

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL  
CEMENTO TIPO I CON 5% DE ADITIVO ZEOLÍTICO  
PUZOLÁNICO ECUATORIANO, EN EL PROCESO DE  
CURADO EN AGUA.”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA MECÁNICA**

Presentada por:

Martha Karina Franco Fienco

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por ponerme en el sitio exacto, a mami Mirian, mami Betsy, a mis tíos por ser constantes en cariño y enseñanzas, a mis amigos por ser los mejores y al Ing. Juan Carlos Pindo por su invaluable ayuda en la realización de esta tesis.

## **DEDICATORIA**

AL ING. EDMUNDO  
VILLACIS (+) POR SU  
VALIOSA AMISTAD, A  
MI HIJO ARIEL POR  
SER MI INSPIRACIÓN  
DÍA A DÍA Y A MAMI  
BETSY POR NO  
PERDER LAS  
ESPERANZAS.

**TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

Ing. Francisco Andrade S.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Rodrigo Perugachi B.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
VOCAL

---

Ing. Juan Pindo M.  
VOCAL

**DECLARACIÓN EXPRESA**

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

---

Martha Karina Franco  
Fienco

**RESUMEN**

En esta investigación, se estudió la influencia que tiene la zeolita ecuatoriana como material puzolánico en la pasta de cemento a diferentes concentraciones (5, 10, 15, 20, 25%) y en varios tiempos de curado (7, 14, 21 y 28 días), todo esto referente a la resistencia a la compresión de probetas cúbicas de 50 mm de lado, las cuales fueron elaboradas desde la molienda de la piedra, mezcla de los componentes (zeolita, cemento tipo I y agua), moldeo y prueba de ensayo propiamente dicha.

Con estos datos obtenidos se hicieron gráficas esfuerzo-deformación para estudiar el comportamiento de la pasta de cemento en presencia de zeolita y, luego se modelaron con una curva teórica en el programa Matlab. Se analizaron estadísticamente los resultados de esfuerzos en el programa Statistica y se hizo la debida comparación entre los diferentes porcentajes con resultados de muestras de cemento tipo I a 0% de aditivo y de muestras con cemento Tipo IV (tipo comercial).

Al finalizar este análisis se llegó a la conclusión que al adicionar zeolita ecuatoriana a la pasta de cemento tipo I, existió un aumento en la resistencia a la compresión, llegando a un valor máximo cuando la pasta de cemento tuvo 15% de zeolita en su composición.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III

ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
INTRODUCCIÓN	

## CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES.....	2
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.2. Objetivos de la Tesis.....	3
1.3. Metodología usada para el desarrollo de la Tesis.....	3
1.4. Estructura de la Tesis .....	5

## CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. El cemento y sus propiedades.....	7
2.1.1. Generalidades.....	7
2.2. Aditivos usados en la industria cementera .....	17
2.2.1. Generalidades.....	17



2.2.2. Clasificación.....	17
2.3. Métodos de curado del cemento.....	20
2.3.1. Generalidades.....	20
2.3.2. Clasificación.....	20
2.3.3. Curado en Agua.....	21
2.4. Otras investigaciones realizadas.....	22

### CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA.....	26
3.1. Muestreo.....	26
3.2. Diseño experimental.....	26
3.2.1. Protocolo Experimental.....	27
3.2.2. Pruebas y ensayos.....	46
3.2.3. Simulación computacional.....	48

### CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
---	----

### CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
--	----

APÉNDICE

BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

A	Área
f	Fuerza
FRC	Concreto de fibra reforzada
g	Gramos
h	Horas
HPC	Alto rendimiento de la mezcla
Kg	Kilogramos
Lbf	Libras fuerza
min	Minutos
mm	Milímetros
MPa	Megapascales
NJDOT	Ministerio de Transporte de New Jersey
P	Presión
rpm	Revoluciones por minuto
μm	Micrómetros

## SIMBOLOGÍA

$\sigma$	Esfuerzo
$\sigma_{yo}$	Esfuerzo de fluencia
$\mu$	Media
$^{\circ}\text{C}$	Grado Celsius
$\text{CaO}$	Óxido de calcio
$\text{MgO}$	Óxido de magnesio
$\text{SiO}_2$	Dióxido de silicio
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminosilicato
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido férrico
$\text{CO}_3\text{Ca}$	Carbonato de calcio
$\text{NO}_3\text{H}$	Ácido nítrico
$\text{FH}$	Ácido fluorhídrico
$k_1$	Constante de la expresión de Knudsen
$k_2$	Constante de la expresión de Knudsen
$\varepsilon$	Deformación
$m$	Corrector plástico
$a$	Corrector plástico
$\mu$	Desplazamiento
$\%$	Porcentaje
$r$	Residual
$\mu^*$	Relación entre la fuerza trial y la constante del material.

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Metodología de Tesis.....	4
Figura 2.1 Esquema de fabricación por vía húmeda.....	11
Figura 2.2 Esquema de fabricación por vía seca.....	12
Figura 3.1 Molino de mandíbulas.....	29
Figura 3.2 Adición de zeolita al molino de mandíbulas.....	29
Figura 3.3 Granulometría de zeolita al salir de molino de mandíbulas.....	30
Figura 3.4 Material en balanza electrónica.....	30
Figura 3.5 Molino de rodillos.....	31
Figura 3.6 Adicionando zeolita en molino de rodillos.....	31
Figura 3.7 Granulometría del material al salir del molino de rodillos	32
Figura 3.8 Cuarteando el material.....	32
Figura 3.9 Tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo.....	33
Figura 3.10 Molino de discos.....	33
Figura 3.11 Agregando material al molino de discos.....	34
Figura 3.12 Segundo cuarteo del material.....	34
Figura 3.13 Tamices #50, 100, 200, 325 y fondo.....	35
Figura 3.14 Granulometría del material al salir del molino de discos	35
Figura 3.15 Molino de bolas.....	36
Figura 3.16 Tamices 325 y fondo.....	36
Figura 3.17 Zeolita con granulometría final 45 um.....	37
Figura 3.18 Preparación de moldes.....	38
Figura 3.19 Balanza electrónica encerada.....	39
Figura 3.20 Pesando materials.....	40
Figura 3.21 Homogeneizando cemento + zeolita en seco.....	41
Figura 3.22 Cemento + zeolita + agua en la mezcladora.....	41
Figura 3.23 Llenando los moldes con pasta.....	42
Figura 3.24 Compactando las probetas.....	43
Figura 3.25 Probetas reposando por unos minutos.....	43
Figura 3.26 Probetas cubiertas por un plástico.....	44

Figura 3.27	Desmoldando.....	45
Figura 3.28	Probetas sumergidas en agua.....	45
Figura 3.29	Calibrando equipo de ensayos.....	46
Figura 3.30	Probeta en equipo de ensayo universal.....	47
Figura 3.31	Probeta al finalizar el ensayo.....	48
Figura 3.32	Curva esfuerzo-deformación generada con el programa en Matlab (Teórico).....	55
Figura 4.1	Curva esfuerzo-deformación de muestras con 5% de zeolita al séptimo día de curado.....	62
Figura 4.2	Histograma 5% zeolita, día 21. Promedio del módulo de Young de las tres muestras.....	63
Figura 4.3	Gráfica de aproximación de la curva teórica a la experimental.....	65
Figura 4.4	Curva de medias de esfuerzos de ruptura con su respectivo intervalo de confianza, muestras 5% zeolita	68
Figura 4.5	Pantalla de programa statistica para analizar los datos con comparación de un control (Dunnett).....	70
Figura 4.6	Gráficas de medias de esfuerzos de ruptura con su respectivo intervalo de confianza, muestras al 0, 5, 10, 15, 20 y 25% de zeolita.....	74
Figura 4.7	Pantalla de programa Statistica para analizar los datos con rangos múltiples (Duncan).....	75
Figura 4.8	Medias de esfuerzos de ruptura con su respectivo de confianza para los diferentes días de curado de las muestras al tipo IV, 0, 5, 10, 15, 20 y 25% zeolita.....	77
Figura 4.9	Comparación de medias de esfuerzos de ruptura con su respectivo intervalo de confianza para los diferentes porcentajes de zeolita (Tipo IV, 0, 5, 10, 15, 20 y 25%)	78
Figura 4.10	Medias de esfuerzos de ruptura con su respectivo intervalo de confianza para los diferentes porcentajes de zeolita (Tipo IV, 0, 5, 10, 15, 20 y 25%).....	79
Figura 4.11	Superficie de respuesta de los esfuerzos de ruptura vs días de curado y porcentaje de zeolita.....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Composición química de las puzolanas.....	18
Tabla 2	Cantidad en gramos de material a ser usado en el experimento al 5 y 7.5% de zeolita.....	39
Tabla 3	Datos al 5% de zeolita y 7 días de curado.....	57
Tabla 4	Datos al 5% de zeolita y 14 días de curado .....	57
Tabla 5	Datos al 5% de zeolita y 14 días de curado.....	58
Tabla 6	Datos al 5% de zeolita y 14 días de curado.....	58
Tabla 7	Datos al 5% de zeolita y 4 días de curado .....	59
Tabla 8	Datos al 5% de zeolita y 11 días de curado.....	60
Tabla 9	Datos al 5% de zeolita y 18 días de curado.....	60
Tabla 10	Datos al 5% de zeolita y 25 días de curado.....	61
Tabla 11	Valores promedios de E, $\sigma_{YO}$ , m y a .....	64
Tabla 12	Porcentaje de errores, zeolita 5% a diferentes días de curado.....	66
Tabla 13	Esfuerzos de ruptura de las muestras a diferentes tiempos de curado.....	67
Tabla 14	Medias, intervalos de confianza, muestras al 5% de zeolita	68
Tabla 15	Comparación entre medias tomando un control (séptimo día de curado).....	70
Tabla 16	Medias, intervalos de confianza, muestras al 0, 5, 10, 15, 20 y 25% de zeolita usando cemento tipo I al 0%.....	72
Tabla 17	Medias de esfuerzo de ruptura en base a los días de curado.....	73
Tabla 18	Medias de esfuerzos de ruptura en base a los porcentajes de zeolita.....	73
Tabla 19	Medias, intervalos de confianza, muestras al 0, 5, 10, 15, 20 y 25% de zeolita, usando cemento tipo IV para el 0%	76

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las ciudades en nuestros tiempos ha dado hincapié en la búsqueda de nuevas tecnologías, métodos y sistemas en el área de la construcción. El cemento, uno de los principales componentes en este mercado, ha tenido un alza de precios significativa en las últimas épocas; razón por la cual los investigadores se han preocupado en buscar nuevos procedimientos y materiales que permitan disminuir principalmente la explotación de un solo elemento aditivo y dar paso al descubrimiento de reemplazos y mezclas que alcancen los mismos resultados y concluyan siendo más efectivos en ciertos casos.

Debido a esta problemática, se desarrolló la presente investigación, haciendo un análisis estadístico a los datos obtenidos, al someter a cargas de compresión a las probetas de cemento tipo I con diferentes concentraciones de zeolita y a varios tiempos de curado, para posteriormente compararlas con resultados conseguidos al efectuar la misma experimentación, pero sin aditivo alguno para el cemento tipo I y para el cemento tipo IV (usado comercialmente en la actualidad).



# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### **Planteamiento del Problema**

En base a los requerimientos actuales de cemento en el área de la construcción, en cuanto a cantidad, se generó la interrogante de si algún día la materia prima que se usa para la elaboración del cemento se terminara, ¿qué otros materiales podrían reemplazarlos?, que sean éstos amigables con el medio ambiente y que a su vez puedan mejorar o mantener ciertas propiedades del cemento.

Esta investigación se realizó para cubrir estas necesidades, tomando un material puzolánico como la zeolita y experimentar con él, para así tratar de responder las preguntas planteadas anteriormente.

## **1.2. Objetivos de la Tesis**

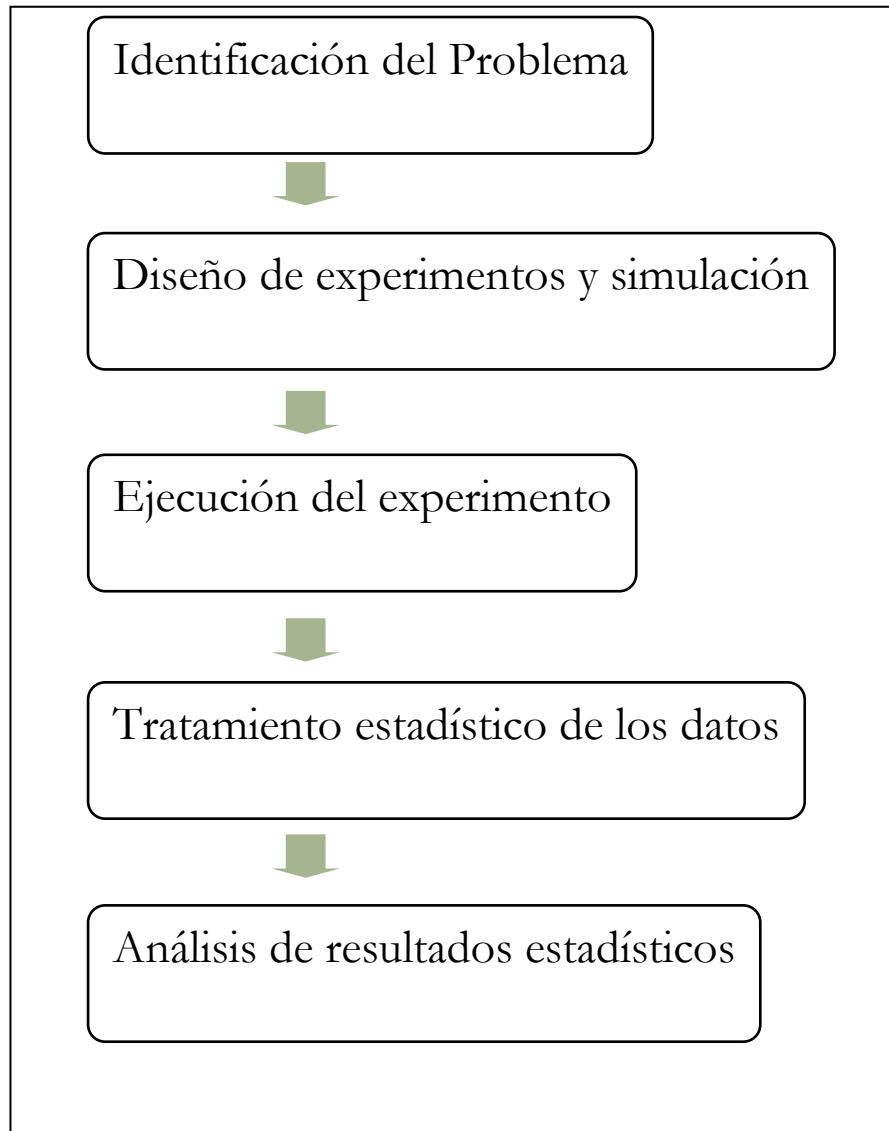
**Objetivo General.**- Simular el comportamiento de la pasta de cemento tipo I en presencia de zeolita como aditivo en diferentes porcentajes de concentración, en varios tiempos de curado en agua teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

**Objetivos Específicos.**- los objetivos específicos, son los siguientes:

- Estudiar el efecto que tiene la adición de zeolita a diferentes concentraciones en la pasta de cemento.
- Estudiar el comportamiento de la pasta de cemento en diferentes tiempos de curado al agua (7, 14, 21 y 28 días).
- Analizar los resultados estadísticamente respecto al cemento tipo I y IV.

## **1.3 Metodología usada para el desarrollo de la Tesis**

- a. La propiedad específica del cemento que se estudió fue la resistencia a la compresión, pues es la propiedad que se quería mejorar adicionando zeolita en la pasta.
- b. Se utilizó como método estadístico Duncan's y Dunnett para analizar todos los datos desde el 5% hasta el 25% de adición de zeolita.



**FIGURA [1.1] METODOLOGÍA DE TESIS**

- c. La unidad experimental se la obtuvo mezclando cemento, agua y aditivo (zeolita 1 en un porcentaje del 5% en relación al total del producto; el aditivo se recolectó en una misma área para que tenga en su mayoría las mismas propiedades físicas). Las diferentes unidades de observación (probetas) se tomaron en cubos de 50 mm<sup>3</sup>, pesando en una balanza electrónica que

permitió ser más exactos; cada una de estas muestras se expusieron a diferentes tiempos de curado en agua, siendo estos 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25 y 28 días, en tres datos de cada una, es decir, que se tuvieron en total 8 tratamientos. Al finalizar el curado, se realizó la prueba de resistencia a la compresión en la máquina de ensayos universales.

- d. Los datos que se recolectaron en cada uno de los experimentos fueron tabulados y analizados en ONE WAY ANOVA y las decisiones se tomaron con un nivel de confianza del 95%, es decir, con  $\alpha=0.05$ . Al finalizar los experimentos todos los datos del grupo, es decir, los resultados a diferentes porcentajes de aditivo se compararon y se analizaron en un diseño de regresión lineal con el programa STATISTICA en FACTORIAL ANOVA, para determinar entre ellos el mejor porcentaje de mezcla que mejore las propiedades mecánicas del Cemento Tipo 1 (si este fuera el caso), en especial la capacidad para soportar fuerzas de compresión.

#### **1.4. Estructura de la Tesis**

En el capítulo 1 se exponen las justificaciones y objetivos del desarrollo de esta tesis. Así como también se detalla la metodología que se siguió para la elaboración de la misma.

En el capítulo 2 se enmarcaron todos los conceptos que se utilizaron a lo largo de esta investigación, programas y otras consideraciones necesarias para el completo entendimiento de la parte técnica y experimental de la tesis.

El capítulo 3 fue la parte medular de la investigación, pues en él se concibió el diseño experimental, se recolectaron las muestras necesarias y se originó el experimento en sí, finalizando esta parte en las pruebas y ensayos necesarios que nos hicieron llegar a nuestros objetivos.

Dentro del capítulo 4 se recolectaron los resultados y se analizaron estadísticamente, para poder determinar diferencias entre cada uno de ellos y se aceptaron o rechazaron según un nivel de confianza.

El capítulo 5 fue la parte final de la tesis, donde se concluyó de acuerdo a los resultados obtenidos y a los objetivos preestablecidos en el capítulo 1. Se dieron recomendaciones en ciertos casos.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

Es muy importante conocer los conceptos que se utilizaron lo largo de los experimentos. Este capítulo se concentró en las definiciones de los materiales y conceptos básicos a manejar.

### 2.1 El cemento y sus propiedades

#### 2.1.1. Generalidades

El nombre de cemento deriva de *caementum*, que en latín significa argamasa, y procede, a su vez, del verbo *caedere* (precipitar). Antiguamente se aplicaba a los morteros en general, cualquiera que fuera la sustancia aglomerante, y desde el año 1792, en que PARKER patentó su cemento natural o

romano, a los productos resultantes de la cocción de caliza y arcilla. [1]

Pero se atribuye a JOSE ASPDIN la invención del cemento Pórtland, pues lo patentó en 1824, y por el parecido color que adquiere, después de fraguado, con la piedra de la localidad inglesa de Pórtland, le puso este nombre. [1]

Clasificación.- existen varias maneras de clasificarlos, según el fraguado, composición química y aplicación:

- a) Con relación al tiempo de fraguado, se dividen en cementos de fraguado rápido (Cementos romanos) y lentos, según que éste termine antes o después de una hora, respectivamente.
- b) Por su composición química se denominan cementos naturales, Pórtland, trappiers, escorias, puzolánicos, aluminosos, sulfatados, etc.
- c) Según sus aplicaciones, de altas resistencias iniciales, resistentes a sulfatos, bajo calor de hidratación, como en Norteamérica.[2]

### **Cemento Pórtland**

Se define como el producto artificial resultante de calcinar hasta un principio de fusión mezclas rigurosamente homogéneas de caliza y arcilla, obteniéndose un cuerpo llamado clinker,

constituido por silicatos y aluminatos anhidros, el cual hay que pulverizar junto con yeso, en proporción menor del 3%, para retrasar su fraguado. [2]

### **Fabricación de Cementos**

Materias primas.- siendo difícil encontrar en la naturaleza calizas con la cantidad de arcilla precisa para fabricar este producto, se recurre a mezclar rocas calizas y arcillas naturales en proporciones determinadas. Se emplean también productos artificiales calizos, como las escorias de altos hornos, residuos de la industria de los álcalis, etc., y la arena de residuos de minerales de hierro para la arcilla.[2]

Extracción.- la roca caliza se suele hacer a cielo abierto, por voladuras con dinamita. La arcilla se extrae con picos o palas excavadoras, cargando directamente las vagonetas.

