

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

“Estudio y Simulación del Comportamiento del Cemento  
Pórtland Tipo I con la Adición de 15% de Zeolita  
Ecuatoriana Mediante el Curado al Aire”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Bernardo Alberto Mazacón Baño

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2009

## AGRADECIMIENTO

A los maestros que durante mis años de estudio me han brindado sus sabios conocimientos, a todas las personas que colaboraron para la realización de este trabajo, y especialmente a mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar.

## DEDICATORIA

ESTE TRABAJO DE  
VARIOS MESES DE  
ESFUERZO, ESTÁ  
DEDICADO A MIS  
PADRES, HERMANOS,  
FAMILIARES Y  
AMIGOS.

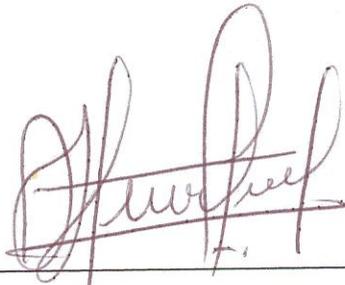
## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Dra. Cecilia Paredes V.  
DELEGADA POR EL  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



Ing. Mauricio Cornejo M.  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Juan Pindo M.  
VOCAL



CIB - ESPOL

## DECLARACION 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”



---

Bernardo Alberto  
Mazacón Baño

## RESUMEN

El presente trabajo se basa en el análisis y modelación mediante métodos numéricos del comportamiento de una pasta de cemento, compuesto por cemento Pórtland tipo I y zeolita de la comuna de Manglaralto de la provincia ecuatoriana de Santa Elena. La pasta de cemento compuesto estuvo expuesta a un proceso de curado al aire. Las variables analizadas fueron: las independientes, el porcentaje de zeolita y el tiempo de curado; siendo la función de respuesta, la resistencia máxima a la compresión de un cubo de pasta de cemento compuesto.

Este trabajo se realizó debido a la necesidad de buscar nuevos aditivos naturales que puedan suplir a las cenizas volcánicas como aditivos puzolánicos en el cemento Pórtland Tipo I, además de las tendencias que existen a nivel mundial para la investigación en ciencias e ingeniería de materiales.

El presente estudio tiene por objetivo científico-tecnológico, implementar un modelo por medio de métodos numéricos de modo que se pueda

describir el comportamiento de una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita y sometida a un proceso de curado al aire; además de comprobar los efectos que causa la adición de aditivos puzolánicos como la zeolita en las propiedades mecánicas de un material de construcción como lo es el cemento compuesto.

La metodología en que se basó el desarrollo de esta tesis consta de dos partes; la primera, el trabajo de campo, el cual consistió en la recolección de la zeolita de un yacimiento en la comuna de Manglaralto de la provincia ecuatoriana de Santa Elena mediante un método de muestreo; la segunda parte es el trabajo de Laboratorio, el cual consistió en seguir el procedimiento descrito en esta tesis para la preparación de las probetas y la recolección de datos, en este caso estos datos fueron la resistencia a la compresión para lo cual se usó la máquina de ensayos de compresión del laboratorio de suelos, rocas y materiales de la FICT (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL). Además mediante la computadora se realizó la simulación computacional del comportamiento del concreto.

La adición de la zeolita se la realizó en un porcentaje de 15% con respecto al peso del cubo de pasta de cemento, el cual se lo diseñó

utilizando como referencia la norma **ASTM C 109/C 109M-02** con algunas variaciones, como por ejemplo, que en lugar de morteros se utilizó pasta de cemento compuesto en cubos de 50mm de arista compuestos por cemento tipo I, agua y el 15% de zeolita.

Los datos empíricos que se obtuvieron del laboratorio fueron la resistencia a la compresión de las muestras de cemento compuesto, las cuales fueron curadas al aire y se tomaron tres medidas del esfuerzo de compresión cada 7, 14, 21 y 28 días respectivamente, estos datos permitieron la modelación por computadora con lo que se obtuvo un mejor ajuste entre los datos modelados en la computadora y el comportamiento real del cemento compuesto, también se analizó por medio de métodos estadísticos la influencia de la zeolita y del curado al aire en la pasta de cemento compuesto cuando a la pasta de cemento compuesto se le agrega 5, 10, 15, 20 y 25% de zeolita y se los comparó con un patrón de cemento Pórtland Tipo I (0% de zeolita y expuesto al curado al aire).

Además, se realizó lo descrito en el párrafo anterior para porcentajes intermedios de zeolita (7.5, 12.5, 17.5, 22.5 y 27.5% de zeolita) y tiempos de curado intermedios empezando desde el cuarto día en intervalos de

siete días hasta llegar al día veinte y cinco, estos datos sirvieron para validar lo realizado con los otros porcentajes.

Una vez que se realizó el análisis de la influencia del curado al aire y la adición de zeolita en una pasta de cemento compuesto se concluyó que el curado al aire no afecta en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita, y que al agregarle zeolita del yacimiento mencionado en uno de los párrafos anteriores la resistencia a la compresión disminuye y que entre más zeolita se le agregue disminuye aún más esta resistencia. Además en el presente estudio se implementó un modelo computacional en matlab el cual permitió simular el comportamiento de una pasta de cemento compuesto.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.1. Antecedentes y Justificación.....	5
1.2. Objetivos.....	7
1.2.1. Objetivos Generales.....	7
1.2.2. Objetivos Específicos.....	7

1.3. Metodología.....	9
1.4. Estructura de la tesis.....	14

## CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO PUZOLÁNICO.....	16
2.1. Cemento Pórtland tipo I.....	16
2.2. Materiales Pozolánicos Naturales.....	24
2.3. Zeolita.....	29
2.3.1. Generalidades.....	29
2.3.2. Aplicaciones.....	31
2.4. Clasificación y Características de la Zeolita.....	33
2.5. Cemento Pozolánico.....	36
2.6. Métodos de curado del Concreto.....	37
2.7. Otras investigaciones relacionadas.....	44

## CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	50
3.1. Diseño Experimental.....	50

3.2. Preparación y Ensayo de las probetas.....	65
3.3. Simulación Computacional.....	87

#### CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	95
4.1. Ensayo de Compresión.....	95
4.2. Análisis Estadístico.....	107
4.3. Resultados del Modelo computacional.....	146

#### CAPÍTULO 5

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	157
5.1. Conclusiones.....	157
5.2. Recomendaciones.....	160

#### APÉNDICES

#### BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato Tricálcico
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Aluminoferrito Tetracálcico
ASTM	American Society of Testing Materials
ClH	Cloruro de Hidrogeno
HRB	Dureza Rockwell B
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL
g	Gramos
NaOH	Hidróxido de Sodio
h	Horas
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
MPa	Mega Pascales
m	Metros
$\mu$	Micras
mL	Mili litros
mm	Milímetros
$\text{mm}^2$	Milímetro Cuadrado
$\text{mm}^3$	Milímetro Cúbico
min	Minutos
CaO	Oxido de Calcio
MgO	Oxido de Magnesio (periclasa)
RPM	Revoluciones por minuto
s	Segundos
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato Dicálcico
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato Tricálcico
$\text{CaSO}_4$	Tetrasulfato de Calcio

## SIMBOLOGÍA

A	Área
$\varepsilon$	Deformación de la Probeta
m	Deformación Inelástica Total
SS	Desviación Estándar
$\sigma$	Esfuerzo
$\sigma_y$	Esfuerzo de Fluencia
$\sigma_{\text{máx(Modelo)}}$	Esfuerzo Máximo del Modelo.
$\sigma_{\text{máx}}$	Esfuerzo Máximo Experimental
$\sigma_u$	Esfuerzo Último de Compresión
F	Fuerza de Compresión en Newton
$F_0$	Fuerza Observada de Compresión
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
$H_1$	Hipótesis Alternativa
$H_0$	Hipótesis Nula
HR	Humedad Relativa
$L_f$	Longitud Final de Deformación
$L_0$	Longitud Inicial de Deformación
$Y_0$	Marca de compresión observada en la Máquina
u	Media de los Tratamientos
E	Módulo de Elasticidad de Young
$H'$	Módulo de Plasticidad
$\alpha$	Nivel de Significancia Probabilístico
N	Número de Probetas o Replicas
$p_{\text{calculado}}$	Probabilidad Calculada
p	Probabilidad Estadística
$p_{\text{Teórico}}$	Probabilidad Teórica
$\sigma_n^{tr}$	Valor constante de la deformación del modelo
a	Valor constante del modelo
$F_{\text{calculado}}$	Valor Estadístico Calculado
F	Valor Estadístico de Fischer
$F_{\text{Teórico}}$	Valor Estadístico Teórico
W	Valor Tabulado de Shapiro Wilk

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Metodología de la tesis .....	9
Figura 2.1 Piedra de Zeolita.....	30
Figura 2.2 Ejemplo de un sistema de spray para mantener la Humedad relativa en un cuarto de humedad .....	41
Figura 3.1 Gráfica de la densidad de probabilidad normal .....	58
Figura 3.2 Balanza electrónica .....	66
Figura 3.3 Molde .....	68
Figura 3.4 Mezclador y tazón .....	68
Figura 3.5 Paleta .....	69
Figura 3.6 Máquina de ensayos universal .....	70
Figura 3.7 Molino de mandíbulas .....	72
Figura 3.8 Zeolita al salir del molino de mandíbulas .....	73
Figura 3.9 Molino de Rodillos .....	73
Figura 3.10 Granulometría del material al salir del molino de rodillos .....	74
Figura 3.11 Cuarteando el material .....	74
Figura 3.12 Tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo .....	75
Figura 3.13 Molino de discos .....	76
Figura 3.14 Molino de bolas .....	77
Figura 3.15 Tamices 325 y fondo .....	77
Figura 3.16 Zeolita con granulometría final 45 $\mu$ m .....	78
Figura 3.17 Aplicación del aceite .....	79
Figura 3.18 Homogeneidad .....	82
Figura 3.19 Obtención de la pasta de cemento compuesto .....	83
Figura 3.20 Preparación de las muestras.....	84
Figura 3.21 Compactación de las muestras.....	84
Figura 3.22 Muestras para las pruebas.....	85
Figura 3.23 Ensayo de compresión.....	86

Figura 3.24	Representación gráfica de los parámetros.....	88
Figura 4.1	Datos de esfuerzo a la compresión y tiempo de curado para una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita.....	109
Figura 4.2	Histograma de esfuerzos para pastas de cemento con una concentración de 15% de zeolita.....	110
Figura 4.3	Residuos vs. Número de casos para pastas de cemento con una concentración de 15% de zeolita.....	111
Figura 4.4	Probabilidad normal de los residuos para pastas de cemento con 15% de zeolita.....	112
Figura 4.5	Datos de esfuerzo a la compresión y tiempo de curado para una pasta de cemento compuesto con 17.5% de zeolita.....	113
Figura 4.6	Histograma de esfuerzos para pastas de cemento con una concentración de 17.5% de zeolita.....	114
Figura 4.7	Residuos vs. Número de casos para pastas de cemento con una concentración de 17.5% de zeolita.....	115
Figura 4.8	Probabilidad normal de los residuos para pastas de cemento con 17.5% de zeolita.....	116
Figura 4.9	Prueba univariada.....	118
Figura 4.10	Rango en el que se encuentra la media de los tratamientos $\alpha=0.05$ .....	119
Figura 4.11	Rangos de las medias de los tratamientos (15% de zeolita)..	120
Figura 4.12	Análisis de Post Hoc de Tukey HSD (15% de zeolita).....	122
Figura 4.13	Prueba univariada para la validación.....	124
Figura 4.14	Rango en el que se encuentra la media de los tratamientos $\alpha=0.05$ (17.5% de zeolita).....	125
Figura 4.15	Rangos de las medias de los tratamientos (17.5% de zeolita).....	126
Figura 4.16	Análisis de Post Hoc de Tukey HSD (17.5% de zeolita).....	127
Figura 4.17	Distribución normal del esfuerzo a la compresión para el tiempo de curado y el porcentaje de zeolita.....	129

Figura 4.18	Residuos vs. número de casos para pastas de cemento con diferentes concentraciones de zeolita y tiempo de curado.....	130
Figura 4.19	Probabilidad normal de los residuos para pastas de cemento con diferentes concentraciones de zeolita.....	131
Figura 4.20	Distribución normal del esfuerzo a la compresión para el tiempo de curado y el % de zeolita para la validación.....	132
Figura 4.21	Residuos vs. Número de casos para pastas de cemento con diferentes concentraciones de zeolita y tiempo de curado (validación).....	133
Figura 4.22	Probabilidad normal de los residuos para pastas de cemento con diferentes concentraciones de zeolita (validación).....	134
Figura 4.23	Análisis de covarianza grupal.....	135
Figura 4.24	Análisis de varianza factorial del esfuerzo de compresión de una pasta de cemento con diferentes porcentajes de zeolita y para distintos días de curado .....	136
Figura 4.25	Rangos del esfuerzo a la compresión para los factores tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	137
Figura 4.26	Esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado.....	138
Figura 4.27	Curvas de nivel del esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempos de curado.....	139
Figura 4.28	Superficie de respuesta del esfuerzo de fluencia en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	140
Figura 4.29	Curvas de nivel para el esfuerzo de fluencia en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	140
Figura 4.30	Superficie de respuesta del módulo de elasticidad en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	141
Figura 4.31	Curvas de nivel para el módulo de elasticidad en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	141

Figura 4.32	Superficie de respuesta de la deformación máxima en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	142
Figura 4.33	Curvas de nivel para la deformación máxima en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	142
Figura 4.34	Superficie de respuesta del parámetro “a” en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	143
Figura 4.35	Curvas de nivel para el parámetro “a” en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	143
Figura 4.36	Superficie de respuesta de la deformación inelástica total (parámetro “m”) en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	144
Figura 4.37	Curvas de nivel para la deformación inelástica total (parámetro “m”) en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	144
Figura 4.38	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 15% de zeolita y 7 días de curado.....	148
Figura 4.39	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 15% de zeolita y 14 días de curado.....	149
Figura 4.40	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 15% de zeolita y 21 días de curado.....	150
Figura 4.41	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 15% de zeolita y 28 días de curado.....	151
Figura 4.42	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 17.5% de zeolita y 4 días de curado.....	152
Figura 4.43	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento	

	con 17.5% de zeolita y 11 días de curado.....	153
Figura 4.44	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 17.5% de zeolita y 18 días de curado.....	154
Figura 4.45	Curvas esfuerzo-deformación simulada y de los datos obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 17.5% de zeolita y 25 días de curado.....	155

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Composición de la fase potencial para cementos de los diferentes tipos fabricados en los Estados Unidos.....	19
Tabla 2	Características químicas de la zeolita.....	34
Tabla 3	Características físicas de la zeolita.....	35
Tabla 4	Análisis químico de la zeolita.....	47
Tabla 5	Formato de toma de datos de resistencia a la compresión con respecto al tiempo de curado.....	54
Tabla 6	Matriz de diseño para las pruebas.....	56
Tabla 7	Análisis de varianza.....	62
Tabla 8	Tolerancia permitida en los moldes de las muestras.....	67
Tabla 9	Cantidades para la producción de morteros.....	81
Tabla 10	Variaciones a la norma ASTM C 109/ C 109M-02.....	81
Tabla 11	Datos obtenidos a los 7 días de curado.....	96
Tabla 12	Datos obtenidos a los 14 días de curado.....	97
Tabla 13	Datos obtenidos a los 21 días de curado.....	98
Tabla 14	Datos obtenidos a los 28 días de curado.....	99
Tabla 15	Datos obtenidos a los 4 días de curado.....	100
Tabla 16	Datos obtenidos a los 11 días de curado.....	101
Tabla 17	Datos obtenidos a los 18 días de curado.....	102
Tabla 18	Datos obtenidos a los 25 días de curado.....	103
Tabla 19	Matriz de diseño de los datos experimentales.....	105
Tabla 20	Matriz de diseño para los datos de validación.....	106
Tabla 21	Resumen estadístico de los datos obtenidos.....	118
Tabla 22	Resumen estadístico de los datos obtenidos para la validación, 17.5% de zeolita.....	123

## INTRODUCCIÓN

Las empresas dedicadas a la fabricación del cemento de uso comercial, utilizan como aditivo las cenizas volcánicas para mejorar algunas propiedades del cemento. Mediante la presente tesis, se busca estudiar a la zeolita natural de la comuna de “Manglaralto” como alternativa para suplir a las cenizas volcánicas en sus funciones como aditivo natural del compuesto denominado “cemento”.

La zeolita de la comuna de “Manglaralto”, antes de realizar este estudio no había sido analizada como aditivo del cemento, pero anteriores estudios han demostrado que la zeolita de otros yacimientos pueden reemplazar de muy buena manera a las cenizas volcánicas en sus funciones como aditivo del cemento. Además, en la ESPOL no se había obtenido un método numérico que permita obtener un modelo matemático para describir el comportamiento de la resistencia a la compresión del cemento, luego de que al cemento se le haya agregado un determinado porcentaje de aditivo puzolánico como la zeolita y se lo haya expuesto a un proceso de curado al aire. Esto permitió en la primera parte de la tesis “analizar y justificar el problema”.

El objetivo de la tesis es implementar un modelo por medio de métodos numéricos de modo que se pueda describir el comportamiento de una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita y sometida a un proceso de curado al aire, que tiene como respuesta la resistencia mecánica a la compresión.

En la parte final de este estudio, se demostró mediante análisis estadísticos que al utilizar zeolita de Manglaralto como aditivo del cemento, esta zeolita hace que la resistencia a la compresión de la pasta de cemento compuesta sea menor que la resistencia a la compresión de pastas de cemento con las mismas características pero sin zeolita agregada, siendo las muestras expuestas al mismo proceso y tiempo de curado, en este caso curado al aire. Además, se implementó además un programa en “matlab”, el cual permitió mediante métodos numéricos obtener la curva esfuerzo-deformación para pastas de cemento compuestas tomando datos de las pruebas experimentales para que el ajuste entre las curvas real y simulada tengan la menor diferencia posible.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Planteamiento del problema.

Las propiedades del cemento tales como; la durabilidad frente a los ciclos de congelación y deshielo, resistencia mecánica, impermeabilidad, estabilidad volumétrica y resistencia al desgaste, mejoran con la edad mientras existan condiciones favorables para la continuidad del proceso de hidratación de este. Este mejoramiento, crece rápidamente a edades tempranas y continúa más lentamente por un lapso indefinido para la resistencia a la compresión.

Durante el transcurso del tiempo, la tecnología para la fabricación y el uso del cemento ha venido evolucionando, desde los romanos, los cuales en la antigüedad utilizaban una mezcla hidráulica compuesto de calcáreos arcillosos con agregados de puzolanas para la

construcción de sus grandes edificaciones, hasta el día de hoy en que para la fabricación del cemento se utiliza una moderna tecnología y para lo cual se le agregan aditivos puzolánicos como las cenizas volcánicas, las que cumplen diferentes funciones dentro del compuesto denominado cemento.

Como se mencionaba en el párrafo anterior, la tecnología sigue avanzando, por lo que el problema que se presentó, es la búsqueda de nuevos aditivos que puedan suplir a las cenizas volcánicas en sus funciones como aditivos del cemento, además lo que se buscó en los nuevos aditivos es mejorar algunas propiedades del cemento. Entre las propiedades que se buscó mejorar esta la resistencia mecánica a la compresión, lo cual fue uno de los análisis principales del presente estudio.

Otro problema que se presentó, y se buscó obtener una solución, es que en la ESPOL no se había obtenido algún método numérico que permita obtener un modelo matemático para describir el comportamiento de la resistencia a la compresión del cemento, luego de que al cemento se le haya agregado un determinado porcentaje de aditivo puzolánico como la zeolita y se lo haya sometido a un proceso de curado al aire.

### **1.1.1. Antecedentes y Justificación.**

El presente estudio analizó el comportamiento de una pasta de cemento compuesto, la cual fue expuesta a un proceso de curado al aire. La pasta de cemento compuesto se la obtuvo a partir del cemento Pórtland tipo I con 15% de aditivo, en este caso el aditivo utilizado es el material puzolánico conocido como zeolita. Esta zeolita se obtuvo de un yacimiento de zeolita en Manglaralto en la provincia ecuatoriana de Santa Elena.

Para el presente trabajo se utilizó zeolita natural ecuatoriana, debido a que la zeolita natural es más barata de conseguir que la zeolita artificial, además que anteriores estudios han demostrado que la zeolita puede reemplazar de muy buena manera a las cenizas volcánicas, por brindar al cemento mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros, incremento en la resistencia a la corrosión y abrasión además que aumenta la durabilidad del cemento, y por último permite incrementar la resistencia a la compresión

Se escogió la zeolita de Manglaralto, debido a que esta comuna se encuentra muy cerca de la ciudad de Guayaquil, ciudad en la que se encuentran las principales y más modernas plantas de procesamiento de cemento Pórtland en el Ecuador.

Otro punto que se buscó evaluar, es la respuesta del cemento a diferentes tiempos de curado y diferentes composiciones de zeolita, con estos resultados obtenidos se implementó un modelo por medio de métodos numéricos que permitió describir la resistencia mecánica a la compresión de la pasta de cemento compuesto en función de los dos parámetros antes mencionados (Porcentaje de zeolita y tiempo de curado). De esta manera se buscó dar solución a una necesidad que se tenía en la industria del cemento de implementar modelos numéricos que permitan simular el comportamiento de las pastas de cemento compuesto en función del % de aditivo y el tiempo de curado.

## **1.2. Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivos Generales.**

El presente estudio tuvo por objetivo científico-tecnológico implementar un modelo por medio de métodos numéricos de modo que se pueda describir el comportamiento de una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita y sometida a un proceso de curado al aire, que tiene como respuesta la resistencia mecánica a la compresión.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

La presente tesis tuvo como objetivos específicos los siguientes:

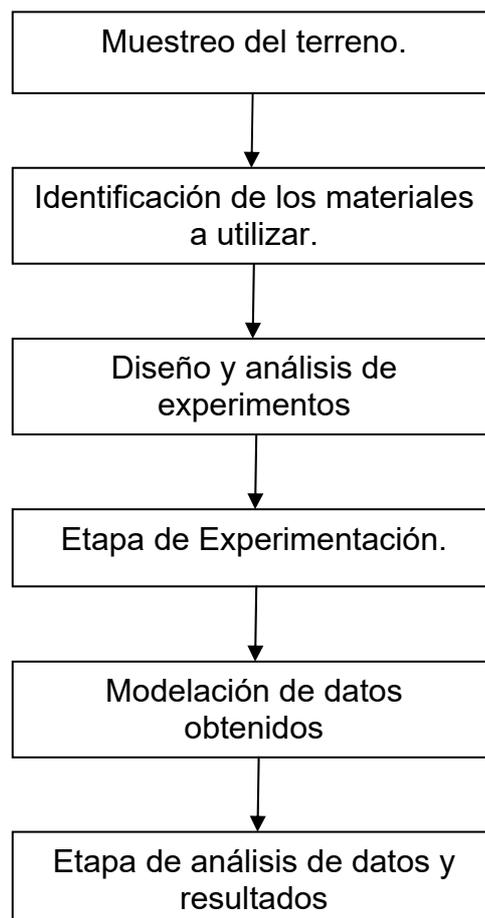
- Estudiar los efectos que causa el tiempo de curado en la resistencia mecánica a la compresión de una pasta de cemento compuesto.

- Analizar los efectos que produce la adición de diferentes porcentajes de zeolita en la resistencia mecánica a la compresión de una pasta de cemento compuesto.
- Analizar los modelos numéricos de los datos obtenidos.
- Comparar los datos obtenidos de los modelos numéricos con los obtenidos en la experimentación.
- Obtener los porcentajes de zeolita y tiempos de curado más óptimos.

### **1.3. Metodología.**

Para el presente trabajo investigativo la metodología que se siguió se la dividió en dos partes, las cuales son: el trabajo de campo y el trabajo en el laboratorio. El trabajo de campo consistió en la recolección de la zeolita del yacimiento de Manglaralto mediante muestreo. En tanto que el trabajo en el laboratorio consistió en seguir el procedimiento descrito en esta tesis para la preparación de las probetas y la recolección de datos, en este caso estos fueron datos

de resistencia a la compresión; para lo cual se uso la máquina de ensayos de compresión del laboratorio de suelos rocas y materiales de la FICT. Además, mediante la computadora se realizó la simulación computacional del comportamiento de la pasta de cemento. La metodología que se siguió se detalla mediante la FIGURA. 1.1., la cual detalla los pasos para llevar a cabo cada uno de nuestros objetivos propuestos.



**FIGURA 1.1. METODOLOGÍA DE LA TESIS.**

En el primer cuadro detallado como **“Muestreo del terreno”**, se realizó el muestreo del terreno del cual se extraerán las muestras de zeolita, este trabajo se lo realizó en un yacimiento de zeolita en Manglaralto, y tiene como fin obtener las muestras representativas de todo el yacimiento y no solo de una parte del mismo.

En el cuadro descrito como **“Identificación de los materiales a utilizar”**, se estudió las propiedades y los componentes de los materiales que se utilizaron para obtener las muestras que sirvieron para llevar a cabo el experimento, en este caso estos materiales fueron el cemento Pórtland tipo I y la zeolita.

La parte que se detalla como **“Diseño y análisis de experimentos”**, contiene la planificación de los experimentos que se realizó, además la forma como se realizó las pruebas a las hipótesis específicas.

