoce, consiste en la utilización del instrumento blaine para definir la cantidad de aire que pasa por una cama preparada de cemento, donde el tamaño y la cantidad de los poros del material esta en función del tamaño de las partículas, lo que nos permite determinar la cantidad de aire que fluye por la misma. La norma **ASTM C204-96^a** "Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus" establece el método de ensayo para determinar la finura del material en términos de la superficie específica dada en cm^2/g o m^2/kg mediante el permeabilímetro de blaine.

La superficie específica es el área superficial de todas las partículas de una masa unitaria de cemento determinada por permeametría. La finura, por otro lado, es el valor numérico que expresa el tamaño de las partículas del material y se puede obtener por la medición de la superficie específica, por los valores límites obtenidos por tamizado húmedo, entre otros. Estos dos datos se relacionan entre sí, a mayor finura, mayor será la superficie específica ya que la porosidad está dada por volumen de vacíos para volumen total. A continuación se detallará el método a seguir.

Para este ensayo primero debemos calcular el volumen de vacío de la cama de cemento o volumen óptimo. Para esto tomamos dos discos de papel filtro y lo colocamos en la celda asegurándonos que esté bien asentada. Luego llenamos esta celda con mercurio, y con varios movimientos sacamos cualquier burbuja de aire que pueda existir, luego enrasamos. Hecho esto, se pesa la cantidad de mercurio.

Ahora es necesario tomar una muestra de 2.8g de cemento para colocarlos en la celda. En este caso debido a que la muestra de cemento puzolánico es menos densa que el cemento portland, este material ocupa mayor volumen, por lo que se utilizaron menos gramos. Para esto se debe colocar nuevos discos de papel filtro en la celda, pero esta vez un disco en la parte inferior de la muestra y el otro en la parte superior de la misma.

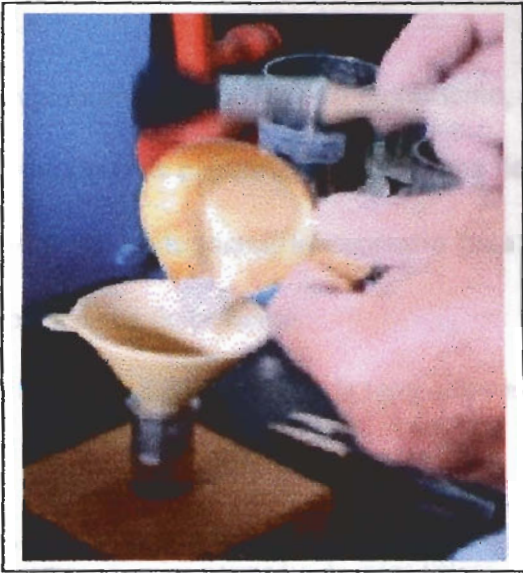


Foto 4.2.4.1 "Material dentro de la celda"

Una vez colocado el primer disco de papel filtro se coloca la muestra de cemento, se compacta para formar la cama de cemento y se sella presionando y rotando. Luego se llena la celda con mercurio y se enrasa nuevamente.

Finalmente se toma ese mercurio y se lo pesa. Con estos valores anotados y las fórmulas correspondientes podemos obtener el volumen de vacío de la cama de cemento como se muestra a continuación.

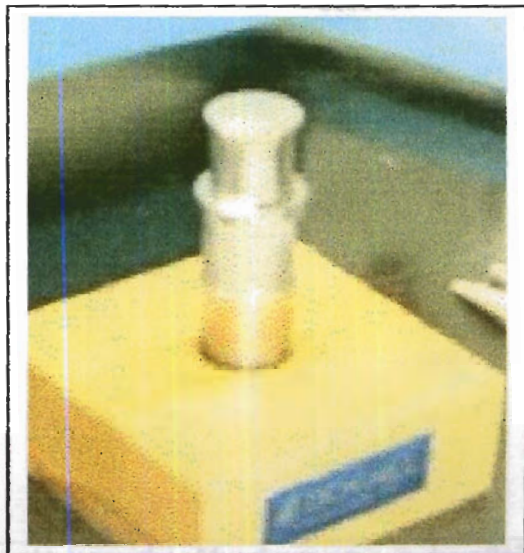


Foto 4.2.4.2 "Celda sellada"

Para calcular el volumen vacío de la cama de cemento para el ensayo de Blaine utilizamos la siguiente fórmula:

$$V = \frac{(W_a - W_b)}{D}$$

donde:

V = volumen vacío de la cama de cemento, cm^3

W_a = gramos de mercurio necesario para llenar la celda.

W_b = gramos de mercurio necesario para completar la porción de la celda que no ocupa la cama de cemento.

D = densidad del mercurio a la temperatura del momento del ensayo, Mg/m^3 .

Nota: Esta prueba se debe realizar dos veces con diferentes camas compactadas de cemento para tomar un valor promedio de estos valores.

$$W = d \cdot V (1 - e)$$

$$V = \frac{(W_a - W_b)}{D}$$

$$W_a = 111,077 \text{ g}$$

$$T = 24,5 \text{ C}$$

$$D = 13,54 \text{ Mg/m}^3$$

$$d = 2423 \text{ Kg/m}^3$$

W	Wb	Wb prom	Tiempo	t prom	V	e	e³*T
1,7	87,012	87,012	36,6	36,6	1,777	0,9996	6,046
1,8	86,517	86,529	39,6				
1,8	86,586		41,4				
1,8	86,483		52,2	44,4	1,813	0,9996	6,659
1,9	86,301	86,416	70,0				
1,9	86,531		86,6	78,3	1,821	0,9996	8,843
2,0	86,192	86,203	141,0				
2,0	86,214		136,0	138,5	1,837	0,9996	11,761

Tabla 4.2.4.1. "Resultados de la prueba de Blaine"

Una vez obtenido este valor, se procede a calcular el peso requerido de la muestra

$$W = \rho * V(1 - \varepsilon)$$

donde:

W = gramos de muestra requeridos

ρ = densidad del material

V = volumen vacío de la cama de cemento

ε = porosidad deseada de la cama de cemento (0.5 ± 0.005)

A seguir se detallarán los procedimientos

Para realizar la prueba. Lo primero es

poner la celda en la parte superior del manómetro asegurándonos que este bien fija. Lentamente se hace succión para

subir el nivel del líquido en el manómetro hasta que llegue a la segunda marca. El

tiempo se mide desde el enrasc hasta que el menisco de la burbuja llegue abajo.