Trituración.- se practica con machacadoras de mandíbulas, trituradores de martillo, de campana, de rodillos, etc.

Fórmulas de dosificación.- existen varias fórmulas, propuestas por los investigadores que las han aplicado, para dosificar las mezclas crudas, basadas en las relaciones estequiométricas de combinación de los óxidos que forman el cemento, y que cada fabricante aplica según los cementos que cree se forman para que no quede cal libre.[2]



LE CHATELIER propuso, considerando que el cemento estaba formado por compuestos tricálcicos, que el límite superior de cal admisible es el que da la relación [2]:

$$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = 3$$

MICHAELIS indicó la siguiente:

$$1.8 < \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} < 2.2$$

GURRMAN Y GILLE proponen:

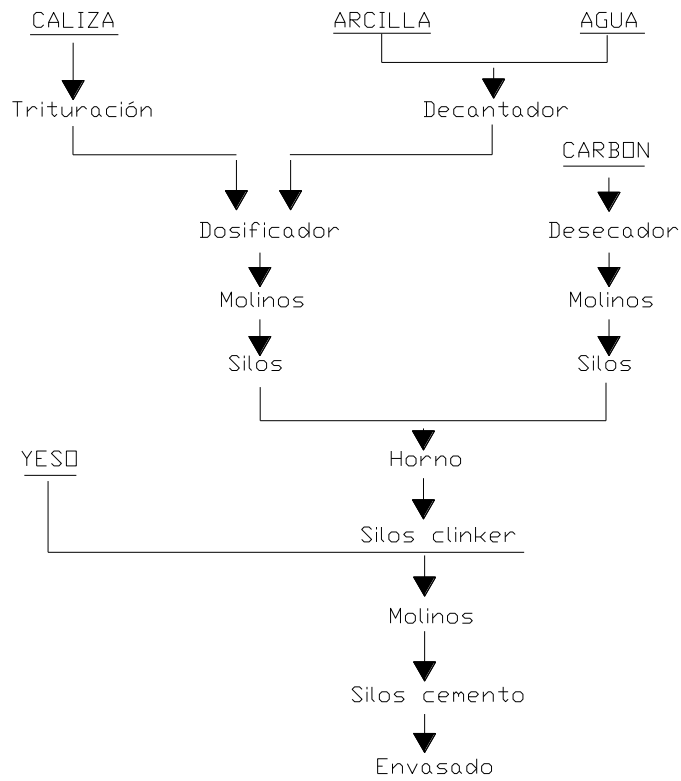
$$CaO \geq 2.8SiO_2 + 1.65Al_2O_3 + 0.35Fe_2O_3$$

VIAN ORTUÑO aplica:

$$CO_3Ca = xSiO_2 + 2.95Al_2O_3 + 0.6Fe_2O_3$$

Preparación de las mezclas.- se hace por vía seca o húmeda, según que la caliza y la arcilla se mezclen en dichos estados.

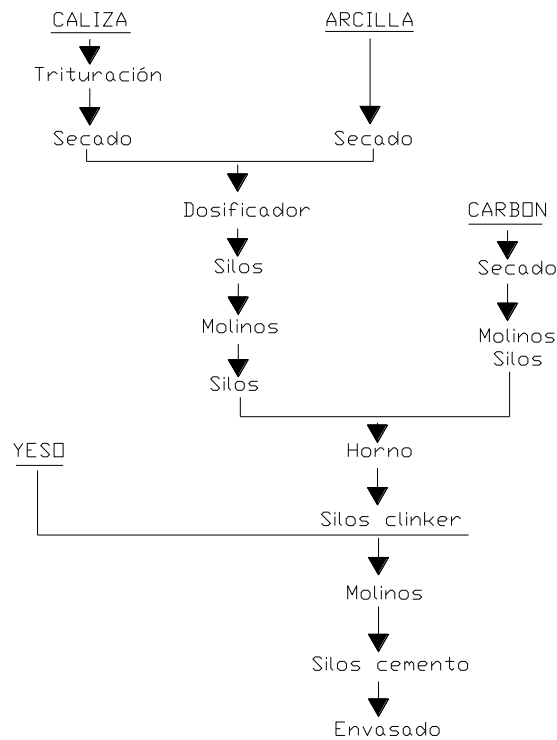
I. Vía húmeda.- El esquema de fabricación por este método es el siguiente:



**FIGURA [2.1] ESQUEMA DE FABRICACIÓN POR VÍA HÚMEDA**

FUENTE: Oruss F. Materiales de construcción

II. Vía seca.- El esquema de la fabricación por vía seca es:



**FIGURA [2.2] ESQUEMA DE FABRICACIÓN POR VÍA SECA**

FUENTE: Oruss F. Materiales de construcción

Molienda.- esta operación hay que hacerla con la caliza, arcilla, el carbón y el clinker, moliéndose en unos molinos tubulares rotatorios de palastro, que contienen en su interior bolas de acero o sílex, dispuestas en departamentos cargados con bolas de distinto diámetro. Son de funcionamiento continuo, entrando la materia a moler por un extremo y saliendo por el otro. La trituración se produce porque al girar el cilindro arrastra las bolas hasta una cierta altura, venciendo el peso propio de éstas a la fuerza centrífuga, originando en su caída choques que

acaban por pulverizar el producto a la finura deseada. Esto sucede en unos compartimentos; en otros hay bolas o cilindros que actúan por rozamientos. Suelen llevar también un separador de aire.[2]

Molienda y ensilado.- el clinker, una vez enfriado, se muele en molinos de bolas, junto con una pequeña cantidad de yeso, el cual incluso conviene esté sin cocer, pues se deshidrata con el calor desarrollado en los cilindros moledores. Su objeto es retrasar el fraguado. Una vez molido a gran finura, se transporta a los silos, en los cuales debe permanecer el cemento algún tiempo antes de su expedición, con objeto de que se extinga la poca cal viva o libre que haya podido quedar.[2]

### **Propiedades físicas del cemento.**

Peso específico.- el peso específico de los cementos Pórtland varía de 2.9 a 3.15 siendo, generalmente, mayor de 3. La determinación del peso específico no se puede hacer sumergiendo el cemento en agua para medir su volumen, pues se conoce que reacciona, empleándose líquidos que no alteren, como la parafina líquida, esencia de trementina, bencina, etc.

Densidad aparente.- es el peso de un volumen dado de cemento, el cual varía según el método usado para llenar el

recipiente, el grado de agitación y la finura, por lo cual se ha excluido de las normas para indicar la calidad del producto.

Finura de molido.- tiene mucha importancia que el cemento tenga una gran finura, por favorecer sus propiedades, ya sea recubriendo mejor el objeto a aglomerar porque reacciona químicamente por el agua sólo en la superficie de los granos, y cuanto más pequeños sean éstos más superficie ofrecen, no quedando núcleos inertes en su interior. Suponiendo que éstos sean esféricos, al fraguar se produce una soldadura de sus granos, interviniendo sólo la parte superficial, no afectando para nada la inferior.

El rendimiento útil de cada grano es directamente proporcional a su superficie e inversamente a su volumen; por consiguiente, será tanto mayor, cuanto menor sea su radio.

Se determina la finura del molido en un cemento tamizándole con un juego de tamices superpuestos, los cuales se tapan por encima y por debajo, formando una caja cilíndrica. Se agitan durante un cierto tiempo a mano, mecánicamente o mediante tamices vibratorios, y se pesan los residuos o las fracciones que los atraviesan.

Estabilidad de volumen.- el cemento, una vez amasado, debe conservar la forma que se le ha dado, con objeto de que la obra ejecutada no se destruya.

La expansión de un cemento, es debida a una lenta hidratación de alguno de sus componentes, después del fraguado. Se atribuye a una dosificación excesiva de la cal, magnesia o sulfatos. La cal libre en un cemento, puede provenir de la dosificación alta del crudo en cal para que se combine con la sílice, a insuficiente cocción o molido del crudo. Si la cal libre en un cemento es inferior a un 2% se hidrata espontáneamente en el ensilado o al ser amasada, pero si rebasa este tanto por ciento, produce expansión.

Las cantidades excesivas de magnesia se ha comprobado en accidentes ocurridos en algunas obras transcurrido algún tiempo de su construcción, debido a que una calcinación elevada, como es la del cemento, mantiene inerte algún tiempo la magnesia calcinada antes de que se hidrate.

Calor de hidratación.- la determinación se hace mediante calorímetros, habiéndose seguido diversos métodos.

a) *Método del Termo o Vaso Deward*, se amasa una cantidad de cemento, se introduce en una botella o termos y se

aprecia la elevación de temperatura con un termómetro muy sensible como un Beckman.

b) *Método adiabático*, consiste en introducir en un calorímetro una cantidad amasada de cemento y se mantiene a la misma temperatura que la muestra a medida que se hidrata y puede registrar la temperatura en función del tiempo.

c) *Método del calor de disolución*, este procedimiento consiste en observar la disminución de energía de un material anhidro e hidratado después de cierto tiempo. Se disuelve en una mezcla de  $\text{NO}_3\text{H}$  y FH cierta cantidad de cemento anhidro y mide la cantidad de calor desprendida. Se confeccionan con el mismo cemento probetas de pasta pura y después de conservarlas en ciertas condiciones de temperaturas e hidrometría. Al cabo de ciertos días de endurecimiento se toma una cantidad de cemento hidratado correspondiente al mismo anhidro, se pulveriza y disuelve en igual mezcla de ácidos; midiéndose el calor desprendido en un calorímetro que es más débil que la anterior. Se traza la curva de calor desprendido en función del tiempo.

Resistencias mecánicas.- la calidad de un cemento se aprecia por la resistencia, que es capaz de desarrollar una vez fraguado y endurecido. Se debe a la cohesión de los granos de cemento

y a la adherencia de los elementos que agreguen: arena, grava, etc.

Las normas exigen una determinada resistencia a la tracción y compresión, pero como éstas varían mucho en la manipulación, temperatura, grado de compresión, agua de amasado, conservación, etc; las fijan también.

Realmente, las pruebas hechas con pasta pura deberían ser las mejores, pero se han desechado con seguridad por la calidad de un cemento. [1]

## **2.2 Aditivos usados en la industria cementera**

### **2.2.1 Generalidades**

El cemento es la base para todos los sistemas usados en el área de la construcción, pues de él se deriva el cemento compuesto, pasta de cemento, mortero, concreto y hormigón.

Es importante estudiar si existe algún aditivo que pueda alterar sus propiedades mecánicas y que esto sea beneficioso para las diferentes aplicaciones que existen actualmente en ésta área.

### **2.2.2 Clasificación**

Se suelen clasificar en naturales y artificiales, agrupándose así:

- a) Cenizas y tobas volcánicas (riolitas, andesitas y fenolitas)



- b) Rocas silíceas sedimentarias (diatomeas, pizarras y pedernales)
- c) Arcillas y pizarras calcinadas (caolinita, etc)
- d) Subproductos industriales (escorias, cenizas volantes y chamota).[5]

Los elementos químicos que las integran son los mismos de los aglomerantes hidráulicos, con defecto de cal, por lo cual, de por sí solas, no dan compuestos insolubles.

La composición química de las puzolanas, tanto naturales como artificiales, varían entre los siguientes límites:

**TABLA [1]**  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS PUZOLANAS

**FUENTE:** ZEOLITAS. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES.

Gutiérrez M. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Sílice	42-66 por 100
Alúmina	14-20 por 100
Óxido de hierro	5-20 por 100
Óxido cálcico	3-10 por 100
Óxido magnésico	1-6 por 100
Álcalis	2-10 por 100
Agua combinada	1-15 por 100

### **Puzolanas Naturales**

Son las rocas existentes en la naturaleza que no precisan para su empleo nada más que la molienda. Proceden de las rocas eruptivas volcánicas: riolitas, traquitas, andesitas, basaltos, que

en forma de ceniza o escorias han adquirido caracteres de una roca frágil y se llaman tobas. Las puzolanas naturales constan fundamentalmente de una masa vítrea que cementa fragmentos de pómez, escoria, pequeños cristales de augita, mica, piroxeno, etc.[6]

Se clasifican en básicas si contienen de un 40 a 55 %de  $\text{SiO}_2$ ; neutras de un 55 a 65%, y ácidas de 65 a 70%. Las puzolanas más activas son las ácidas y neutras de color claro y ligeras. Las básicas son oscuras y pesadas.

Las puzolanas naturales, como hemos indicado, no precisan otra preparación para su empleo más que el de la pulverización, procurando que no se aireen, pues pierden su actividad.[6]

Puzolanas artificiales.- se forman al calentar las arcillas y pizarras y luego enfriarlas rápidamente.

También se obtienen puzolanas artificiales con los exquisitos petrolíferos, la gaize, moler, trass, escorias y cenizas volantes, convenientemente activados por el calor.[5]

La preparación de las puzolanas artificiales se reduce a la cocción de las arcillas y pizarras a temperaturas que oscilan en 600 a 900°C., según sean más o menos calizas, y a una pulverización análoga a la del cemento Pórtland. [3]

## **2.3 Métodos de curado del cemento**

### **2.3.1 Generalidades**

El curado de la pasta de cemento tiene dos propósitos principales:

- Retiene humedad de manera que la pasta de cemento continúe ganando resistencia a la compresión.
- Demora la contracción por secado hasta que la pasta de cemento sea lo suficientemente fuerte para resistir la fisuración por contracción.

La pasta de cemento, adecuadamente curada mejora la resistencia a la compresión, la durabilidad, la estanqueidad y la resistencia al desgaste.

### **2.3.2 Clasificación**

Los procedimientos de curado se agrupan en tres grandes categorías:

1. Aquellos que previenen o impiden la evaporación del agua por interposición de un medio húmedo.
2. Aquellos que tratan de impedir o reducen la pérdida de agua por interposición de un medio impermeable el cual controla la evaporación.

3. Aquellos que aceleran el desarrollo de resistencia por aplicación artificial de calor, mientras el concreto es mantenido en condición húmeda.[5]

### **2.3.3 Curado en agua**

Para curarlo en agua, el hormigón es inundado, o rociado con agua. Es la forma más efectiva de método de curado para evitar la evaporación del agua de mezclado. Los métodos de retención de agua, usan cubiertas como arena, arpillera, paja, etc., que se mantienen continuamente húmedas. El material usado se debe mantener húmedo durante el periodo de curado.

El papel impermeable o sello de película plástica. Se aplican tan pronto como el hormigón ha endurecido lo suficiente para resistir el daño superficial. Las películas plásticas pueden provocar decoloración del hormigón, por lo cual no se deben aplicar al hormigón cuando es importante la apariencia. La aplicación química se debe hacer tan pronto como esté terminado el hormigón. Se nota que los compuestos de curado pueden afectar la adherencia de los pisos resilientes. [4]

## **2.4 Otras investigaciones realizadas**

El método factorial permite estudiar el efecto que sobre una variable dependiente ejercen más de una variable independiente. Una forma de abordar este problema es por medio del diseño factorial [5].

En los diseños factoriales, cada factor (variable independiente) puede tomar dos o más valores y cada tratamiento o condición experimental consiste en la combinación de los valores seleccionados de las variables independientes. Cuando todas las combinaciones son utilizadas se tiene un diseño factorial completo.

### **Otras investigaciones**

El módulo de elasticidad de un material es una característica fundamental requerida para el modelado apropiado de su comportamiento constitutivo y para su uso apropiado en varios usos estructurales. Este papel discute la evaluación experimental del módulo elástico del concreto de alto rendimiento hecho de mezclas usando varios porcentajes de cenizas volátiles, de humo de sílice, y de la escoria de horno granulada. Resultados se comparan con especímenes de control en edades entre 1 y 90 días. Los resultados presentados son parte de un estudio para el Ministerio de Transporte de New Jersey (NJDOT) para desarrollar y para ejecutar el diseño concreto de alto rendimiento de la mezcla (HPC) y especificaciones

técnicas para las estructuras del transporte. El estudio también investiga el efecto del curado sobre el módulo elástico. Tres métodos de curado fueron evaluados: (1) curado seco al aire, (2) curando el compuesto, y (3) el curado mojado. Los resultados demostraron que la adición del humo de sílice dio lugar a un aumento en fuerza y el módulo en las edades tempranas. Además, la adición de las cenizas volátiles del 20% con varios porcentajes del humo de la sílice, tenían un efecto nocivo sobre la fuerza y valores del módulo en todas las edades a 90 días. También se demuestra que el compuesto de curado y de curado seco reduce el módulo de la elasticidad comparado al curado mojado. Los resultados demostraron que el módulo elástico de la HPC es proporcional a la fuerza compresiva, pero las ecuaciones de la predicción de ACI-318 y de ACI-363 pueden no predecir exactamente los valores del módulo para el concreto de alto rendimiento con puzolanas. [10]

Las simulaciones de Meso niveles fueron utilizadas para describir procesos de la fractura en concreto. Un nuevo algoritmo estocástico-heurístico fue desarrollado para generar la estructura compuesta del concreto en espacio tridimensional, produciendo especímenes con el contenido de agregado alto comparable con distribución realista. Las partículas agregadas fueron descritas como elipsoides, permitiendo control en las distribuciones de forma y dimensiones. La serie continua fue individualizada en los enrejados de elementos lineales en análisis

estructurales. Para los segundos análisis, las rebanadas del espécimen tridimensional fueron idealizadas como bragueros/marcos planares, mientras que para los análisis tridimensionales los especímenes fueron idealizados como estructuras de espacio. El concreto de fibra reforzada (FRC) también fue modelado. La compresión, la tensión directa y las pruebas fueron simuladas. El estudio paramétrico fue realizado para investigar el efecto de diversas características materiales y proporciones en adiciones concretas. Los resultados de la simulación están de común acuerdo con observaciones experimentales. La aplicabilidad y los realces para tales modelos se discuten y se proponen en direcciones futuras de la investigación. [11]

En estudios actuales, se ha desarrollado modelo matemático para predecir características del cemento en la descripción de la cinética de la hidratación en las mezclas del humo de sílice de la escoria de cementos Pórtland, que contenían hasta 15 % del humo de sílice. Los modelos de dispersión de Knudsen fueron aplicados para saber el grado de hidratación y los datos experimentales de la fuerza compresiva en función de tiempo. Fue encontrado que los ajustes 'del modelo' de la dispersión de los sistemas de la mezcla del humo de la sílice, como los constantes  $k_1$  y  $k_2$  de las expresiones de Knudsen son significativos en los sistemas de los cuales se están refiriendo. Con respecto al hecho de que haya una relación entre los parámetros

según lo definido por Knudsen, este estudio ha intentado establecer la dependencia funcional directa entre el grado de hidratación y la fuerza compresiva por medio de la variable de tiempo. Fue encontrado que el grado de dependencia de la fuerza compresiva de la hidratación, para el reemplazo del nivel de variación a partir de 0 a 15 % totales del humo de sílice, indica una función matemática lineal. Hay buenos acuerdos entre el modelo y los resultados experimentales obtenidos. El modelo propuesto proporciona la oportunidad de predecir el desarrollo de la fuerza compresiva basado en la medición del calor durante la hidratación del cemento de 48 h si el valor de la fuerza compresiva se sabe infinitamente. [12]



# CAPÍTULO 3

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Muestreo

Las rocas de zeolita ecuatoriana fueron recolectadas en la vía a la costa en la ciudad de Guayaquil en la zona de Casas Viejas, aproximadamente 25 Kg de rocas enteras.