Pero el análisis del experimento continuó con un análisis mas completo de las pruebas planeadas. Por estas razones, se trató de controlar o disminuir los errores realizando pruebas o comparaciones simultáneas las cuales sirvieron para validar o no los datos obtenidos

de la resistencia a la compresión, en los días de curado establecidos para realizar dichas pruebas.

Sin embargo, las pruebas anteriormente mencionadas a pesar de que al incrementarlas por separado aumentan la precisión de las conclusiones, también aumentan la posibilidad de que por lo menos una de ellas nos de una respuesta errónea, esto nos da a entender que la probabilidad de encontrar un error entre varias pruebas es mucho mayor que encontrar un error en pruebas individuales.

El cuadro que detalla la “**Etapa de experimentación**”, comprende la realización de los experimentos en el laboratorio, para el presente estudio, este trabajo consistió en la realización de probetas con pasta de cemento compuesto las cuales eran cubos de 50mm de arista con 5, 10, 15, 20 y 25% de zeolita, que fueron expuestas a un proceso de curado al aire por un periodo de 7, 14, 21 y 28 días respectivamente. En cada uno de los cuales se realizó los ensayos de compresión a tres probetas en la máquina de ensayos de compresión del laboratorio de suelos rocas y materiales de la FICT. Las variantes que se manejaron para realizar las pruebas fueron: el porcentaje de aditivo y las condiciones de curado, además de las variables que se mantuvieron constantes como son la relación agua/mezcla, la

granulometría de la mezcla entre otras. De estas variables se obtuvo como función de respuesta la resistencia a la compresión de la pasta de cemento compuesto, siendo esta, solo una de las tantas funciones de respuesta que se pueden obtener de estas probetas. Además de las pruebas antes mencionadas se realizaron los mismos ensayos para muestras con porcentajes de zeolita y días de curado intermedios, es decir 7.5, 12.5, 17.5, 22.5 y 27.5% de zeolita y las pruebas para estos porcentajes se las realizó desde el cuarto día en intervalos de siete días hasta el día 25, realizando 3 ensayos por día de curado.

En la “**Modelación de datos**”, se implementó un modelo mediante el uso de la computadora para simular el comportamiento de la pasta de cemento compuesto de 15% de zeolita y curado al aire, con lo cual se pudo comparar la variación de la resistencia a la compresión de las probetas. Los datos que se obtuvo del modelo computacional se lo compararon con los datos obtenidos en el laboratorio para tratar de que la diferencia entre los datos modelados con los experimentales tengan la mínima diferencia posible.

En tanto que en la “**Etapa de análisis de datos y resultados**”, se comparó los parámetros obtenidos de los experimentos con los datos

que ya se tenía de la pasta de cemento sin ningún tipo de aditivo y con el mismo proceso de curado. También en esta etapa se verificó si las hipótesis planteadas al inicio del estudio se contradicen con los datos que se obtuvo.

#### **1.4. Estructura de la tesis.**

El presente trabajo de tesis está compuesto de seis capítulos, los cuales se detallan a continuación.

El primer capítulo denominado “**Generalidades**”, contiene una perspectiva general de lo que es el cemento Pórtland tipo I, la influencia que el cemento ha tenido en el desarrollo de la humanidad, así como los trabajos y análisis que se realizaron para la pasta de cemento compuesto que fue objeto de este estudio, también este capítulo presenta los objetivos que se intentaron alcanzar al realizar el presente trabajo investigativo. Además, el capítulo antes mencionado contiene la metodología de investigación que se siguió para el desarrollo del presente estudio investigativo, y de esta manera intentar cumplir con los objetivos propuestos.

El segundo capítulo denominado **“Estado del Arte del Cemento Pozolánico”**, contiene toda la información concerniente al cemento, la obtención del mismo, las características y propiedades de los elementos que lo componen, el procesamiento y los diferentes aditivos que puede contener el cemento Pórtland tipo I, además en este capítulo se incluye de que forma se pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto al agregarle aditivos pozolánicos como la zeolita. También se presentan los diferentes métodos de curado que se le pueden dar al concreto, se menciona además algunos estudios que se realizaron agregando zeolita al cemento para intentar obtener mejores propiedades mecánicas.

En el tercer capítulo denominado **“Procedimiento y Diseño Experimental”**, se muestra los procedimientos que se siguieron para la obtención de datos en la experimentación, además se muestra el diseño que se utilizó para la obtención de los datos de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo de curado y porcentaje de zeolita, lo cual se detalla en el procedimiento del presente estudio.

El cuarto capítulo denominado **“Resultados y Análisis Estadístico”**, estudia y analiza como variaron las propiedades mecánicas de la pasta de cemento compuesto que se analizó, el cual

contenía 15% de zeolita y se lo analizó con respecto al tiempo de curado, además se analizó como varia la resistencia a la compresión de la misma pasta de cemento al agregarle diferentes porcentajes de zeolita comparándola con la muestra que se esta usando como patrón, el cual como ya se mencionó antes, no contenía aditivos y tenia el mismo proceso de curado que la pasta de cemento compuesto en estudio. Esta comparación que se realizó, permitió conocer si se mejoro o no la resistencia a la compresión de la pasta de cemento agregándole zeolita.

Una vez que se terminó con la comparación de cambios de propiedades, se procedió en el quinto capítulo de esta tesis a realizar la “**Discusión de resultados**”, aquí se concluye si verdaderamente la resistencia a la compresión de la pasta de cemento compuesto mejoró o no, una vez que se le agregó zeolita y se expuso a un proceso de curado al aire, además se realizó las recomendaciones para trabajos similares que se puedan realizar a futuro.

# CAPÍTULO 2

## 2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO PUZOLÁNICO

### 2.1. Cemento Pórtland tipo I.

El cemento Pórtland es el más importante en lo que se refiere a la cantidad producida, ya que este es el más usado en el mundo. Sus primeros usos se dan a inicios del siglo XIX, su inventor le dió el nombre de “cemento Pórtland” debido a que el concreto ya curado obtiene el mismo color de una piedra caliza que se obtiene cerca de Pórtland, Inglaterra.

El cemento Pórtland es una mezcla de caliza quemada, hierro, sílice y alúmina. Se fabrica por calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla, u otros materiales de composición global similar, a la

temperatura que provoca una fusión parcial. El producto, llamado clinker, se muele y se mezcla con un porcentaje pequeño de yeso. El clinker contiene cuatro fases principales: silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ),  $\beta$ -silicato dicálcico ( $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), aluminato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y solución sólida de ferrito [1].

En la mayoría de países en que se fabrica el cemento Pórtland existen varios tipos con diferentes características. Las variables más importantes son la velocidad de endurecimiento, la velocidad de desprendimiento de calor y cantidad de calor desprendida durante la hidratación y la resistencia del cemento endurecido al ataque por soluciones de sulfatos. Estas características están influidas por las proporciones relativas de las cuatro fases antes mencionadas y por factores físicos, como la finura alcanzada en la molienda. Los ensayos en que pueden basarse las especificaciones de cada tipo de cemento Pórtland (o de otra clase) son fundamentalmente los tres tipos siguientes: a) ensayos verificados sobre el cemento anhidro; b) ensayos basados en la conducta del cemento durante la hidratación, y c) ensayos sobre la pasta endurecida. Las condiciones de ensayo deben estar rígidamente establecidas, sobre todo en los tipos de ensayos a) y b). El tipo a) incluye determinaciones tales como análisis químico completo y análisis granulométrico. El tipo b) incluye,

por ejemplo, las determinaciones del tiempo de fraguado y del calor de hidratación. El tipo c) incluye la determinación de propiedades tales como la resistencia a la compresión después de diferentes tiempos de curado, o la resistencia de la pasta endurecida al ataque por sulfatos. En general, se emplean combinaciones de ensayos que pertenecen a diferentes grupos.

La clasificación de los cementos Pórtland usada en los Estados Unidos se usa a veces como referencia. Se basa parcialmente en la composición de la fase potencial, es decir, las proporciones de las cuatro fases principales calculadas a partir del análisis químico total por un método Standard, conocido como método de Bogue.

La composición de la fase potencial esta probablemente en buen acuerdo con la verdadera composición de fases para la mayoría de los cementos Pórtland. La TABLA 1 da los nombres y las composiciones medias de la fase potencial de los cinco tipos de Cemento Pórtland fabricados en los Estados Unidos. De ellos, el tipo I es con diferencia el más importante; los otros solo se manufacturan con fines especiales. Las composiciones típicas de los cementos fabricadas en los Estados Unidos y las de los cementos Pórtland

similares producidos para uso general en otros países, no han cambiado mucho desde 1935 aproximadamente, aunque la mayoría de los cementos producidos allí y en otros países contenían más  $2\text{CaSiO}_2$  y menos  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ .

**TABLA 1**

**COMPOSICIÓN DE LA FASE POTENCIAL PARA CEMENTOS DE LOS DIFERENTES TIPOS FABRICADOS EN LOS ESTADOS UNIDOS [1].**

Cemento		Composición de la fase potencial %					CaO libre %	CaSO <sub>4</sub> %	Total %
Tipo	Descripción	3CaO.SiO <sub>2</sub>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO			
I	De uso general	45	27	11	8	2,9	0,5	3,1	98
II	De moderado calor de endurecimiento	44	31	5	13	2,5	0,4	2,8	99
III	De moderado calor de endurecimiento	53	19	11	9	2,0	0,7	4,0	99
IV	De bajo calor	28	49	4	12	1,8	0,2	3,2	98
V	Resistente a los sulfatos	38	43	4	9	1,9	0,5	2,7	99

## **Cemento Tipo I**

Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación.

Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados **[2]**.

Entre las ventajas del cemento tipo I es que puede ser usado en cimientos de hormigón ya que su resistencia se va adquiriendo rápidamente y para este tipo de construcciones se necesita una resistencia rápida (en un menor tiempo). Cementos Tipo III o menores, pueden ser permitidos para pruebas de cimientos vaciados en sitio para ganar una resistencia rápida. Cementos Tipo II y Tipo V pueden ser especificados para exposición a sulfatos **[3]**.

## **Tipo II**

El cemento Pórtland tipo II se utiliza cuando es necesario la protección

contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje, siempre y cuando las concentraciones de sulfatos sean ligeramente superiores a lo normal, pero sin llegar a ser severas (En caso de presentarse concentraciones mayores se recomienda el uso de cemento Tipo V, el cual es altamente resistente al ataque de los sulfatos).

Genera normalmente menos calor que el cemento tipo I, y este requisito de moderado calor de hidratación puede especificarse a opción del comprador. En casos donde se especifican límites máximos para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc.

La Norma ASTM C 150 establece como requisito opcional un máximo de 70 cal/g a siete días para este tipo de cemento.

### **Tipo III**

Este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Su utilización

se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas.

### **Tipo IV**

El cemento Pórtland tipo IV se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo, y no tienen que producirse dilataciones durante el fraguado. El desarrollo de resistencias de este tipo de cemento es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento. Los usos y aplicaciones del cemento tipo IV están dirigidos a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas.

La hidratación inicia en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua; el endurecimiento de la mezcla da principio generalmente a las tres horas, y el desarrollo de la resistencia se logra a lo largo de los primeros 30 días, aunque éste continúa aumentando muy lentamente por un período mayor de tiempo [2].

Otra característica es que entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. Aun entonces, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa hidratación del cemento.

Para el uso de cemento tipo 4, cemento Pórtland de bajo calor de hidratación, se debe de tomar en consideración donde sea de importancia fundamental contar con un bajo calor de hidratación.

Este calor se desprende por las reacciones químicas con el agua, tal como el calor que se desprende durante el fraguado y endurecimiento del cemento Pórtland, o la diferencia entre el calor de solución del cemento seco y el de un cemento parcialmente hidratado **[4]**.

La fabricación del cemento de Pórtland se da en tres fases: (i) Preparación de la mezcla de las materias primas; (ii) Producción del clinker; y, (iii) Preparación del cemento.

Las materias primas para la producción del Pórtland son minerales que contienen:

Óxido de calcio (44%), óxido de silicio (14,5%), óxido de aluminio (3,5%), óxido de hierro (3%) y óxido de manganeso (1,6%).

## **2.2. Materiales Puzolánicos Naturales.**

Las puzolanas se han definido como materiales que aunque por sí mismos no sean aglomerantes, contienen sustancias que a temperatura ordinaria se combinan con la cal en medió acuoso para formar sustancias insolubles que poseen propiedades cementantes. Se incluyen aquí diferentes materiales naturales, la mayoría de origen volcánico y también productos artificiales o semi-artificiales tales como las arcillas activadas y las cenizas volantes [1].

Los morteros de cal-puzolana fueron usados por los romanos en muchas clases de estructuras, incluyendo las obras de carácter marítimo. El buen estado en que se encuentran hoy muchas de estas construcciones, pone de manifiesto la durabilidad del aglomerante. Las puzolanas se usan hoy en morteros, como adiciones directas al

hormigón y como cementos puzolánicos o mezclas finamente divididas de cemento Pórtland con puzolana.

Las puzolanas naturales incluyen ciertas rocas de origen volcánico, rocas altamente silíceas, posibles residuos de minerales que sufrieron ataques químicos y materiales silíceos compuestos por esqueletos de seres vivos. Los mayores depósitos de puzolanas son de origen volcánico, y a partir de ellos se obtiene la mayor parte de la puzolana empleada para la fabricación de cemento puzolánico o para materia prima en la fabricación del clinker. Puede hacerse una tentativa de clasificación de puzolanas basada en la naturaleza del constituyente que reacciona con el hidróxido cálcico. Este puede ser: a) Vidrio volcánico; b) Una zeolita o un vidrio parcialmente zeolitizado; y c) Una forma reactiva de la sílice hidratada. A continuación se consideran estos grupos ordenadamente.

### **Vidrios Volcánicos.**

Los vidrios volcánicos que poseen actividad puzolánica, pueden ser puros o estar parcialmente alterados. Las puzolanas cuya fase vítrea tiene una alta relación sílice/alúmina, se llaman vidrios puzolánicos ácidos. La extracción selectiva fue realizada con CIH al 20%, seguida

de un tratamiento con NaOH al 10%; bajo estas condiciones el vidrio se solubiliza en su mayor parte, quedando en el residuo insoluble una proporción considerable de componentes cristalinos así como algo de vidrio. Este tratamiento ácido-básico se usa generalmente para determinar el residuo insoluble de una puzolana, este dato puede servir para materiales de un yacimiento dado como una indicación aproximada de su actividad.

Según las hipótesis generalmente aceptadas, los vidrios reactivos se originaron en erupciones volcánicas explosivas. El magma fundido es pulverizado por los gases liberados durante la explosión, sufriendo en este estado un enfriamiento brusco, que evita la cristalización. La evolución de los gases disueltos durante el enfriamiento produce una fina textura de canalículos y burbujas causantes de la alta superficie específica interna de estas partículas vítreas consolidadas.

De acuerdo con algunos autores, la reactividad del vidrio también depende de la naturaleza de los gases liberados durante la solidificación. La presencia de cationes alcalinos y alcalino-térreos, puede afectar también a la reactividad en el sentido de que influyen en el grado de condensación de poliedros Si-O y Al-O. Una estructura más abierta y reactiva, puede ser atribuida, tal vez a la

presencia de dichos cationes alcalinos y alcalinotérreos. Asimismo se ha sugerido, que la actividad puede también mejorarse por alteraciones neumatolíticas, producidas por los gases y aguas subterráneas que eliminan a algunos de los constituyentes más solubles

### **Zeolita o un vidrio parcialmente zeolitizado.**

La zeolita como puzolana natural se la estudiara de una manera mas detallada en la siguiente sección (sección 2.3.).

### **Puzolanas de alto contenido en sílice.**

Los materiales puzolánicos que se encuentran en la naturaleza, pertenecientes a este grupo comprenden la diatomita y algunas rocas que representan probablemente los residuos silíceos de minerales de los que han sido extraídos los óxidos solubles.

La diatomita es una forma de sílice hidratada amorfa, muy finamente dividida, compuesta de caparzones de algas microscópicas de muchas variedades, el contenido en sílice puede llegar hasta un

94%. Los mayores depósitos conocidos están en California, así como en Canadá, Argelia, Dinamarca y Alemania; depósitos de barro diatomáceo se han encontrado lejos de la costa de África, en una extensión de 650km de longitud por 160km de anchura. No todas las clases de diatomita son utilizables como puzolanas, con algunos tipos se necesita excesiva cantidad de agua al mezclarlo con la cal o el cemento para obtener una buena trabajabilidad. Pueden también encontrarse depósitos de diatomita mezclada con arcilla, siendo en Dinamarca un depósito de este tipo con el nombre de moler, su actividad se incrementa por una calcinación que descomponga la fracción arcillosa.

En algunos yacimientos excepto los materiales descritos, se han encontrado estratós conteniendo una proporción considerable de fases cristalinas alteradas. Se distinguen por su alto contenido en alúmina, baja reactividad con la cal y presencia de un material que da un espectro de líneas, por difracción de rayos "X". Algunas muestras dan espectros de rayos "X" semejantes a los de la montmorillonita activada por ácidos minerales, poseyendo como esta actividad decolorante.

En la fabricación de cemento puzolánico, se prefiere el empleo de materiales libres de impurezas cristalinas, estas pueden diferenciarse fácilmente con análisis químico, o con gran exactitud mediante los rayos "X". Una característica peculiar de estas puzolanas ricas en sílice, es que pueden producir un cemento con alta resistencia química a las aguas naturales agresivas. Dicha propiedad, puede atribuirse principalmente a la formación de una gran cantidad de silicato cálcico hidratado gelatinoso, el cual es en particular resistente por su baja relación cal/sílice. Una segunda razón es el bajo contenido en alúmina reactiva.

### **2.3. Zeolita.**

#### **2.3.1. Generalidades.**

La zeolita es un tipo puzolana natural, también se las conoce con el nombre de tobas volcánicas y se forman por las erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo [5].

En la FIGURA 2.1. se muestra una fotografía de una roca de zeolita.



**FIGURA 2.1. PIEDRA DE ZEOLITA.**

Las zeolitas son aluminosilicatos con cavidades de dimensiones moleculares de 3 a 10  $\text{\AA}$ . Contienen iones grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento, para así poder permitir el intercambio iónico. Esta propiedad es la que da origen a su nombre, que se deriva de las palabras griegas, *zeo*: que ebulle, y *lithos*: piedra [6].

### 2.3.2. Aplicaciones.

La zeolita se la puede aplicar en diferentes áreas como las que se mencionan a continuación:

- La agricultura.
- La acuicultura.
- Nutrición animal.
- Como intercambiador iónico.
- Como catalizador en la industria química.
- En la construcción.

En la **agricultura**, se utiliza como fertilizante; permiten que las plantas crezcan más rápido, pues les facilita la fotosíntesis y las hace más frondosas.

En la **acuicultura**, se utiliza como un ablandador de aguas, debido a su capacidad de intercambiar iones, y también se utiliza para hacer engordar más rápido a algunos peces, aunque el exceso puede ser mortal, por lo cual sólo se puede utilizar como un suplemento alimenticio.

Para la **nutrición animal**, se la utiliza como suplemento alimenticio para los ganados, pues los hace aprovechar más la comida. La zeolita actualmente se utiliza como un suplemento alimenticio para las aves, pues engordan de una 25% a un 29% más con respecto a las que no se les adiciona zeolita; la zeolita que permite esto es la clinoptilolita. La causa de que los animales engorden más es que la zeolita hace que los nutrimentos ingeridos queden retenidos por ella, se quedan un tiempo debido a los poros con los que cuenta la zeolita. Esto permite que la zeolita les haga aprovechar mucho más los alimentos.

Como **intercambiador iónico**: La mayor parte de los intercambios iónicos se lleva a cabo a través de la solución acuosa, por lo cual se utiliza para ablandar aguas pesadas residuales.

Como **catalizador en la industria química**: muy importante para muchos procesos de la petroquímica.

Las zeolitas, debido a sus poros altamente cristalinos, se consideran un tamiz molecular, pues sus cavidades son de dimensiones moleculares, de modo que al pasar las aguas duras, las moléculas más pequeñas se quedan y las más grandes siguen su curso, lo cual permite que salga un líquido más limpio, blando y cristalino.

En la **construcción**, es utilizada como aditivo del cemento para la producción de cementos puzolánicos, esta aplicación es parte del estudio de la presente tesis.

#### **2.4. Clasificación y características de la zeolita.**

Siendo la zeolita una puzolana natural, las características físicas y químicas de esta, deben cumplir con los requerimientos para las puzolanas naturales descritos en la norma ASTM C618-01 (Standard

Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete) [7].

En las tablas 2 y 3 se muestran los requerimientos físicos y químicos para las puzolanas según la norma ASTM C618-01.

**TABLA 2**

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LA ZEOLITA.**

<b>Descripción</b>	<b>%</b>
Oxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ), Oxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	70
Oxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), % min.	-
Anhídrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> ), % max.	4
Contenido de humedad, % max.	3
Pérdida al fuego, % max.	10

TABLA 3

## CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA ZEOLITA.

Descripción	%
<b>Finura:</b>	
Cantidad retenida en el tamiz No., 325 % máx.	34
<b>Índice de Esfuerzos:</b>	
Con Cemento Pórtland, a 7 días, % min. De control	75c
Con Cemento Pórtland, a 28 días, % min. De control	75c
Requerimiento de agua, % máx. De control	115
Autoclave, expansión o retracción, % máx.	0,8
<b>Requerimientos de uniformidad:</b>	
<b>La densidad y finura de las muestras individuales no deben variar de las establecidas en las 10 muestras siguientes por mas de:</b>	
Densidad, % máx. De variación con la promedió.	5
Porcentaje retenido en tamiz No. 325, % máx. De variación del promedió	5

La zeolita, se divide en nueve principales, las mismas que surgen en las rocas sedimentarias y son **[6]**:

- Chabazita.
- Clinoptilolita.
- Erionita.

- Mordenita.
- Estilbita.
- Ferrierita.
- Filippsita.
- Huelandita.
- Laumantita.

## **2.5. Cemento Puzolánico.**

El cemento Pórtland puzolánico, es un cemento que se obtiene de la mezcla del clinker de cemento Pórtland obtenido del molino o de la escoria del cemento Pórtland del horno de explosión con una puzolana fina, de donde se obtiene una uniforme e íntima mezcla. En un cemento Pórtland puzolánico, la puzolana constituye entre el 15%

y el 40% de la masa de la mezcla. Si la puzolana constituye menos del 15% en masa de la mezcla a este se lo conoce como cemento Pórtland puzolánico modificado [8].

Cuando un cemento puzolánico reacciona con agua, ocurren dos reacciones completamente diferentes: hidratación de los compuestos del clinker y combinación de los óxidos reactivos de la puzolana con la cal liberada por el cemento. La composición química de las pastas de cemento puzolánico hidratado, especialmente cuando en su composición entran puzolanas volcánicas o tobas zeolíticas, debe ser diferente de la composición de las pastas de cemento Pórtland hidratado, tanto en el contenido en hidróxido cálcico como en la cantidad y composición total en silicato cálcico hidratado [1].

## **2.6. Métodos de curado del Concreto.**

Existen varios tipos de curado del concreto, entre los cuales se tiene: curado en un cuarto o cabina de humedad, curado en agua y curado al aire, el cual es el método que se estudia en el presente trabajo investigativo.

Todo concreto debe curarse para obtener la máxima resistencia. El concreto curado correctamente es mejor desde todo punto de vista: se contrae menos, se agrieta menos y desprende menos polvo. Es más fuerte, más durable y tiene mayor resistencia al desgaste superficial **[9]**.

Al mezclar cemento Pórtland con agua, se lleva a cabo la reacción química denominada hidratación. El grado hasta el cual esta reacción se llegue a completar, influye en la resistencia, la durabilidad y en la densidad del concreto **[10]**.

Los objetivos del curado son por consiguiente:

- 1.- Prevenir (o reaprovisionar) la pérdida de humedad del concreto.
- 2.- Mantener una temperatura favorable en el concreto durante un período definido.

Para poder aplicar los diferentes métodos de curado a las muestras, es necesario tener en cuenta ciertos aspectos en el proceso de preparación de las muestras. Entre estos aspectos tenemos, que el

cuarto donde se prepara la pasta de cemento compuesto y los morteros, se debe controlar la temperatura, la cual deberá mantenerse en  $23 \pm 4^{\circ}\text{C}$ , además la humedad relativa no debe ser menor que el 50%. La temperatura del agua que se utiliza para la preparación de las muestras debe mantenerse en  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  [11].

### **Requerimientos para la cabina de humedad y los cuartos de humedad.**

En general, las cabinas y los cuartos de humedad tendrán la temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  y la humedad relativa no menor que 95%. La humedad en la atmosfera deberá ser saturada hasta los grados necesitados de modo que las superficies de todas las muestras almacenadas se permanezcan húmedas todo el tiempo. Todas las cabinas y los cuartos húmedos deben ser equipados con termómetros de grabación. Estos termómetros se los calibrara cada seis meses por cuestión de precisión. Al llevar a cabo la verificación del termómetro de grabación, se compara la temperatura leída por el termómetro de grabación con la temperatura leída de un termómetro de referencia durante la operación normal de la cabina o el cuarto húmedo. El termómetro usado como referencia deberá ser preciso y

legible para 0.5°C. Una copia del certificado o reporte en el cual se verifica la precisión deberá estar disponible en el laboratorio.