Este intervalo de tiempo debe ser tomado en segundos y la temperatura en grados

centígrados.

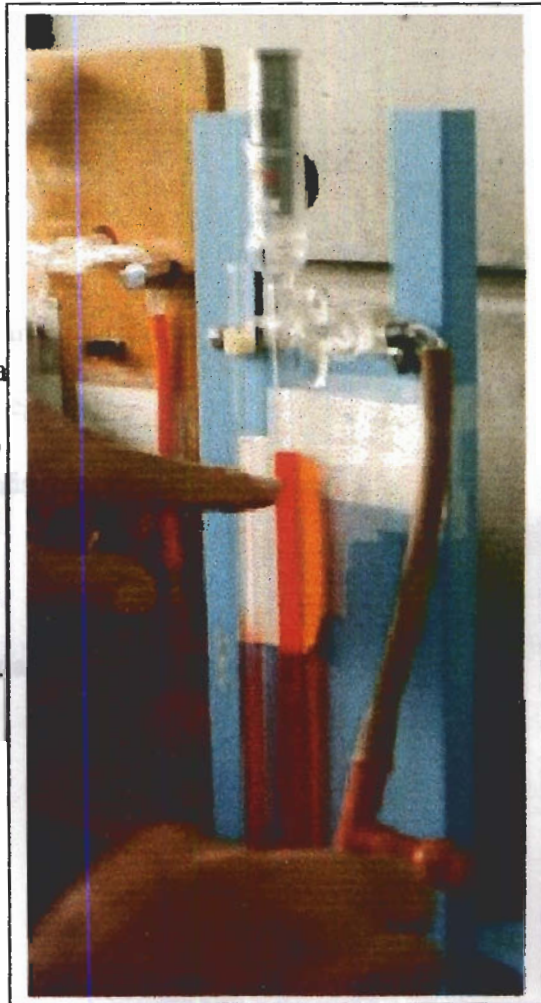


Foto 4.2.4.3 "Instrumento Blaine"

Con estos datos se procede al cálculo de la superficie específica, para esto es necesario el uso de las fórmulas y de algunas tablas que podemos encontrar en la misma norma y que se mostrarán a continuación:

Cálculo de la superficie específica de la muestra, m^2/kg ,

$$S = \frac{S_s * \rho_s * (b_s - \epsilon_s) * \sqrt{\epsilon^3} * \sqrt{T}}{\rho * (b - \epsilon) * \sqrt{\epsilon} * \sqrt{T_s}}$$

$$S = \frac{S_s * \rho_s * (b_s - \epsilon_s) * \sqrt{n_s} * \sqrt{\epsilon^3} * \sqrt{T}}{\rho * (b - \epsilon) * \sqrt{\epsilon} * \sqrt{T_s} * \sqrt{n}}$$

donde:

S = superficie específica del material

T = intervalo de tiempo en segundos

T_s = intervalo de tiempo de la muestra standard

n = viscosidad del aire, micropascal por segundo

n_s = viscosidad del aire de la muestra standard, micropascal por segundo

ϵ = porosidad de la cama de la muestra

ϵ_s = porosidad de la cama de la muestra standard

ρ = densidad del material

ρ_s = densidad de la muestra standard

b = constante específica para la prueba

$b_s = 0,9$ que es la constante standard

$$\begin{aligned}
 S_s/(T_s)^{1/2} &= 49,3 \\
 E_s &= 0,5 \\
 D_s &= 3,15 \\
 B_s &= 0,9 \\
 B &= 0,6254 \\
 D &= 2,423 \text{ G/cm}^3
 \end{aligned}$$

T s	W g	$(e^3 \cdot t)^{1/2}$	e Porosidad	S cm ² /g
39,6	1,80	2,8551	0,5904	5923
41,4	1,80	2,9107	0,5893	5845
70,0	1,90	3,6144	0,5715	4859
86,6	1,90	3,9778	0,5674	4977
141,0	2,00	4,8551	0,5509	4724
136,0	2,00	4,7631	0,5505	4610
370,2	2,15	7,1952	0,5191	4906
629,0	2,25	8,7887	0,4970	4965
1068,0	2,35	10,7395	0,4762	5220
TOTAL				4840

Tabla 4.2.4.2. "Datos para el cálculo de la superficie específica"

Finalmente se obtuvo una superficie específica de 4840 cm²/g

Nota: Es importante mencionar que para realizar el promedio y obtener la superficie específica los valores extremos fueron descartados.