De este total se tomó 450 g para las dos mezclas al 5 y 7.5%, 180 y 270 g respectivamente.

### 3.2 Diseño Experimental

Se utilizó el método factorial para el análisis estadístico de los resultados. En el análisis individual el método de Dunnett y para el análisis grupal el método de Duncan's.

### **3.2.1 Protocolo Experimental**

En estos experimentos se tomaron en cuenta ciertos equipos y materiales indicados en la norma ASTM C109 y otros se adaptaron a nuestras necesidades y requerimientos, que están descritos a continuación.

#### **Pesos y dispositivos de medición**

Basado en especificaciones según norma **C1005**. La balanza debe ser evaluada para la exactitud e inclinación en una carga total de 2000g. En este caso específico será una balanza electrónica SARTORIUS certificada ISO 9001.

#### **Moldes de especímenes**

Los cubos de 2 in o 50 mm quedaron de manera ajustada en el molde. Los moldes tuvieron 3 compartimientos cúbicos y fueron separables en 2 partes. Las partes de los moldes ensamblados permanecieron juntas. Fueron construidos de bronce y hierro fundido. Las caras interiores y superficiales se ajustaron a las variaciones indicadas en la norma.

#### **Mezclador, tazón y remo**

Se utilizó un mezclador de tipo mecánico accionado por electricidad, del tipo equipado con remo y tazón de mezclado con dos velocidades. La primera de velocidad baja pudo mezclar en un rango de  $140 \pm 5$  rpm, y la segunda velocidad

revolvió a razón de  $285 \pm 10$  rpm. El mezclador que se usó fue de marca HOBART.

### **Cuarto húmedo**

De acuerdo a los requerimientos de la especificación **C511**.

La temperatura del aire en la vecindad del mezclado fue de  $26 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

### **Máquina de pruebas**

Se usaron dos máquinas universales, para los ensayos de las muestras a 4 y 7 días de curado, la primera electromecánica con capacidad hasta 300.000 Kg y la segunda hidráulica con capacidad hasta 120.000 Lbf.

### **Otros instrumentos de medición**

Para verificar y tomar mediciones de temperatura, humedad y tiempo, se usó un termohigrómetro portátil.

### **Procedimiento de molienda**

1. Una vez recolectada la piedra y llevada al laboratorio respectivo para la molienda, se disgregó la zeolita en bruto en piedras pequeñas que pudieron ingresar fácilmente al primer molino, esto se hizo con un combo.
2. El primer molino al que ingresó el material fue el de mandíbulas, y se agregó el material poco a poco.



**FIGURA. [3.1] MOLINO DE MANDÍBULAS**



**FIGURA. [3.2] ADICIÓN DE ZEOLITA AL MOLINO DE MANDÍBULAS**

3. Se repitió el procedimiento con todo el material



**FIGURA [3.3] GRANULOMETRÍA DE ZEOLITA AL SALIR DE MOLINO DE MANDÍBULAS**

4. Se pesó la zeolita y se usó la cantidad requerida, es decir, el total para el grupo respectivo.



**FIGURA [3.4] MATERIAL EN BALANZA ELECTRÓNICA**

5. Se encendió el molino de tornillo, y se agregó el material poco a poco



**FIGURA [3.5] MOLINO DE RODILLOS**



**FIGURA [3.6] ADICIONANDO ZEOLITA EN MOLINO DE RODILLOS**

6. Se repitió el procedimiento con todo el material



**FIGURA [3.7]** GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL AL SALIR DEL MOLINO DE RODILLOS

7. Se cuarteó la zeolita
8. Se tomó una porción del cuarteo y se pesaron 100 gramos



**FIGURA [3.8]** CUARTEANDO EL MATERIAL



9. Se llevaron estos 100 g al tamizador, con tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo. Esto significa en el mismo orden: 1,4 cm, 40 mm, 425  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$



**FIGURA [3.9] TAMICES # 14, 18, 40, 50 Y FONDO**

10. Se regresó al proceso de molienda y se encendió el molino de disco, agregando el material poco a poco



**FIGURA [3.10] MOLINO DE DISCOS**



11. Se repitió el procedimiento con todo el material.



**FIGURA [3.11] AGREGANDO MATERIAL AL MOLINO DE DISCOS**

12. Se cuarteó la zeolita



**FIGURA [3.12] SEGUNDO CUARTEO DEL MATERIAL**

13. Se tomó una porción del cuarteo y se pesaron 100 gramos

14. Se llevaron estos 100 g al tamizador, con tamices # 50, 100, 200, 325 y fondo. Esto es en el mismo orden los siguientes tamaños: 300  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ , 45  $\mu\text{m}$ .



**FIGURA [3.13] TAMICES #50, 100, 200, 325 Y FONDO**



**FIGURA [3.14] GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL AL SALIR DEL MOLINO DE DISCOS**

15. Se regresó al proceso de molienda y se encendió el molino de bolas, agregando el material y moliéndolo por 45 minutos.



**FIGURA [3.15] MOLINO DE BOLAS**

16. Se cuarteó la zeolita
17. Se tomó una porción del cuarteo y se pesaron 100 gramos
18. Se llevaron estos 100 g al tamizador, con tamices # 325 y fondo.



**FIGURA [3.16] TAMICES 325 Y FONDO**

19. Si el 60% de la muestra pasa al fondo, parar el procedimiento de molienda y usar la zeolita. Si no es así, repetir los pasos del 15 al 18.

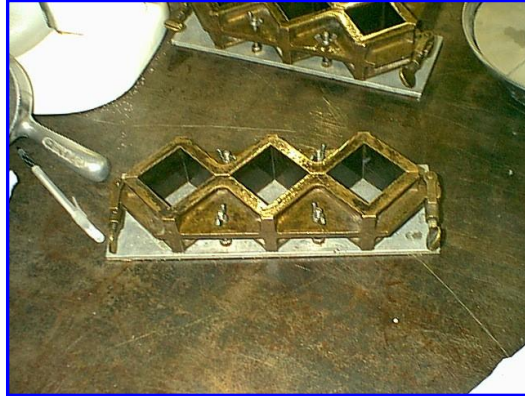


**FIGURA [3.17] ZEOLITA CON GRANULOMETRÍA FINAL 45  $\mu\text{m}$**

### **PREPARACIÓN DE MOLDES**

1. Se aplicó una fina capa de agente deslizante con un trapo impregnado en las caras interiores del molde y en las placas base no-absortivas. Se removió con un trapo el exceso de agente en las caras y las placas base y así se obtuvo una fina capa sobre las superficies.
2. Se sellaron las superficies donde se unen las mitades del molde aplicando una capa de grasa ligera como “petrolatun”. La cantidad fue suficiente para extruir ligeramente cuando las dos mitades se ajustaron. Se removió todo exceso con un trapo.
3. Después de colocar el molde sobre su placa base, se removió cuidadosamente con un paño seco cualquier exceso de aceite o grasa de la superficie del molde y de

la placa base a las cuales se aplicó sellador impermeable.



**FIGURA [3.18] PREPARACIÓN DE MOLDES**

**Procedimiento para la mezcla de pasta de cemento**

1. La proporción de los materiales para este mortero de cemento fue de 300 g como mezcla total. Se hizo uso de una proporción agua-cemento de 0,3 para este experimento.

**TABLA [2]**

**CANTIDAD EN GRAMOS DE MATERIAL A SER USADO EN EL EXPERIMENTO AL 5 Y 7.5% DE ZEOLITA**

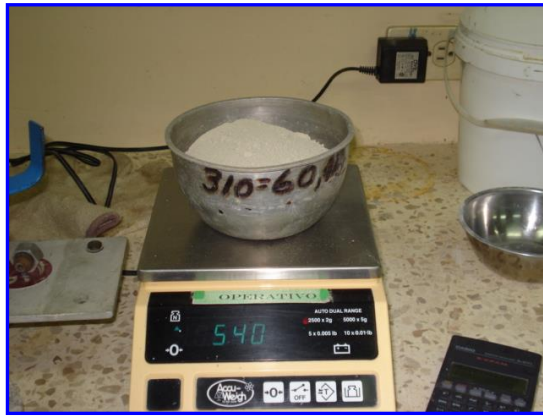
Fracción de puzolana (%)	PUZOLANA (g)	CEMENTO(g)
5	15	285
7.5	22.5	277.5

2. Las cantidades de materiales que se mezclaron fue por el total de morteros, es decir, doce por cada porcentaje de zeolita que se manejó.
3. Se procedió a encerar la balanza electrónica tomando en cuenta el peso del recipiente.



**FIGURA [3.19] BALANZA ELECTRÓNICA ENCERADA**

4. Se pesó en la balanza electrónica el cemento en la cantidad indicada, es decir, 3420 g para el 5% de zeolita y 3330 g para 7.5% respectivamente.



**FIGURA [3.20] PESANDO MATERIALES**

5. Se pesó en la balanza electrónica la zeolita en la cantidad indicada, es decir, 180 g que representan el 5% y 270 g para 7.5% respectivamente.
6. Se pesó en la balanza electrónica el agua en la cantidad indicada.
7. Antes de proceder a hacer la mezcla, se tomaron datos de temperatura y humedad relativa del cuarto, esto es muy importante por ser factores externos que pudieron afectar el experimento.
8. Se colocó en la mezcladora el cemento y la zeolita por cerca de 10 minutos a velocidad baja para homogeneizar la mezcla.



**FIGURA [3.21] HOMOGENEIZANDO CEMENTO + ZEOLITA EN SECO**

9. Se apagó la mezcladora, poniéndola a velocidad uno, luego se encendió y se agregó poco a poco el agua, una vez que se adicionó toda, se mantuvo la mezcladora a esta misma velocidad por 45 segundos.
10. Se apagó la mezcladora, poniéndola a velocidad dos, se encendió y se mezcló por 2 min, incluyendo los 45 segundos anteriores.



**FIGURA [3.22] CEMENTO + ZEOLITA + AGUA EN LA MEZCLADORA**



11. Los moldes se llenaron en dos capas, luego de la primera capa se apisonó. La presión de apisonado debe ser la suficiente para asegurar el correcto llenado del molde. Las 4 rondas de apisonado de los moldes fueron completadas en un cubo antes de seguir con otro. Cuando el apisonado de la primera capa en todos los compartimentos se completó, se llenaron los compartimentos con el mortero sobrante y se volvió a apisonar de la misma forma. Mientras se llenaron los moldes, no se dejó de mover la mezcla.



**FIGURA [3.23] LLENANDO LOS MOLDES CON PASTA**

12. Se compactaron las probetas, dando pequeños golpes en la base y lados de la misma, para que salgan las burbujas que se formaron en el interior al adicionar la mezcla.



**FIGURA [3.24] COMPACTANDO LAS PROBETAS**

13. Se dejaron reposar las probetas por unos minutos.



**FIGURA [3.25] PROBETAS REPOSANDO POR UNOS  
MINUTOS**

14. Se retiró el exceso de mezcla de las probetas, para mejorar el acabado de la cara superior de la misma.

15. Se cubrieron las probetas con plástico para evitar que perdieran agua en exceso y, se las dejaron así por 24 horas



**FIGURA [3.26] PROBETAS CUBIERTAS POR UN PLÁSTICO**

### **Procedimiento para desmolde**

1. Se retiró el plástico colocado en los moldes el día anterior.
2. Se retiró el exceso de mezcla de la cara superior, para definir los bordes de la muestra.
3. Se abrieron los moldes



**FIGURA [3.27] DESMOLDANDO**

4. Se marcaron las caras superiores de las probetas
5. Se marcaron las probetas bajo el código establecido
6. Se pesaron cada una de las probetas
7. Se sumergieron en agua.



**FIGURA [3.28] PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA**

### 3.2.2 Pruebas y ensayos

Habiendo cumplido todos los protocolos experimentales de preparación de las probetas, se procedió a realizar los ensayos de compresión de cada una de las muestras a los diferentes días de curado: 7, 14, 21 y 28 para el 5% de zeolita y, 4, 11, 18 y 25 para el 7,5% de zeolita (porcentaje que llamamos de convalidación).

#### Procedimiento para ensayo de compresión

1. Se retiraron del recipiente con agua, las probetas que se usaron en el ensayo
2. Se tomaron lecturas de temperatura y humedad relativa.
3. Se pesaron las probetas
4. Se dejaron secar las probetas por unos minutos
5. Se encendió y enceró el equipo de ensayo universal



**FIGURA [3.29] CALIBRANDO EQUIPO DE ENSAYOS**

6. Se encendió el medidor de deformación
7. Se midieron las dimensiones de las probetas
8. Se limpió con un trapo cada espécimen hasta tener la superficie de cada una muy seca, y se removieron granos de arena sueltos o incrustaciones de las caras que estuvieron en contacto con los bloques de soporte de la máquina de pruebas. Se chequearon las caras por medio de un filo recto y se trabajaron las caras para que no existan caras curvas. Se colocó la probeta en el equipo de tal forma que las caras lisas del mismo estuvieron en contacto con las caras superior e inferior de la prensa respectivamente.



**FIGURA [3.30] PROBETA EN EQUIPO DE ENSAYO UNIVERSAL**

9. Se aplicaron las cargas, a una velocidad constante y se anotaron los valores que resultaron de intervalos indicados de deformación.
10. Se anotó la carga que produce la ruptura de la probeta.



**FIGURA [3.31] PROBETA AL FINALIZAR EL ENSAYO**

### **3.2.3 Simulación computacional**

En esta sección se mostró una simulación en el programa Matlab de cómo se obtuvo la curva Esfuerzo – Deformación, usando conceptos de Inelasticidad para llegar a ello.

Tradicionalmente se usó la relación  $f_m = \frac{P}{A}$ ; pero en una investigación son necesarios mas parámetros, los cuales hacen llegar a una conclusión confiable, por este motivo, todos los resultados fueron generados mediante la aplicación de la Teoría de Inelasticidad, por medio de mecánica del continuo.

Se desarrolló mediante la teoría de Mecánica del Continuo relaciones unidimensionales llevadas a tres dimensiones usando un lenguaje tensorial más las condiciones de borde apropiadas.

La deformación se define como el gradiente simétrico del desplazamiento, y teniendo en cuenta que todo tensor tiene una parte simétrica y una parte asimétrica, se tiene:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \nabla^s \underline{\mu} \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{d\mu}{dx} + \left( \frac{d\mu}{dx} \right)^+ \right) \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2} \left( \frac{d\mu_i}{dx_j} + \frac{d\mu_j}{dx_i} \right)\end{aligned}$$

Entonces la definición que se usa para estas relaciones es de la forma:

$$\sigma = \mathcal{L}^{ex} : \varepsilon$$

$$\sigma_{ij} = \mathcal{L}_{ijkl}^{ex} : \varepsilon_{kl}$$

La parte de no linealidad se desarrolló con el Método de Newton Raphson. Este método se podría considerar como un esquema iterativo que ayuda a desarrollar un esquema no lineal en tres dimensiones definiendo un residual que siempre está regido por una relación dada por:



$$r(\mu^*) = 0$$

Donde  $(\mu^*)$  es la solución y va a depender estrictamente del material.

Si se hace una expansión de la Serie de Taylor, lo cual asegurará que se va a converger a la respuesta, tenemos lo que sigue:

$$r(\mu_{k+1}) = r(\mu_r) + \left. \frac{dr}{d\mu} \right]_{\mu=\mu_k} (\mu_{r+1} - \mu_r) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2r}{d\mu^2} \right]_{\mu=\mu_r} + \dots$$

El siguiente algoritmo presentado en Matlab, fue realizado bajo el método de Deformation Driven, debido a que en el mismo básicamente solo se toma en cuenta las propiedades del material y, como este modelo es no lineal, porque sólo se debe a la respuesta del material bajo la influencia del aditivo (zeolita tipo 1) en los porcentajes requeridos:

```
clc;
```

```
%warning off
```

```
%Declaración de parámetros del material
```

```
m=0.025; % Intersección de la curva ESF-def con el eje x
```

```
a=0.78; % Intervalo de Deformación máxima respecto al esf de  
fluencia
```

```
E=2128.11354; % Modulo de Elasticidad del Material
```

```

tol=1e-20; % Valor para la precisión en el calculo de raíces por el
Método de Newton-Raphson

L(1,1)=0; % Valor de Lambda.... inicialmente cero para la zona
elástica

deltaeps=0.0005; %Incremento de la deformación para graficar los
puntos en la curva

def_total=0.03237; % Deformación máxima del material bajo la
carga aplicada

epsilon=0:deltaeps:def_total;

n=length(epsilon)-1;

sigma=zeros(n,1);

sigma(1,1)=0;

sigmay=ones(n,1)*28.6545; % Valor del Esfuerzo de Fluencia del
Material = 100

for i=1:n;

%=====

=====

% A CONTINUACION SE TIENEN LOS PASOS
DETERMINADOS POR EL ALGORITMO RETURN MAPPING

%=====

=====

```

```
%PASO 1
```

```
sigmatrial(i,1)=sigma(i,1)+E*deltaeps; %Esfuerzo estimado o de  
prueba
```

```
%PASO 2%
```

```
Ftrial(i,1)=abs(sigmatrial(i,1))-sigmay(i,1);
```

```
% Determinar en que zona se encuentra (Ftrial >0 ==> Zona  
Plástica; Ftrial <0; ZONA ELASTICA
```

```
if Ftrial(i,1)>0;
```

```
%=====
```

```
=====
```

```
% A PARTIR DE ESTE PUNTO SE TIENEN LOS PASOS DEL  
METODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SOLUCION DE  
ECUACIONES NO LINEALES
```

```
% EL RESULTADO SON LOS VALORES DE LANDA_N Y  
DELTALANDA
```

```
%=====
```

```
=====
```

```
% PASO 3 DE LA RUTINA RETURN MAPPING
```

```
sql(1,1)=tol;
```

```
for s=1:20
```

```

SF(s,1)=sql(s,1)+L(i,1); % Valor de Landa_n+1=Deltalanda +
Landa_n

H(i,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/SF(s,1))*((m-
SF(s,1))/(m+SF(s,1))^2); % Valor de H_prima

r(s,1)=Ftrial(i,1)-sql(s,1)*(E+H(i,1)); %
ir(s,1)=norm(r(s,1));

if ir(s,1)<tol*ir(1,1)

    break

end

W=-E-a*sigmay(1,1)*(m/SF(s,1))^(1/2)*(m-
SF(s,1))/(m+SF(s,1))^2-SF(s,1)*(-1/2*a*sigmay(1,1)*(m-
SF(s,1))*m/((m/SF(s,1))^(1/2)*(m+SF(s,1))^2*(SF(s,1))^2)-
a*sigmay(1,1)*(m/SF(s,1))^(1/2)/(m+SF(s,1))^2-
2*a*sigmay(1,1)*(m/SF(s,1))^(1/2)*(m-SF(s,1))/(m+SF(s,1))^3);

rdl(s+1,1)=-(r(s,1)/W);

sql(s+1,1)=sql(s,1)+rdl(s+1,1);

end

%

=====

=====

```

% FIN DE LA RUTINA DE NEWTON-RAPHSON

%=====

=====

dl(i+1,1)=sql(s,1);

L(i+1,1)=SF(s,1);