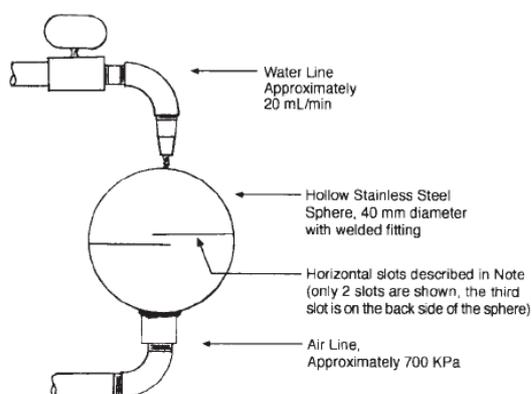
El aire la cabina húmeda y el cuarto húmedo deberán estar cercanos a la saturación con la humedad en orden para proveer las condiciones de almacenamiento especificadas. En muchos casos, la saturación estará debajo de la óptima durante periodos cuando las muestras de la pasta de cemento compuesto estén colocándose dentro o removiéndose desde el almacenamiento. La medida de la humedad relativa no deberá ser hecha durante tiempos obviamente inoportunos.

Las grabaciones desde el termómetro de grabación serán revisadas en orden, para de este modo usar un adecuado mecanismo para el control de la temperatura de la cabina o el cuarto de humedad.

La temperatura del aire dentro de la cabina o el cuarto de humedad será controlada proveyendo calor o frío, o ambos, esto podría ser necesario, y se lograría por cualquiera de las dos vías antes mencionadas.

La **Cabina de Humedad** estará construida de un material durable y las puertas serán herméticamente apropiadas con lo que se esta realizando. La humedad relativa especificada será mantenida por el uso de una o más nubes de sprays para rociar agua, o teniendo cortinas de agua sobre el interior de las paredes.

Las paredes del cuarto de humedad, serán construidas de un material durable, y todas las puertas y ventanas serán herméticamente apropiadas. La humedad relativa especificada debe ser mantenida de alguna manera conveniente, ver FIGURA 2.2.



NOTE 1—Cut three horizontal air slots around circumference of hollow sphere using a 0.20 mm thick diamond lapidary saw covering 120° to 150° each and spaced approximately 5 mm apart. Air passing through these slots strikes the water (which is flowing over the outer surface of the sphere) to produce a spray.

**FIGURA 2.2. EJEMPLO DE UN SISTEMA DE SPRAY PARA MANTENER LA HUMEDAD RELATIVA EN UN CUARTO DE HUMEDAD.**

El cuarto deberá contener una estantería durable y debidamente blindada, para poder colocar ahí las muestras de la pasta de cemento compuesto, y de esta manera evitar que las gotas de agua caigan en las muestras recientemente moldeadas.

**Requerimientos para los tanques de almacenamiento de agua utilizados en el método de curado al agua.**

Los tanques serán construidos de un material no corrosivo, provisto de un control automático para mantener la temperatura del agua a  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , este control se hará si el tanque esta localizado en un cuarto que no contenga un control de temperatura. Con la excepción de los tanques de almacenamiento localizados en las cabinas o cuartos de humedad, donde todos los tanques de almacenamiento deben estar equipados con termómetros de grabación con sus elementos de detección en el agua almacenada.

El agua en los tanques de almacenamiento, será saturada con hidróxido de calcio para separar las partes solubles de las insolubles del hidróxido de calcio con las muestras de la pasta de cemento

compuesto, que están siendo sometidas al proceso de curado. El agua no saturada con hidróxido de calcio, podría afectar los resultados de las pruebas debido a la separación de las partes solubles de las insolubles de la cal proveniente de las muestras. El agua en los tanques de almacenamiento será revuelta desde el fondo en intervalos no mayores a un mes para ayudar a sustituir los iones de calcio que se han agotado.

No utilizar agua que este continuamente corriendo o agua desmineralizada en los tanques de almacenamiento para el curado, por que esto puede afectar los resultados de las pruebas debido a la excesiva separación de las partes solubles de las insolubles. Un sistema cerrado, en el cual se hace circular el agua de cal saturada entre los tanques de almacenamiento, puede ser utilizado.

En tanto que un sistema de “**curado al aire**”, es el mas cercano a lo que se realiza en la realidad en las diferentes construcciones a base de cemento. Debido a que este método, consiste en colocar las muestras de pasta cemento compuesto en un lugar seco (al ambiente), y serán rociadas una o dos veces al día con agua de la llave.

## **2.7. Otras investigaciones relacionadas.**

### **Efectos de la Adición de Zeolita en las Propiedades Mecánicas de un Hormigón Convencional de Cemento Pórtland Tipo I [5].**

Este trabajo investigativo, se realizó como tesis en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en el año 2005 por el Ingeniero Civil Carlos Oriol Saltos Ortega.

Este trabajo estudia el desempeño de la adición de zeolita en un hormigón de Cemento Pórtland tipo I con una dosificación de cemento equivalente a  $400 \text{ kg/m}^3$ . Las adiciones de zeolita que se analizaron fueron de 5%, 10%, 20%, y 30% con respecto al peso del cemento.

Para observar las variaciones de las propiedades mecánicas del hormigón con la adición de zeolita se evaluaron algunas propiedades como: El contenido de aire en el Hormigón fresco, Densidad, Rendimiento y Contenido de aire Absorción y vacíos, Velocidad Ultrasónica, Resistencia a la compresión simple, Tracción por

compresión diametral, etc. Considerando en cada caso los porcentajes de adición antes mencionado.

Como resultado se obtuvo que al mezclar el cemento con 10% de Zeolita adicionada, presento los mejores resultados de trabajabilidad y resistencia mecánica.

### **El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánicos [12].**

Este trabajo investigativo, se realizó como tesis en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en el año 2004 por la Ingeniera Civil Paola Alexandra Robalino Espinoza.

El presente trabajo analiza la obtención de cemento Puzolánicos mediante la adición de la puzolana (zeolita) al cemento Pórtland en una proporción del 20% de la mezcla de la masa. Este trabajo se realizó bajo la norma ASTM C618 – 01 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Puzzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.

La zeolita es el material que se utilizó como adición en la fabricación de cemento puzolánico para esta tesis. Esta zeolita se la obtuvo de un peñón de la ESPOL, el mismo que se encuentra ubicado en la zona sur del Campus Prosperina, de donde se extrajeron muestras de diferentes tamaños las cuales fueron trituradas y molidas en el laboratorio, para luego ser transportadas al Centro Técnico del Hormigón para realizar el proceso de pulverización. En la TABLA 4 se muestra el análisis químico de la zeolita utilizada.

TABLA 4

## ANÁLISIS QUÍMICO DE LA ZEOLITA.

MUESTRA:	ZEOLITA
FECHA:	11/03/2003
Componente	%
P.Fuego	10,00
SiO <sub>2</sub>	63,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,70
CaO	2,40
MgO	1,77
SO <sub>3</sub>	0,01
K <sub>2</sub> O	0,97
Na <sub>2</sub> O	1,31
Total	99,40
Res. Insoluble	52,00

El principal logro de este trabajo, fue la comprobación del índice de actividad puzolánica, ya que el reemplazo del 20% de este material por cemento Pórtland cumplió con los requerimientos que se establecen en la especificación ASTM C618 – 03 a los 7 y 28 días de edad (estas muestras fueron curadas al agua). Las muestras estudiadas superaron el índice de 75% que dicha especificación requiere para el uso de puzolanas naturales en el hormigón.

Debido a que la adición puzolánica retarda la ganancia temprana de resistencia, la fluencia específica de los cementos Puzolánicos es mayor que la de los Pórtland. También es sensato pensar que el hecho de que la zeolita es silícea, esto le proporcione mejoras a las características del cemento Pórtland en cuanto a su durabilidad.

**Evaluación experimental del módulo elástico del concreto de alto rendimiento usando mezclas con varios porcentajes de cenizas volátiles [13].**

Este trabajo se lo realizó como estudio para el ministerio de transporte de New Jersey. Este “paper” presentaba 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. Los resultados se compararon con especímenes de control en edades entre 1 y 90 días.

Los resultados presentados sirvieron para desarrollar y para ejecutar el diseño de concreto de alto rendimiento y especificaciones técnicas para las estructuras del transporte. El estudio también investigó el

efecto del curado sobre el módulo elástico. Los tres métodos de curado evaluados fueron: (1) curado seco al aire, (2) curado en cabina de humedad, y (3) el curado al agua. Los resultados demostraron que la adición del humo de sílice dio lugar a un aumento del esfuerzo y el modulo elástico en las edades tempranas. Además, que con la adición del 20% de cenizas volátiles y varios porcentajes del humo de la sílice, se obtuvo un efecto nocivo sobre el esfuerzo y el módulo de elasticidad en todas las edades a 90 días. También se demostró que el compuesto curado al aire reduce el módulo de la elasticidad comparado con el curado al agua.

# CAPÍTULO 3

## 3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

### 3.1. Diseño Experimental.

Planificar los experimentos permitió obtener la máxima cantidad de información con el menor número posible de experimentos, es decir; tener costos menores al realizar los experimentos, reducir los tiempos ya que al planificar los experimentos se puede organizar y trazar un plan de trabajo en la realización de los experimentos, y por último, se puede lograr que los modelos sean de mayor calidad.

Para diseñar un experimento se tiene que tener en cuenta los siguientes pasos:

1. Análisis del problema.

2. Planificación de los experimentos.
3. Ejecución de los experimentos.
4. Tratamiento estadístico de los datos.
5. Análisis de los resultados estadísticos.
6. Revisar el análisis del problema.

### **Análisis del Problema.**

En esta etapa se establecen los factores, las funciones de respuestas y los vínculos existentes entre los factores y las respuestas. Para el presente trabajo, la función de respuesta que se obtuvo fue la resistencia a la compresión uniaxial con respecto al tiempo de curado. Las variables independientes que se incluyeron en el trabajo fueron el porcentaje de aditivo (en este caso 15% de zeolita), y las condiciones de curado de las muestras (para el presente estudio curado al aire). Las variables cuyos valores

permanecieron constantes fueron la relación agua/mezcla, la granulometría del material utilizado entre otras.

El compuesto (15% de zeolita + cemento) fue analizado mediante ensayos mecánicos (ensayo de compresión) a 7, 14, 21 y 28 días, días en los cuales la pasta de cemento compuesto permaneció expuesta a un proceso de curado al aire (Con lo que se tiene que el principal factor fue el tiempo de curado y los días antes mencionados fueron los niveles de este factor). Esto se realizó para estudiar el efecto que el proceso de curado tiene hacia una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita analizando la resistencia a la compresión por cada tiempo de ensayo. Se escogió los días debido a que anteriores estudios demuestran que el cemento alcanza su máxima resistencia a la compresión a los 28 días, además que la Norma ASTM C-109 sugiere realizarlos al séptimo día y al día 28, los días intermedios se los escogió para tener distribuidos de manera equitativa los días de los ensayos. Además se incluyó en este estudio el análisis del material referencial (0% de zeolita) para las condiciones de curado establecidas, lo cual permitió comparar los efectos que causa la adición de zeolita en la resistencia mecánica a la compresión de la pasta de cemento antes descrita, los porcentajes de zeolita agregados fueron 5, 10, 15, 20 y 25%. Además, se intento

controlar o disminuir los errores realizando pruebas o comparaciones simultáneas las cuales sirvieron para validar o no los datos obtenidos de la resistencia a la compresión, en los días de curado establecidos para realizar dichas pruebas, estas pruebas de validación se las realizó con porcentajes y a tiempos de curado intermedios, es decir: 7.5, 12.5, 17.5, 22.5 y 27.5% de zeolita y los ensayos de compresión se los realizó desde el cuarto día de curado en intervalos de siete días hasta llegar al día 25.

### **Planificación de los experimentos.**

Los experimentos se basaron según lo que sugiere la norma ASTM C109/C 109M, con algunas variaciones, se los llevo a cabo en la máquina de ensayos universal marca SOLIEST, Modelo Versa Tester AP 1020, del laboratorio de Suelos, Rocas y Materiales de la FICT, la cual tenia como función comprimir muestras de cubos de morteros, con los dispositivos adecuados podía ejecutar ensayos de flexión en viguetas.

Para tomar la resistencia a la compresión de las muestras se realizaron tres muestras por día. En la **TABLA 5** se muestra el formato mediante el cual se recolectaron los datos de resistencia a la

compresión con respecto al tiempo de curado, para el porcentaje de zeolita y forma de curado ya mencionados.

**TABLA 5**

**FORMATO DE TOMA DE DATOS DE RESISTENCIA A LA  
COMPRESIÓN CON RESPECTO AL TIEMPO DE CURADO.**

<b>Resistencia a la Compresión (MPa)</b>			
<b>7 Días</b>	<b>14 Días</b>	<b>21 Días</b>	<b>28 Días</b>
Muestra 1	Muestra 1	Muestra 1	Muestra 1
Muestra 2	Muestra 2	Muestra 2	Muestra 2
Muestra 3	Muestra 3	Muestra 3	Muestra 3

Cabe destacar que además de la resistencia a la compresión, se tomaron los datos de la temperatura y humedad relativa al momento de realizar los ensayos de compresión, ya que no se conocía como podían afectar estos factores al experimento. También se realizó una tabla similar del comportamiento de la pasta de cemento que no posee aditivos y que va a ser sometida al mismo proceso de curado. Además, se realizó una toma de datos similar para los datos que sirvieron para validar el experimento, es decir, los días de curado y los porcentajes intermedios mencionados en el análisis del problema.

### **Ejecución de los experimentos.**

Las probetas de pasta de cemento compuesto, se fabricaron en el laboratorio de Suelos, Rocas y Materiales de la FICT siguiendo algunos de los pasos sugeridos en la norma ASTM C109/C 109M 02 con los cambios respectivos; los ensayos de compresión se los realizó en el laboratorio antes mencionado, siguiendo las especificaciones que se detallan en la “sección 3.2.” de la presente tesis.

### **Tratamiento estadístico de los datos.**

Para realizar el tratamiento estadístico de los datos fue necesario primero agruparlos de manera correcta, para esto fue necesario armar una matriz de los experimentos, denominada también “matriz de diseño (design matrix)”, la cual es un objeto matemático que representa el conjunto de combinaciones de niveles de los factores a las que vienen efectuadas los experimentos. En esta matriz, las filas corresponden a los experimentos a efectuarse y las columnas corresponden a las variables codificadas. En el caso de este estudio la matriz de diseño se la presenta en la TABLA 6.

TABLA 6

## MATRIZ DE DISEÑO PARA LAS PRUEBAS.

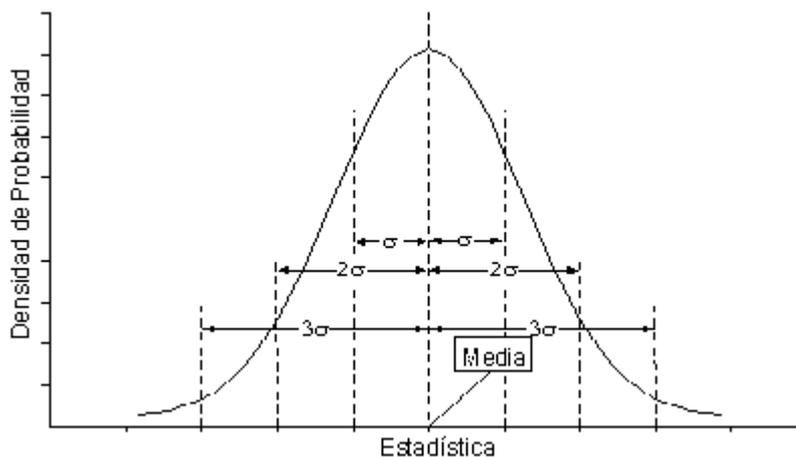
		TIEMPO DE CURADO			
NIVELES		7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS
<b>% DE ZEOLITA</b>	5%	M1	M1	M1	M1
	5%	M2	M2	M2	M2
	5%	M3	M3	M3	M3
	10%	M1	M1	M1	M1
	10%	M2	M2	M2	M2
	10%	M3	M3	M3	M3
	15%	M1	M1	M1	M1
	15%	M2	M2	M2	M2
	15%	M3	M3	M3	M3
	20%	M1	M1	M1	M1
	20%	M2	M2	M2	M2
	20%	M3	M3	M3	M3
	25%	M1	M1	M1	M1
	25%	M2	M2	M2	M2
	25%	M3	M3	M3	M3

Los datos obtenidos para las TABLAS 5 y 6, se los analizó por medio del software computacional STATISTICA realizando lo siguiente:

**Comprobar la normalidad de los datos encontrados.**

La densidad de probabilidad normal o conocida simplemente como distribución normal, fue estudiada por primera vez en el siglo XVIII cuando los científicos observaron con sorpresa el grado de regularidad en los errores de medición. Descubrieron que los patrones (distribuciones) eran aproximados a una distribución continua que denominaron “curva normal de errores” y le atribuyeron reglas de probabilidad. La ecuación de densidad de probabilidad normal, cuya gráfica (de forma semejante al perfil de una campana) se muestra en la FIGURA 3.1. [14].

$$f(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad -\infty < x < \infty$$



**FIGURA 3.1. GRÁFICA DE LA DENSIDAD DE PROBABILIDAD NORMAL.**

#### **Método de Shapiro y Wilk para verificar la Normalidad de datos.**

La prueba W de Shapiro & Wilk data de 1965 y contempla de acuerdo a Fidelis G., C (2004) los siguientes pasos:

- a) Ordenar en forma ascendente las j observaciones para la variable que se estudia.
- b) Calcular la sumatoria, a partir de:

$$\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2$$

c) Si  $j$  es par,  $j = 2k$ , calcular.

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-1+1} (x_{n-i-1} - x_i)^2$$

Si  $j$  es impar,  $j = 2k + 1$ , entonces se omite la mediana de los datos  $x_{k+1}$ , y se calcula el valor de  $b$  de acuerdo a la ecuación anterior.

d) Calcular el valor de  $W_1$ , el estadístico de prueba.

$$W_{cal} = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

e) Comparar  $W_{cal}$  con el valor de  $W_{tab}$  (los valores de  $W_{tab}$  se presentan en el APÉNDICE C). Si  $W_{cal}$  es menor que  $W_{tab}$  se rechaza la hipótesis de normalidad de los datos. Si se compara con un valor  $p$  teórico digamos de 0.05, se dice que se rechaza la hipótesis de normalidad de los datos si  $p$ -value calculado es menor que el valor teórico.

### **Análisis de Varianza.**

El término análisis de varianza describe una técnica por medio de la cual se analiza la variación total o se divide en componentes significativos. Se seleccionan muestras aleatorias de tamaño  $n$  de cada una de las  $k$  poblaciones. El término tratamiento se usa por lo general para referirnos a las diversas clasificaciones. Se supone que las  $k$  poblaciones son independientes y normalmente distribuidas con medias  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$  y varianza común  $\sigma^2$ .

Se desea probar las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

$H_1$ : Al menos dos de las medias no son iguales

Denotemos con  $y_{ij}$  la  $j$ -ésima observación del  $i$ -ésimo tratamiento, ahora cada observación se puede escribir de la forma:

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}$$

El término  $\varepsilon_{ij}$  representa el error aleatorio de la correspondiente media del tratamiento; se prefiere utilizar el término  $\mu$  que es justo la media general de todas las  $\mu_i$ ; es decir

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^k \mu_i}{k}$$

Nuestra hipótesis se basará en una comparación de dos estimaciones independientes de la varianza poblacional común  $\sigma^2$ .

La identidad de la suma de cuadrados se puede representar entonces de manera simbólica con la ecuación:

$$SST = SSA + SSE$$

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \text{suma total de cuadrados}$$

$$SSA = n \sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y}_{..})^2 = \text{suma de cuadrados de tratamientos}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 = \text{suma de cuadrados del error}$$

Cuando  $H_0$  es verdadera, la razón  $f = s_1^2/s^2$  es un valor de la variable aleatoria  $F$  que tiene una distribución  $F$  con  $k-1$  y  $k(n-1)$  grados de libertad. La hipótesis  $H_0$  se rechaza en el nivel de significancia  $\alpha$  cuando:

$$f > f_{\alpha}[k-1, k(n-1)]$$

También se puede aceptar o rechazar la hipótesis  $H_0$  con la aproximación del valor  $P$

$$P = P[F[k-1, k(n-1)] > f]$$

**TABLA 7**

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

<b>Fuente de variación</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>f calculada</b>
Tratamientos	SSA	k-1	$s_1^2 = \frac{SSA}{k-1}$	$\frac{s_1^2}{s^2}$
Error	SSE	k(n-1)	$s^2 = \frac{SSE}{k(n-1)}$	
Total	<u>SST</u>	<u>nk-1</u>		

### **Análisis de Regresión Lineal. Método de mínimos cuadrados.**

En estadística la regresión lineal o ajuste lineal es un método matemático que modela la relación entre una variable dependiente  $Y$ , las variables independientes  $X_i$  y un término aleatorio  $\varepsilon$ . Este modelo puede ser expresado como:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Donde  $\beta_0$  es la intersección o término "constante", las  $\beta_i$  son los parámetros respectivos a cada variable independiente, y  $p$  es el número de parámetros independientes a tener en cuenta en la regresión.

Dada la muestra  $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$ , las estimaciones por mínimos cuadrados  $a$  y  $b$  de los coeficientes de regresión  $\alpha$  y  $\beta$  se calculan a partir de las fórmulas:

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

### **Análisis de los resultados estadísticos.**

Una vez obtenidos todos los datos mencionados en la sección anterior por medio del software STATISTICA, se procedió a analizar si las hipótesis planteadas para cada caso eran aceptadas o no, es decir, se analizó si influye o no el tiempo y tipo de curado en la pasta de cemento compuesto que contiene 15% de zeolita y se analizó si conviene o no agregar zeolita al cemento observando si se mejora o no la resistencia mecánica a la compresión.

Antes de obtener los datos, las hipótesis iniciales planteadas fueron que: “La resistencia a la compresión de una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita no varía en función del tiempo de curado”, “Las resistencias a la compresión de las pastas de cemento compuesto con diferentes porcentajes de zeolita son iguales”; una vez obtenidos los datos de la resistencia a la compresión de las muestras se procedió a realizar el análisis de los datos, observando si verdaderamente no varía esta propiedad, entonces se acepta la

hipótesis inicial planteada, caso contrario se rechaza la hipótesis inicial a favor de la hipótesis experimental encontrada.

### **Revisar el análisis del problema.**

Una vez analizados los resultados obtenidos, se procedió a revisar si los factores que inicialmente se suponía que afectaban al experimento estaban en lo correcto, o si se encontró algún otro factor durante el transcurso del experimento que haga variar la resistencia a la compresión de las muestras, se tendrá que incluirlo en el análisis del problema.

### **3.2. Preparación y ensayo de las probetas.**

Para la preparación y el ensayo de las probetas, el presente estudio se basó en la norma ASTM C 109/C 109M - 02 con algunas modificaciones a dicha norma. La principal modificación realizada es que en lugar de morteros (Cemento + arena), lo que se realizó fue una pasta de cemento compuesto (Cemento + H<sub>2</sub>O + Aditivos) [15].

**Aparatos utilizados para la preparación y ensayo de las probetas.**

- ***Balanza electrónica***, este instrumento de medición proporcionó el peso en gramos de las diferentes proporciones (Figura 3.2.).



**FIGURA 3.2. BALANZA ELECTRÓNICA**

- ***Vaso graduado de 1000ml***, este vaso sirvió para medir la proporción de agua utilizada en la mezcla de la pasta de cemento compuesto.
- ***Los moldes de las muestras***, permitieron obtener los cubos de 50mm de arista, los moldes tenían 3 compartimientos para los cubos, tal como se muestra en la FIGURA 3.3. Las partes de

los moldes cuando se ensamblaron debían estar muy juntas. Los moldes eran de bronce y no debían ser atascados por la pasta de cemento. Los lados de los moldes estaban lo suficientemente rígidos para prevenir la propagación o las rompeduras. Las caras interiores del molde eran superficies planas y se ajustaban a las tolerancias de la TABLA 8.

**TABLA 8**

**TOLERANCIA PERMITIDA EN LOS MOLDES DE LAS MUESTRAS.**

<b>Parámetros</b>	<b>Moldes de los cubos.</b>	
	<b>Nuevos</b>	<b>Usados</b>
Superficies de los lados	<0,025mm	<0,05mm
Dist. entre lados opuestos	50 ± 0,13mm	50 ± 0,50mm
Altura de los compartimientos	50 <sup>+ 0,25mm</sup> - 0,13mm	50 <sup>+ 0,25mm</sup> - 0,38mm
Angulo entre caras adyacentes	90 ± 0,5°	90 ± 0,5°



**FIGURA 3.3. MOLDES**

- **Mezclador, Tazón y Paleta (FIGURA 3.4.),** El mezclador funciona con corriente eléctrica y estaba provisto de una paleta y un tazón para el mezclado de los materiales de las muestras.



**FIGURA 3.4. MEZCLADOR Y TAZÓN**

- **Mesa de Flujo**, esta sirve para compactar la mezcla dentro de los moldes, esta mesa gira en medio en medio de un eje y tiene una especie de leva, la cual hace golpear los moldes para compactarlos.
- **Paleta (FIGURA 3.5.)**, es una hoja de acero de 100 a 150mm de longitud, y con filos rectos.