4.2.5. Determinación del factor b

Para la determinación de este factor se recomienda tomar no menos de 3 datos en cada muestra del material. Este factor es utilizado para los cálculos de finura en materiales que no sea el cemento portland. A continuación se mostraran las gráficas y fórmulas para el cálculo de este factor.

donde:

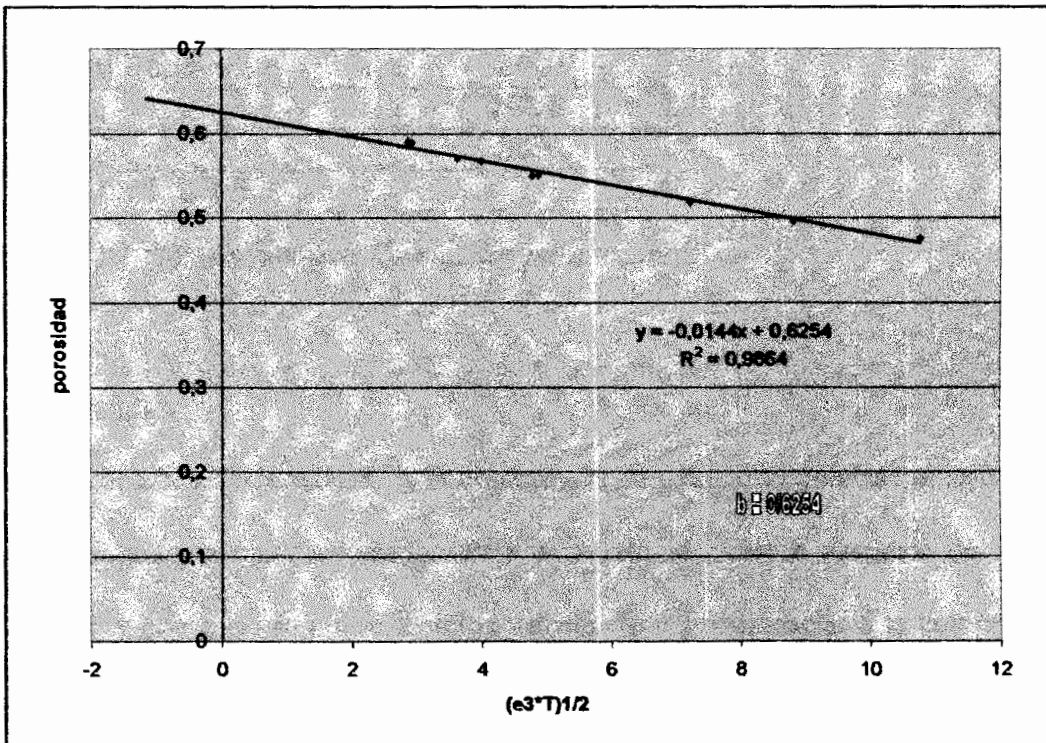
W = gramos de la muestra

T = intervalos de tiempo medido en segundos

e = porosidad de la prueba

W g	T s	e Porosidad	$(e^3 \cdot T)^{1/2}$
1,80	39,6	0,5904	2,8551
1,80	41,4	0,5893	2,9107
1,90	70,0	0,5715	3,6144
1,90	86,6	0,5674	3,9778
2,00	141,0	0,5509	4,8551
2,00	136,0	0,5505	4,7631
2,15	370,2	0,5191	7,1952
2,25	629,0	0,4970	8,7887
2,35	1068,0	0,4762	10,7395

Tabla 4.2.5. "Datos para la gráfica del factor b "



4.2.5. "Gráfica para obtener factor b "

4.3. Resistencia a la compresión simple

Las muestras para esta prueba se prepararon de acuerdo a la norma **ASTM C109/C109 M-99** “*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*”, la misma que se detallara mas adelante.

Para este ensayo existen dos tipos de dosificaciones, para 6 y 9 cubos. En este caso se realizaron varias mezclas con la dosificación de 9 cubos para tener mas datos de nuestra muestra. Una de las mezclas se la denominó **patrón**, ya que es la que contenía cemento portland, y la otra mezcla se la denominó **muestra** ya que a esta mezcla se le agregó un 20% de zeolita al valor de la masa del patrón. Las dosificaciones de las mismas se muestran en la siguiente tabla (Tabla 4.3.1)

MATERIALES	CANTIDAD
Cemento Portland, g	740
Arena, g	2035
Agua, ml	359
Fluidez de 110 + 5	

Tabla 4.3.1 “*Dosificación de las mezclas para 9 cubos*”

Dosificaciones

Para las pruebas de resistencia a la compresión se realizaron diversas muestras para tener resultados a mayores edades. Para este caso se hicieron muestras de 9 cubos cada uno y con estas se obtuvieron los valores de sus resistencias a la compresión a las edades de 1 día, 3, 7, 14, 28, y 90 días respectivamente. A continuación se presentan las tablas con las dosificaciones correspondientes.

9 CUBOS**PATRON P2**

Materiales	Cantidad
Cemento Portland, g	740
Arena, g	2035
Agua, ml para una fluidez de 110 ± 5	359
A/C	0,485
Fluidez	105

MUESTRA M 2

Materiales	Cantidad
Cemento Portland, g	592
Zeolita, g	148
Arena, g	2035
Agua, ml para una fluidez de 110 ± 5	363
A/C	0,613
Fluidez	101

PATRON P 3

Materiales	Cantidad
Cemento Portland, g	740
Arena, g	2035
Agua, ml para una fluidez de 110 ± 5	359
A/C	0,485
Fluidez	100

MUESTRA M 3

Materiales	Cantidad
Cemento Portland, g	592
Zeolita, g	148
Arena, g	2035
Agua, ml para una fluidez de 110 ± 5	363
A/C	0,613
Fluidez	105,2

Tabla 4.3.2. "Dosificación muestra y patrón para 9 cubos"

Preparación de la pasta

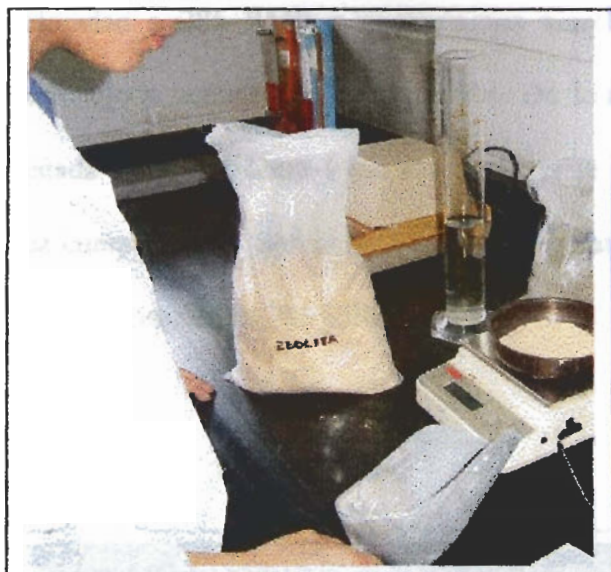


Foto 4.3.1. "Peso de materiales para la pasta"

Ya que tenemos las tablas con las dosificaciones, se debe pesar la cantidad requerida de agua, zeolita, cemento y arena. Una vez que se han pesado cada uno de los materiales, se procede a la preparación de la pasta.