%PASO 4 DE LA RUTINA RETURN MAPPING

sigma(i+1,1)=sigmatrial(i,1)-E\*dl(i+1,1)\*sign(sigmatrial(i,1));

sigmay(i+1,1)=sigmay(i,1)+H(i)\*dl(i+1,1);

% FIN DEL CALCULO DE LOS ESFUERZOS EN LA ZONA

PLASTICA PARA EL PUNTO i

else

L(i+1,1)=0;

sigma(i+1,1)=sigmatrial(i,1);

end

% ACTUALIZACION DE VARIABLES Y FIN DE LA RUTINA DE  
RETURN MAPPING PARA EL PUNTO i

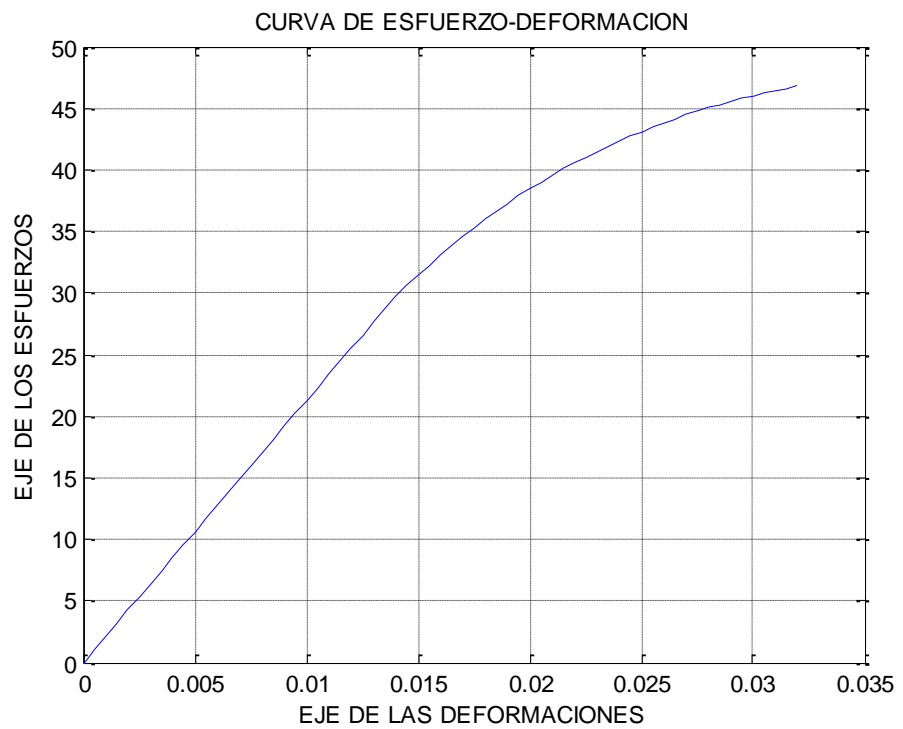
%=====

=====

end

%GRAFICA DE LA CURVA ESFUERZO DEFORMACION PARA  
LOS PARAMETROS INGRESADOS

```
plot(epsilon',sigma,'-b')  
xlabel('EJE DE LAS DEFORMACIONES');  
ylabel('EJE DE LOS ESFUERZOS');  
title('CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACION');  
grid
```



**FIGURA [3.32]** CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN GENERADA CON EL PROGRAMA EN MATLAB (TEÓRICO)

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Resultados

En base a los ensayos de compresión realizados en los diferentes días de curado y porcentaje de zeolita (5% y 7,5%), se obtuvieron los resultados siguientes para las deformaciones correspondientes a cinco milésimas de pulgada cada una. Todas las unidades están en Megapascuales para el esfuerzo y la deformación es adimensional:

***PORCENTAJE: 5%***

***DÍA DE CURADO: 7***

***Temperatura: 27,3°C***

***Humedad Relativa: 65.5%***

**TABLA [3]**

DATOS AL 5% DE ZEOLITA Y 7 DÍAS DE CURADO

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	0.19	0.002	8.56	0.002	10.10
0.005	34.42	0.005	29.46	0.005	33.91
0.007	38.88	0.007	49.67	0.007	55.49
0.010	54.80	0.010	75.36	0.010	78.78
0.012	61.65	0.012	<b>87.34</b>	0.012	<b>88.20</b>
0.015	78.78	-	-	-	-
0.017	<b>93.34</b>	-	-	-	-

**PORCENTAJE: 5%****DÍA DE CURADO: 14****Temperatura: 25,7°C****Humedad Relativa: 63.5%****TABLA [4]**

DATOS AL 5% DE ZEOLITA Y 14 DÍAS DE CURADO

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	1.03	0.002	1.54	0.002	1.03
0.005	15.58	0.005	3.08	0.005	3.94
0.007	30.31	0.007	22.44	0.007	21.07
0.010	42.82	0.010	35.62	0.010	32.20
0.012	57.37	0.012	49.67	0.012	47.95
0.015	71.07	0.015	62.51	0.015	65.94
0.017	79.64	0.017	70.22	0.017	82.21
0.020	<b>83.06</b>	0.020	72.79	0.020	<b>89.06</b>
0.02		0.022	<b>74.50</b>		

**PORCENTAJE: 5%****DÍA DE CURADO: 21****Temperatura: 27,7°C****Humedad Relativa: 66.8%**



**TABLA [5]**

DATOS AL 5% DE ZEOLITA Y 21 DÍAS DE CURADO

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	3.25	0.002	8.39	0.002	4.62
0.005	7.54	0.005	25.52	0.005	22.61
0.007	18.50	0.007	47.10	0.007	33.05
0.010	22.61	0.010	73.64	0.010	57.37
0.012	31.00	0.012	96.76	0.012	76.21
0.015	40.25	0.015	<b>114.75</b>	0.015	90.77
0.017	43.67		-	0.017	<b>94.19</b>
0.020	50.52				
0.022	62.51				
0.025	<b>93.53</b>				

**PORCENTAJE: 5%****DÍA DE CURADO: 28****Temperatura: 25,4°C****Humedad Relativa: 62.9%****TABLA [6]**

DATOS AL 5% DE ZEOLITA Y 28 DÍAS DE CURADO

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	1.54	0.002	1.54	0.002	8.91
0.005	4.97	0.005	3.43	0.005	34.08
0.007	16.78	0.007	11.30	0.007	53.09
0.010	35.79	0.010	36.31	0.010	71.07
0.012	53.09	0.012	59.94	0.012	89.91
0.015	70.22	0.015	83.06	0.015	107.90
0.017	90.77	0.017	102.76	0.017	<b>109.61</b>
0.020	<b>107.90</b>	0.020	<b>107.04</b>		
0.022					

**PORCENTAJE: 7,5%**

**DÍA DE CURADO: 4**

**Temperatura: 26.6°C**

**Humedad Relativa: 67.3%**

**TABLA [7]**

**DATOS AL 7,5% DE ZEOLITA Y 4 DÍAS DE CURADO**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	0.19	0.002	1.70	0.002	0.75
0.005	0.75	0.005	2.83	0.005	1.88
0.007	1.88	0.007	13.19	0.007	4.07
0.010	4.82	0.010	23.55	0.010	13.19
0.012	12.25	0.012	31.08	0.012	22.61
0.015	19.78	0.015	38.62	0.015	31.08
0.017	27.32	0.017	46.16	0.017	39.94
0.020	33.91	0.020	49.92	0.020	48.98
0.022	42.58	0.022	55.57	0.022	53.69
0.025	48.98	0.025	56.52	0.025	55.20
0.027	53.69	0.027	<b>57.46</b>	0.027	<b>61.23</b>
0.030	60.28			-	-
0.032	<b>65.94</b>				

**PORCENTAJE: 7,5%**

**DÍA DE CURADO: 11**

**Temperatura: 27,3°C**

**Humedad Relativa: 65.5%**

**TABLA [8]**

DATOS AL 7,5% DE ZEOLITA Y 11 DÍAS DE CURADO

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	10.10	0.002	3.77	0.002	5.89
0.005	33.05	0.005	13.87	0.005	20.38
0.007	55.66	0.007	19.70	0.007	39.39
0.010	80.49	0.010	29.97	0.010	58.23
0.012	<b>96.76</b>	0.012	48.81	0.012	67.65
0.015	-	0.015	73.64	0.015	75.36
0.017	-	0.017	95.91	0.017	<b>95.89</b>
0.020		0.020	<b>99.33</b>		

**PORCENTAJE: 7,5%****DÍA DE CURADO: 18****Temperatura: 25,7°C****Humedad Relativa: 63.5%****TABLA [9]**

DATOS AL 7,5% DE ZEOLITA Y 18 DÍAS DE CURADO

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	0.69	0.002	11.65	0.002	1.20
0.005	1.88	0.005	28.77	0.005	3.25
0.007	3.43	0.007	47.10	0.007	8.22
0.010	15.41	0.010	68.51	0.010	19.18
0.012	33.40	0.012	89.06	0.012	35.62
0.015	47.95	0.015	<b>101.05</b>	0.015	53.95
0.017	64.22	-	-	0.017	71.93
0.020	71.93	-		0.020	89.91
0.022	74.50	-		0.022	<b>96.76</b>
0.025	<b>77.07</b>	-			

**PORCENTAJE: 7,5%**

**DÍA DE CURADO: 25**

**Temperatura: 27,7°C**

**Humedad Relativa: 66.8%**

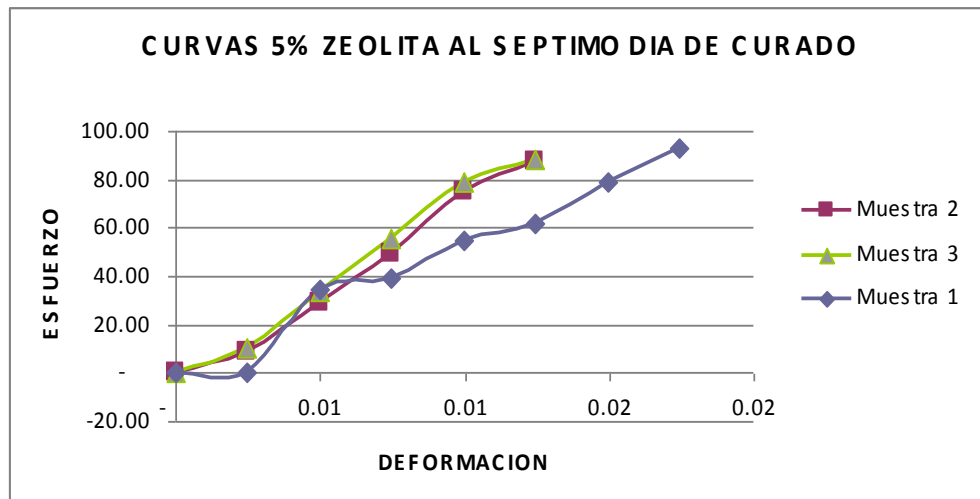
**TABLA [10]**

**DATOS AL 7,5% DE ZEOLITA Y 25 DÍAS DE CURADO**

Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo	Deformación	Esfuerzo
-	-	-	-	-	-
0.002	5.99	0.002	3.25	0.002	4.45
0.005	20.38	0.005	10.62	0.005	19.70
0.007	46.24	0.007	22.44	0.007	39.73
0.010	84.78	0.010	40.42	0.010	60.80
0.012	<b>88.20</b>	0.012	63.37	0.012	84.78
0.015	-	0.015	88.20	0.015	105.33
0.017	-	0.017	<b>101.05</b>	0.017	<b>111.30</b>

### **Análisis de resultados**

Se graficaron las curvas esfuerzo - deformación en excel para ver el comportamiento del material en las zonas elástica e inelástica respectivamente, tomando en cuenta todos los datos experimentales obtenidos.

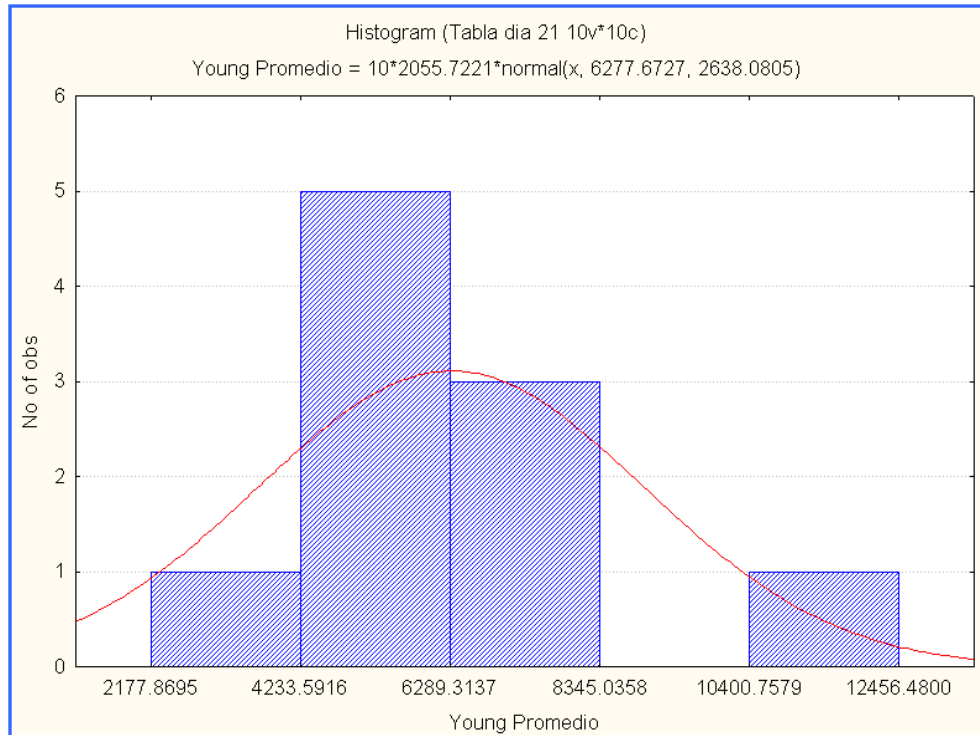


**FIGURA [4.1] CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE MUESTRAS CON 5% DE ZEOLITA AL SÉPTIMO DÍA DE CURADO**

Las gráficas de las muestras a cada porcentaje de zeolita y al día respectivo de curado, se encuentran en el apéndice 1.

A continuación, se promedió los esfuerzos de las tres muestras a los diferentes días de curado y con esto se promediaron los módulos de Young para todos los valores de esfuerzos y se analizaron estadísticamente usando las distribuciones de frecuencia, tomando en cuenta que solo es la parte lineal de la gráfica esfuerzo deformación la que permite analizar el rango elástico de las muestras.

En el siguiente histograma de frecuencia está graficado el promedio de las tres muestras con 5% de aditivo curadas en 21 días; se notó que las curvas gaussianas dan valores de medias y desviaciones estándares, datos que muestran un rango dentro del cual se puede decir que dichas muestras caen en el rango elástico del proceso de compresión.



**FIGURA [4.2] HISTOGRAMA 5% ZEOLITA, DÍA 21. PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS**

En el apéndice 2, se encuentran los histogramas de frecuencia para los demás días de curado al 5 y 7.5% de zeolita.

Una vez que se encontró el rango en el cual las muestras tienen un comportamiento elástico, se sacaron los valores promedios de:

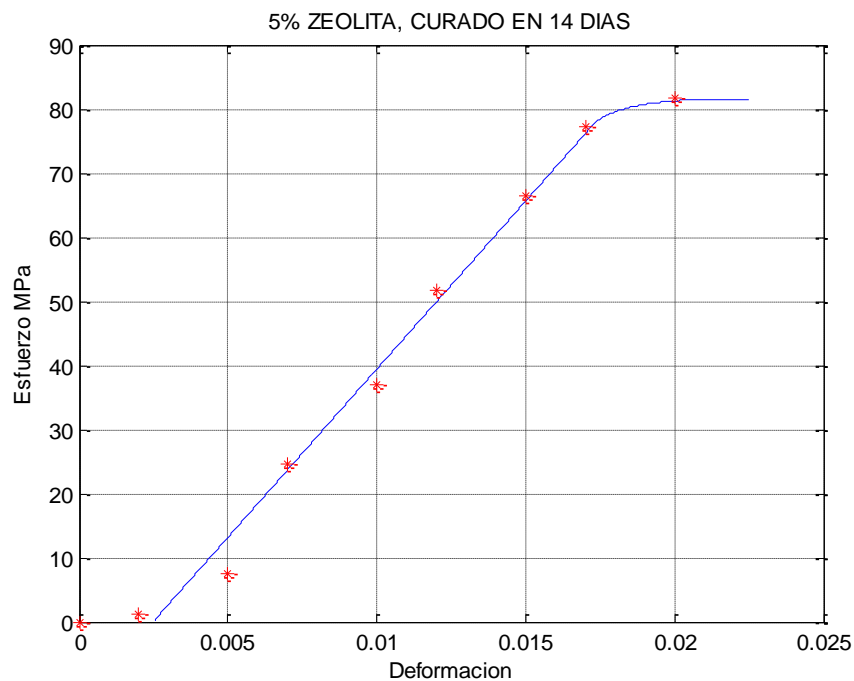
- Módulo de Young
- Esfuerzo de fluencia
- El valor promedio de  $m$  (propio del material)
- El valor promedio de  $a$  (propio del material)

**TABLA [11]**  
**VALORES PROMEDIOS DE E,  $\sigma_{YO}$ , m y a**

5 %	E (Young promedio)	Esfuerzo fluencia prom	Esfuerzo ruptura prom	Deformación promedio	m promedio	a promedio
di a 7	6,992 .11	79.0 7	93.3 4	0.017	0.00 365	0.18 05
di a 1 4	5,245 .23	77.3 5	81.6 4	0.020	0.00 444	0.05 55
di a 2 1	6,189 .73	62.5 1	93.5 3	0.025	0.00 989	0.49 62
di a 2 8	6,390 .33	87.0 6	107. 47	0.020	0.00 318	0.23 44

7 - 5 %	E (Young promedio)	Esfuerzo fluencia prom	Esfuerzo ruptura prom	Deformación promedio	m promedio	a promedio
di a 4	2,889 .92	53.5 7	65.9 4	0.032	0.00 918	0.23 09
di a 1 1	5,645 .27	71.0 7	99.3 3	0.020	0.00 240	0.39 76
di a 1 8	4,231 .94	67.6 5	85.6 3	0.020	0.00 023	0.26 58
di a 2 5	7,404 .76	96.7 6	106. 17	0.017	0.00 266	0.09 73

Con estos valores se graficó en el programa Matlab, tanto la curva teórica con los datos anteriores y la curva experimental con los datos obtenidos promedios, tal como se muestra en la gráfica a continuación:



**FIGURA [4.3]** GRÁFICA DE APROXIMACIÓN DE LA CURVA TEÓRICA A LA EXPERIMENTAL - 5% ZEOLITA, DÍA 14

En el apéndice 3, se encuentran las curvas restantes que muestran la aproximación de la parte teórica a la experimental.

Como se pudo observar en la gráfica 4.3, se desplazó la curva teórica en el eje de la deformación para tener una mejor aproximación a los datos experimentales.

Luego se procedió a medir los errores experimentales de estas curvas, esto se hizo fácilmente con el comando de interpolación de Matlab, con el cual se tomaron los datos conocidos de deformación experimental y esfuerzo de las muestras y se interpolaron para obtener un valor de deformación teórico para cada  $\sigma$  mostrado.