**FIGURA 3.5. PALETA**

- **Máquina de Pruebas (FIGURA 3.6.)**, esta es una máquina de ensayos de compresión universal, con suficiente abertura entre las caras superior e inferior para poder utilizar aparatos de

verificación, la máquina es de ensayos universal marca SOLIEST, Modelo Versa Tester AP 1020, del laboratorio de Suelos, Rocas y Materiales de la FICT (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra) la cual tiene como función comprimir muestras de cubos de morteros, con los dispositivos adecuados puede ejecutar ensayos de flexión en viguetas.



**FIGURA 3.6. MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL**

### **Materiales para la preparación de las muestras.**

El material a utilizarse para la preparación de la pasta de cemento compuesto comprende:

- Cemento Tipo I.
- Zeolita de Manglaralto.
- Agua Potable.

### **Temperatura y humedad.**

- La **temperatura** en los alrededores de donde se va a mezclar el material, moldes, embases y el tazón para mezclar, se mantuvo entre  $23.0 \pm 3^{\circ}\text{C}$ . La temperatura del agua a mezclarse será  $23.0 \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- La **humedad relativa** del laboratorio deberá ser no menos que 50%.

### **PROCESO DE MOLIENDA.**

Una vez que se realizó el proceso de muestreo para la recolección de zeolita y recolectada la misma, esta es llevada al laboratorio de piro metalurgia de la FICT para la respectiva molienda, el objetivo de

este procedimiento es lograr que la zeolita tenga una finura de  $45 \mu$ , Antes de llevar la zeolita a los molinos, esta fue golpeada con un “combo” ya que la zeolita se encontraba en bruto, de este modo se obtuvo piedras de menor tamaño ingresaron fácilmente al primer molino.

1. El primer molino al que ingreso el material es el de mandíbulas, el material se fue agregando poco a poco FIGURA 3.7.



**FIGURA. 3.7. MOLINO DE MANDÍBULAS**

La FIGURA 3.8., muestra la zeolita luego de haber pasado por el molino de mandíbulas.



**FIGURA 3.8. ZEOLITA AL SALIR DE MOLINO DE MANDÍBULAS.**

2. El siguiente molino al que paso la zeolita fue el de rodillo (FIGURA 3.9.).



**FIGURA 3.9. MOLINO DE RODILLOS.**

En la FIGURA 3.10. se aprecia la zeolita luego de haber pasado por el molino de rodillos.



**FIGURA 3.10. GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL AL SALIR  
DEL MOLINO DE RODILLOS**

Luego de salir la zeolita del molino de rodillos, esta fue cuarteada y luego se tomó una porción de 100g, la cual se utilizó para el primer tamizado (FIGURA 3.11.).



**FIGURA 3.11. CUARTEANDO EL MATERIAL**

Una vez obtenida la muestra de 100g, esta zeolita fue llevada al tamizador, con tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo. Esto significa en el mismo orden: 1,4 cm, 40 mm, 425  $\mu$ , 300  $\mu$  (FIGURA 3.12.).



**FIGURA 3.12. TAMICES # 14, 18, 40, 50 Y FONDO**

3. Continuando con el proceso de molienda, el siguiente molino fue el de discos (FIGURA 3.13.).



**FIGURA 3.13. MOLINO DE DISCOS**

La zeolita fue cuarteada nuevamente y se tomó otra porción de 100g, la cual fue llevada al tamizador, con los tamices # 50, 100, 200, 325 y fondo. Esto es en el mismo orden: 300  $\mu$ , 150  $\mu$ , 75  $\mu$ , 45  $\mu$ .

4. Nuevamente en el proceso de molienda, se utilizó el molino de bolas, se agregó el material y fue molido por 50 minutos (FIGURA 3.14.).



**FIGURA 3.14. MOLINO DE BOLAS**

Se cuarteo nuevamente y se tomó otra porción de 100g, la cual fue llevada al tamizador, con los tamices # 325 y fondo (FIGURA 3.15.).



**FIGURA 3.15. TAMICES 325 Y FONDO**

Como el 75% de la muestra pasó el tamizado, se procedió a parar el proceso de molienda, ya que la restricción era que al menos el 60% de la muestra pase al fondo, si no se hubiera obtenido mas del 60% de zeolita se hubiera tenido que retornar al molino de bolas. En la FIGURA 3.16. se puede apreciar la zeolita que se va a utilizar para preparar las pastas de cemento compuesto.



**FIGURA 3.16. ZEOLITA CON GRANULOMETRÍA FINAL 45  $\mu$ m**

#### **Pruebas De Las Muestras.**

- Se realizó ensayos de compresión a tres muestras de 15% de Zeolita cada 7, 14, 21 y 28 días después de fabricadas las muestras. Además se efectuó iguales ensayos a tres muestras

de 17.5% de Zeolita cada 4, 11, 18 y 25 días después de fabricadas (estos datos son los que sirvieron para la validación), por lo que se tuvo que fabricar 24 muestras: 12 con el 15% de zeolita y 12 con el 17,5% de zeolita respectivamente.

### **Preparación De Los Moldes Para Las Muestras.**

1. Se aplicó una delgada capa de aceite lubricante, utilizando para impregnarla, pedazos de tela de algodón y una brocha. Ver FIGURA 3.17.



**FIGURA 3.17. APLICACIÓN DEL ACEITE**

2. El aceite permitió sellar las superficies donde se unen las mitades de los moldes.

### **Composición de las muestras.**

En la composición de las muestras, como ya se mencionó antes, no se realizaron morteros (cemento + arena), como se especifica en la norma ASTM C 109/C 109M – 02, sino, que se obtuvo pasta de cemento compuesto (Cemento + H<sub>2</sub>O + 15% de zeolita, y Cemento + H<sub>2</sub>O + 17,5% de zeolita). De acuerdo a la norma la cantidad de agua a utilizar es 0.485 por la cantidad de cemento especificado en la norma, el porcentaje de agua que se ha utilizado para las pruebas del presente estudio fue de 0.3 por la cantidad total en gramos de cemento más zeolita (3000g) por lo que la cantidad de agua fue 900ml. En la **TABLA 9** se muestran las cantidades mezcladas para producir seis morteros de cemento según la norma ASTM C 109/C 109M – 02. En la **TABLA 10** se especifica las cantidades utilizadas para obtener las 12 muestras que se requirió, para realizar los ensayos de compresión, realizando las respectivas variaciones a la norma antes mencionadas, la segunda columna de cantidades muestra los valores necesarios para realizar las muestras que sirvieron para la validación.

TABLA 9

## CANTIDADES PARA LA PRODUCCIÓN DE MORTEROS.

<b>Detalles</b>	<b>Cantidad.</b>	
Número de Morteros.	6	9
Cemento (g).	500	740
Arena (g).	1375	2035
Agua (mL).	242	359
Aire de arrastre.	230	340
Otros.	-	-

TABLA 10

## VARIACIONES A LA NORMA ASTM C 109/C 109M – 02.

<b>Detalles</b>	<b>Cantidad.</b>	
Número de Muestras.	12	12
Cemento (g).	2550	2475
Zeolita (g).	450	525
Agua (mL).	900	900
Aire de arrastre.	-	-
Otros.	-	-

### **Preparación de las muestras.**

Una vez determinadas las cantidades de los materiales a utilizar, se procedió a medir las cantidades requeridas de agua cemento y zeolita. Con los porcentajes de cada material ya obtenidos, se procedió a la preparación de la pasta siguiendo los pasos que se detallan a continuación.

1. Se homogeneizó el cemento con la zeolita, en la mezcladora eléctrica (5 minutos aproximadamente) para las muestras que contenían 15% de zeolita, y manualmente para las muestras que contenían 17.5% de zeolita, tal como se aprecia en la FIGURA 3.18.



**FIGURA 3.18. HOMOGENEIZADO**

2. Una vez que la mezcla zeolita-cemento estuvo homogeneizada, se le agregó el agua para obtener la pasta de cemento que servirá para realizar las muestras que sirvieron para los ensayos de compresión (FIGURA 3.19.).



**FIGURA 3.19. OBTENCIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO  
COMPUESTO.**

3. Luego de que se obtuvo la pasta de cemento, se procedió a colocarla en sus respectivos moldes para luego compactarlas con el punzón (FIGURA 3.20.).



**FIGURA 3.20. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.**

4. Una vez que los moldes estuvieron a la mitad y completamente llenos se procedió a compactarlos en la mesa de flujo o dándoles suaves golpes a ambos lados de los moldes como se aprecia en la FIGURA 3.21.



**FIGURA 3.21. COMPACTACIÓN DE LAS MUESTRAS.**

5. Se esperó 24h que las muestras se solidifiquen y se procedió a extraerlas de los moldes y se las marcó con el porcentaje de zeolita, tiempo de curado y grupo, en este caso fue G6/15/Día de curado o G6/17,5/Día de curado para la validación (FIGURA 3.22.).



**FIGURA 3.22. MUESTRAS PARA LAS PRUEBAS**

### **Ensayos De Compresión.**

Estos ensayos se realizó en la máquina de ensayos de compresión descrita en la FIGURA 3.6., y a las muestras se les realizaron los ensayos como ya se menciona antes cada 7, 14, 21 y 28 días y cada 4, 11, 18 y 25 días para la validación.

Antes de realizar los ensayos de compresión, se limpio las superficies y se removió las incrustaciones de material de las caras de los cubos que estaban en contacto con la máquina de ensayos de compresión.

Los datos que se obtuvieron por cada muestra son: la deformación cada 5 mili pulgadas con su respectiva carga en libras (se anotó además la carga máxima soportada por el cubo antes de romperse), los cuales luego se los transformó y presentó en el siguiente capítulo de este estudio como deformación unitaria y esfuerzo de compresión considerando como longitud inicial 50 mm y como área inicial 2500 mm<sup>2</sup>. Ver FIGURA 3.23.



**FIGURA 3.23. ENSAYO DE COMPRESIÓN.**

### **Cálculos.**

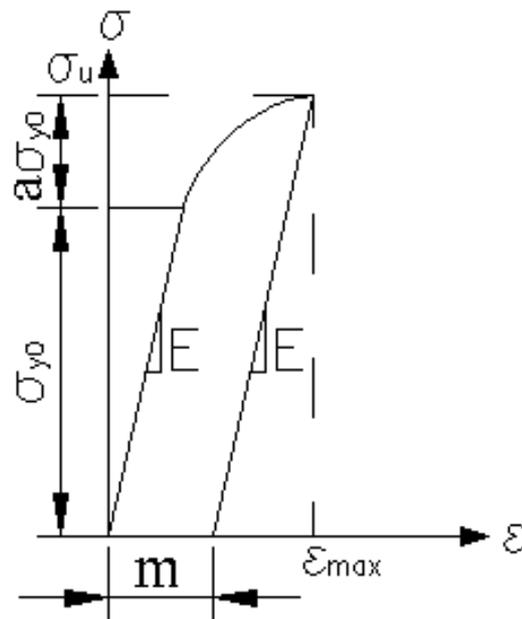
Una vez que se tuvo los datos de la carga indicada por la máquina de ensayos, el esfuerzo de compresión se lo calculó de la siguiente manera:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde,  $f_m$  es el esfuerzo de compresión en MPa,  $P$  la carga máxima total en Newton, y  $A$  el área de la superficie a la que se le aplicó la carga en  $\text{mm}^2$ .

### **3.3. Simulación Computacional.**

En esta etapa se implementó el programa en Matlab que se detallará mas adelante para modelar el esfuerzo de compresión en función de las variables que se detallan a continuación, (Ver FIGURA 3.24.):



**FIGURA 3.24. REPRESENTACIÓN DE LOS PARÁMETROS.**

$\sigma_u$ : Esfuerzo máximo de compresión.

$\sigma_{yo}$ : Esfuerzo de fluencia.

$E_{max}$ : Deformación máxima.

$m$ : Deformación inelástica total.

$$a = \frac{\sigma_u - \sigma_{yo}}{\sigma_{yo}}.$$

La modelación en Matlab se la realizó con el siguiente algoritmo, en el cual se organizaron las formulas y se ingresaron los valores de las constantes para que tengan una secuencia lógica y de esta manera poder graficar los esfuerzos en función de la deformación del material.

#### **Algoritmo en Matlab.**

Este algoritmo permite graficar la curva esfuerzo-deformación de un cuerpo sometido a tensión o a compresión como es el caso de la pasta de cemento compuesto que es objeto de este estudio.

1. Inicializo todas las variables a utilizar

```
de=0.000025;
```

```
e=[0:de:0.15]';
```

```
s(1)=0;
```

```
E=20000e6;
```

```
n=size(e);
```

```
ntotal=n(1,1);
```

```
sy(1)=10e6;
```

```
m=0.003;
```

```
a=1;
```

```
L(1)=0;
```

2. Por El siguiente lazo "for" se determinan los valores de los esfuerzos a graficar.

```
for i=1:ntotal,
```

$$\text{str}(i+1)=s(i)+E*de;$$
$$\text{Ftr}(i+1)=\text{abs}(\text{str}(i+1))-s_y(i);$$

if  $\text{Ftr}(i+1) > 0$

3. En el siguiente paso se llama a la función que por medio del método numérico de Newton Raphson calcula los valores de delta lambda y de H' para poder graficar los esfuerzos en la deformación plástica.

$$[dL(i+1),H(i+1)]=\text{NewtonRaphson}(\text{Ftr}(i+1),E,s_y(1),a,m,L(i));$$
$$L(i+1)=dL(i+1)+L(i);$$
$$s(i+1)=\text{str}(i+1)-E*dL(i+1)*\text{sign}(\text{str}(i+1));$$
$$s_y(i+1)=s_y(i)+H(i+1)*dL(i+1);$$

else

```
L(i+1)=0;
```

```
s(i+1)=str(i+1);
```

```
sy(i+1)=sy(i);
```

```
end
```

```
end
```

4. Se organiza los esfuerzos en un vector y se grafica en función de la deformación.

```
esf=s(1:ntotal);
```

```
plot(e,esf);
```

```
grid;
```

5. El siguiente algoritmo es la función que fue llamada en el “paso 3”, este algoritmo sirve para realizar la función Newton Raphson, la cual permite encontrar los diferentes delta lambda y H’.

```
function [DL,Hn1]=NewtonRaphson(Ft,E,Sy0,a,m,ln)
```

```
tol=1e-10;
```

```
dl(1)=tol;
```

```
for k=1:200,
```

```
    H(k)=a*Sy0*sqrt(m)*(m-dl(k)-ln)/((m+dl(k)+ln)^2*sqrt(dl(k)+ln));
```

```
    r(k)=Ft-dl(k)*(E+H(k));
```

```
    A(k)=EH(k)+dl(k)*Sy0*a*sqrt(m)*(2*(m+dl(k)+ln)*(dl(k)+ln)+4*(m-  
    dl(k)-ln)*(dl(k)+ln)+(m+dl(k)+ln)*(m-dl(k)-  
    ln))/(2*(m+dl(k)+ln)^3*(dl(k)+ln)^1.5);
```

```
    dl(k+1)=dl(k)-r(k)/A(k);
```

```
if norm(r(k))<tol*norm(r(1))  
  
    DL=dl(k+1);  
  
    Hn1=a*Sy0*sqrt(m/(dl(k+1)+ln))*(m-dl(k+1)-  
ln)/(m+ln+dl(k+1))^2;  
  
    break  
  
end  
  
end
```

# **CAPÍTULO 4**

## **4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS**

### **4.1. Ensayo de Compresión.**

Una vez que se realizaron los ensayos de compresión en el laboratorio de suelos, rocas y materiales de la FICT, con la máquina de ensayos universal marca SOLIEST, Modelo Versa Tester AP 1020, en esta sección del presente estudio se muestran los resultados obtenidos, a los cuales se los analizó en una de las secciones posteriores del presente estudio, los datos que se encuentran de color rojo en las tablas que se detallarán a continuación, corresponden a la deformación en la zona plástica.

En la TABLA 11 se muestran los datos de deformación y esfuerzo a la compresión de las tres muestras correspondientes a 7 días de curado y 15% de zeolita.

**TABLA 11**

**DATOS OBTENIDOS A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>					
<b>Temp. Amb.</b>	26°C	<b>Humedad Relativa</b>	68,7 HR	<b>Máquina</b>	Versa Tester AP 1020.
<b>DATOS OBTENIDOS CON 15% DE ZEOLITA</b>					
<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>		<b>Muestra 3</b>	
<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>
0,0025	0,98	0,00254	0,9016	0,00254	0,784
0,0051	2,744	0,00508	1,8816	0,00508	2,156
0,0076	6,86	0,00762	4,508	0,00762	4,5864
0,0102	12,152	0,01016	8,624	0,01016	8,82
0,0127	17,836	0,0127	13,25	0,0127	13,916
0,0152	22,932	0,01524	19,012	0,01524	19,326
0,0178	28,42	0,01778	24,5	0,01778	24,5
0,0203	33,32	0,02032	30,38	0,02032	32,34
0,0229	38,808	0,02286	36,26	0,02286	38,808
0,0254	43,12	0,0254	41,748	0,0254	44,1
0,0279	47,04	0,02794	48,02	0,02794	49,98
0,0305	49	0,03048	52,332	0,03048	52,92
0,033	49,98	0,034036	57,82		

La TABLA 12 muestra los datos obtenidos de las tres muestras a los 14 días de curado y 15% de zeolita.

**TABLA 12**

**DATOS OBTENIDOS A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>					
<b>Temp. Amb.</b>	27,2°C	<b>Humedad Relativa</b>	62,1HR	<b>Máquina</b>	Versa Tester AP 1020.
<b>DATOS OBTENIDOS CON 15% DE ZEOLITA</b>					
<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>		<b>Muestra 3</b>	
<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>
0,0025	0,784	0,00254	0,784	0,00254	0,588
0,0051	1,96	0,00508	2,548	0,00508	1,372
0,0076	4,312	0,00762	5,88	0,00762	2,548
0,0102	8,232	0,01016	9,996	0,01016	5,292
0,0127	12,544	0,0127	15,484	0,0127	9,016
0,0152	18,228	0,01524	21,56	0,01524	14,112
0,0178	24,5	0,01778	28,42	0,01778	19,6
0,0203	31,36	0,02032	34,3	0,02032	25,088
0,0229	37,24	0,02286	40,768	0,02286	30,38
0,0254	44,1	0,0254	48,02	0,0254	35,868
0,0279	49,98	0,02794	53,508	0,02794	41,748
0,0305	55,86	0,029464	55,86	0,03048	46,06
0,033	59,78			0,0315	47,04

La TABLA 13 muestra los datos obtenidos de las tres muestras a los 21 días de curado y 15% de zeolita.

**TABLA 13**

**DATOS OBTENIDOS A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>					
<b>Temp. Amb.</b>	27,1°C	<b>Humedad Relativa</b>	64,8HR	<b>Máquina</b>	Versa Tester AP 1020.
<b>DATOS OBTENIDOS CON 15% DE ZEOLITA</b>					
<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>		<b>Muestra 3</b>	
<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>
0,0025	0,98	0,00254	1,372	0,00254	1,372
0,0051	3,136	0,00508	3,528	0,00508	4,508
0,0076	7,448	0,00762	7,448	0,00762	9,604
0,0102	12,348	0,01016	13,132	0,01016	14,7
0,0127	18,424	0,0127	18,816	0,0127	21,56
0,0152	24,5	0,01524	24,5	0,01524	27,44
0,0178	31,36	0,01778	30,38	0,01778	34,3
0,0203	36,26	0,02032	35,28	0,02032	41,16
0,0229	43,12	0,02286	41,16	0,02286	47,628
0,0254	47,04	0,0254	46,06	0,0254	51,94
0,0279	48,02	0,02794	49,98		
		0,03048	51,94		

La TABLA 14 muestra los datos obtenidos de las tres muestras a los 28 días de curado y 15% de zeolita.

**TABLA 14**

**DATOS OBTENIDOS A LOS 28 DÍAS DE CURADO**

<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>					
<b>Temp. Amb.</b>	25,7°C	<b>Humedad Relativa</b>	68,8HR	<b>Máquina</b>	Versa Tester AP 1020.
<b>DATOS OBTENIDOS CON 15% DE ZEOLITA</b>					
<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>		<b>Muestra 3</b>	
<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>
0,0025	0,6664	0,00254	0,784	0,00254	0,588
0,0051	1,96	0,00508	1,764	0,00508	1,176
0,0076	2,94	0,00762	3,136	0,00762	1,764
0,0102	4,508	0,01016	5,292	0,01016	2,94
0,0127	6,664	0,0127	8,624	0,0127	5,488
0,0152	11,172	0,01524	13,524	0,01524	9,212
0,0178	16,464	0,01778	18,228	0,01778	13,916
0,0203	22,54	0,02032	23,52	0,02032	18,62
0,0229	28,42	0,02286	28,42	0,02286	23,52
0,0254	34,3	0,0254	34,3	0,0254	29,4
0,0279	40,18	0,02794	40,18	0,02794	34,888
0,0305	45,08	0,03048	45,08	0,03048	40,18
0,033	49,98	0,03302	47,04	0,03302	46,06
0,0356	55,468			0,03556	52,92
0,0386	59,78			0,0381	54,88

La TABLA 15 muestra los datos obtenidos de las tres muestras a los 4 días de curado y 17,5% de zeolita.

**TABLA 15**

**DATOS OBTENIDOS A LOS 4 DÍAS DE CURADO**

<b>CONDICIONES DEL ENSAYO</b>					
<b>Temp. Amb.</b>	25,3°C	<b>Humedad Relativa</b>	69,4HR	<b>Máquina</b>	Versa Tester AP 1020.
<b>DATOS OBTENIDOS CON 17,5% DE ZEOLITA</b>					
<b>Muestra 1</b>		<b>Muestra 2</b>		<b>Muestra 3</b>	
<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>	<b>Def. Unitaria</b>	<b>Esf. (Mpa)</b>
0,0025	0,5096	0,00254	0,3136	0,00254	0,3528
0,0051	1,568	0,00508	0,98	0,00508	1,176
0,0076	3,136	0,00762	1,96	0,00762	2,352
0,0102	6,468	0,01016	2,94	0,01016	4,508
0,0127	9,8	0,0127	5,88	0,0127	7,7616
0,0152	15,092	0,01524	9,212	0,01524	12,466
0,0178	20,58	0,01778	15,484	0,01778	17,64
0,0203	26,46	0,02032	20,58	0,02032	26,46
0,0229	31,36	0,02286	26,46	0,02286	30,38
0,0254	40,18	0,0254	32,34	0,0254	36,26
<b>0,032</b>	<b>49,98</b>	0,02794	39,2	0,02794	43,12
		0,03048	46,844	0,03048	49
		<b>0,032004</b>	<b>48,02</b>	<b>0,03302</b>	<b>51,94</b>

La TABLA 16 muestra los datos obtenidos de las tres muestras a los 11 días de curado y 17,5% de zeolita.

**TABLA 16**

**DATOS OBTENIDOS A LOS 11 DÍAS DE CURADO**

CONDICIONES DEL ENSAYO					
Temp. Amb.	25°C	Humedad Relativa	70,6HR	Máquina	Versa Tester AP 1020.
DATOS OBTENIDOS CON 17,5% DE ZEOLITA					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Def. Unitaria	Esf. (Mpa)	Def. Unitaria	Esf. (Mpa)	Def. Unitaria	Esf. (Mpa)
0,0025	1,0976	0,00254	1,4112	0,00254	1,176
0,0051	2,94	0,00508	4,3512	0,00508	3,4888
0,0076	6,9384	0,00762	8,82	0,00762	7,448
0,0102	13,132	0,01016	13,328	0,01016	13,132
0,0127	19,208	0,0127	19,992	0,0127	18,62
0,0152	25,48	0,01524	27,44	0,01524	24,5
0,0178	32,144	0,01778	34,692	0,01778	30,38
0,0203	38,22	0,02032	44,1	0,02032	36,26
0,0229	45,08	0,02286	49	0,02286	42,728
0,0254	49			0,02591	48,02

La TABLA 17 muestra los datos obtenidos de las tres muestras a los 18 días de curado y 17,5% de zeolita.

TABLA 17

## DATOS OBTENIDOS A LOS 18 DÍAS DE CURADO

CONDICIONES DEL ENSAYO					
Temperatura	27,1°C	Humedad	70HR	Máquina	Versa Tester AP 1020.
DATOS OBTENIDOS CON 17,5% DE ZEOLITA					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Def. Unitaria	Esf. (Mpa)	Def. Unitaria	Esf. (Mpa)	Def. Unitaria	Esf. (Mpa)
0,0025	0,588	0,00254	0,98	0,00254	0,588
0,0051	0,98	0,00508	2,744	0,00508	1,176
0,0076	2,352	0,00762	6,664	0,00762	2,352
0,0102	4,508	0,01016	12,152	0,01016	5,684
0,0127	7,9184	0,0127	17,64	0,0127	10,074
0,0152	12,544	0,01524	25,48	0,01524	15,484
0,0178	17,836	0,01778	32,34	0,01778	21,56
0,0203	25,088	0,02032	40,18	0,02032	27,44
0,0229	31,36	0,02286	49	0,02286	35,28
0,0254	39,2	0,0254	49,98	0,0254	42,728
0,03	46,06			0,03099	51,94

La TABLA 18 muestra los datos obtenidos de las tres muestras a los 25 días de curado y 17,5% de zeolita.