Se coloca en la mezcladora la cantidad de agua requerida, la misma que debe estar a una temperatura de 23 ± 2 C. Luego se le agrega el cemento, que ha sido pasado previamente por el tamiz 850um (No 20) y se deja durante 30s para permitir la absorción del agua. Se mezcla a velocidad lenta de 140 RPM por 30s y durante los siguientes

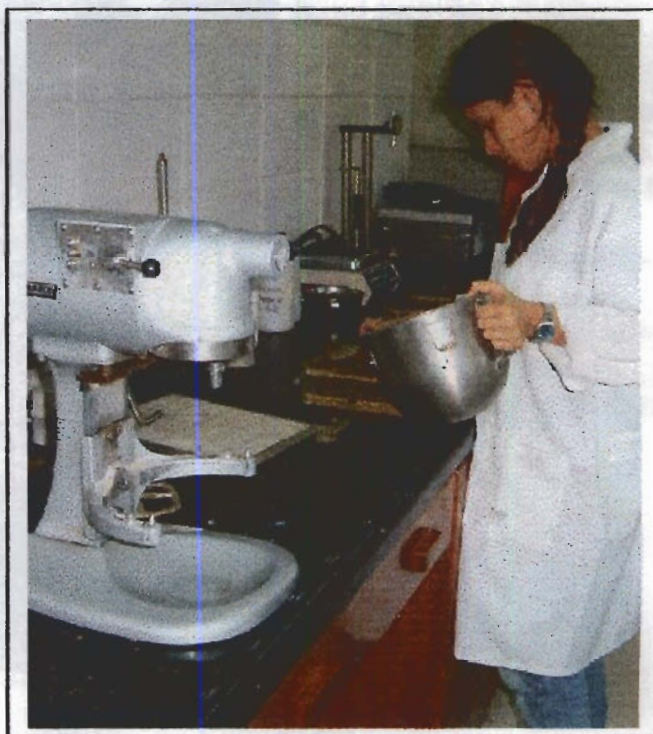
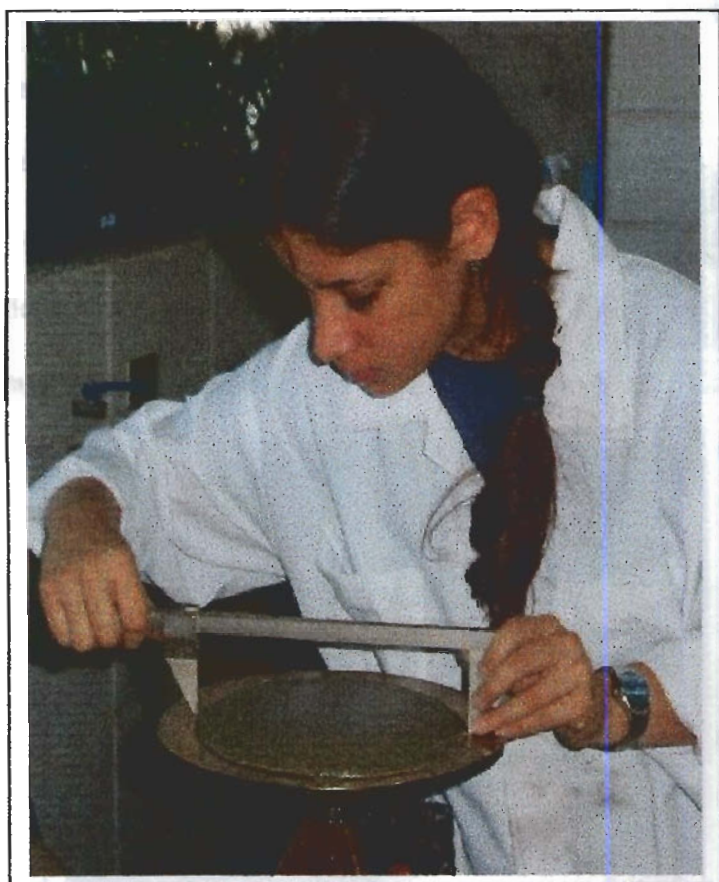


Foto 4.3.2. "Preparación de cubitos"

30s mas se le incorpora la arena. Luego se para la mezcladora para cambiar de velocidad a 285 RMP y continuamos mezclando durante 30s. Luego se para la mezcladora nuevamente durante 90s. De los cuales en 15s se arrastra la mezcla pegada en el recipiente y los 75s restantes se tapa la masa y se la deja reposar. Una vez cumplido este tiempo se vuelve a mezclar la masa por ultima vez durante 60s a velocidad rápida de 285 RPM.

Determinación del flujo (mesa)



La primera etapa debe realizarse en 60s, y esta consiste en llenar el cono hasta la mitad y compactarlo 20 veces, luego se llena el cono por completo y se compacta 20 veces más. Una vez que el cono esta lleno se enrasa la parte superior.

Foto 4.3.3. "Mesa de Flujo"

Al momento de retirar el cono, deben haber pasado los 60s. Ahora se hace girar la palanca de la mesa de flujo 25 veces en 15s. Entonces podemos medir la fluidez, tal como se muestra en la foto, y esta debe medir 110 ± 5 .