**TABLA [12]**

**PORCENTAJE DE ERRORES, ZEOLITA 5% A DIFERENTES DÍAS DE CURADO.**

5%	ESFUERZO EXPERIMENTAL	ESFUERZO TEÓRICO	ESFUERZO RUPTURA TEÓRICO	ERROR		
				ENTRE ESFUERZOS	MEDIA CUADRÁTICA	ESFUERZO RUPTURA
DÍA 7	31.46	32.60	93.31	3.5%	16.7%	6.9%
	45.45	48.01		5.3%		
	66.43	69.65		4.6%		
	80.40	79.07		1.7%		
	90.11	78.78		14.4%		
	86.88	93.34		6.9%		
DÍA 14	23.60	24.60	81.57	4.1%	3.6%	0.4%
	39.34	36.88		6.7%		
	49.83	51.66		3.6%		
	65.57	66.51		1.4%		
	76.06	77.35		1.7%		
	81.25	81.64		0.5%		
DÍA 21	21.66	18.55	91.92	16.8%	7.6%	0.1%
	34.04	32.88		3.5%		
	52.61	51.21		2.7%		
	64.82	67.99		4.7%		
	78.13	81.92		4.6%		
	91.85	93.53		1.8%		
DÍA 28	19.17	14.16	105.79	35.4%	15.7%	1.0%
	31.95	27.06		18.1%		
	51.12	47.73		7.1%		
	63.90	67.65		5.5%		
	83.07	87.06		4.6%		
	94.7835	101.05		6.2%		
	104.7458	107.47		2.5%		

### Análisis estadístico individual

El análisis estadístico se realizó con el programa STATISTICA 7.0, se ingresaron los datos promedios obtenidos, como se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA [13]**  
ESFUERZOS DE RUPTURA DE LAS MUESTRAS A DIFERENTES  
TIEMPOS DE CURADO

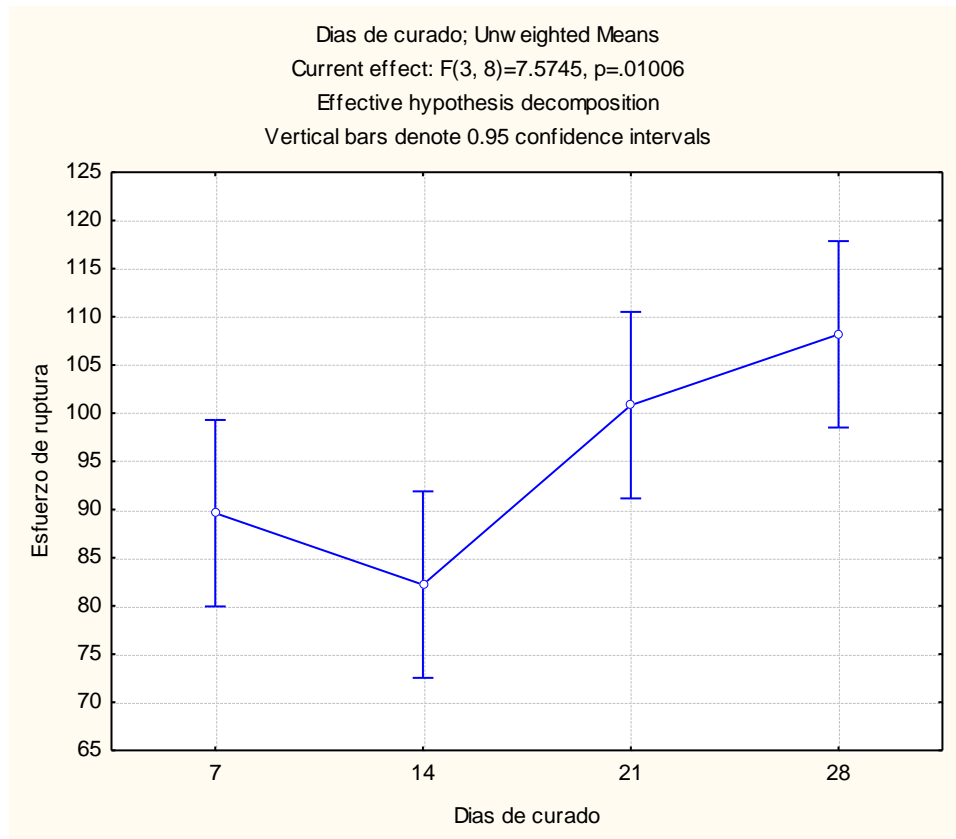
	1 Días de curado	2 Esfuerzo de ruptura	3 Var3
1	7	87.3440285	
2	7	88.2003425	
3	7	93.34	
4	14	83.0626298	
5	14	89.0566565	
6	14	74.5	
7	21	114.746077	
8	21	94.1945406	
9	21	93.53	
<b>10</b>	28	107.895565	
11	28	107.039251	
12	28	109.608193	

Luego estos datos se analizaron por ONE WAY ANOVA, y se obtuvieron las medias, intervalos de confianza y probabilidades para cada uno de los días de curado

**TABLA [14]**  
**MEDIAS, INTERVALOS DE CONFIANZA, MUESTRAS AL 5% DE**  
**ZEOLITA**

Dias de curado; Unweighted Means (Individual) Current effect: F(3, 8)=7.5745, p=.01006 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Dias de curado	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95.00%	Esfuerzo de ruptura +95.00%	N
1	7	89.6281	4.195631	79.95298	99.3033	3
2	14	82.2064	4.195631	72.53129	91.8816	3
3	21	100.8235	4.195631	91.14840	110.4987	3
4	28	108.1810	4.195631	98.50586	117.8561	3

La gráfica a continuación, indica las medias de las muestras en cada uno de los días de curado con su respectivo intervalo de confianza. Se notó que en los últimos días de curado, el esfuerzo de ruptura es mayor que a los primeros días.



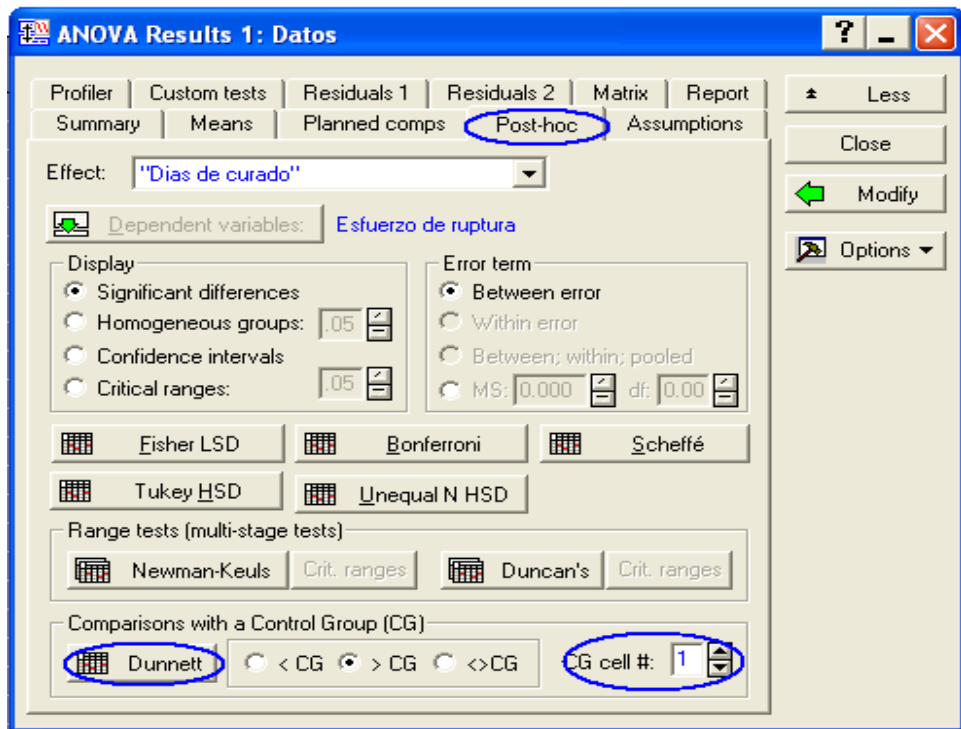
**FIGURA [4.4] CURVA DE MEDIAS DE ESFUERZOS DE RUPTURA CON SU RESPECTIVO INTERVALO DE CONFIANZA, MUESTRAS 5% ZEOLITA**

Luego se definieron las hipótesis, sabiendo de antemano que se quiere demostrar un error de Tipo I, es decir, que la hipótesis nula sea falsa.

$H_0$  = Todas las medias de las muestras son menores o iguales al control

$H_A$  = Existe por los menos una media mayor al control

En este análisis se usó comparaciones de tratamientos con un control, que en este caso se tomó la muestra del día 7.



**FIGURA [4.5]** PANTALLA DE PROGRAMA STATISTICA PARA ANALIZAR LOS DATOS CON COMPARACIÓN DE UN CONTROL (DUNNETT)

La tabla de resultados que se generó con este análisis es el siguiente:

**TABLA [15]**  
COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS TOMANDO UN CONTROL (SÉPTIMO DÍA DE CURADO)

Dunnett test; variable Esfuerzo de ruptura (Individual)		Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control)		
Error: Between MS = 52.810, df = 8.0000				
Cell No.	Días de curado	{1}		
1	7	89.628		
2	14	0.974921		
3	21	0.108594		
4	28	0.017430		

Por lo que se pudo decir que, se aceptó la hipótesis alterna, es decir, que hubo una media mayor al control efectivamente cumpliéndose para los 28 días de curado en agua.

### **Análisis estadístico grupal**

En este análisis se compararon muestras a diferentes porcentajes de zeolita tipo I, con una pasta de cemento Tipo I con 0% de zeolita y con cemento Tipo IV que tiene otro material puzolánico diferente a la zeolita.

Para el primer análisis se usó el método factorial ANOVA, debido a que existían 6 diferentes porcentajes de aditivos (0, 5, 10, 15, 20 y 25%) para los 7, 14, 21 y 28 días de curado en agua, para las muestras hechas en pasta de cemento Tipo I.

Las medias de los datos experimentales a diferentes días de curado y porcentaje de zeolita son los siguientes:

**TABLA [16]**

MEDIAS, INTERVALOS DE CONFIANZA, MUESTRAS AL 0, 5, 10, 15, 20 y 25% DE ZEOLITA USANDO CEMENTO TIPO I AL 0%

Días de curado*Porcentaje de zeolita; Unweighted Means (FINAL GRUPAL) Current effect: F(15, 48)=4.2898, p=.00006 Effective hypothesis decomposition							
Cell No.	Días de curado	Porcentaje de zeolita	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95.00%	Esfuerzo de ruptura +95.00%	N
1	7	0	89.2153	5.800250	77.5531	100.8775	3
2	7	5	89.6133	5.800250	77.9511	101.2755	3
3	7	10	81.3259	5.800250	69.6637	92.9881	3
4	7	15	73.0817	5.800250	61.4195	84.7439	3
5	7	20	59.6970	5.800250	48.0348	71.3592	3
6	7	25	52.8934	5.800250	41.2312	64.5556	3
7	14	0	95.4860	5.800250	83.8238	107.1482	3
8	14	5	82.0567	5.800250	70.3945	93.7189	3
9	14	10	87.4010	5.800250	75.7388	99.0632	3
10	14	15	89.7853	5.800250	78.1231	101.4475	3
11	14	20	64.7024	5.800250	53.0403	76.3646	3
12	14	25	91.1263	5.800250	79.4641	102.7885	3
13	21	0	96.0561	5.800250	84.3939	107.7182	3
14	21	5	91.9100	5.800250	80.2478	103.5722	3
15	21	10	102.3022	5.800250	90.6400	113.9643	3
16	21	15	112.3029	5.800250	100.6407	123.9651	3
17	21	20	91.2105	5.800250	79.5483	102.8727	3
18	21	25	57.5987	5.800250	45.9365	69.2609	3
19	28	0	95.7710	5.800250	84.1088	107.4332	3
20	28	5	108.1800	5.800250	96.5178	119.8422	3
21	28	10	110.6124	5.800250	98.9502	122.2746	3
22	28	15	116.2934	5.800250	104.6312	127.9556	3
23	28	20	110.3077	5.800250	98.6455	121.9699	3
24	28	25	99.1500	5.800250	87.4878	110.8122	3

Los datos sombreados muestran las medias de esfuerzos de ruptura más altos a lo largo de la experimentación. Estos se dan al 15% de aditivo en los días de curado 21 y 28 respectivamente. En las tablas a continuación se muestra lo dicho en las líneas anteriores, tomando en cuenta los días de curado y el porcentaje de zeolita correspondientemente.

**TABLA [17]**

MEDIAS DE ESFUERZO DE RUPTURA EN BASE A LOS DÍAS DE CURADO

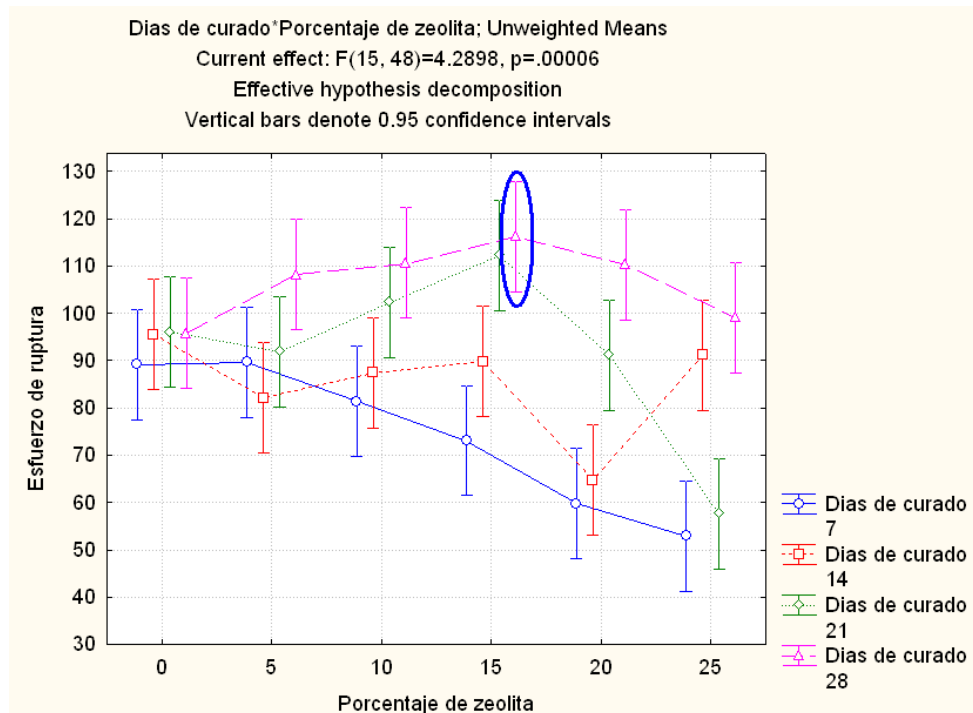
Dias de curado; Unweighted Means (FINAL GRUPAL) Current effect: F(3, 48)=32.849, p=.00000 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Dias de curado	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95.00%	Esfuerzo de ruptura +95.00%	N
1	7	74.3044	2.367942	69.5434	79.0655	18
2	14	85.0930	2.367942	80.3319	89.8540	18
3	21	91.8967	2.367942	87.1357	96.6578	18
4	28	106.7191	2.367942	101.9580	111.4801	18

**TABLA [18]**

MEDIAS DE ESFUERZOS DE RUPTURA EN BASE A LOS PORCENTAJES DE ZEOLITA

Porcentaje de zeolita; Unweighted Means (FINAL GRUPAL) Current effect: F(5, 48)=9.6842, p=.00000 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Porcentaje de zeolita	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95.00%	Esfuerzo de ruptura +95.00%	N
1	0	94.13208	2.900125	88.30099	99.9632	12
2	5	92.94000	2.900125	87.10891	98.7711	12
3	10	95.41037	2.900125	89.57928	101.2415	12
4	15	97.86584	2.900125	92.03474	103.6969	12
5	20	81.47942	2.900125	75.64832	87.3105	12
6	25	75.19208	2.900125	69.36099	81.0232	12



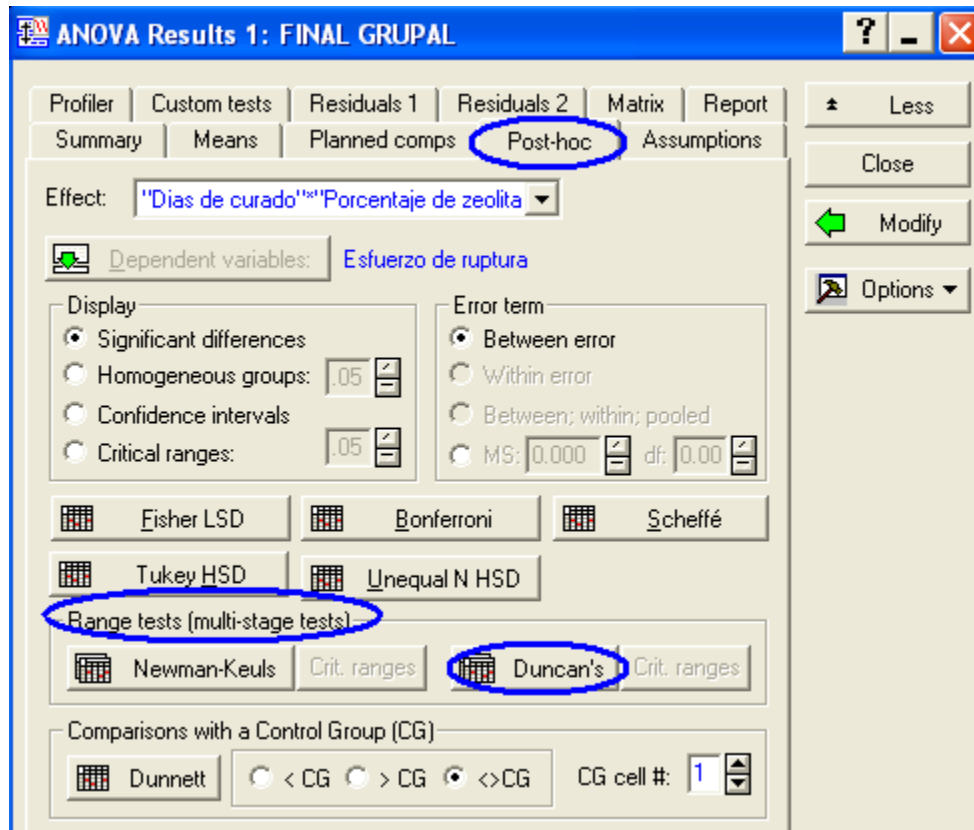


**FIGURA [4.6]** GRÁFICAS DE MEDIAS DE ESFUERZOS DE RUPTURA CON SU RESPECTIVO INTERVALO DE CONFIANZA, MUESTRAS AL 0, 5, 10, 15, 20 Y 25% ZEOLITA

Finalmente, se analizaron los datos por rangos múltiples usando Duncan's, pero antes definieron las hipótesis estadísticas, como sigue:

$H_0$  = Todas las medias de la población son iguales

$H_A$  = Existe por los menos una media diferente.