TABLA 18

## DATOS OBTENIDOS A LOS 25 DÍAS DE CURADO

CONDICIONES DEL ENSAYO					
Temperatura	26,3°C	Humedad	68,9HR	Máquina	Versa Tester AP 1020.
DATOS OBTENIDOS CON 17,5% DE ZEOLITA					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Def. Unitaria	Esf. (Mpa)	Def. Unitaria	Esf. (Mpa)	Def. Unitaria	Esf. (Mpa)
0,0025	0,98	0,00254	0,98	0,00254	0,784
0,0051	2,548	0,00508	2,352	0,00508	1,568
0,0076	4,704	0,00762	5,096	0,00762	2,744
0,0102	7,84	0,01016	10,192	0,01016	4,116
0,0127	12,544	0,0127	15,288	0,0127	6,468
0,0152	17,64	0,01524	21,56	0,01524	9,8
0,0178	23,52	0,01778	27,44	0,01778	13,132
0,0203	29,4	0,02032	33,32	0,02032	16,464
0,0229	34,3	0,02286	39,2	0,02286	20,58
0,0254	40,18	0,0254	44,1	0,0254	24,5
0,0279	44,1	0,02794	48,02	0,02794	28,42
0,0305	45,08	0,03048	52,92	0,03048	31,36
		0,03302	54,88	0,03302	35,28
				0,03556	41,16
				0,0381	48,02
				0,04064	50,96

En esta sección de la tesis se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de compresión, estos resultados sirvieron luego para

realizar el modelo que simuló el comportamiento del esfuerzo a la compresión de las muestras. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, los resultados que necesitaba el modelo computacional son: el esfuerzo de fluencia; el esfuerzo máximo a la compresión; la deformación máxima; el módulo elástico; la constante “**a**”, que es una relación entre esfuerzo máximo a la compresión y el esfuerzo de fluencia; y por último el valor de la constante “**m**” la cual es la deformación inelástica total.

En el APÉNDICE A, se muestran los resultados antes mencionados de la pasta de cemento compuesta con 15% de zeolita para los diferentes días de curado.

El APÉNDICE B, muestra los mismos resultados para los datos de validación, lo que quiere decir, de la pasta de cemento compuesta con 17,5% de zeolita para los diferentes días de curado.

La TABLA 19, muestra los valores de la matriz de diseño mencionada en el capítulo anterior. Además de los valores experimentales de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de zeolita, se incluyó también el valor que servirá como control (0% de zeolita) y el del cemento Pórtland tipo IV, lo que permitió determinar la reacción que

produce la adición de zeolita en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento, además en la TABLA 20 se muestra la matriz de diseño para los datos de validación, aquí también se incluyo el valor del patrón para el análisis.

**TABLA 19**

**MATRIZ DE DISEÑO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES**

		<b>TIEMPO DE CURADO</b>			
		<b>7 DIAS</b>	<b>14 DIAS</b>	<b>21 DIAS</b>	<b>28 DIAS</b>
	<b>NIVELES</b>				
<b>% DE ZEOLITA</b>	<b>0,00%</b>	80,015	87,128	63,700	77,348
	<b>0,00%</b>	80,015	88,017	63,308	76,459
	<b>0,00%</b>	82,682	88,017	66,640	77,348
	<b>5,00%</b>	46,060	64,012	66,679	67,568
	<b>5,00%</b>	59,780	66,679	66,679	68,457
	<b>5,00%</b>	57,820	67,568	76,459	73,792
	<b>10,00%</b>	62,132	53,900	40,180	62,720
	<b>10,00%</b>	57,820	57,820	44,100	65,660
	<b>10,00%</b>	56,252	59,780	45,080	71,540
	<b>15,00%</b>	49,980	59,780	48,020	59,780
	<b>15,00%</b>	57,820	55,860	51,940	47,040
	<b>15,00%</b>	52,920	47,040	51,940	54,880
	<b>20,00%</b>	49,000	44,100	51,940	67,568
	<b>20,00%</b>	47,040	49,000	48,020	68,457
	<b>20,00%</b>	44,100	55,860	54,880	65,790
	<b>25,00%</b>	33,320	41,160	42,140	54,880
	<b>25,00%</b>	45,668	45,080	43,120	45,080
	<b>25,00%</b>	47,236	50,960	49,980	50,960
	<b>TIPO IV</b>	49.9570	50.8996	45.2441	40.5311
	<b>TIPO IV</b>	45.2441	49.9570	40.5311	42.4163
<b>TIPO IV</b>	45.2441	49.0144	42.4163	42.9819	

TABLA 20

## MATRIZ DE DISEÑO PARA LOS DATOS DE VALIDACIÓN

		TIEMPO DE CURADO				
		NIVELES	4 DIAS	11 DIAS	18 DIAS	25 DIAS
<b>% DE ZEOLITA</b>	<b>0,00%</b>		70,235	86,238	87,127	94,240
	<b>0,00%</b>		71,124	86,238	101,352	84,460
	<b>0,00%</b>		80,015	88,017	86,238	110,243
	<b>7,50%</b>		63,700	66,640	68,457	72,014
	<b>7,50%</b>		57,820	71,540	81,793	72,014
	<b>7,50%</b>		56,252	62,720	72,903	65,790
	<b>12,50%</b>		57,820	59,567	45,080	40,180
	<b>12,50%</b>		52,920	54,232	44,492	45,668
	<b>12,50%</b>		56,840	58,678	44,688	41,748
	<b>17,50%</b>		49,980	49,000	46,060	45,080
	<b>17,50%</b>		48,020	49,000	49,980	54,880
	<b>17,50%</b>		51,940	48,020	51,940	50,960
	<b>22,50%</b>		57,820	59,780	83,571	79,126
	<b>22,50%</b>		59,780	75,460	86,238	70,235
	<b>22,50%</b>		51,940	60,760	86,238	74,681
	<b>27,50%</b>		31,752	38,220	48,608	28,420
	<b>27,50%</b>		32,928	42,728	43,120	37,240
	<b>27,50%</b>		33,712	41,160	41,160	39,200
	<b>TIPO IV</b>		45,2441	42,4163	40,5311	46,7522
	<b>TIPO IV</b>		39,5886	46,1866	44,3015	37,3263
<b>TIPO IV</b>		38,6460	42,2278	36,7608	44,3015	

Los análisis correspondientes a los datos mostrados en las dos tablas anteriores, se muestran en una de las secciones posteriores del presente capítulo.

#### **4.2. Análisis Estadístico.**

En esta sección, se realizó el análisis estadístico de los datos y resultados obtenidos en la sección anterior, mediante la ayuda de la herramienta computacional "STATISTICA". Esta herramienta se utilizó para determinar las funciones que rigen el comportamiento de las diferentes variables dependientes en función del % de zeolita y del tiempo de curado, estas funciones obtenidas en esta etapa fueron útiles para simular el comportamiento de las pastas de cemento compuesto.

El primer análisis que se realizó en esta etapa es mediante la prueba de Shapiro y Wilk, la cual se utilizó para verificar la normalidad de los datos experimentales.

Para este análisis se asumió las siguientes hipótesis:

- Ho: Los datos obtenidos tienen una distribución normal.
- H1: Los datos obtenidos no tienen una distribución normal.

Cuando Ho es verdadera,  $W_{cal}$  es un valor de variable aleatoria  $W$  con un nivel de significancia  $\alpha$  para  $N$  datos.

$$W_{cal} = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

Este valor de  $W_{cal}$ , se lo compara con el valor de  $W$  que se obtiene de la tabla que se muestra en el APENDICE C de este estudio para los valores de  $W$  tabulados. Si el valor de  $W_{cal}$  es mayor que  $W_{tab}$ , se acepta la hipótesis nula, lo que quiere decir que la distribución de los datos es normal.

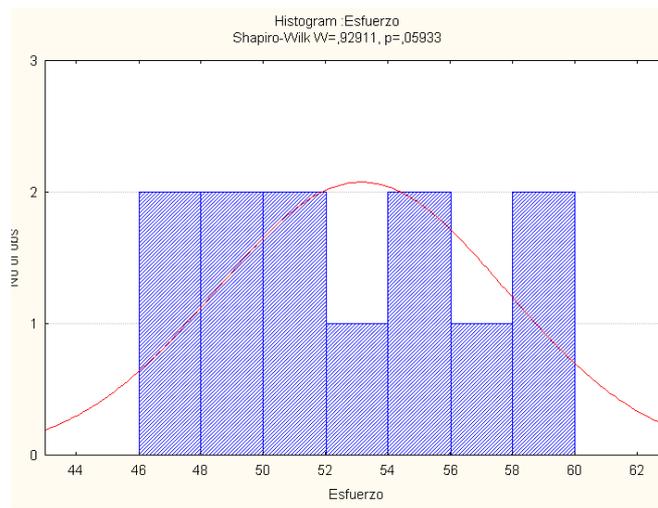
En la FIGURA 4.1. se muestran los valores del esfuerzo último a la compresión para su correspondiente tiempo de curado, los cuales fueron ingresados al software STATISTICA para su correspondiente análisis.

The screenshot shows the STATISTICA software window titled "STATISTICA - Imported from E:\Libro2.xls - [Sheet3]". The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Insert, Format, Statistics, Graphs, Tools), a toolbar with various icons, and a spreadsheet area. The spreadsheet has two columns: "1 Dias" and "2 Esfuerzo". The data is as follows:

	1 Dias	2 Esfuerzo
1	7	49,98
2	7	57,82
3	7	52,92
4	14	59,78
5	14	55,86
5	14	47,04
7	21	48,02
3	21	51,94
3	21	51,94
3	28	59,78
1	28	47,04
2	28	54,88

**FIGURA 4.1. DATOS DE ESFUERZO A LA COMPRESIÓN Y  
TIEMPO DE CURADO PARA UNA PASTA DE CEMENTO  
COMPUESTA CON 15% DE ZEOLITA.**

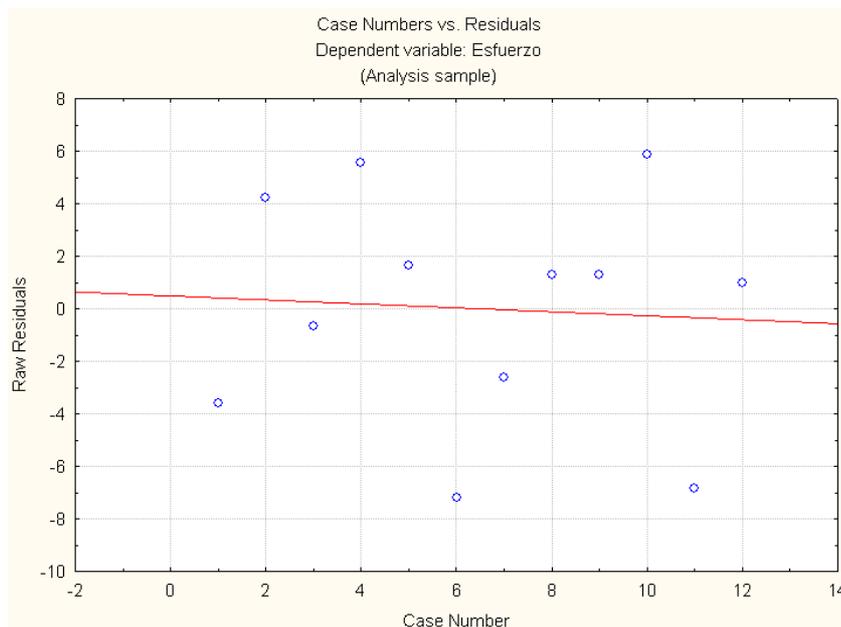
Una vez ingresados estos datos en el software STATISTICA, se procedió a obtener el histograma de frecuencia con los esfuerzos para las suposiciones de distribución normal (FIGURA 4.2.).



**FIGURA 4.2. HISTOGRAMA DE ESFUERZOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON UNA CONCENTRACIÓN DE 15% DE ZEOLITA.**

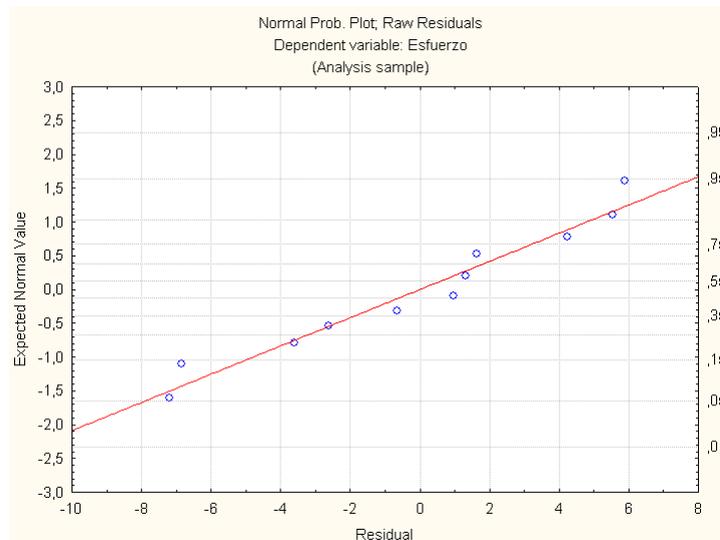
En la figura se puede observar que el valor de  $W_{cal}$  es igual a 0.92911, el cual se lo comparó con el 0.859 que es el valor de  $W_{tab}$ , como el valor del  $W_{cal}$  es mayor que el tabulado se aceptó la hipótesis inicial asumida que es el de la normalidad de los datos con un 94% de confianza  $“(1-p)*100”$ .

La FIGURA 4.3. muestra el análisis de los residuos contra el número de casos para una distribución normal de esfuerzos de compresión, esto se utilizó para ver como se comportaban los residuos con respecto a la media de los esfuerzos.



**FIGURA 4.3. RESIDUOS VS. NÚMERO DE CASOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON UNA CONCENTRACIÓN DE 15% DE ZEOLITA.**

La FIGURA 4.4. muestra que tan cerca se encontraban los datos experimentales de una distribución normal, aquí se puede observar que la varianza de cada uno de los datos es mínima, y que no existe mucha dispersión de estos datos.

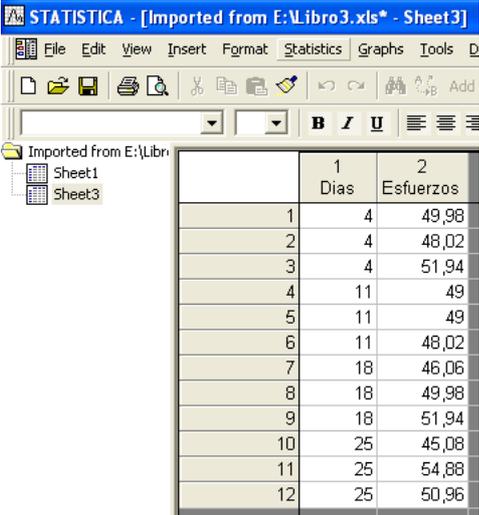


**FIGURA 4.4. PROBABILIDAD NORMAL DE LOS RESIDUOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON 15% DE ZEOLITA.**

Una vez concluido este análisis para los esfuerzos máximos de compresión para el cemento curado a los 7, 14, 21 y 28 días y un 15% de zeolita, se procedió a realizar el mismo análisis anterior para los datos de esfuerzo a la compresión con los datos de validación (4, 11, 18 y 25 días de curado y 17.5% de zeolita). Este análisis, permitió comprobar si las asunciones realizadas anteriormente estaban en lo correcto.

La FIGURA 4.5. muestra los datos ingresados en el software STATISTICA para la validación y se los analizó por medio del método

de anova, el cual se lo utiliza para el análisis de datos con comportamiento normal.

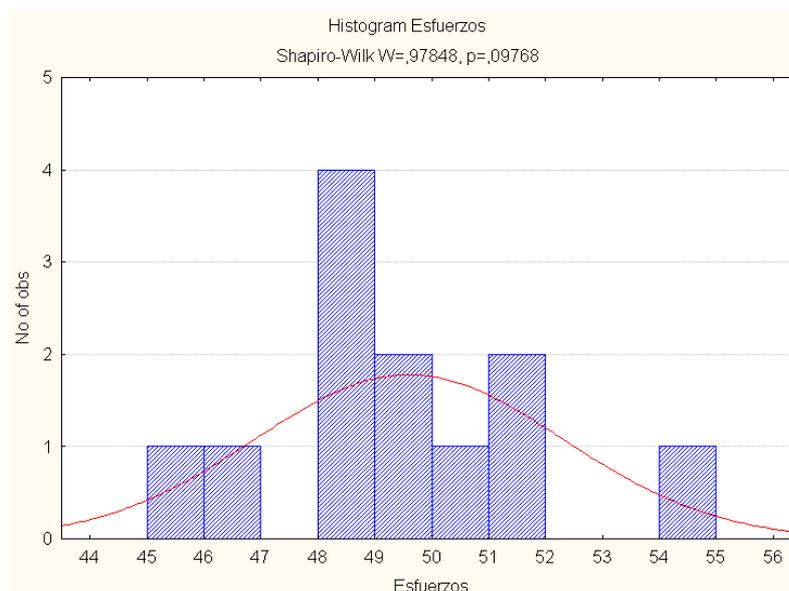


The screenshot shows the STATISTICA software interface. The title bar reads "STATISTICA - [Imported from E:\Libro3.xls\* - Sheet3]". The menu bar includes File, Edit, View, Insert, Format, Statistics, Graphs, and Tools. The toolbar contains various icons for file operations and editing. The spreadsheet area displays a table with two columns: "Días" (Days) and "Esfuerzos" (Efforts). The data is as follows:

	1 Días	2 Esfuerzos
1	4	49,98
2	4	48,02
3	4	51,94
4	11	49
5	11	49
6	11	48,02
7	18	46,06
8	18	49,98
9	18	51,94
10	25	45,08
11	25	54,88
12	25	50,96

**FIGURA 4.5. DATOS DE ESFUERZO A LA COMPRESIÓN Y  
TIEMPO DE CURADO PARA UNA PASTA DE CEMENTO  
COMPUESTA CON 17.5% DE ZEOLITA.**

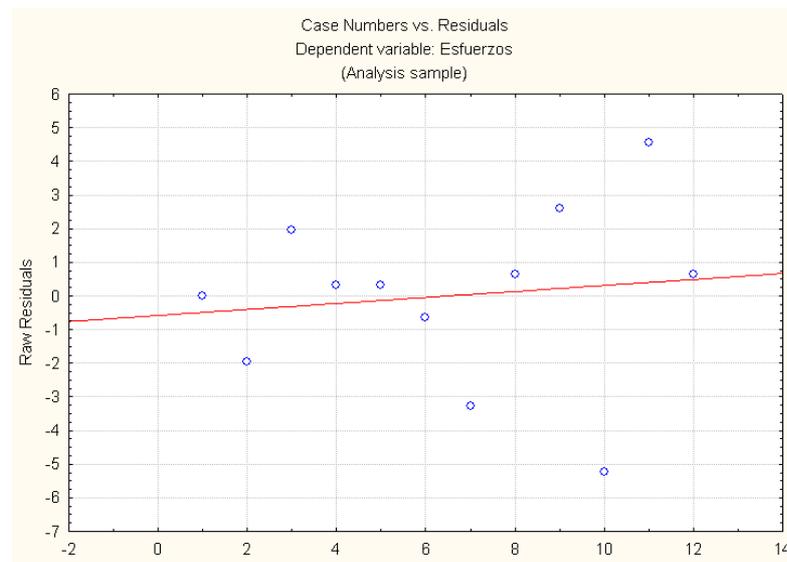
Obtenemos el correspondiente histograma de frecuencia para estos datos (FIGURA 4.6.).



**FIGURA 4.6. HISTOGRAMA DE ESFUERZOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON UNA CONCENTRACIÓN DE 17.5% DE ZEOLITA.**

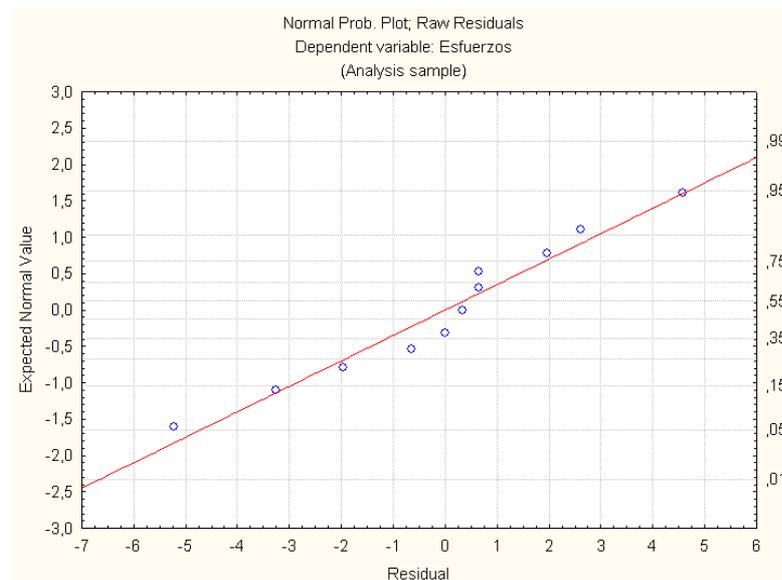
Como se puede observar en la gráfica que con un 90% de confianza se aceptó la hipótesis de homogeneidad planteada al inicio de este análisis, ya que el valor de  $W_{cal}$  (0.97848) fue mayor que el  $W_{tab}$  (0.859), este intervalo de confianza debe haber disminuido por que contiene los datos del día 4 de curado.

La FIGURA 4.7. muestra el análisis de los residuos contra el número de casos para una distribución normal de esfuerzos de compresión para los datos de validación.



**FIGURA 4.7. RESIDUOS VS. NÚMERO DE CASOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON UNA CONCENTRACIÓN DE 17.5% DE ZEOLITA.**

La FIGURA 4.8. muestra que tan cerca se encontraban los datos de validación de una distribución normal, aquí se puede observar que la varianza de cada uno de los datos es mínima, y que no existe mucha dispersión de estos datos.



**FIGURA 4.8. PROBABILIDAD NORMAL DE LOS RESIDUOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON 17.5% DE ZEOLITA.**

### **ANÁLISIS DE VARIANZA.**

Una vez que se comprobó la normalidad de los datos obtenidos, se procedió a realizar el análisis de ANOVA para un factor o análisis de varianza simple.

Este análisis permitió determinar si existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos, para este caso los tratamientos fueron el tiempo de curado (4, 14, 21 y días) y los datos analizados fueron los del esfuerzo último a la compresión.

Para realizar el presente análisis se asumió las siguientes hipótesis:

- Ho: Las medias de los tratamientos son iguales.
- H1: Al menos dos de las medias no son iguales.

La hipótesis nula Ho se rechaza en el nivel de significancia cuando:

$$f > f_{\alpha[k-1, k(n-1)]}, \text{ y además } p < \alpha = 0.05$$

En la TABLA 21 se puede observar un resumen con la suma, promedio y varianza de las tres muestras obtenidas por cada día de curado, como se puede apreciar en la tabla siguiente el valor de la varianza aumentó de manera considerable a los 14 y 28 días de curado, esto se produce debido a que todo experimento esta expuesto a varios tipos de errores, los valores para las medias de los esfuerzo a la compresión serán analizados mas adelante.

TABLA 21

## RESUMEN ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS

GRUPOS	CUENTA	SUMA	PROMEDIO	VARIANZA
7	3	160,72	53,57	15,69
14	3	162,68	54,23	42,58
21	3	151,9	50,63	5,12
28	3	161,7	53,90	41,30

A continuación se realizó un estudio más exhaustivo de los datos obtenidos para comprobar si la hipótesis inicial asumida acerca de la diferencia significativa entre las medias de los tratamientos puede ser aceptada o rechazada a favor de la hipótesis experimental. Este análisis se lo realizó por medio de un análisis con anova en el software computacional STATISTICA, la FIGURA 4.9. muestra los resultados obtenidos para el análisis de los datos individuales del esfuerzo a la compresión de una pasta de cemento compuesto teniendo como tratamientos 7,14, 21 y 28 días de curado al aire.

Univariate Tests of Significance for Esfuerzo (Sheet3 i Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	33814,08	1	33814,08	1292,049	0,000000
Dias	24,65	3	8,22	0,314	0,815073
Error	209,37	8	26,17		

FIGURA 4.9. PRUEBA UNIVARIADA.

Como se puede apreciar en la figura anterior el valor de  $F(0.314)$  obtenido es menor que el  $F_{\text{critico}}$  (1292.049), y además el valor de  $p$  (0.815) es mucho mayor que el  $\alpha$  asumido (0.05). Con los resultados obtenidos se pudo asegurar con un 95% de confianza que no existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos.

Continuando con el análisis por medio de anova, en la FIGURA 4.10. se muestra el rango en el que se encontraban las medias de los tratamientos (esfuerzo último a la compresión) para cada uno de los diferentes días de curado para un intervalo de 95% de confianza.