Confección de cubos

Tomamos el material de la mesa de flujo con el resto del mortero durante 15s a una velocidad 285 RPM. Una vez que los moldes han sido engrasados, se los llena hasta la mitad para compactar cada cubo 32 veces. Luego se los llenan totalmente compactando nuevamente.

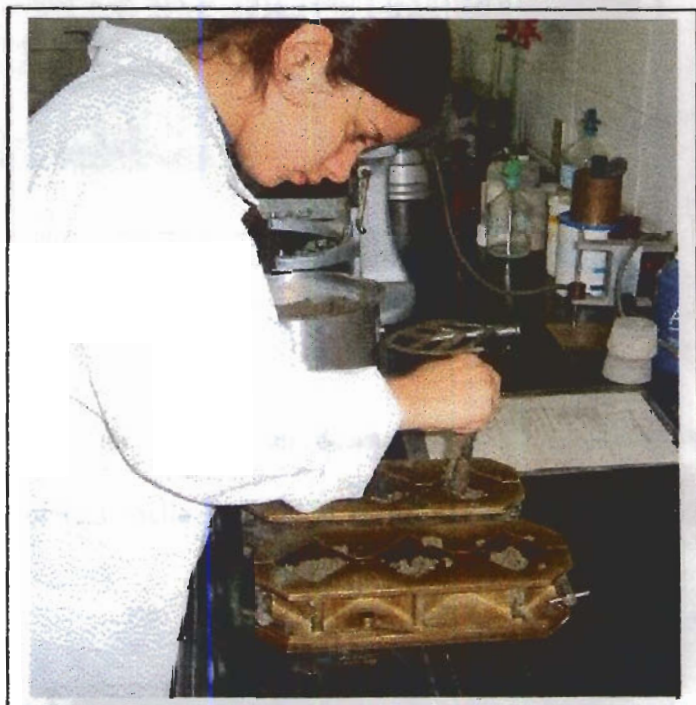


Foto 4.3.4. "Compactación de cubos"



Foto 4.3.5. "Cámara Húmeda"

Una vez compactados se debe engrasar la capa superior y son llevados a la cámara húmeda durante 24 horas.

Luego estos cubos son desmoldados y enumerados para guardarlos en las piscinas de agua hasta el tiempo de su rotura.



Foto 4.3.6. "Cubos en la piscina"

Curado

Es importante mencionar que los cubos deben ser desmoldados y colocados en recipientes de metal cubiertos por una toalla húmeda al momento de su rotura para que no pierdan humedad.

Tablas y resultados

Estos cubos fueron sometidos a esfuerzos a la compresión para obtener su resistencia a diferentes edades, utilizando una prensa.

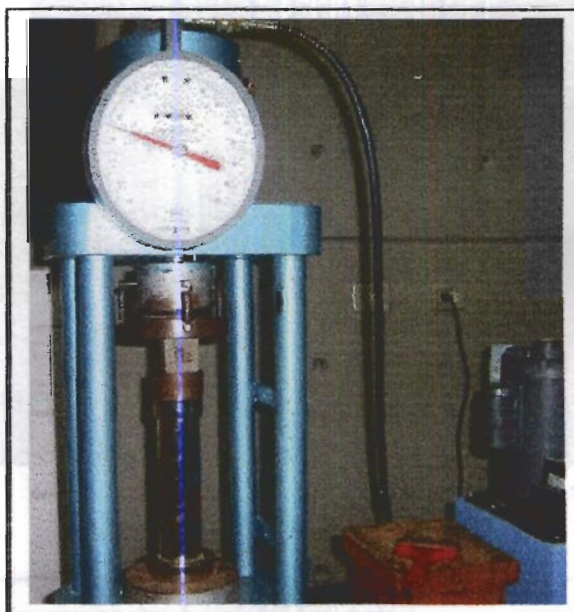
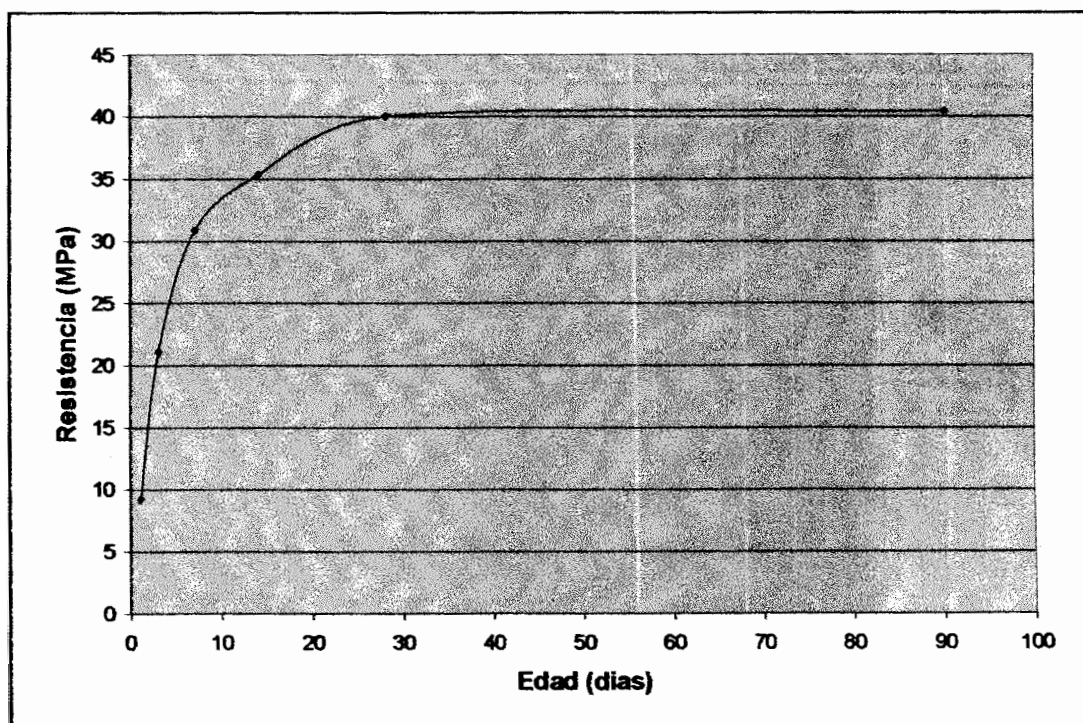