**FIGURA [4.7]** PANTALLA DE PROGRAMA STATISTICA PARA ANALIZAR LOS DATOS CON RANGOS MÚLTIPLES (DUNCAN)

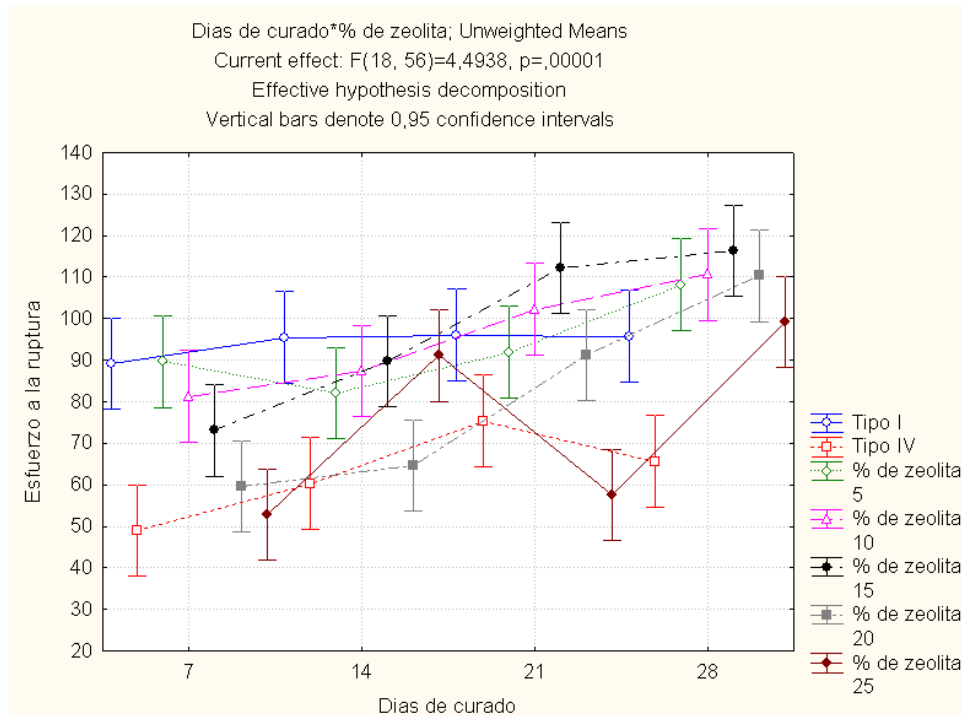
La tabla a continuación muestra el análisis de Duncan, como se puede observar no todas las muestras fueron iguales, por lo que se pudo decir que se aceptó la hipótesis alterna.

En el segundo análisis se incluyeron las muestras con 0% de zeolita pero hechas con cemento Tipo IV.

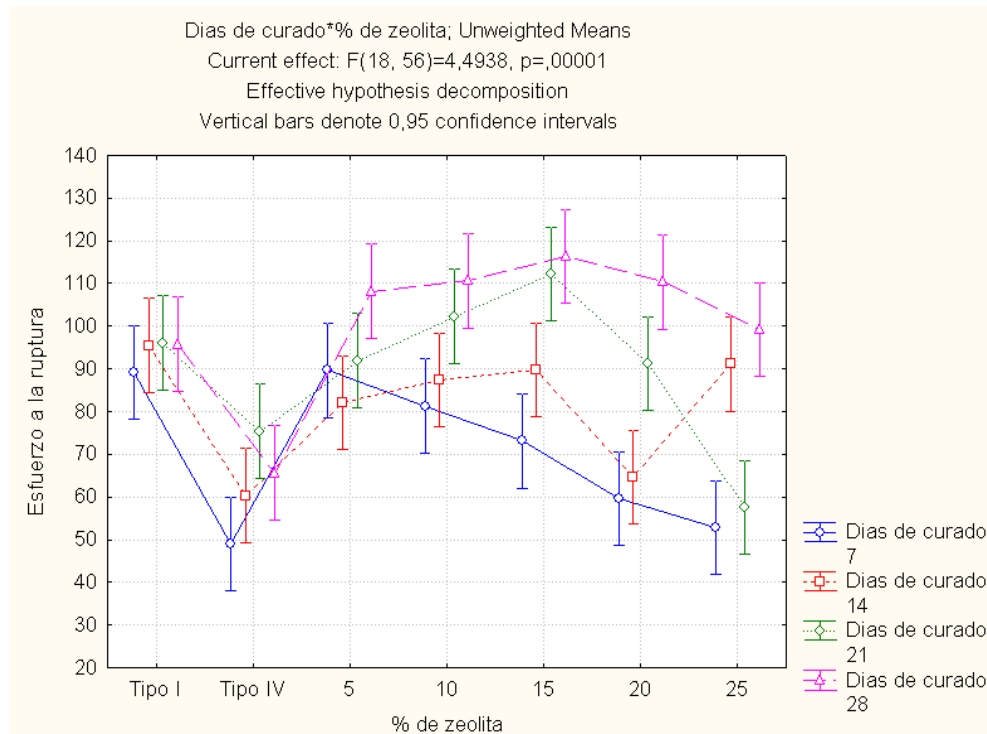
**TABLA [19]**  
**MEDIAS, INTERVALOS DE CONFIANZA, MUESTRAS AL 0, 5, 10, 15, 20 y 25% DE ZEOLITA, USANDO CEMENTO TIPO IV PARA EL 0%**

Dias de curado*% de zeolita; Unweighted Means (análisis grupal) Current effect: F(18, 56)=4,4938, p=.00001 Effective hypothesis decomposition							
Cell No.	Dias de curado	% de zeolita	Esfuerzo a la ruptura Mean	Esfuerzo a la ruptura Std.Err.	Esfuerzo a la ruptura -95,00%	Esfuerzo a la ruptura +95,00%	N
1	7	Tipo I	89.2153	5.487216	78.2231	100.2075	3
2	7	Tipo IV	49.0144	5.487216	38.0222	60.0066	3
3	7	5	89.6133	5.487216	78.6211	100.6055	3
4	7	10	81.3259	5.487216	70.3337	92.3181	3
5	7	15	73.0817	5.487216	62.0895	84.0739	3
6	7	20	59.6970	5.487216	48.7048	70.6892	3
7	7	25	52.8934	5.487216	41.9012	63.8856	3
8	14	Tipo I	95.4860	5.487216	84.4938	106.4782	3
9	14	Tipo IV	60.3254	5.487216	49.3332	71.3176	3
10	14	5	82.0567	5.487216	71.0645	93.0489	3
11	14	10	87.4010	5.487216	76.4088	98.3932	3
12	14	15	89.7853	5.487216	78.7931	100.7775	3
13	14	20	64.7024	5.487216	53.7102	75.6947	3
14	14	25	91.1263	5.487216	80.1341	102.1185	3
15	21	Tipo I	96.0561	5.487216	85.0638	107.0483	3
16	21	Tipo IV	75.4068	5.487216	64.4146	86.3990	3
17	21	5	91.9100	5.487216	80.9178	102.9022	3
18	21	10	102.3022	5.487216	91.3099	113.2944	3
19	21	15	112.3029	5.487216	101.3107	123.2951	3
20	21	20	91.2105	5.487216	80.2183	102.2027	3
21	21	25	57.5987	5.487216	46.6065	68.5909	3
22	28	Tipo I	95.7710	5.487216	84.7788	106.7632	3
23	28	Tipo IV	65.6667	5.487216	54.6745	76.6589	3
24	28	5	108.1800	5.487216	97.1878	119.1722	3
25	28	10	110.6124	5.487216	99.6202	121.6046	3
26	28	15	116.2934	5.487216	105.3012	127.2856	3
27	28	20	110.3077	5.487216	99.3155	121.2999	3
28	28	25	99.1500	5.487216	88.1578	110.1422	3

La tabla 19 mostrada arriba indica las medias aritméticas de las muestras en base a las cuales se realizó el análisis estadístico Duncan's

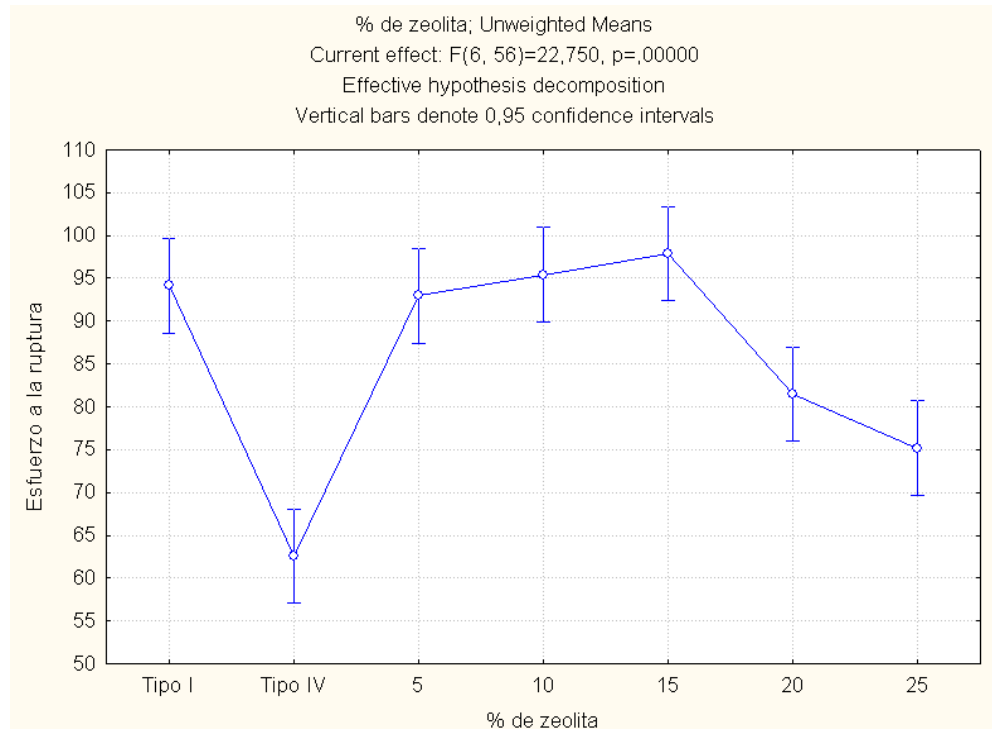


**FIGURA [4.8] MEDIAS DE ESFUERZOS DE RUPTURA CON SU RESPECTIVO INTERVALO DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO DE LAS MUESTRAS AL TIPO IV, 0, 5, 10, 15, 20 Y 25% ZEOLITA**



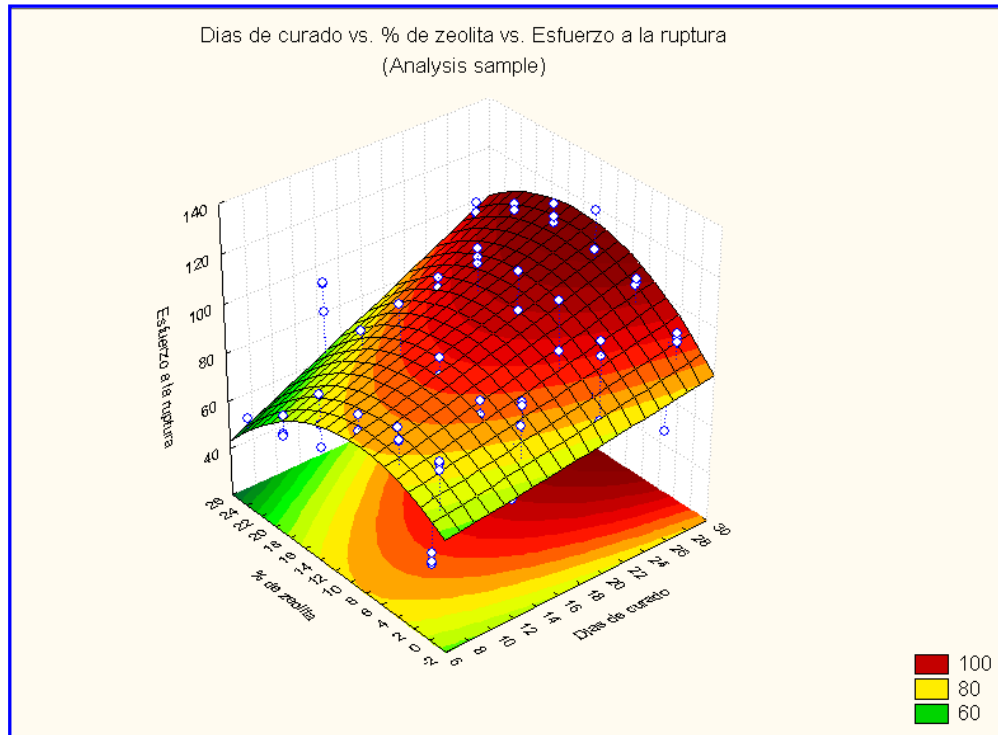
**FIGURA [4.9] COMPARACIÓN DE MEDIAS DE ESFUERZOS DE RUPTURA CON SU RESPECTIVO INTERVALO DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA (TIPO IV, 0, 5, 10, 15, 20 Y 25%)**

De acuerdo a las figuras 4.8 y 4.9 mostrada arriba se comprobó que, el 15% de adición de zeolita a los 28 días de curado en agua, presentaron un aumento significativo de la resistencia a la compresión incluso mayor a la mezcla formada con cemento Tipo IV, presentando esta mezcla una resistencia menor a las demás muestras con diferentes porcentajes de Zeolita tipo I.



**FIGURA [4.10] MEDIAS DE ESFUERZOS DE RUPTURA CON SU RESPECTIVO INTERVALO DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA (TIPO IV, TIPO I, 5, 10, 15, 20 Y 25%)**

Es importante recalcar que el 15% de zeolita de acuerdo a la figura 4.9 siempre mantuvo un aumento de la resistencia a la compresión conforme pasaron los días de curado en agua. Con este análisis se distinguió que el mejor porcentaje para trabajos que estén sometidos a grandes cargas de compresión, es cemento con 15 % de adición de Zeolita.



**FIGURA [4.11]** SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LOS ESFUERZOS DE RUPTURA VS DÍAS DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA

En la superficie de respuestas se observa que el 15% de adición de zeolita comparado con las muestras de cemento sin aditivo (Tipo I) y cemento tipo IV (comercial) presentó mayor resistencia a la compresión de acuerdo a los picos dados en la gráfica de superficie.

Este porcentaje de zeolita (15%), presentó mayor esfuerzo de compresión a los 28 días de curado en agua, en relación a los otros porcentajes.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Se comprobó que la curva  $\sigma$  vs  $\epsilon$  experimental tuvo un comportamiento elasto-plástico como se esperaba de la información teórica existente.
- Se comprobó que al 5% de zeolita ecuatoriana, la resistencia a la compresión en la pasta de cemento aumentó conforme pasaron los días de curado (7, 14, 21 y 28 respectivamente).
- El esfuerzo de ruptura mayor experimental, en muestras con 5% de zeolita fue 116.29 MPa, que correspondieron al 28avo día de curado.



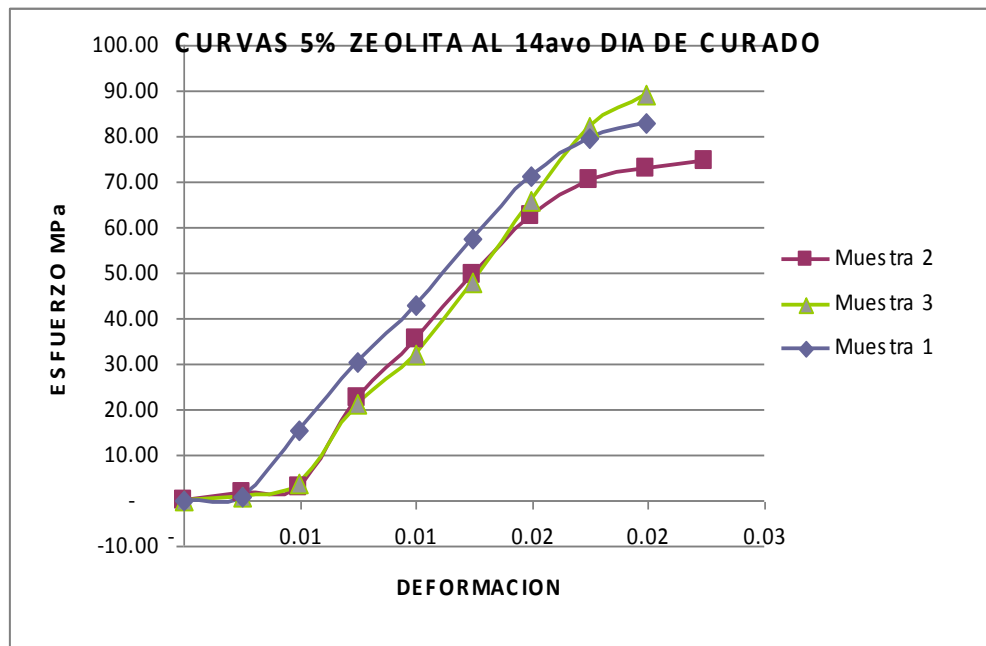
- El error total del experimento al 5% de zeolita, fue de 10,9%, que está dentro de un rango aceptable de acuerdo a los diferentes factores experimentales que influenciaron en esta investigación.
- La resistencia a la compresión en la pasta de cemento Tipo I aumentó gradualmente hasta aproximadamente el 15% de adición de zeolita, luego de este porcentaje empezó a decrecer. El valor del esfuerzo en este punto fue de 116,29 MPa.
- Todos los valores de esfuerzo en el cemento tipo I con 5% de zeolita fueron mayores que en cemento Tipo IV.
- Al finalizar los experimentos y análisis respectivos, se puede decir que, sí hay un efecto positivo en el aumento de la resistencia a la compresión en la pasta de cemento en presencia de zeolita. Razón por la cual se podría sustituir el 15% de cemento tipo I por zeolita en el proceso de fabricación y en consecuencia podría bajar el nivel de contaminación debido a los gases emanados al quemar clinker.
- Esta investigación ha sido muy enriquecedora para la industria cementera, porque queda claro que en el caso que necesiten un material aditivo que aumente la resistencia a la compresión en la pasta de cemento, la zeolita al 15% es una buena alternativa para este uso y, también en un futuro podrá ser un reemplazo a los aditivos utilizados actualmente cuando sean escasos.

## **Recomendaciones**

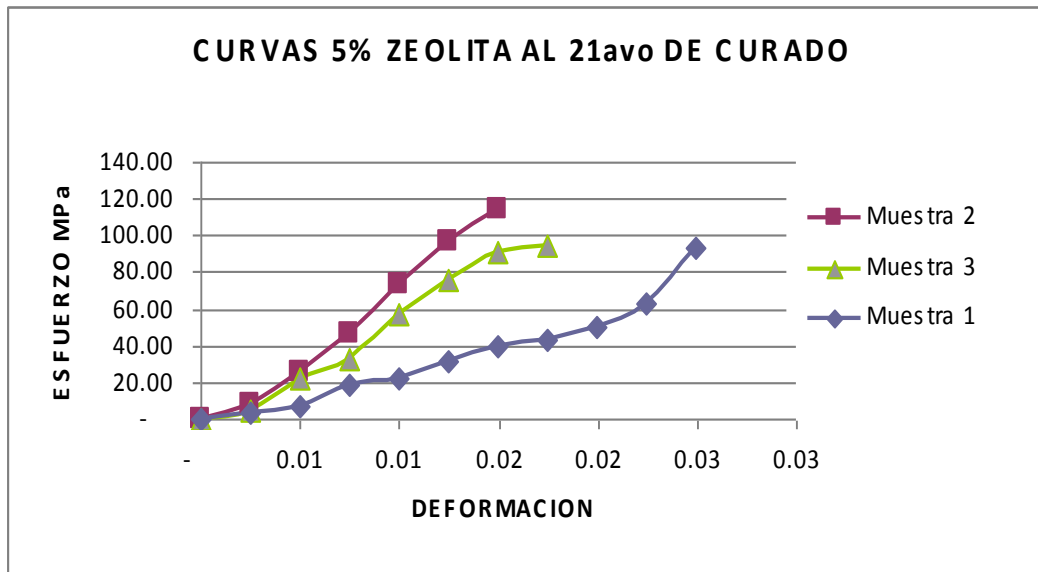
- Tener en cuenta que el almacenamiento de la zeolita debe ser en un ambiente con una humedad relativa de aproximadamente 50%, debido a que gana fácilmente humedad y esto puede repercutir en el proceso de mezclado.
- Compactar y apisonar bien la mezcla al introducirla en los moldes respectivos, para evitar la presencia de burbujas de aire que pueden influenciar grandemente en el ensayo a la compresión.
- Es recomendable usar una máquina que tenga control electrónico, para así no depender del error humano en la aplicación de las diferentes cargas si se lo hace manualmente y también, en la lectura de las resistencias.
- En general, realizar el experimento con mucha concentración y tomando en cuenta las indicaciones dadas por el instructor.