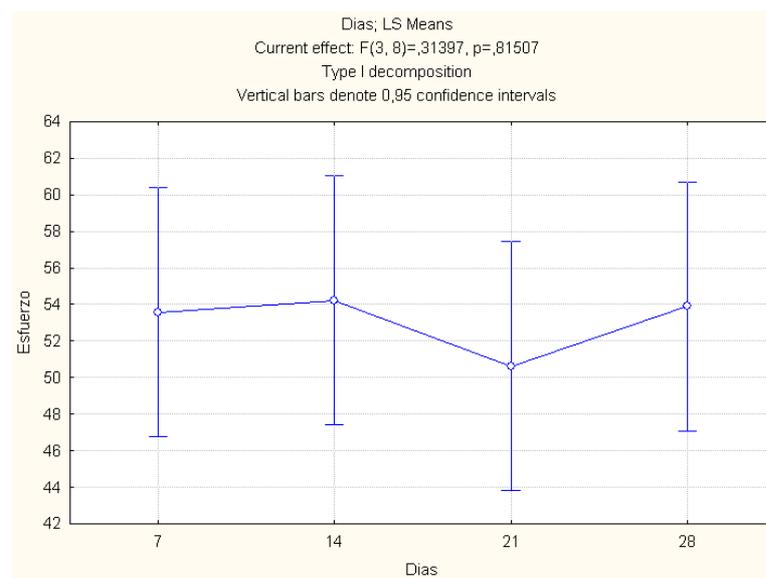
Dias; Unweighted Means (Sheet3 in Imported from E						
Current effect: F(3, 8)=,31397, p=,81507						
Type I decomposition						
Cell No.	Dias	Esfuerzo Mean	Esfuerzo Std.Err.	Esfuerzo -95,00%	Esfuerzo +95,00%	N
1	7	53,57333	2,953580	46,76237	60,38430	3
2	14	54,22667	2,953580	47,41570	61,03763	3
3	21	50,63333	2,953580	43,82237	57,44430	3
4	28	53,90000	2,953580	47,08903	60,71097	3

**FIGURA 4.10. RANGO EN EL QUE SE ENCUENTRA LA MEDIA DE LOS TRATAMIENTOS PARA  $\alpha=0.05$ .**

Como se puede apreciar en la figura anterior, el valor de las medias de los esfuerzos a la compresión para cada uno de los tratamientos

se encuentra dentro de los valores de los esfuerzos para un intervalo de confianza del 95%.

La FIGURA 4.11., muestra gráficamente los rangos en que se encontraban los valores del esfuerzo a la compresión de una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita y cuyos niveles de tratamientos son 7, 14, 21 y 28 días de curado al aire para un intervalo de confianza del 95%.



**FIGURA 4.11. RANGOS DE LAS MEDIAS DE LOS TRATAMIENTOS (15% DE ZEOLITA).**

Como se puede apreciar en la gráfica anterior los rangos del esfuerzo para un intervalo de confianza del 95% no sufrieron mucha variación para los cuatro diferentes tratamientos, salvo el día 21 de curado donde se puede apreciar que la resistencia a la compresión disminuye. Esto se debe haber producido por algún error de tipo experimental ya que como se aprecia en la misma figura el día 28 vuelve a ascender a valores similares a los de los días 7 y 14. Lo que muestra la gráfica se puede interpretar como que no existe diferencia significativa entre las medias de los diferentes tratamientos, ya que todos los rangos del esfuerzo a la compresión se interceptan entre si, lo que nos hace confirmar la hipótesis inicialmente planteada.

El siguiente análisis que se realizó fue por medio de la tabla de probabilidades de Post Hoc de Tukey HSD del esfuerzo de compresión de la pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita, este análisis compara la probabilidad de que la media de uno de los tratamientos esté dentro del rango de esfuerzo a la compresión de los otros tratamientos. En la FIGURA 4.12, se muestra la tabla del análisis de Post Hoc de Tukey HSD obtenida del software STATISTICA.

Tukey HSD test; variable esf (Spreadsheet7)					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = 26,171, df = 8,0000					
Cell No.	días	{1}	{2}	{3}	{4}
1	7	53,573	54,227	50,633	53,900
2	14	0,998569	0,998569	0,892880	0,999825
3	21	0,892880	0,824819	0,824819	0,999825
4	28	0,999825	0,999825	0,860638	0,860638

**FIGURA 4.12. ANÁLISIS DE POST HOC DE TUKEY HSD (15% DE ZEOLITA).**

Como se puede apreciar en la figura anterior, este análisis compara la probabilidad de que la media de un tratamiento se encuentre en el intervalo de confianza de las medias de los esfuerzos a la compresión de los otros tratamientos analizados (7, 14, 21 y 28 días de curado), de este análisis se obtuvo que todas las diferentes combinaciones de probabilidades de los tratamientos están cercanas a “uno”, con lo que se pudo afirmar que: “el esfuerzo a la compresión de una pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita no varía en función del tiempo de curado”.

#### **ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VALIDACIÓN.**

En esta etapa del estudio se procedió a realizar el mismo análisis anterior con las mismas asunciones pero tomando como datos el esfuerzo a la compresión para 4, 11, 18 y 25 días de curado, los

cuales serán los niveles de los tratamientos. Lo primero que se realizó nuevamente es el resumen estadístico simple de los datos de validación, los cuales se muestra en la TABLA 22.

**TABLA 22**

**RESUMEN ESTADÍSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS PARA LA  
VALIDACIÓN, 17.5% DE ZEOLITA**

GRUPOS	CUENTA	SUMA	PROMEDIO	VARIANZA
7	3	149,94	49,98	3,84
14	3	146,02	48,67	0,32
21	3	147,98	49,33	8,96
28	3	150,92	50,31	24,33

Como se puede apreciar en este caso también la varianza es mínima, tomando en cuenta la forma como se realizaron los ensayos de compresión en donde se dependía de la rapidez de dos personas para la obtención de los datos, el análisis de la media se lo realizó con los análisis que continúan. A continuación, se realizó la prueba univariada para el mismo intervalo de confianza antes asumido (95%), la FIGURA 4.13. muestra la prueba univariada realizada en el programa STATISTICA.

Univariate Tests of Significance for Esfuerzos (Sheet3 i Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	29488,20	1	29488,20	3149,137	0,000000
Dias	4,72	3	1,57	0,168	0,914935
Error	74,91	8	9,36		

**FIGURA 4.13. PRUEBA UNIVARIADA PARA LA VALIDACIÓN.**

Como se puede apreciar en la figura anterior, el valor de  $F(0.168)$  obtenido es menor que el  $F_{\text{crítico}}$  (3149.137), y además el valor de  $p$  (0.914935) es mucho mayor que el  $\alpha$  asumido (0.05). Con lo que se puede confirmar la hipótesis inicialmente planteada con un 95% de confianza, esta hipótesis sugería que no existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos, con esto se rechaza definitivamente la otra hipótesis.

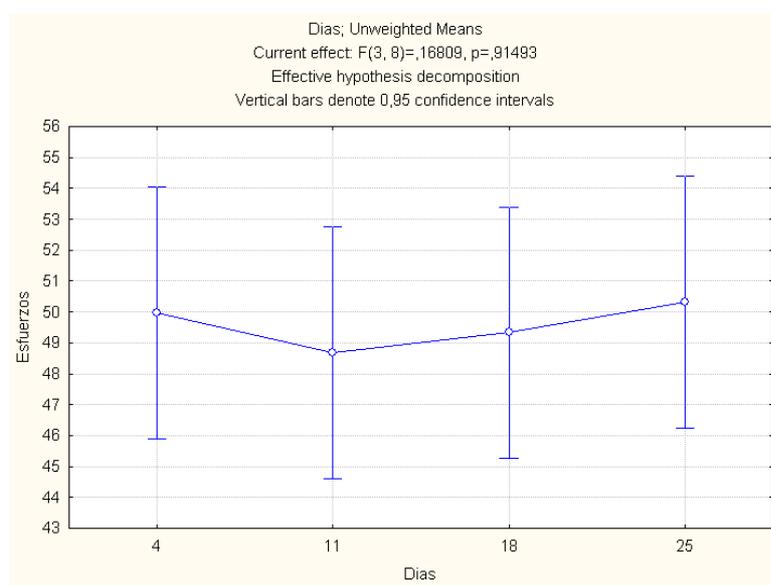
En la FIGURA 4.14. se muestra el rango en el que se encontraban las medias de los tratamientos (esfuerzo último a la compresión) para cada uno de los diferentes días de curado para un intervalo de 95% de confianza.

Dias; LS Means (Sheet3 in Imported from E:\Libro3.xls)						
Current effect: F(3, 8)=,16809, p=,91493						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Dias	Esfuerzos Mean	Esfuerzos Std.Err.	Esfuerzos -95,00%	Esfuerzos +95,00%	N
1	4	49,98000	1,766720	45,90594	54,05406	3
2	11	48,67333	1,766720	44,59927	52,74740	3
3	18	49,32667	1,766720	45,25260	53,40073	3
4	25	50,30667	1,766720	46,23260	54,38073	3

**FIGURA 4.14. RANGO EN EL QUE SE ENCUENTRA LA MEDIA DE LOS TRATAMIENTOS PARA  $\alpha=0.05$  (17.5% DE ZEOLITA).**

Como se puede observar en la figura anterior los valores de la media del esfuerzo a la compresión de estos tratamientos son un poco menores que los esfuerzos a la compresión de los otros tratamientos (7, 14, 21 y 28 días de curado), esto puede ser debido a que las pastas de cemento compuesta no se las realizó de manera similar para 15% como para la validación 17.5% de zeolita, empezando por que el laboratorio no fue el mismo ya que las pastas de cemento para la validación se las realizó en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal de Guayaquil y de una manera manual y no se siguió los procedimientos del diseño experimental para el presente trabajo, ya que el laboratorio antes mencionado no contaba con los mismos equipos que el laboratorio de Suelos Rocas y Materiales de la FICT.

La FIGURA 4.15., muestra gráficamente los rangos en que se encuentran los valores del esfuerzo a la compresión de una pasta de cemento compuesta con 17.5% de zeolita y cuyos niveles de tratamientos son 4, 11, 18 y 25 días de curado al aire para un intervalo de confianza del 95%.



**FIGURA 4.15. RANGOS DE LAS MEDIAS DE LOS TRATAMIENTOS (17.5% DE ZEOLITA).**

En esta gráfica se puede apreciar que el esfuerzo a la compresión de la pasta de cemento compuesta con 17.5% se comporta de manera similar que el esfuerzo a la compresión de la pasta de cemento compuesto con 15% de zeolita (ver FIGURA 4.11.)

El siguiente análisis que se realizó fue por medio de la tabla de probabilidades de Post Hoc de Tukey HSD del esfuerzo de compresión de la pasta de cemento compuesta con 17.5% de zeolita, la FIGURA 4.16. muestra los resultados obtenidos en el programa STATISTICA para los datos y tratamientos antes detallados.

Tukey HSD test; variable Esfuerzos (Sheet3 in In					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = 9,3639, df = 8,0000					
Cell No.	Dias	{1}	{2}	{3}	{4}
		49,980	48,673	49,327	50,307
1	4		0,951197	0,993304	0,999189
2	11	0,951197		0,993304	0,911420
3	18	0,993304	0,993304		0,978203
4	25	0,999189	0,911420	0,978203	

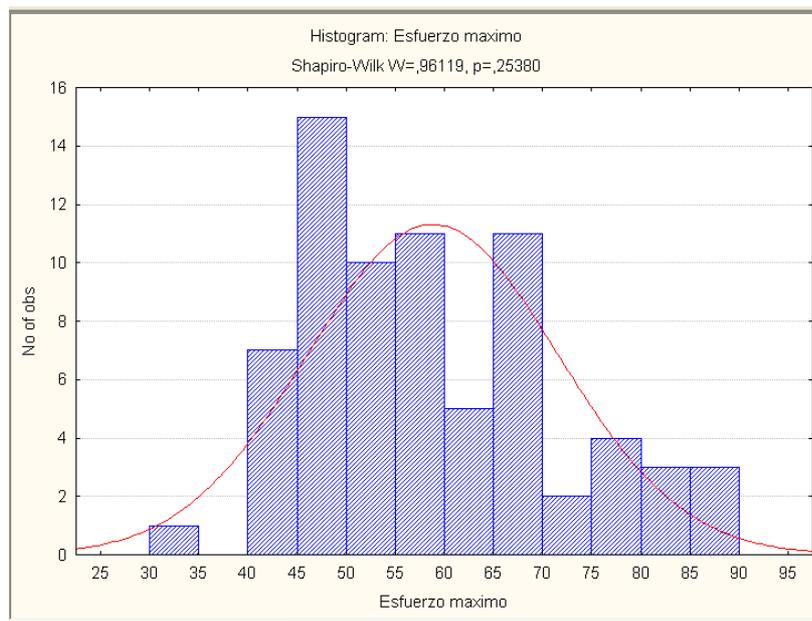
**FIGURA 4.16. ANÁLISIS DE POST HOC DE TUKEY HSD (17.5% DE ZEOLITA).**

Como se puede apreciar en la figura anterior, las probabilidades de que las medias de los esfuerzos a la compresión estén dentro del rango de los otros tratamientos son mucho mas cercana al uno, el cual es el valor máximo que se puede obtener. Con esto se puede afirmar con un 95% de confianza que “el esfuerzo a la compresión de una pasta de cemento compuesto con 17.5% de zeolita no varia en función del tiempo de curado”.

## **ANÁLISIS GRUPAL.**

Para realizar este análisis, primero se comprobó que los datos obtenidos por medio de la experimentación (los cuales se mostraron en las TABLAS 19 y 20 al inicio del presente capítulo), se comportaban de forma normal o no. Una vez comprobada la normalidad de los datos, se utilizó el método de anova factorial para realizar el correspondiente análisis de las medias y varianzas.

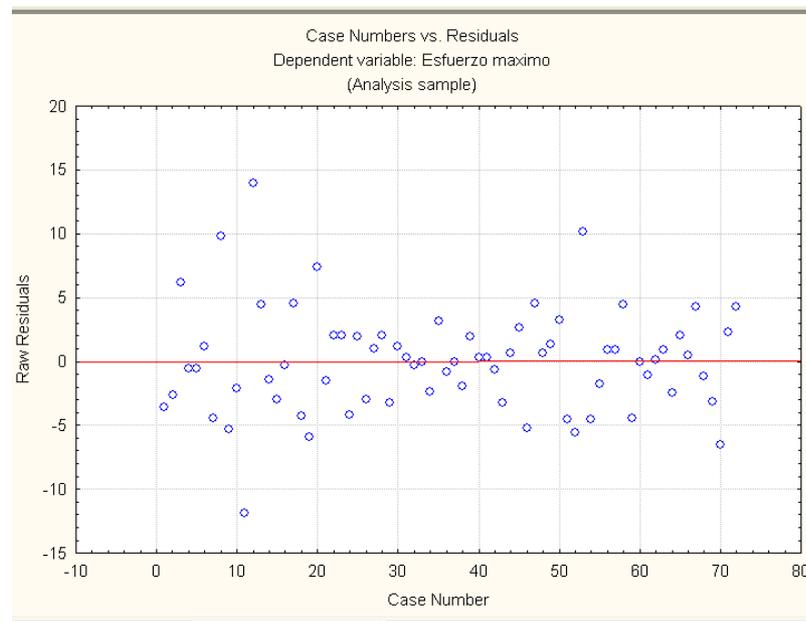
El primer análisis que se realizó es comprobar si los datos obtenidos de los esfuerzos a la compresión tienen un comportamiento normal o no. La FIGURA 4.17. muestra el histograma de frecuencia de los esfuerzos a la compresión para los dos factores analizados los cuales son: el tiempo de curado, cuyos niveles fueron 7, 14, 21 y 28 días; y el otro factor, el cual es el porcentaje de zeolita cuyos niveles fueron 5, 10, 15, 20, 25% de Zeolita en diferentes pastas de cemento compuesto.



**FIGURA 4.17.DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN PARA EL TIEMPO DE CURADO Y EL % DE ZEOLITA.**

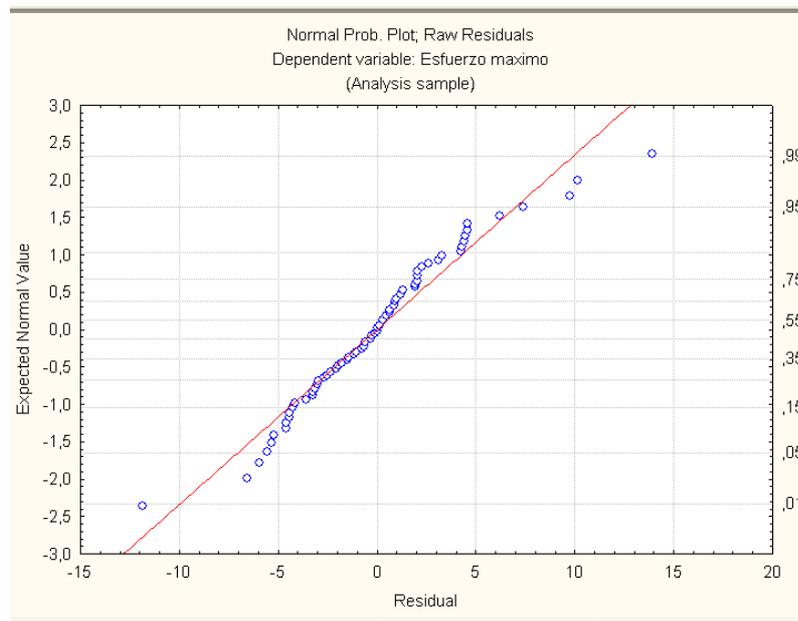
Como se puede observar en la gráfica, el valor de “p” calculado es igual a 0.2538, el cual es mayor que el teórico asumido (0.05), con lo cual se puede aceptar la hipótesis de normalidad de los datos.

La FIGURA 4.18. muestra el análisis de los residuos contra el número de casos para una distribución normal de esfuerzos de compresión, esto se utilizó para observar como se comportaban los residuos con respecto a la media de los esfuerzos.



**FIGURA 4.18. RESIDUOS VS. NÚMERO DE CASOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO.**

La FIGURA 4.19. muestra que tan cerca se encontraban los datos experimentales de una distribución normal, aquí se puede observar que la varianza de cada uno de los datos es mínima, y que no existe mucha dispersión de estos datos.

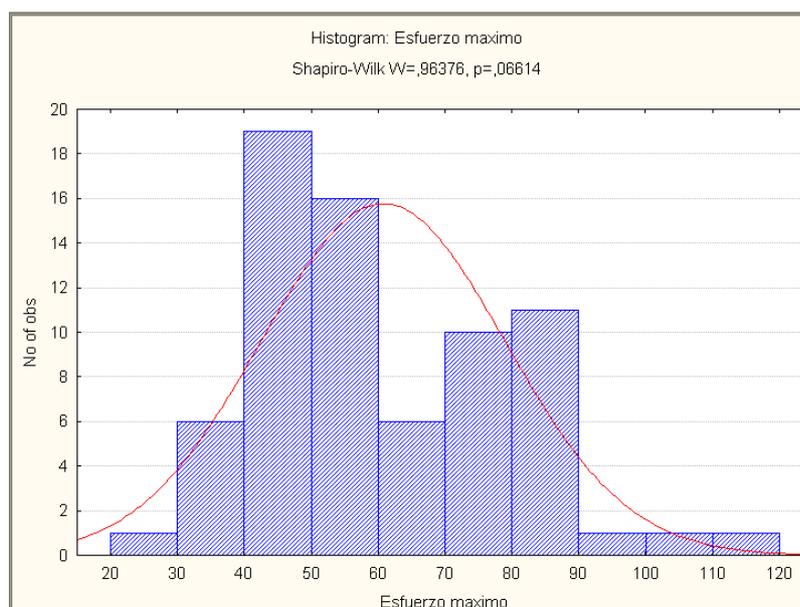


**FIGURA 4.19. PROBABILIDAD NORMAL DE LOS RESIDUOS  
PARA PASTAS DE CEMENTO CON DIFERENTES  
CONCENTRACIONES DE ZEOLITA.**

Luego de realizado este análisis se procedió a realizar lo mismo pero con los datos de validación, ya que el software STATISTICA no aceptaba realizar el análisis de todos los datos en una sola corrida.

La FIGURA 4.20. muestra el histograma de frecuencia de los esfuerzos a la compresión para los dos factores analizados en la validación, los cuales son: El tiempo de curado, cuyos niveles fueron 4, 11, 18, y 25 días; y el otro factor el cual es el porcentaje de zeolita

cuyos niveles fueron 7,5, 12,5, 17,5, 22,5, 27,5% de Zeolita en diferentes pastas de cemento compuestas.

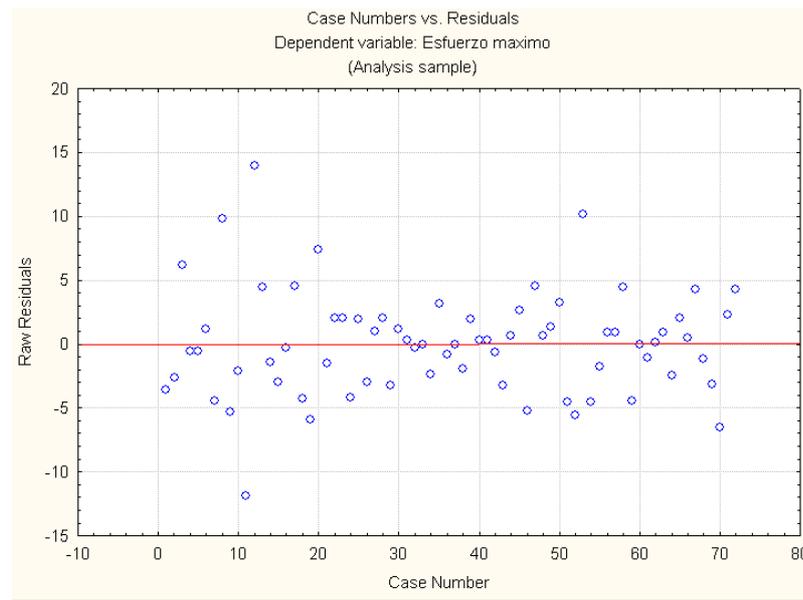


**FIGURA 4.20.DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN PARA EL TIEMPO DE CURADO Y EL % DE ZEOLITA PARA LA VALIDACIÓN.**

Como se puede observar en la gráfica, el valor de “p” calculado es igual a 0.06614, el cual es mayor que el teórico asumido (0.05), con lo cual se puede confirmar la hipótesis de normalidad de los datos.

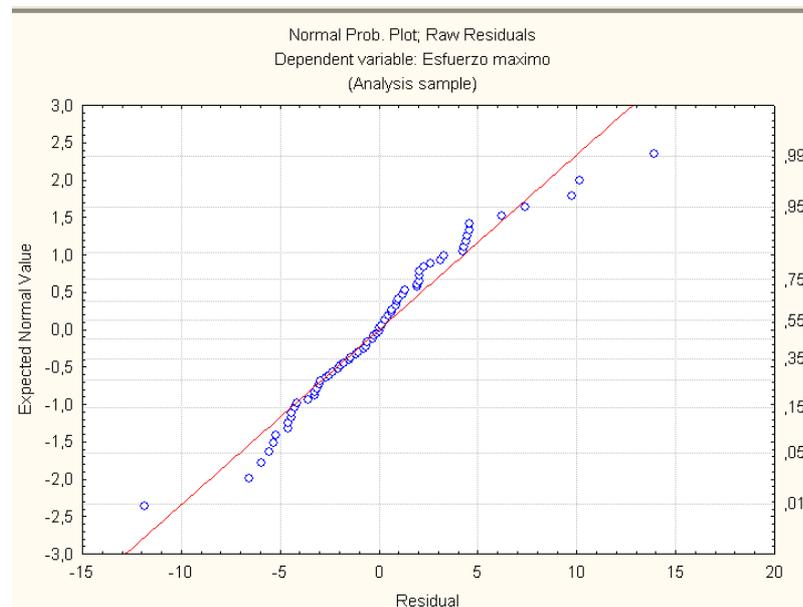
La FIGURA 4.21. muestra el análisis de los residuos contra el número de casos para una distribución normal de esfuerzos de

compresión, esto se utilizó para ver como se comportaban los residuos con respecto a la media de los esfuerzos.



**FIGURA 4.21. RESIDUOS VS. NÚMERO DE CASOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO (VALIDACIÓN).**

La FIGURA 4.22. muestra que tan cerca se encontraban los datos de validación de una distribución normal, aquí se puede observar que la varianza de cada uno de los datos es mínima, y que no existe mucha dispersión de estos datos.



**FIGURA 4.22. PROBABILIDAD NORMAL DE LOS RESIDUOS PARA PASTAS DE CEMENTO CON DIFERENTES CONCENTRACIONES DE ZEOLITA (VALIDACIÓN).**

### **ANÁLISIS DE VARIANZA.**

Una vez que se comprobó la normalidad de los datos obtenidos se procedió a realizar el análisis de varianza para la distribución factorial de los datos, para esto fueron planteadas las siguientes hipótesis:

- $H_0$ : Las medias de los tratamientos son iguales.
- $H_1$ : Al menos dos de las medias no son iguales.

El primer análisis que se realizó es el de covarianza, en la FIGURA 4.23. se muestra este análisis realizado en el software STATISTICA.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F	p
Intercepto	1	270412.6	270412.6	16715.72	0.000000
Porcentaje (%)	6	9296.9	1549.5	95.78	0.000000
Tiempo de Curado (días)	3	914.9	305.0	18.85	$1.414 \times 10^{-5}$
Porcentaje (%) * Tiempo de Curado (días)	18	2290.5	127.2	7.87	$1.097 \times 10^{-9}$
Error	56	905.9	16.2		

**FIGURA 4.23. ANÁLISIS DE COVARIANZA GRUPAL.**

Como se puede observar en la tabla de la gráfica anterior, el valor de la probabilidad p es menor que el valor del  $\alpha$  asumido (0.05) para los diferentes factores y para la combinación porcentajes días, con lo cual se pudo afirmar con un 95% de confianza que si existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos. Por tal razón se rechazó la hipótesis inicial en favor de la hipótesis experimental o alternativa la cual afirmaba que al menos dos de las medias del esfuerzo a la compresión no son iguales.