Foto 4.3.7. "Rotura de cubitos en la prensa"

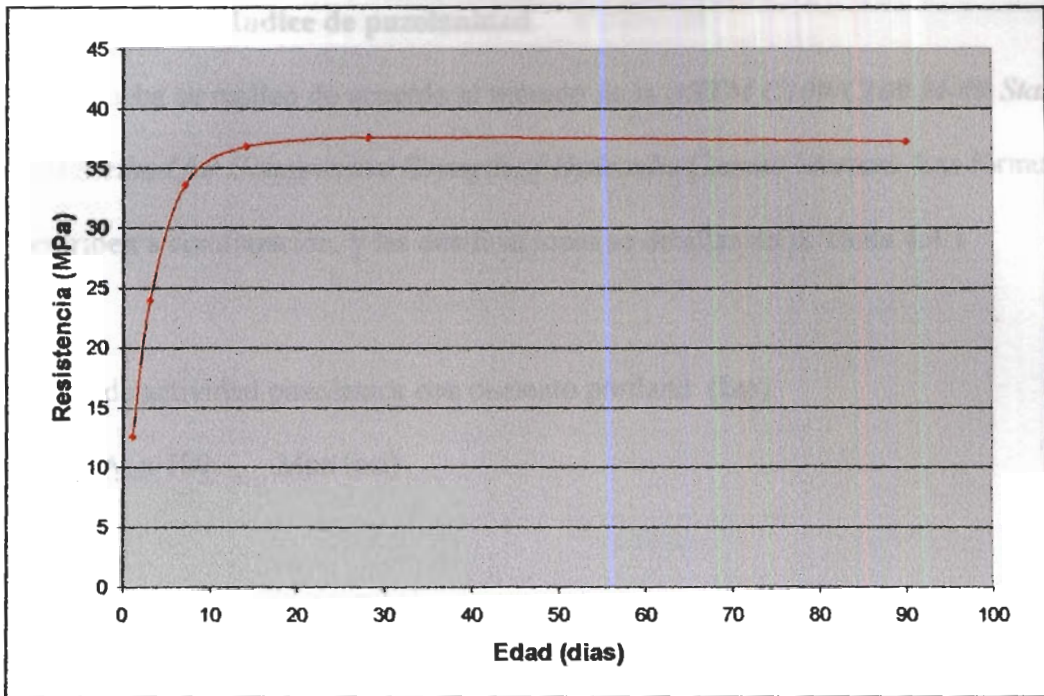
A continuación se mostrarán las tablas con las resistencias a la compresión simple a las diferentes edades con sus gráficas respectivas.

T (días)	Resistencias (Mpa)	
	Muestra	Patron
1	9,26	12,66
3	21,14	23,99
7	30,87	33,6
14	35,38	36,84
28	40,06	37,61
90	40,48	37,27

Tabla 4.3.3. "Resistencias a la compresión simple"

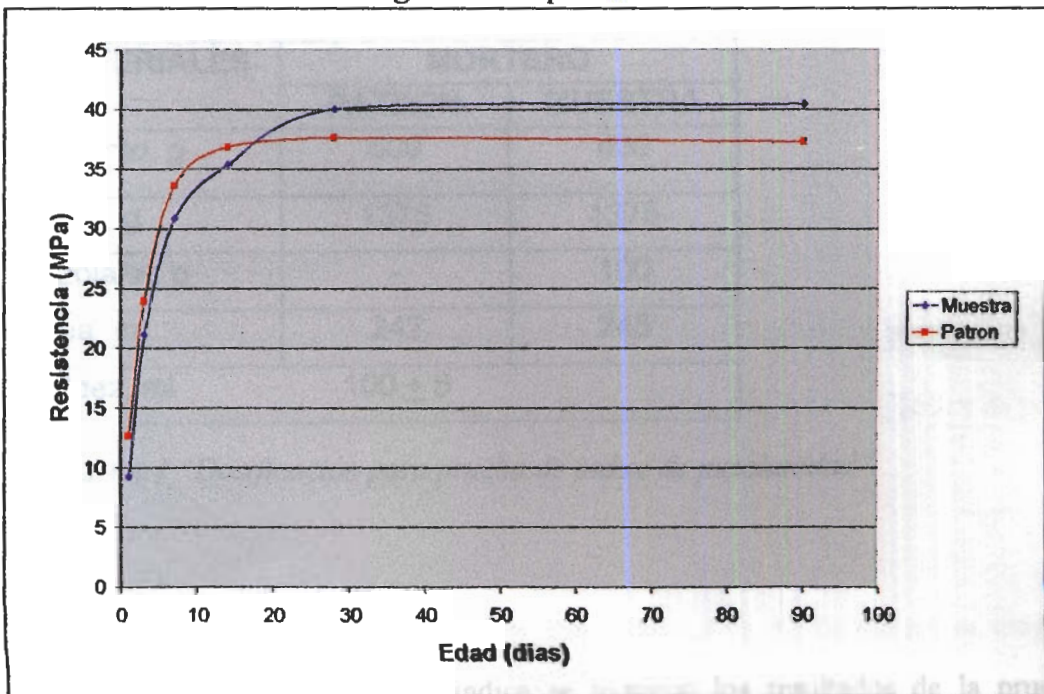


4.3.1. "Gráfica de resistencia a la compresión de la muestra"



4.3.2. "Gráfica de resistencia a la compresión del patrón"