# APÉNDICE

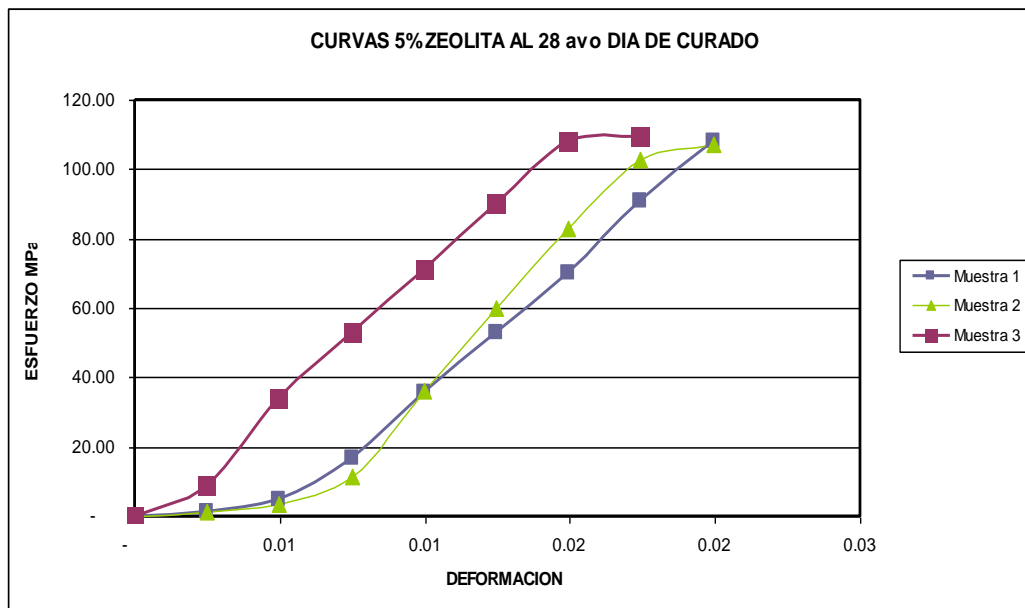
## APÉNDICE 1



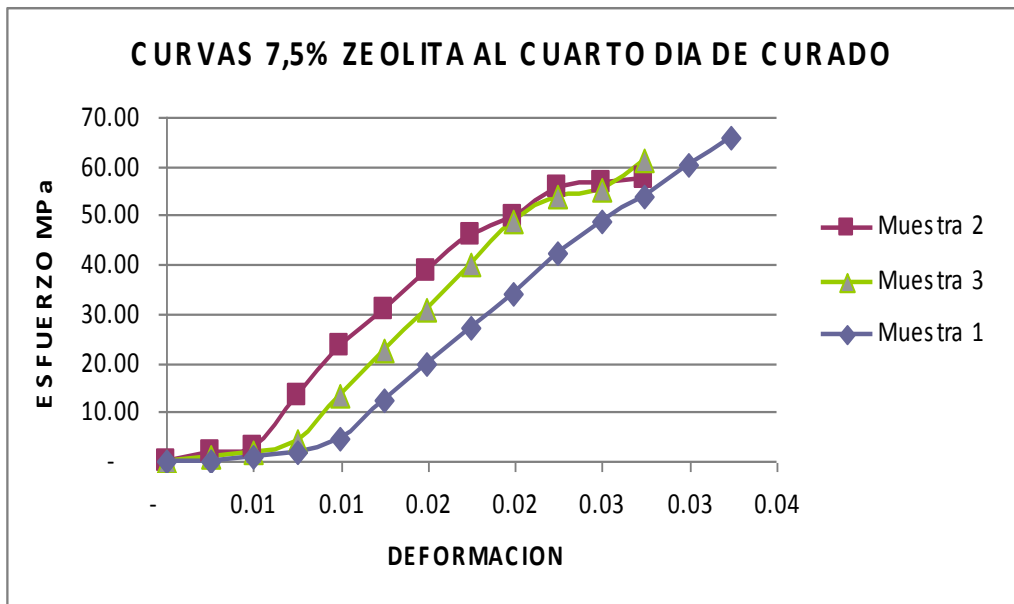
**FIGURA [1] CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DE MUESTRA CON 5% DE ZEOLITA AL 14<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO**



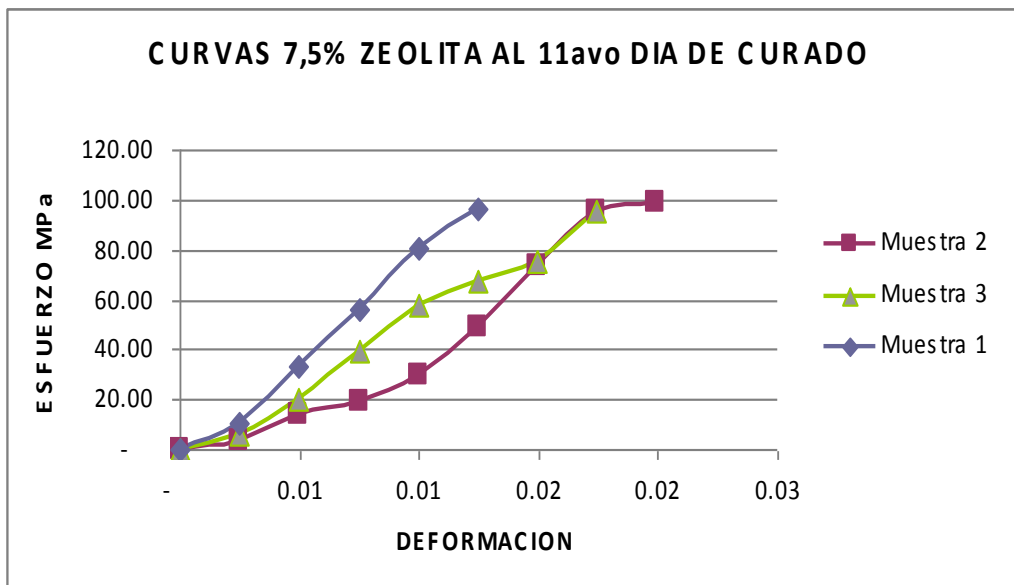
**FIGURA [2] CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DE MUESTRA CON 5% DE ZEOLITA AL 21<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO**



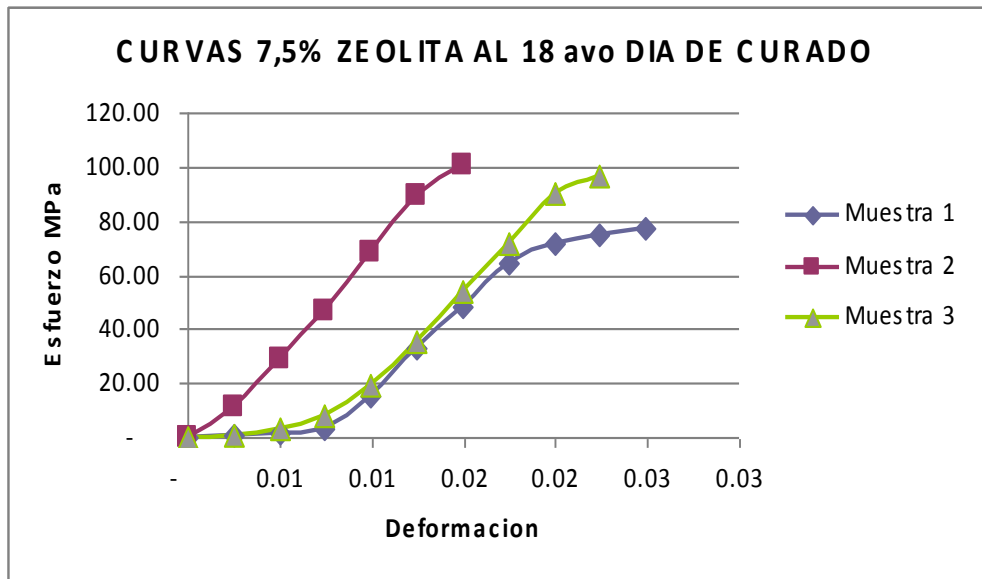
**FIGURA [3] CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DE MUESTRA CON 5% DE ZEOLITA AL 28<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO**



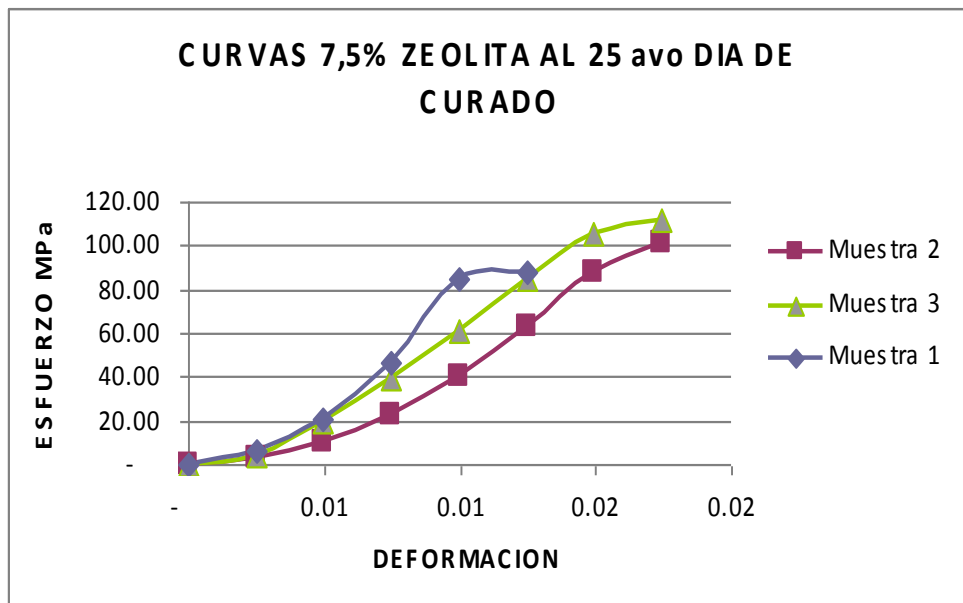
**FIGURA [4]** CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DE MUESTRA CON 7,5% DE ZEOLITA AL 4<sup>TO</sup> DÍA DE CURADO



**FIGURA [5]** CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DE MUESTRA CON 7,5% DE ZEOLITA AL 11<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO

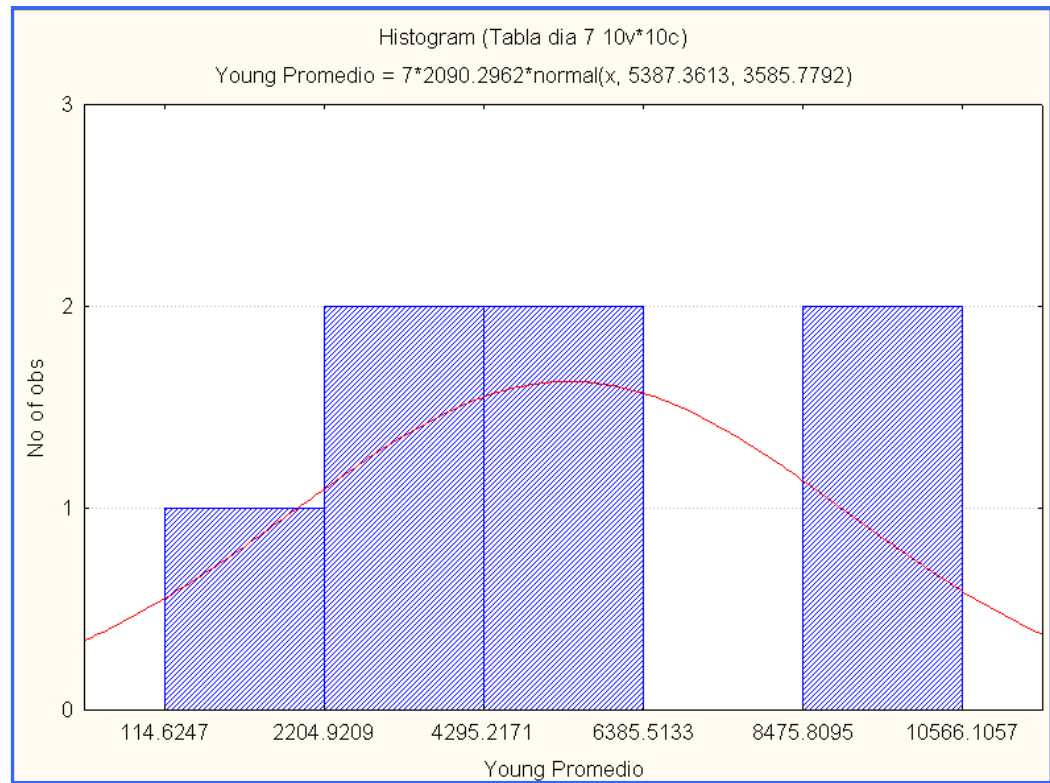


**FIGURA [6]** CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DE MUESTRA CON 7,5% DE ZEOLITA AL 18<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO



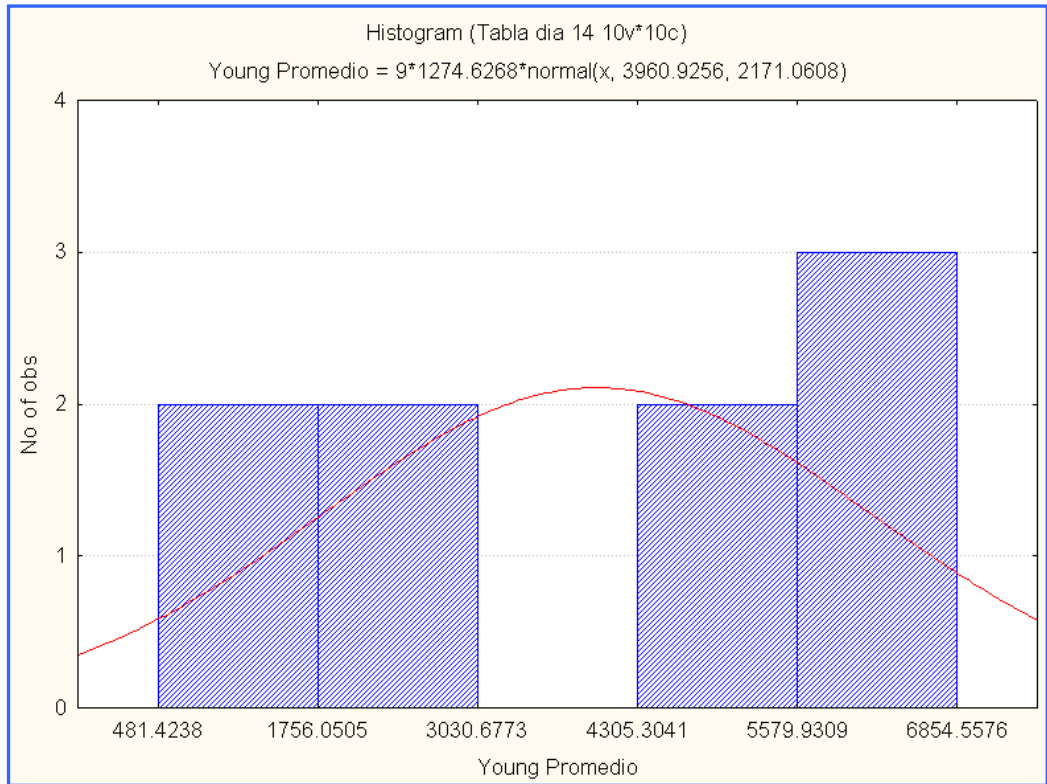
**FIGURA [7]** CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN DE MUESTRA CON 7,5% DE ZEOLITA AL 25<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO

## APÉNDICE 2

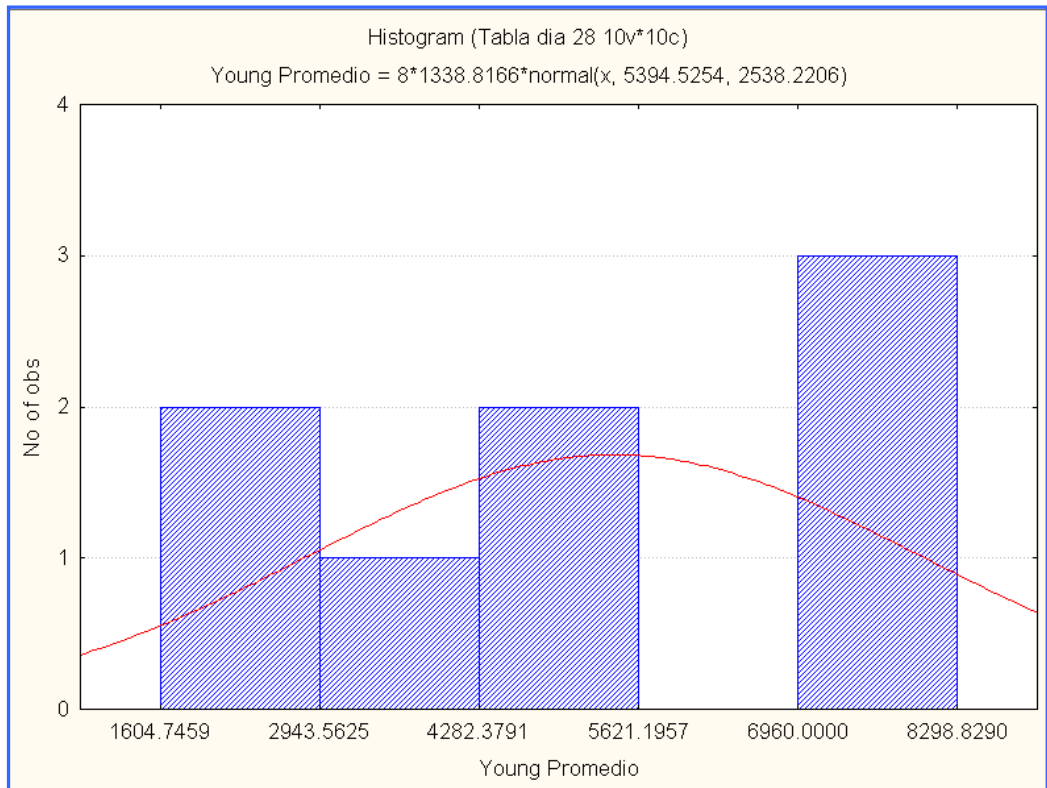


**FIGURA [8]** HISTOGRAMA DE FRECUENCIA AL 5% DE ZEOLITA 7<sup>MO</sup> DÍA DE CURADO, PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS

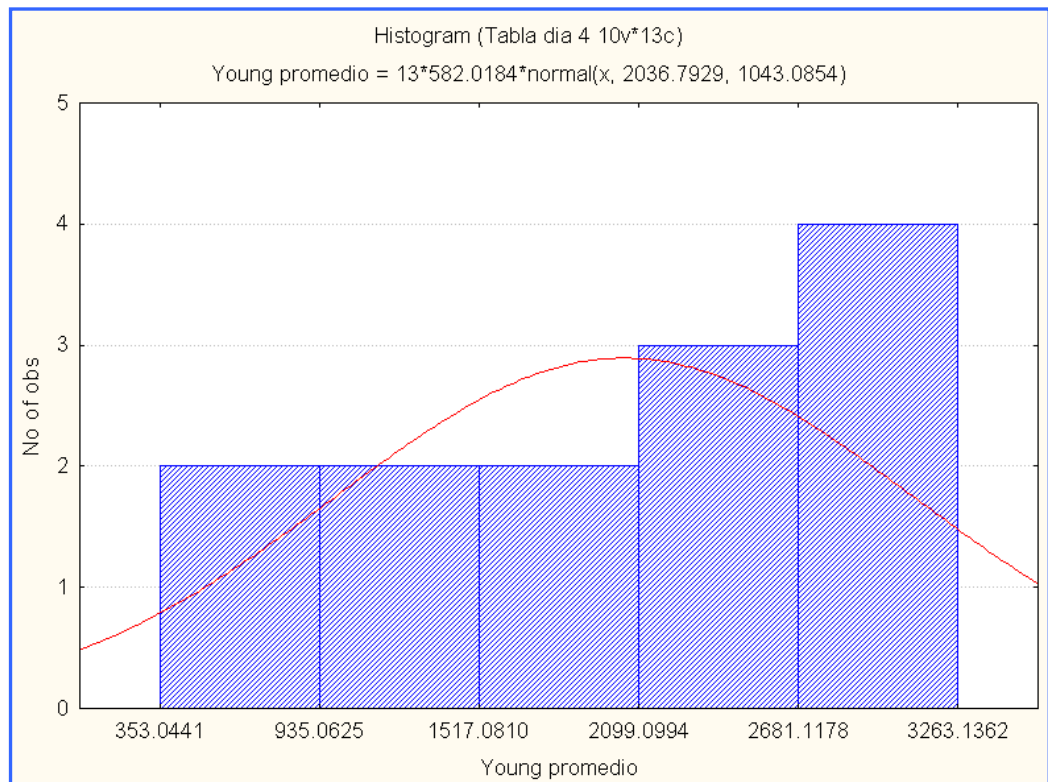




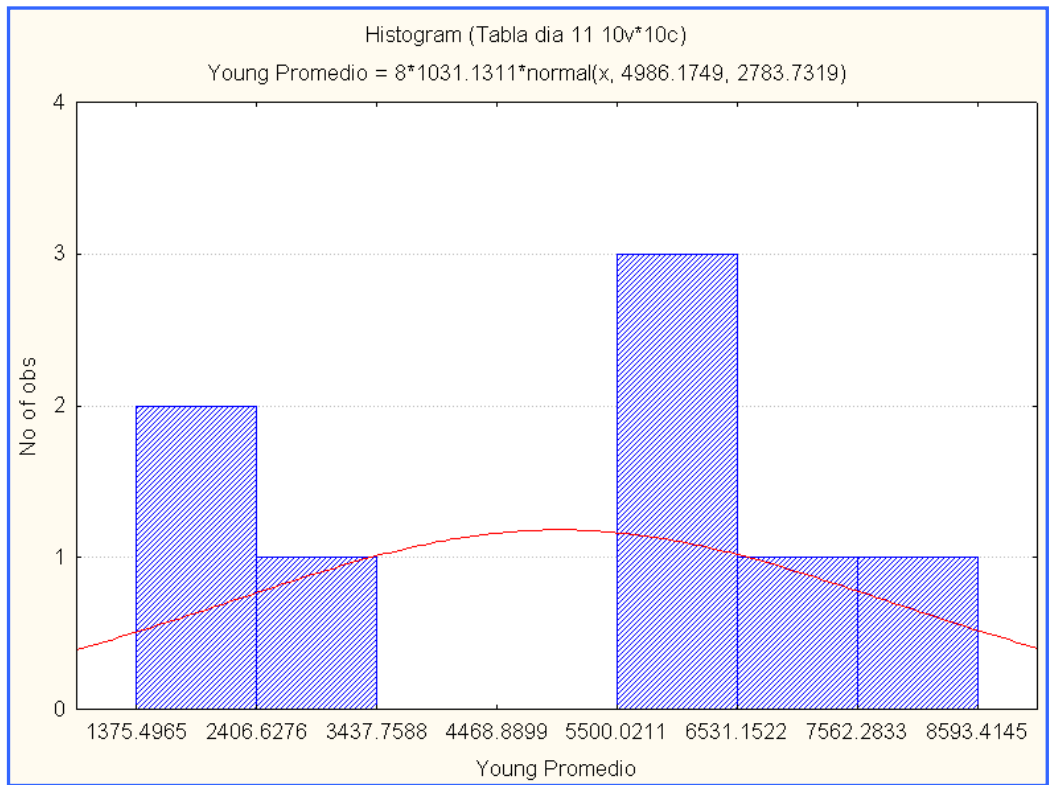
**FIGURA [9]** HISTOGRAMA DE FRECUENCIA AL 5% DE ZEOLITA 14<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO, PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS



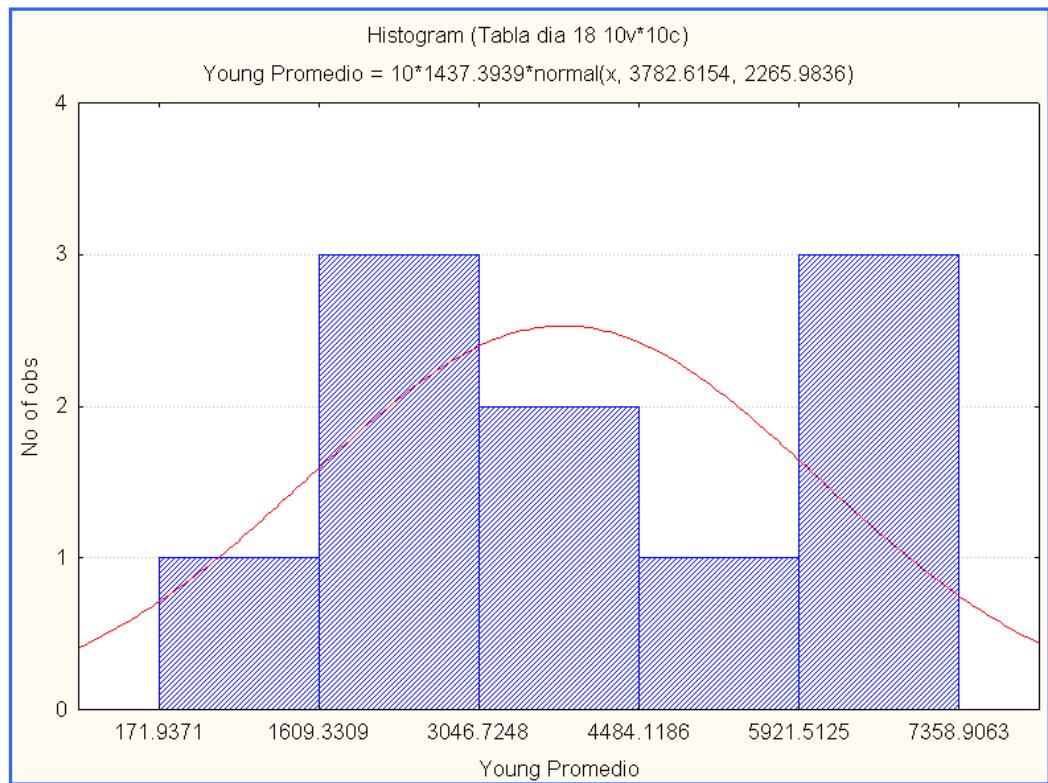
**FIGURA [10]** HISTOGRAMA DE FRECUENCIA AL 5% DE ZEOLITA 28<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO, PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS



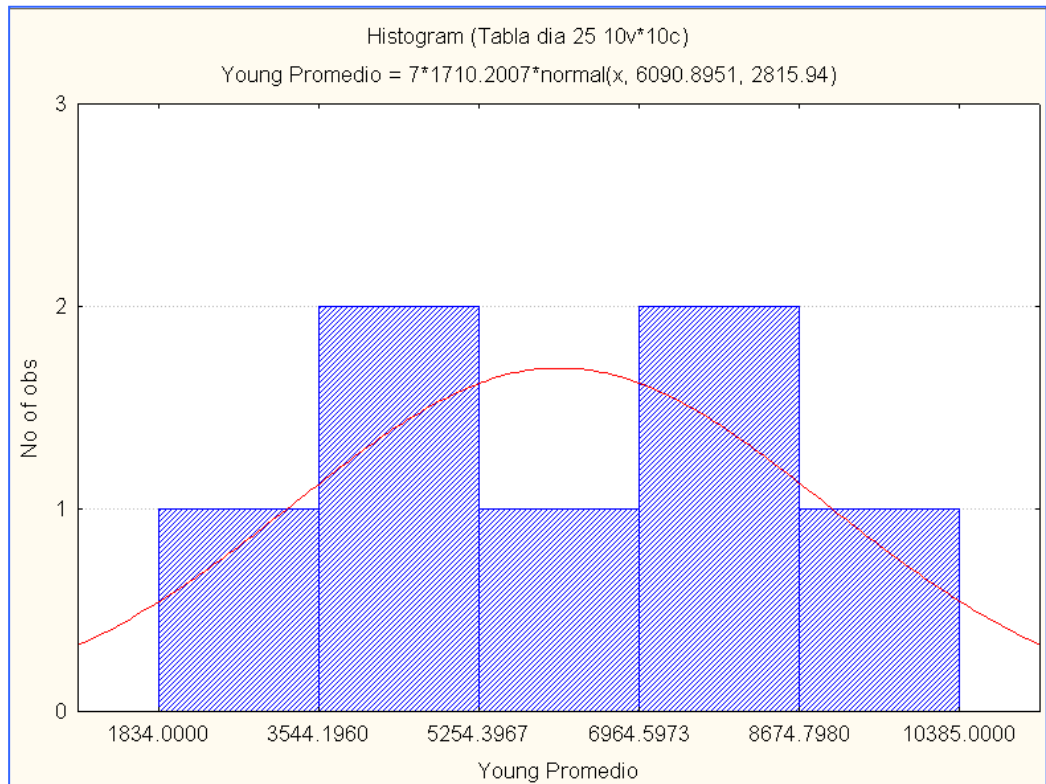
**FIGURA [11]** HISTOGRAMA DE FRECUENCIA AL 7,5% DE ZEOLITA 4<sup>TO</sup> DÍA DE CURADO, PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS



**FIGURA [12]** HISTOGRAMA DE FRECUENCIA AL 7,5% DE ZEOLITA 11<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO, PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS

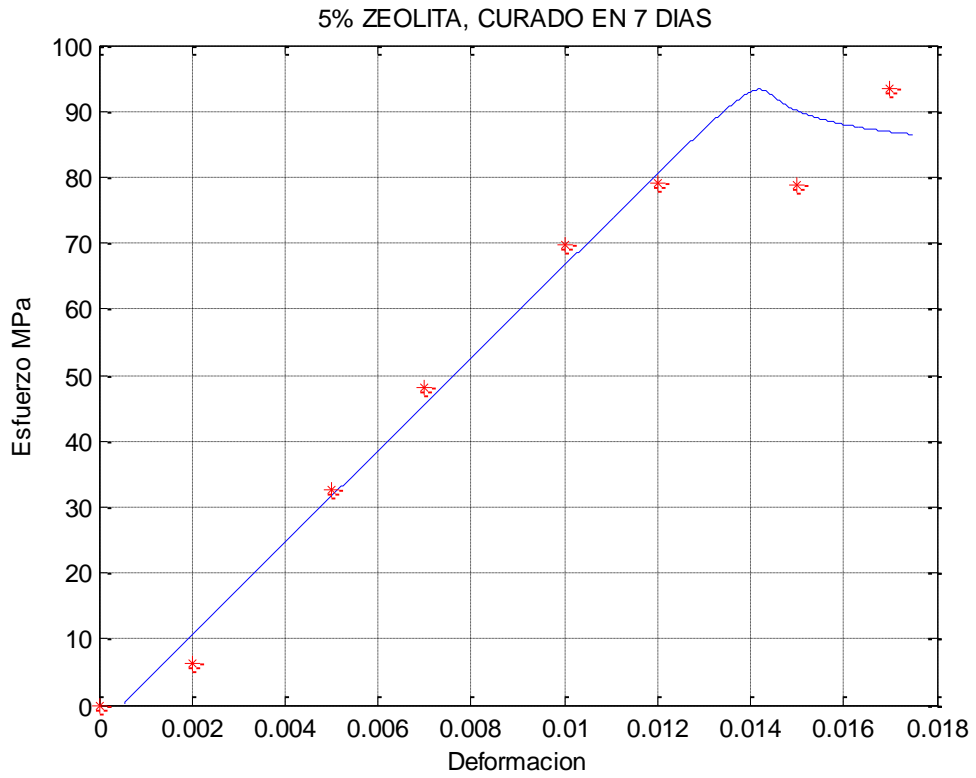


**FIGURA [13]** HISTOGRAMA DE FRECUENCIA AL 7,5% DE ZEOLITA 18<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO, PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS

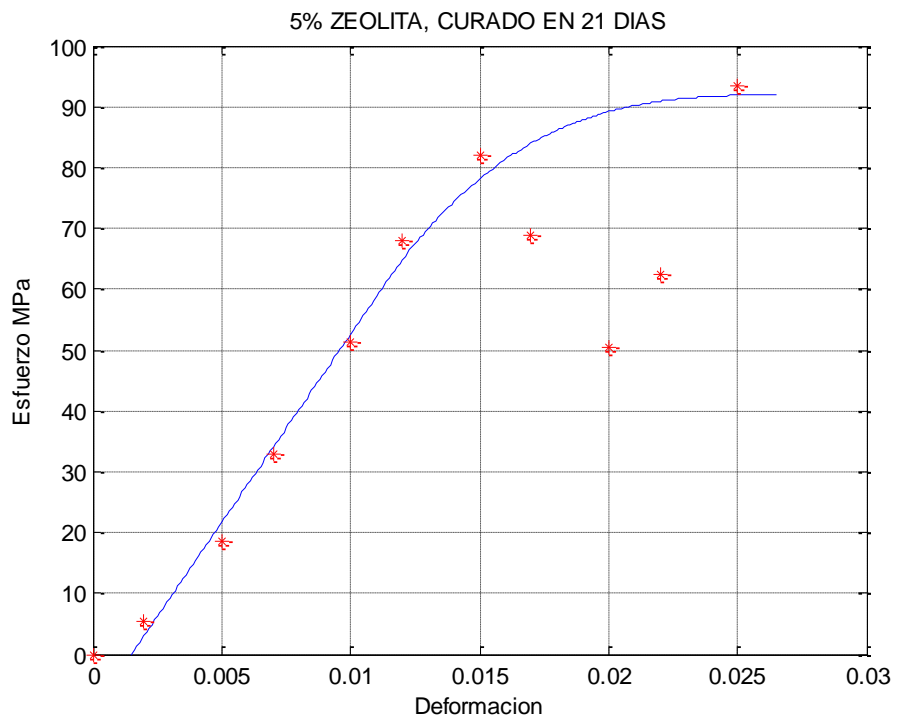


**FIGURA [14]** HISTOGRAMA DE FRECUENCIA AL 7,5% DE ZEOLITA 25<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO, PROMEDIO DEL MÓDULO DE YOUNG DE LAS TRES MUESTRAS

## APÉNDICE 3

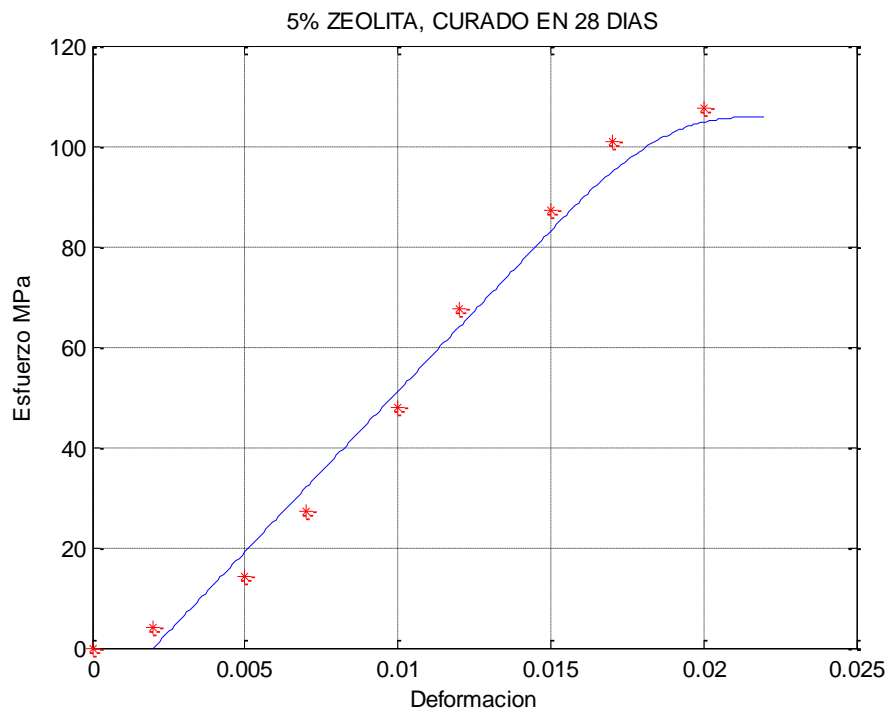


**FIGURA [15]** GRÁFICA DE APROXIMACIÓN DE LA CURVA TEÓRICA A LA EXPERIMENTAL. 5% DE ZEOLITA, 7<sup>MO</sup> DÍA DE CURADO



**FIGURA [16]** GRÁFICA DE APROXIMACIÓN DE LA CURVA TEÓRICA A LA EXPERIMENTAL. 5% DE ZEOLITA, 21<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO





**FIGURA [17]** GRÁFICA DE APROXIMACIÓN DE LA CURVA TEÓRICA A LA EXPERIMENTAL. 5% DE ZEOLITA, 28<sup>AVO</sup> DÍA DE CURADO

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jimenez, H. "TECNOLOGÍA DEL CONCRETO". UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA DEL PERÚ". [www.fic.uni.edu.pe](http://www.fic.uni.edu.pe). Febrero, 2008.
- [2] Reyes, G. "MANUFACTURA DEL CEMENTO PÓRTLAND". [www.monografias.com](http://www.monografias.com). Marzo, 2008.
- [3] Anton, A. "EL EXPERIMENTO FACTORIAL", [www.uned.es](http://www.uned.es). Marzo, 2008
- [4] Servin, J. "METALURGIA DE MINERALES NO METÁLICOS", [www.monografias.com](http://www.monografias.com). Marzo, 2008.
- [5] Gutiérrez, M. "ZEOLITAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES", Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Marzo, 2008.
- [6] \_\_\_\_\_, "QUÉ ES UNA ZEOLITA", [www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx](http://www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx), Febrero, 2008.

- [8] ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, Mayo 2008.
- [9] Galbiati, J. "REGRESION LINEAL SIMPLE", [http://www.jorgegalbiati.cl/enero\\_07/Regresion.pdf](http://www.jorgegalbiati.cl/enero_07/Regresion.pdf), Mayo,2008
- [10]Hani H. Nassif \*, Husam Najm, Nakin Suksawang "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC", Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers, The State University of New Jersey, 98 Brett Road, SOE Building, 131 A-Wing, Piscataway, NJ 08854, USA. December 2004.
- [11]Abdulkadir Cuneyt Aydin, Abdussamet Arslan, Rustem Gul, "Mesoscale simulation of cement based materials' time-dependent behavior". Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ataturk University, Erzurum, Turkey, Department of Civil Engineering, Engineering and Architecture Faculty, Gazi University, Ankara, Turkey. 23 February 2007.
- [12]J. Zelić, D. Rusic, R Krstulovic. "A mathematical model for prediction of compressive strength in cement–silica fume blends" . Faculty of Chemical Technology, Department of

Engineering and Technology, University of Split, Teslina  
10/V, HR-21000 Split, Croatia. 9 April 2004.