A continuación en la FIGURA 4.24. se presenta mediante el análisis de Dunnett la tabla que se obtuvo del análisis en STATISTICA para

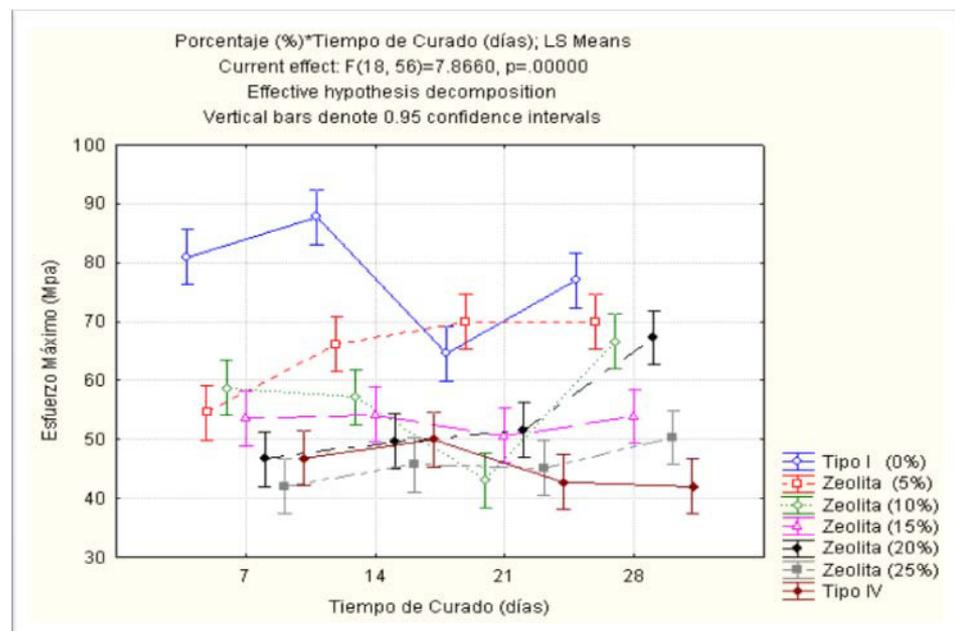
buscar el tratamiento más óptimo y que muestre una diferencia significativa con el patrón.

	Porcentaje (%)	7 días	14 días	21 días	28 días
		{1} 80.904	{1} 87.720	{1} 64.549	{1} 77.052
1	0				
2	5	0.000041	0.000056	0.999041	0.075651
3	10	0.000142	0.000022	0.000028	0.010820
4	15	0.000035	0.000022	0.000551	0.000030
5	20	0.000023	0.000022	0.001031	0.015910
6	25	0.000022	0.000022	0.000040	0.000023
7	Tipo IV	0.000023	0.000022	0.000027	0.000022

**FIGURA 4.24. ANÁLISIS DE VARIANZA FACTORIAL DEL ESFUERZO DE COMPRESIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y PARA DISTINTOS DÍAS DE CURADO.**

Como se puede apreciar en la tabla de la figura anterior existe diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, excepto con la pasta de cemento compuesta con 5% de zeolita, donde se puede apreciar que a los 21 días de curado la resistencia mecánica a la compresión se comporta igual que el patrón y mejor que el cemento tipo IV, ya que en este tiempo se obtiene una mayor resistencia a la compresión que con los otros porcentajes. Esto se puede ver de forma gráfica en la FIGURA 4.25., la cual muestra los

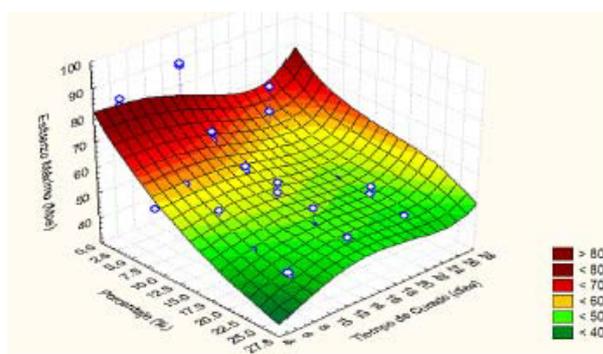
rangos de las medias de los esfuerzos a la compresión para los dos factores ya mencionados.



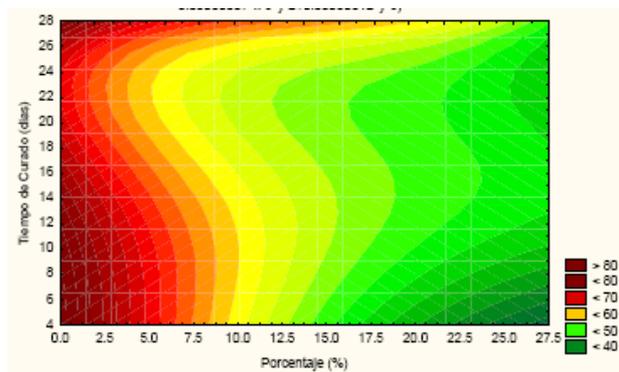
**FIGURA 4.25. RANGOS DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN PARA LOS FACTORES TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**

En la figura anterior se puede apreciar como el esfuerzo a la compresión de la pasta de cemento que no tiene zeolita se encuentra por arriba de los esfuerzos a la compresión que las pastas de cemento compuesta que contienen zeolita. Con esto se puede afirmar que agregarle este tipo de zeolita no mejora las propiedades

de la pasta de cemento Pórtland, esta zeolita hizo que disminuya la resistencia a la compresión. Esto se puede apreciar en el gráfico en 3d de la FIGURA 4.26. y en las curvas de nivel de la FIGURA 4.27., las cuales tienen como variables independientes los factores tiempo de curado y porcentaje de zeolita y como variable dependiente el esfuerzo máximo a la compresión.

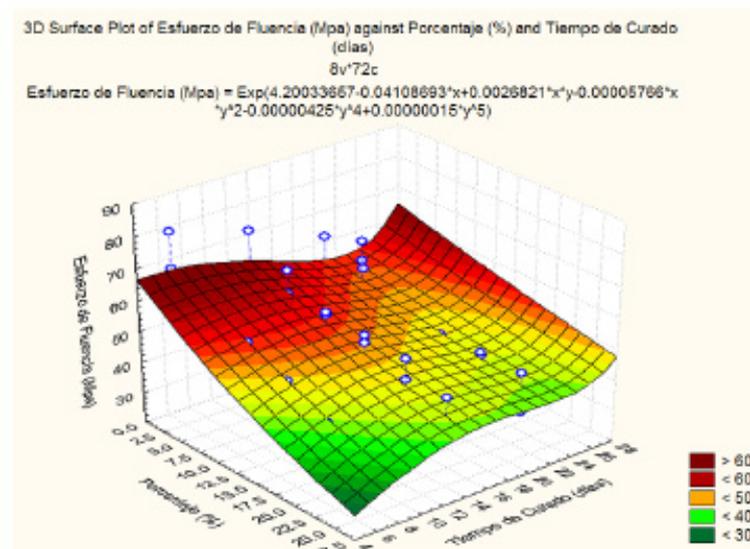


**FIGURA 4.26. ESFUERZO MÁXIMO A LA COMPRESIÓN PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPOS DE CURADO.**

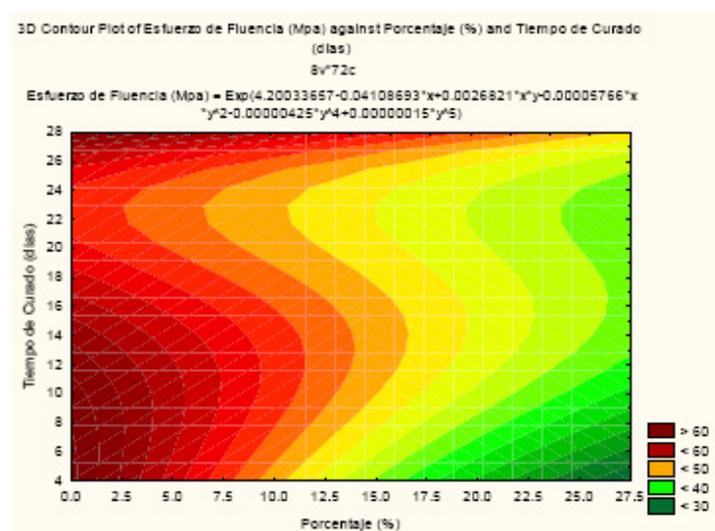


**FIGURA 4.27. CURVAS DE NIVEL DEL ESFUERZO MAXIMO A LA COMPRESIÓN PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPOS DE CURADO.**

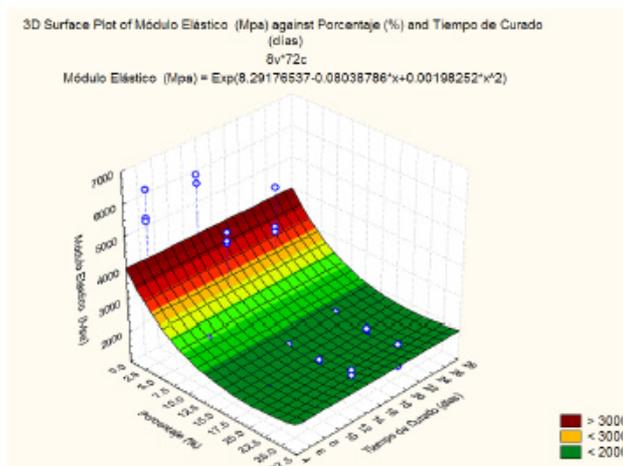
Además de los gráficos mostrados en las dos figuras anteriores, también se realizó lo mismo para las otras propiedades que tiene una curva esfuerzo deformación como por ejemplo el esfuerzo de fluencia, deformación máxima, módulo de elasticidad etc. Estos gráficos se muestran en las siguientes figuras desde la FIGURA 4.28. hasta la FIGURA 4.37., cabe mencionar que los siguientes gráficos contienen también los datos de validación además de los otros datos en los días sugeridos por la norma ASTM C-109.



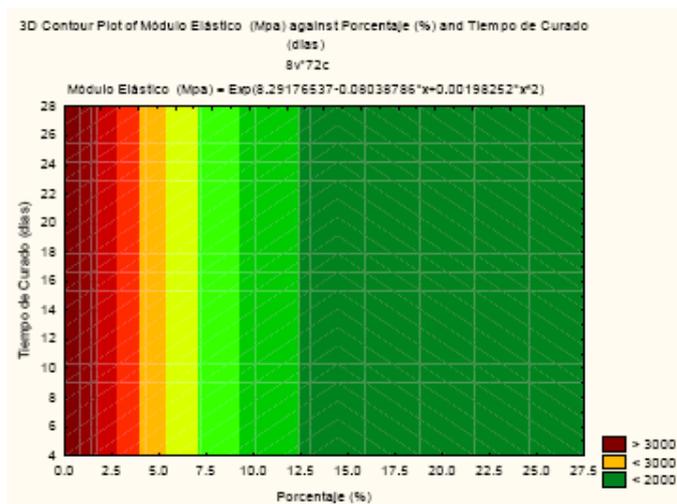
**FIGURA 4.28. SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ESFUERZO DE FLUENCIA EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



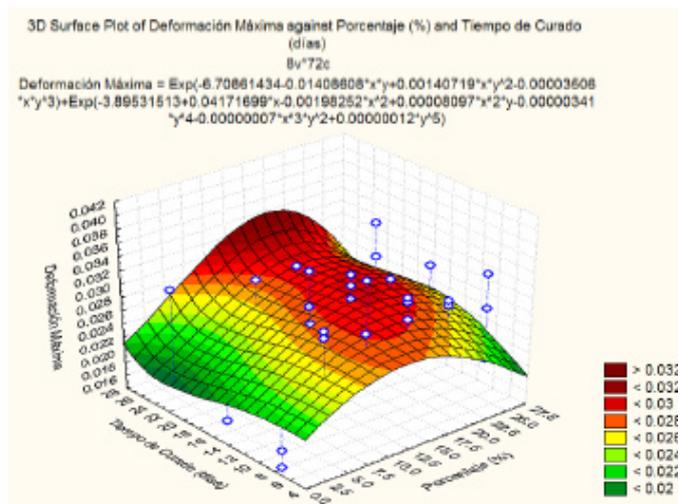
**FIGURA 4.29. CURVAS DE NIVEL PARA EL ESFUERZO DE FLUENCIA EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



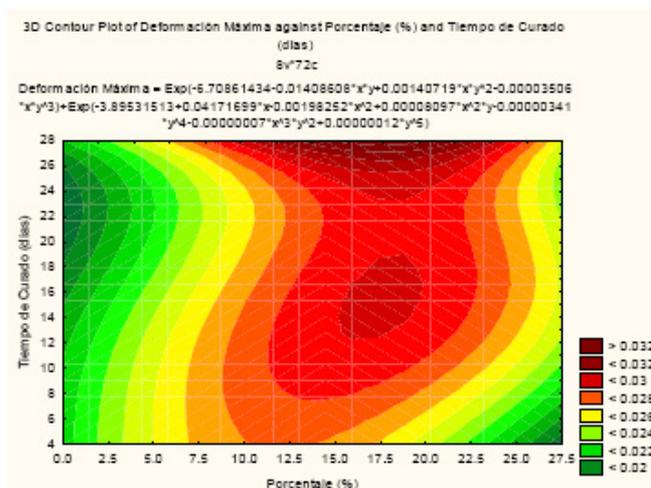
**FIGURA 4.30. SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



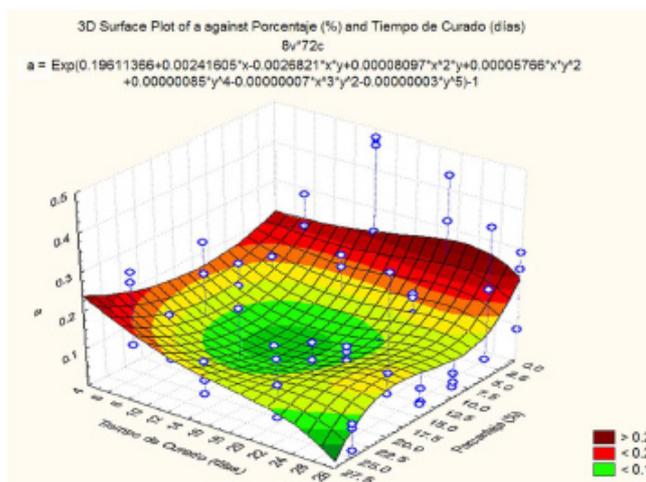
**FIGURA 4.31. CURVAS DE NIVEL PARA EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



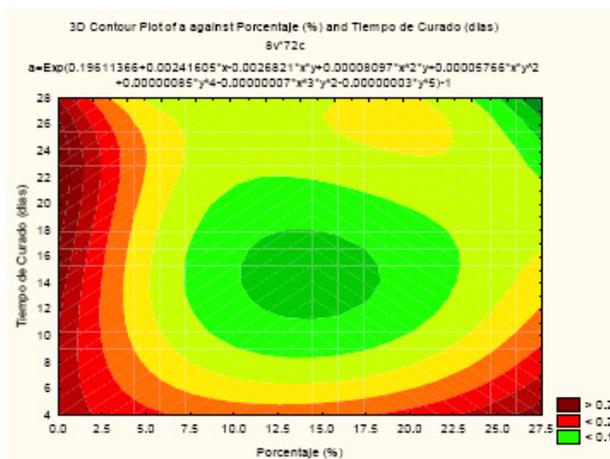
**FIGURA 4.32. SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LA DEFORMACION MAXIMA EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



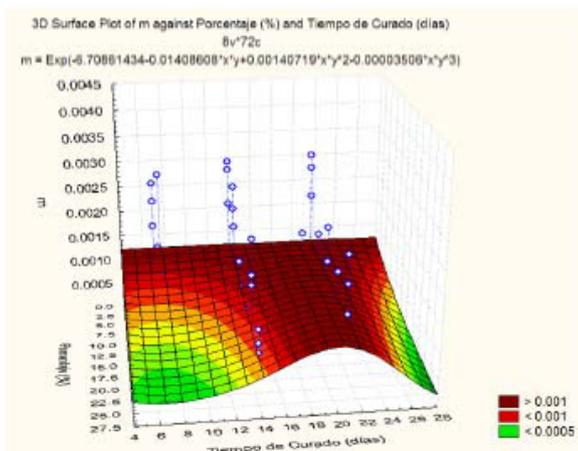
**FIGURA 4.33. CURVAS DE NIVEL PARA LA DEFORMACION MAXIMA EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



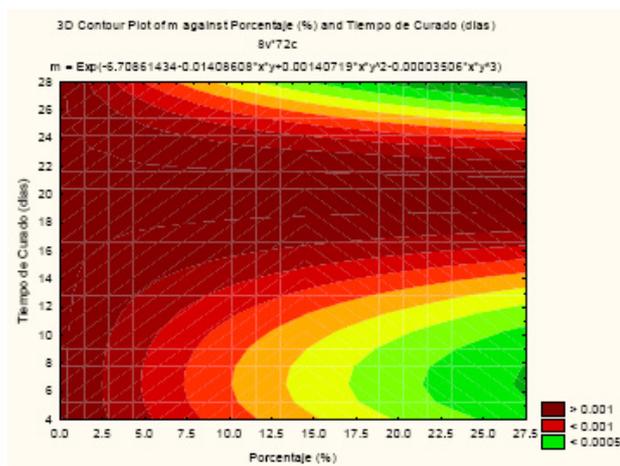
**FIGURA 4.34. SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL PARAMETRO “a” EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



**FIGURA 4.35. CURVAS DE NIVEL PARA EL PARAMETRO “a” EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



**FIGURA 4.36. SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LA DEFORMACION INELASTICA TOTAL (PARAMETRO “m”) EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**



**FIGURA 4.37. CURVAS DE NIVEL PARA LA DEFORMACION INELASTICA TOTAL (PARAMETRO “m”) EN FUNCION DEL TIEMPO DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA.**

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, arriba de estas se encuentra la ecuación para cada una de ellas. Estas se las puede obtener por medio del método de regresión múltiple, que se encuentran en los APÉNDICES D, E, F, G Y H, las cuales nos serán útiles en el modelo computacional. A continuación se detalla la forma como se determina las ecuaciones que rigen cada parámetro mediante el uso del software STATISTICA. En las tablas que se encuentran en los apéndices fueron eliminados todos los valores que fueron removidos por el programa.

### **Regresión Lineal Múltiple de los diferentes parámetros requeridos para el modelo de simulación.**

Módulo de Elasticidad, Esfuerzo de Fluencia,  $\sigma_y$

Parámetro a:

$$a = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} - 1$$

Parámetro m:

$$m = \varepsilon_{\max} - \frac{\sigma_u}{E}$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sigma_u}{\sigma_y} - 1 \varepsilon_{\max} = m + \frac{\sigma_u}{E} xy \ln Z \\ &= \beta_0 + \beta_{11}x + \beta_{12}y + \beta_{21}x^2 + \beta_{22}xy + \dots + \beta_{55}xy^4 \\ &\quad + \beta_{56}y^5 \end{aligned}$$

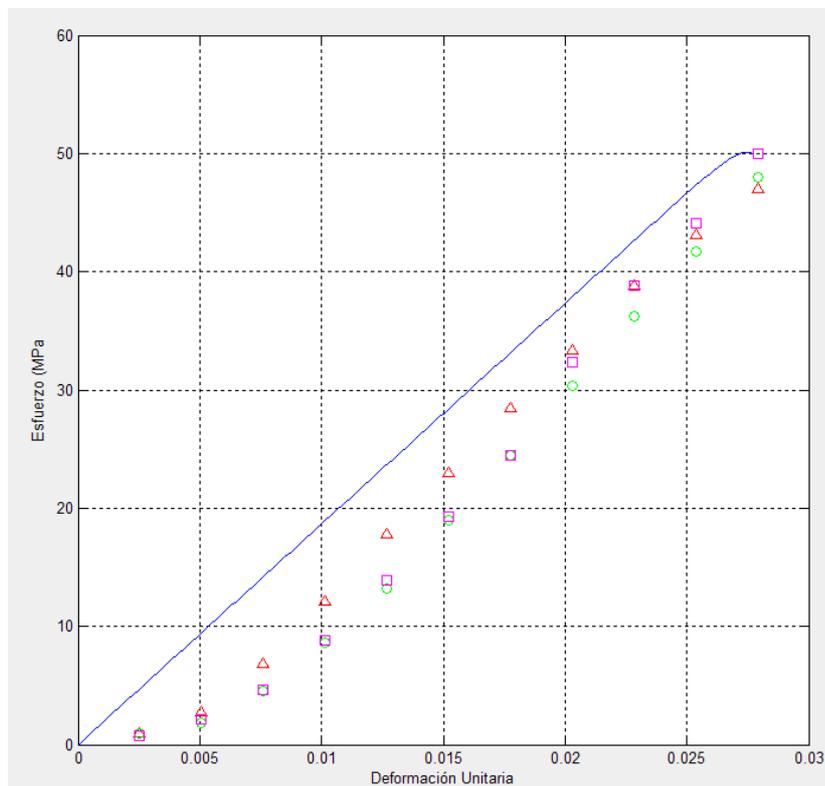
$$\ln Z = \beta_0 + \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^{j+1} \beta_{ji} x^{j+1-i} y^{i-1}$$

#### 4.3. Resultados del Modelo Computacional.

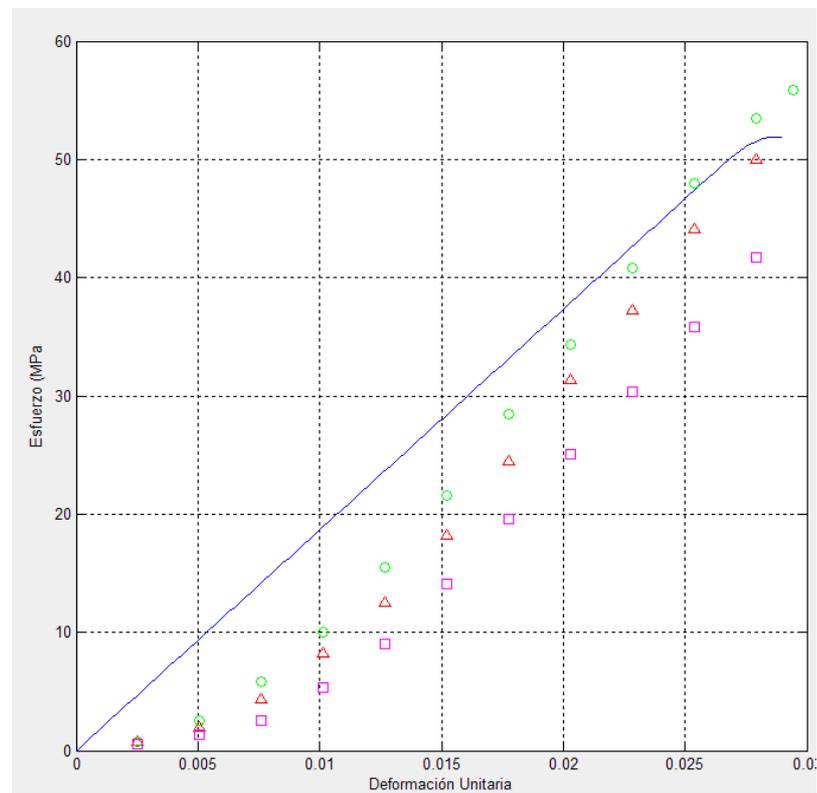
En esta sección se presentan los resultados de la simulación computacional con el programa en Matlab implementado. En esta etapa se utilizaron las funciones encontradas en la sección anterior, mediante las cuales se presentaron las curvas de nivel y las superficies de respuestas de cada una de las variables dependientes en función de las independientes (tiempo de curado y porcentaje de zeolita).

Las propiedades mecánicas de la pasta de cemento compuesto como el esfuerzo de fluencia, el módulo de elasticidad, la deformación máxima, la deformación inelástica total, etc se presentan en los APÉNDICES A y B. Los parámetros utilizados en el modelo Bilineal para simular el comportamiento de la pasta de cemento compuesta se encuentran en el APÉNDICE I, y se los obtuvo del promedio de las diferentes propiedades mecánicas de la pasta de cemento compuesta para cada día de curado y porcentaje de zeolita (15% y 17.5% de zeolita).