A continuación se mostrará la gráfica comparativa de estas dos resistencias



4.3.3. "Gráfica comparativa de resistencias muestra/patrón"

4.4. Pruebas de Índice de puzolanidad

Esta prueba se realizó de acuerdo al método de la *ASTM C109/C109 M-99 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Las fórmulas se describen a continuación, y las dosificaciones se detallan en la Tabla 4.4.1

Índice de actividad puzolánica con cemento portland (Iap)

$$Iap = \frac{A}{B} \times 100 \quad \text{Mpa (psi)}$$

donde:

A= Resistencia a la compresión de cubos del mortero de ensayo (puzolana+cemento)

B= Resistencia a la compresión de los cubos del mortero patrón (cemento)

MATERIALES	MORTERO	
	PATRON	MUESTRA
Cemento, g	500	400
Arena, g	1375	1375
Puzolana, g	-	100
Agua, ml	242	245
Fluidez, ml	100 ± 5	

Tabla 4.4.1 “Dosificación para prueba de índice de puzolanidad”

Para la determinación de este índice se tomaron los resultados de la prueba de compresión simple a las diferentes edades y se obtuvieron los siguientes resultados:

Días		Resistencia	Indice de
muestra/patrón		Mpa	Puzolanidad %
M	1	9,26	73,15
P	1	12,66	
M	3	21,14	88,12
P	3	23,99	
M	7	30,87	91,86
P	7	33,60	
M	14	35,38	96,03
P	14	36,84	
M	28	40,06	106,50
P	28	37,61	
M	90	40,48	108,61
P	90	37,27	

Tabla 4.4.2 "Índices de puzolanidad"

Como se muestra en la tabla, ésta puzolana supera el índice requerido de puzolanidad del 75% a los 7 y 28 días, según la norma ASTM C618-03.

4.5. Contenido de aire atrapado en mortero

- Incorporación de Aire

Utilizando cemento portland para el patrón y cemento portland puzolánico para la muestra, se siguen los requerimientos en la especificación ASTM C150, y se preparan las muestras de acuerdo al método ASTM C185.

Las cantidades y proporciones de los materiales que se deben utilizar se muestran a continuación en la Tabla 4.5.1

MATERIALES	CANTIDAD
Cemento Portland, g	300
Zeolita, g	75
Arena, g	1125
Agua, ml para una fluidez de 80 a 95	Y
Vinsol, ml para contenido de aire de $18 \pm 3 \%$	Z

Tabla 4.5.1 “Dosificaciones para prueba de aire atrapado en mortero”

Ya que el vinsol utilizado debe ser diluido en el agua, esa cantidad de vinsol debe considerarse como parte de la cantidad de agua a utilizar. Para determinar la cantidad de Vinsol Z como un % de cemento para obtener un contenido de aire de $18 \pm 3 \%$, será necesario interpolar los dos valores. Para esto tomaremos dos muestras:

- a. contenido de aire del 15 a 18%.
- b. contenido de aire del 18 a 21%.

Para calcular el contenido de aire debe conocerse la sgte. simbología:

W_a = peso por unidad de volumen del mortero

W = peso especificado de 400ml

W_c = peso teórico por unidad de volumen, calculado con las cantidades de materiales utilizados en la muestra sin incorporar aire y sus respectivas densidades.

P = porcentaje de agua (mezclado con vinsol), con respecto al cemento.

D = densidad de la zeolita

Dosificaciones

MUESTRA

Materiales	Cantidad
Cemento Portland, g	300
Zeolita, g	75
Arena, g	1125
Agua, ml para una fluidez de 80 a 95	220
A/C	0,59
Fluidez	85,80
Vinsol, ml para cont de aire de $18 \pm 3\%$	856,50
% agua respecto al cemento P =	58,60

Materiales	Densidad g/cm ³	Masa g	Volumen ml
Cemento Pórtland	2,90	300	103
Zeolita	2,42	75	31
Arena	2,70	1125	417
Agua	1,00	220	220
Total		1720	771

PATRON

Materiales	Cantidad
Cemento Portland, g	375
Arena, g	1125
Agua, ml para una fluidez de 80 a 95	220
A/C	0,59
Fluidez	93,00
Vinsol, ml para cont de aire de $18 \pm 3\%$	854,50
% agua respecto al cemento P =	58,60

Materiales	Densidad g/cm ³	Masa g	Volumen ml
Cemento Pórtland	2,90	375	129
Arena	2,70	1125	417
Agua	1,00	220	220
Total		1720	766

Tabla 4.5.2 "Dosificación muestra/patrón para obtención del contenido de aire"

La siguiente tabla muestra los resultados del contenido de aire atrapado en mortero

	W ml	P %	Wa Kg/m ³	Wc Kg/m ³	% aire
Muestra	856,5	58,6	2140	2231	7,5
Patrón	854,5	58,6	2135	2245	7,7

Tabla 4.5.3. "Porcentajes de contenido de aire en el mortero"

El resultado de la muestra indica que la zeolita no tiene incidencia. Así como el resultado del patrón nos indica que cumple con la norma ASTM para cemento tipo I que debe ser < 12%.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 5

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar ésta investigación se ha podido comprobar la eficiencia de la zeolita al ser utilizada como material puzolánico al reemplazar parcialmente al cemento portland empleado en este trabajo.

El principal logro fue la comprobación del índice de actividad puzolánica, ya que el reemplazo del 20% de este material por cemento portland cumple con el requerimiento que establece la especificación ASTM C618-03 a los 7 y 28 días de edad. Las muestras estudiadas superaron el índice de 75% que dicha especificación requiere para el uso de puzolanas naturales en hormigón. Los valores encontrados al usar nuestra puzolana fueron de 91,86% a los 7 días y 106,5% a los 28 días. De la misma manera los resultados obtenidos superan los requerimientos especificados para puzolanas en la elaboración de cementos compuestos según la especificación ASTM C595-03 (Tabla 3). Se pudo comprobar también que el índice de actividad puzolánica se incrementó en las muestras de reemplazo que permanecieron curadas permanentemente; y determinar un incremento del 8% a los 90 días de edad.

Tomando en cuenta las especificaciones de la norma de la ASTM C618-03 para el uso de puzolanas naturales como adición mineral, se pudo comprobar mediante el análisis químico de la zeolita, que este mineral cumple con dicha norma. Ésta norma

especifica que el contenido mínimo de la suma de Oxido de Silicio (SiO_2), Oxido de Aluminio (Al_2O_3) y Oxido Férrico (Fe_2O_3) debe ser del 70%, y la zeolita utilizada en los ensayos obtuvo un 83,1%. Así también, indica que el contenido máximo de Trioxido de Azufre (SO_3) debe ser de 4%, y nuestra zeolita cumple este requerimiento obteniendo un 0,01%. Finalmente otra característica a cumplir debía ser el porcentaje de la pérdida al fuego con un máximo del 10% según la norma, y la zeolita obtuvo un 10% en el análisis, que está dentro del porcentaje permitido.

El contenido de aire atrapado en mortero es también un dato importante. Los resultados de la muestra con un 7,5% de aire, indican que la zeolita no tiene incidencia en el porcentaje de aire. Así como el resultado de 7,7% que obtuvo el patrón, nos muestra que cumple con la norma ASTM C618-03 (Tabla 3), para cemento tipo I que indica que este porcentaje debe ser $< 20\%$.

La trabajabilidad es también una característica importante, y estos morteros con adición de zeolita la tienen. Es importante recordar que debido a que la adición puzolánica retarda la ganancia temprana de resistencia, la fluencia específica de cementos puzolánicos es mayor que la de los Portland. También es sensato pensar que el hecho de que la zeolita es silíceo, esto le proporcione mejoras a las características del cemento portland en cuanto a su durabilidad.

Con el uso del cemento puzolánico el constructor encontrará que obtiene varias ventajas al utilizar este material, tales como similares resistencias a la compresión, gran manejabilidad de las mezclas frescas, e incluso una mayor resistencia después de los 28 días de edad.

Las zeolitas ya han demostrado su idoneidad y competitividad en el campo de la construcción. Por esto es importante ver a éste mineral como algo más que una simple adición, debemos verlo como un recurso valioso para el desarrollo no solo de las construcciones, sino de otras ramas como en la agricultura, por mencionar una.

Hablar de los costos para aprovechar este recurso es también importante. Por mencionar uno de los rubros más importantes, tenemos el transporte, ya que la puzolana que se utiliza en estos momentos en la planta local, proviene desde Latacunga. Considerando que la fuente de extracción de zeolita estaría más cerca de la fábrica de cemento, ya que los yacimientos se encuentran en el campus La Prosperina de la ESPOL, al utilizar esta zeolita se acortaría la distancia y con esto los costos.

Existen otros países que ya están aprovechando las bondades de este mineral, y que cuentan con grandes producciones de zeolita. Países como Cuba, China y Japón utilizan la zeolita para aplicaciones en la construcción mayormente.

En nuestro país se ha considerado el uso de la zeolita en otras ramas, pero ahora es el momento de canalizar este recurso hacia la rama de la construcción. Actualmente en el Campus La Prosperina, se están realizando trabajos de construcción y excavación debido al proyecto del Parque Tecnológico ESPOL. Aprovechemos estos trabajos y estudios de suelos para la ubicación de yacimientos de zeolita en este campus, y la evaluación detallada de sus reservas. No pasemos por alto este mineral. Este es un valioso recurso, que si bien en nuestra ciudad no ha sido explotado aún, con el correcto aprovechamiento y el empleo racional del mismo, podríamos usar estas reservas y sacarle provecho a este mineral.

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

1. Dr Aurelio Mosquera Cedeno, “EL CEMENTO” Historia, Fabricación y Usos
2. Peter C. Hewlett, “LEAS Chemistry of Cement and Concrete” 4th Edition
3. Código ASTM C204 Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus
4. Código ASTM C109/C109M Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars
5. Código ASTM C311-98b Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete
6. Código ASTM C618-01 Coal Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for use as a mineral Admixture in Concrete
7. Código ASTM C185 Air Content of Hydraulic Cement Mortar
8. Código ASTM C128-01 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate
9. Código ASTM C305 Mechanical Mixing of Hydraulic Cement pastes and mortars of Plastic Consistency
10. Referencia 1 Peter C. Hewlett, “LEAS Chemistry of Cement and Concrete” 4th Edition (Pozzolan – Containing Cements), Pag 501
11. Referencia 2 Peter C. Hewlett, “LEAS Chemistry of Cement and Concrete” 4th Edition (Durability), Pag 569
12. Referencia 3 Peter C. Hewlett, “LEAS Chemistry of Cement and Concrete” 4th Edition (Pozzola and Pozzolanic Cements), Pag 514
13. Referencia 4 Peter C. Hewlett, “LEAS Chemistry of Cement and Concrete” 4th Edition (Pozzola and Pozzolanic Cements), Pag 515
14. Referencia 5 Peter C. Hewlett, “LEAS Chemistry of Cement and Concrete” 4th Edition (Pozzolan – Containing Cements), Pag 564, Table 10,41

15. Referencia 6 Peter C. Hewlett, “ LEAS Chemistry of Cement and Concrete ”

4th Edition (Pozzolan – Containing Cements), Pag 564, Table 10,42

16. Internet, páginas web:

http://www.ich.cl/biblioteca/biblioteca_preg_frec.htm

http://www.asocem.org.pe/mercado_de_cemento.htm

http://www.cbb.cl/man_ccm.htm

<http://www.ecosur.org/ecosurwebenglish/cp40.htm>