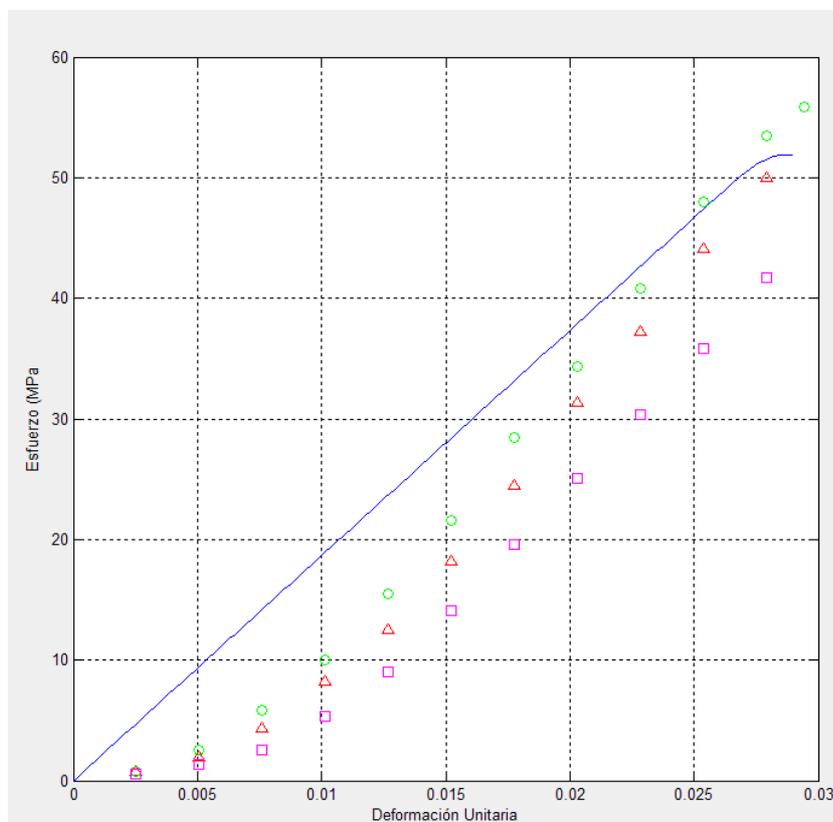
Las FIGURAS 4.38. a 4.41 muestran las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los cubos de pasta de cemento compuesta con 15% de zeolita que fueron expuestos a un proceso de curado al aire por 7, 14, 21, 28 días respectivamente, además se presenta la curva simulada para estos parámetros, la cual se aprecia en azul.



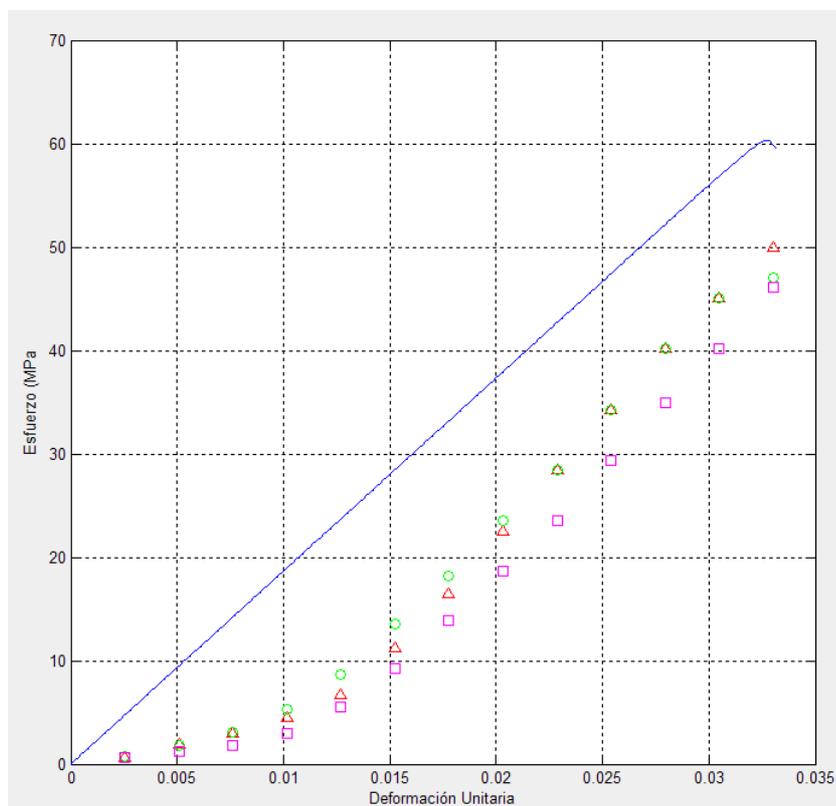
**FIGURA 4.38. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 15% DE ZEOLITA Y 7 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.39. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 15% DE ZEOLITA Y 14 DÍAS DE CURADO**



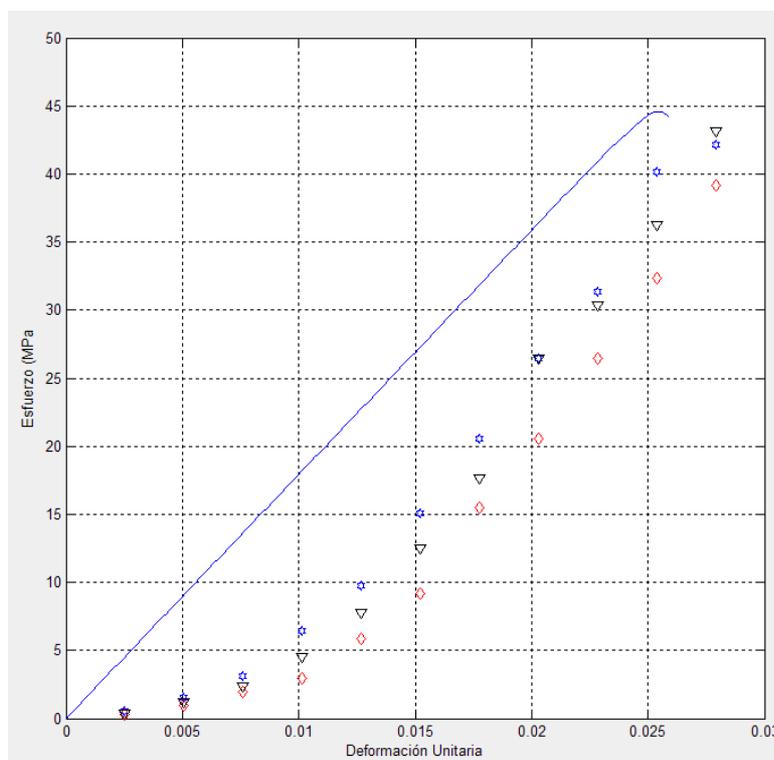
**FIGURA 4.40. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 15% DE ZEOLITA Y 21 DÍAS DE CURADO**



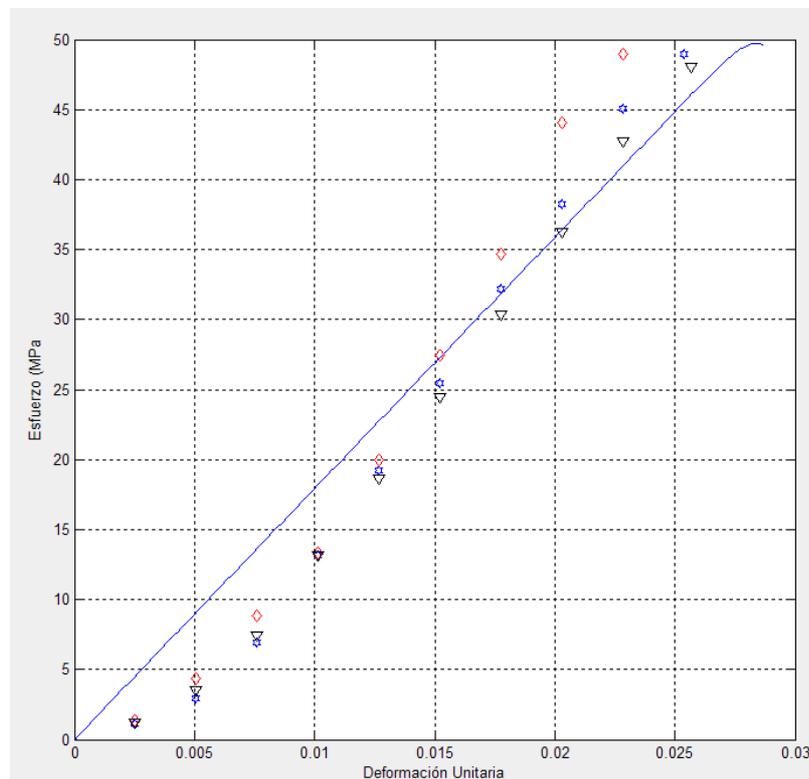
**FIGURA 4.41. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 15% DE ZEOLITA Y 28 DÍAS DE CURADO**

Las FIGURAS 4.42. a 4.45. muestran las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los cubos de pasta de cemento compuesta con 17.5% de zeolita que fueron expuestos a un proceso de curado al aire por 4, 11, 18 y 25 días respectivamente, además se

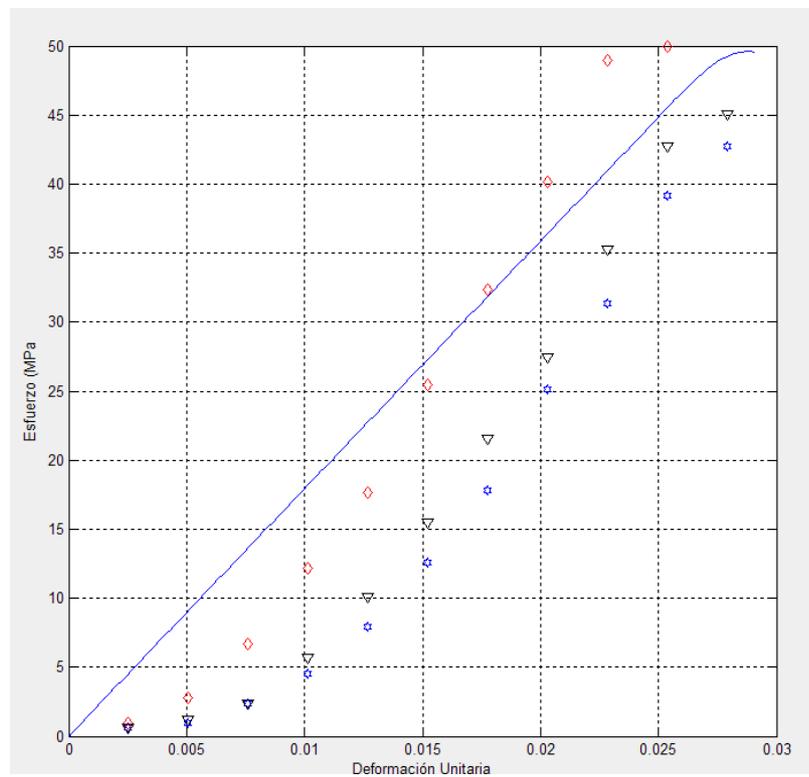
presenta la curva simulada para estos parámetros, la cual se aprecia en azul.



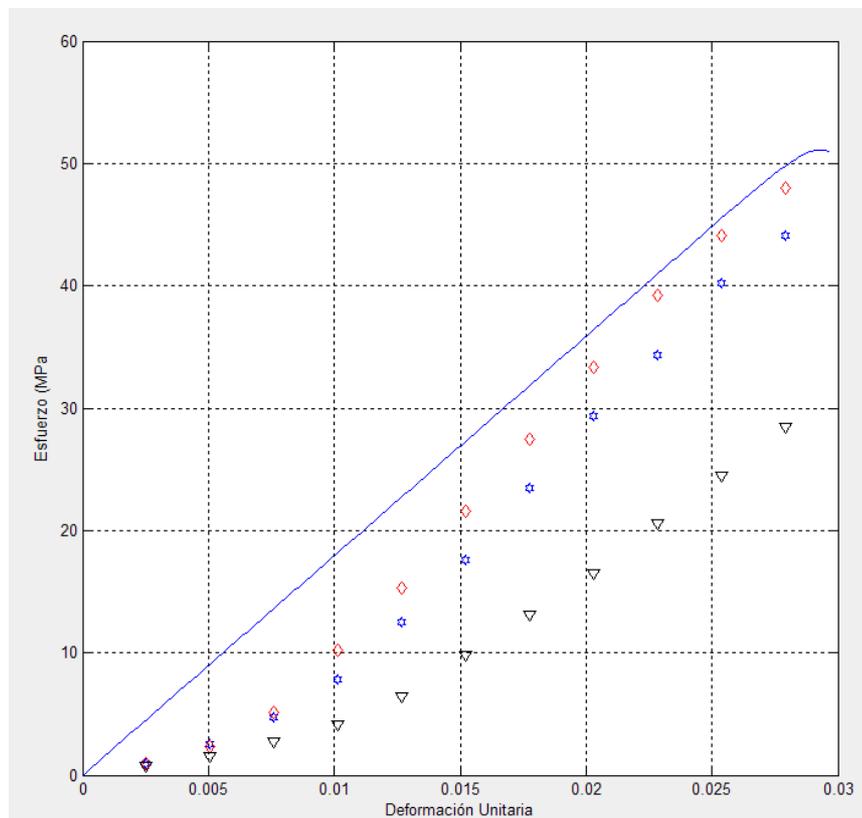
**FIGURA 4.42. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 17.5% DE ZEOLITA Y 4 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.43. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 17.5% DE ZEOLITA Y 11 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.44. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 17.5% DE ZEOLITA Y 18 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.45. CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 17.5% DE ZEOLITA Y 25 DÍAS DE CURADO**

Como se puede apreciar en la mayoría de las figuras desde la FIGURA 4.38. hasta la FIGURA 4.45., las curvas esfuerzo-deformación reales en la mayoría de sus puntos se comportan de manera paralela a la curva esfuerzo-deformación simulada, esto se produce debido a que la pasta de cemento no tiene una zona elástica

bien definida como la mayoría de materiales, sino que la curva en esta parte tiene la forma de una “ojiva”. Para poder separar la zona elástica de la zona plástica, lo que se realizó fue colocar en la zona plástica los datos de las propiedades mecánicas (esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia, etc.) que se encontraban después de que el módulo elástico adquiriera su valor máximo y empiece a descender. El programa en Matlab implementado para obtener la curva esfuerzo-deformación simulada asume que el comportamiento de la pasta de cemento compuesto se comporta de una manera ideal.

# CAPÍTULO 5

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Conclusiones.

Luego de finalizar con los análisis del presente trabajo investigativo se puede concluir lo siguiente:

El curado al aire de una pasta de cemento compuesta a la cual se le adiciono 15% de zeolita de la comuna de Manglaralto de la Provincia ecuatoriana de Santa Elena no causo ningún efecto en la resistencia máxima a la compresión, ya que como se pudo observar en los análisis realizados en la sección 4.2. del presente estudio no se produjo una diferencia significativa entre las medias de los esfuerzos máximos a la compresión del día siete de curado con los cubos de los días catorce, veinte y uno, y veintiocho. Esto se pudo corroborar

con los datos de validación, los cuales se obtuvieron de una pasta de cemento compuesta con 17.5% de zeolita del mismo yacimiento antes mencionado y expuesto al mismo proceso de curado. Pero los ensayos de compresión se los realizó desde el cuarto día con intervalos de siete días hasta el día veinte y cinco.

Para las pastas de cemento compuestas de 15% y 17.5% de zeolita, los valores de la resistencias máximas a la compresión del cuarto día no tenían diferencias significativas con los valores de la resistencia a la compresión de los otros días, y las medias de estos esfuerzos máximos a la compresión eran casi iguales para los ocho días que se realizaron los ensayos de compresión. Por lo tanto, no es influyente en la resistencia máxima a la compresión el curar al aire las pastas de cemento compuestas con 15% y 17.5% de zeolita.

La adición de zeolita del yacimiento mencionado en el párrafo anterior tiene como efecto en el cemento Pórtland Tipo I disminuir la resistencia máxima a la compresión de una pasta de cemento en cualquier porcentaje en que se le agregue esta zeolita, ya que como se puede observar en la parte del análisis grupal de la sección 4.2. del presente estudio todas las muestras a las cuales se les agrego zeolita en diferentes porcentajes (en este caso 5, 10, 15, 20 y 25%

de zeolita) mostraban una menor resistencia a la compresión que las de la muestra patrón (0% de zeolita y curado al aire) realizando los ensayos de compresión a los mismos tiempos de curado (cada siete días realizando el primer ensayo al séptimo día). Por lo tanto la adición de zeolita de la comuna de Manglaralto de la Provincia ecuatoriana de Santa Elena reduce la resistencia a la compresión de una pasta de cemento compuesto, y mientras más zeolita se le agregue menor será la resistencia a la compresión.

El comportamiento de las superficies de respuestas de las diferentes propiedades mecánicas de las pastas de cemento compuestas, tienen un comportamiento exponencial en función del tiempo de curado y el porcentaje de zeolita.

El comportamiento de la curva esfuerzo-deformación para las pastas de cemento compuestas analizadas en el presente estudio no son como la mayoría de materiales, en las cuales se puede diferenciar la zona elástica (comportamiento lineal) de la zona plástica; sino que tienen el comportamiento como una "ojiva", y, fácilmente se pueden ajustar a un modelo de regresión polinomial de grado 3. Para diferenciar la zona elástica de la zona plástica, en estos casos se analiza el módulo de Young o elástico, el cual en la zona elástica va

a llegar hasta un valor máximo en el punto que cambia de la zona elástica a la plástica; ya una vez en la zona plástica, el módulo de Young empezara a disminuir hasta que el material se rompa.

La curva esfuerzo-deformación simulada tenía un comportamiento ideal, es por esto que no se ajusto al 100% con los datos obtenidos experimentalmente, ya que estos datos experimentales aparte de que la curva esfuerzo-deformación se comporta como una ojiva están inmersos en errores experimentales que se cometen involuntariamente por la persona que realiza la experimentación.

## **5.2. Recomendaciones.**

Al realizar los ensayos de compresión se recomienda realizarlos en una sola máquina de ensayos universales. Por que si se utiliza dos máquinas diferentes estas pueden estar calibradas de manera diferente y se obtienen errores tan notorios como el que se observa en la sección 4.2. con el porcentaje de 20% en el análisis grupal, donde el último día de ensayos se cambio la máquina.

Se recomienda realizar los ensayos de compresión en una máquina de ensayos de compresión universal de la cual se obtenga los datos con la ayuda de una computadora, ya que de esta manera se reduciría al máximo los errores de lectura experimental.

## APÉNDICES

## APÉNDICE A

### RESULTADOS OBTENIDOS PARA 15% DE ZEOLITA Y DIFERENTES

#### TIEMPOS DE CURADO

Variables Independientes		Variables Dependientes o Resultados					
Porc. (%)	Tiempo de Curado (días)	Esf. de Fluencia (Mpa)	Esf. Máx. (Mpa)	Def. Máx.	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
15	7	40,1800	49,9800	0,0320	1581,8898	0,2439	0,0010
15	7	48,0200	57,8200	0,0340	1718,6829	0,2041	0,0010
15	7	49,9800	52,9200	0,0305	1788,8332	0,0588	0,0010
15	14	55,8600	59,7800	0,0330	1832,6772	0,0702	0,0010
15	14	53,5080	55,8600	0,0295	1915,1038	0,0440	0,0010
15	14	46,0600	47,0400	0,0315	1511,1549	0,0213	0,0010
15	21	43,1200	48,0200	0,0279	1886,2642	0,1136	0,0025
15	21	46,0600	51,9400	0,0305	1813,3858	0,1277	0,0018
15	21	47,6280	51,9400	0,0254	2083,4646	0,0905	0,0010
15	28	55,4680	59,7800	0,0386	1559,8425	0,0777	0,0010
15	28	45,0800	47,0400	0,0330	1479,0026	0,0435	0,0012
15	28	52,9200	54,8800	0,0381	1488,1890	0,0370	0,0012

## APÉNDICE B

### RESULTADOS OBTENIDOS PARA 17,5% DE ZEOLITA Y DIFERENTES

#### TIEMPOS DE CURADO

Variables Independientes		Variables Dependientes o Resultados					
Porcentaje (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Deformación Máxima	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
17,5	4	40,1800	49,9800	0,0320	1581,8898	0,2439	0,0010
17,5	4	46,8440	48,0200	0,0320	1536,8766	0,0251	0,0010
17,5	4	49,0000	51,9400	0,0330	1607,6115	0,0600	0,0010
17,5	11	45,0800	49,0000	0,0254	1972,0035	0,0870	0,0010
17,5	11	44,1000	49,0000	0,0229	2170,2756	0,1111	0,0010
17,5	11	42,7280	48,0200	0,0259	1869,1164	0,1239	0,0010
17,5	18	39,2000	46,0600	0,0300	1543,3071	0,1750	0,0010
17,5	18	49,0000	49,9800	0,0254	2143,4821	0,0200	0,0021
17,5	18	42,7280	51,9400	0,0310	1682,2047	0,2156	0,0010
17,5	25	40,1800	45,0800	0,0305	1581,8898	0,1220	0,0020
17,5	25	52,9200	54,8800	0,0330	1736,2205	0,0370	0,0014
17,5	25	48,0200	50,9600	0,0406	1260,3675	0,0612	0,0010

## APÉNDICE C

### VALORES DE W TABULADA PARA LA PRUEBA DE SHAPIRO & WILKS

#### NIVEL DE SIGNIFICANCIA

N	0.01	0.05	0.1
3	0.753	0.767	0.789
4	0.687	0.748	0.792
5	0.686	0.762	0.806
6	0.713	0.788	0.826
7	0.73	0.803	0.838
8	0.749	0.818	0.851
9	0.764	0.829	0.859
10	0.781	0.842	0.869
11	0.792	0.85	0.876
12	0.805	0.859	0.883
13	0.814	0.866	0.889
14	0.825	0.874	0.895
15	0.835	0.881	0.901
16	0.844	0.887	0.906
17	0.851	0.892	0.91
18	0.858	0.897	0.914
19	0.863	0.901	0.917
20	0.868	0.905	0.92
21	0.873	0.908	0.923
22	0.878	0.911	0.926
23	0.881	0.914	0.928
24	0.884	0.916	0.93
25	0.888	0.918	0.931
26	0.891	0.92	0.933
27	0.894	0.923	0.935
28	0.896	0.924	0.936
29	0.898	0.926	0.937
30	0.9	0.927	0.939
31	0.902	0.929	0.94
32	0.904	0.93	0.941
33	0.906	0.931	0.942

N	0.01	0.05	0.1
34	0.908	0.933	0.943
35	0.91	0.934	0.944
36	0.912	0.935	0.945
37	0.914	0.936	0.946
38	0.916	0.938	0.947
39	0.917	0.939	0.948
40	0.919	0.94	0.949
41	0.92	0.941	0.95
42	0.922	0.942	0.951
43	0.923	0.943	0.951
44	0.924	0.944	0.952
45	0.926	0.945	0.953
46	0.927	0.945	0.953
47	0.928	0.946	0.954
48	0.929	0.947	0.954
49	0.929	0.947	0.955
50	0.93	0.947	0.955

### APÉNDICE D

#### RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA PREDECIR LOS VALORES DE LOS LOGARITMOS NATURALES DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS EN EL MODELO DE SIMULACIÓN

Variable Dependiente	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	Modelo			Residual			F	p
	Múltiple	Múltiple	Ajustado	SC	GL	CM	SC	GL	CM		
Ln (Esfuerzo Máximo)	0.841215	0.707643	0.685494	2.299637	5	0.459927	0.950078	66	0.014395	31.95023	0.000000
Ln (Esfuerzo de Fluencia)	0.795573	0.632936	0.605128	1.713736	5	0.342747	0.993862	66	0.015059	22.76101	0.000000
Ln (Módulo Elástico)	0.671475	0.450878	0.434962	6.088924	2	3.044462	7.415655	69	0.107473	28.32762	0.000000
Ln (m)	0.373461	0.139473	0.101509	13.58470	3	4.528232	83.81529	68	1.232578	3.673790	0.016270

**APÉNDICE E**  
**ESFUERZO MÁXIMO**

$$\sigma_{\max} = e^{4.39645023 - 0.03867087x + 0.00008097x^2y - 0.00000341y^4 - 0.00000007x^3y^2 + 0.00000012y^5}$$

**ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL ESFUERZO MÁXIMO**

Ln (Esfuerzo Máximo)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (B)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		4.39645023	0.04517187	97.32716	0.000000	4.30626168	4.48663879				
x		-0.03867087	0.00589225	-6.56300	0.000000	-0.05043513	-0.02690661	-1.55432	0.236831	-2.02717	-1.08147
x <sup>2</sup> y		0.00008097	0.00002806	2.88590	0.005269	0.00002495	0.00013699	1.76288	0.610861	0.54326	2.98251
y <sup>4</sup>		-0.00000341	0.00000094	-3.62171	0.000569	-0.00000528	-0.00000153	-3.89865	1.076468	-6.04789	-1.74941
x <sup>3</sup> y <sup>2</sup>		-0.00000007	0.00000003	-2.17905	0.032903	-0.00000014	-0.00000001	-0.96490	0.442808	-1.84899	-0.08081
y <sup>5</sup>		0.00000012	0.00000003	3.73675	0.000392	0.00000006	0.00000018	3.93859	1.054013	1.83418	6.04299

APÉNDICE F

ESFUERZO DE FLUENCIA

$$\sigma_y = e^{4.20033657 - 0.04108693x + 0.00268210xy - 0.00005766xy^2 - 0.00000425y^4 + 0.00000015y^5}$$

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL ESFUERZO DE FLUENCIA

Ln (Esfuerzo de Fluencia)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		4.20033657	0.04196080	100.1014	0.000000	4.116559	4.284114				
x		-0.04108693	0.00760803	-5.4005	0.000001	-0.056277	-0.025897	-1.80922	0.335012	-2.47809	-1.14035
xy		0.00268210	0.00098245	2.7300	0.008112	0.000721	0.004644	2.63757	0.966140	0.70861	4.56653
xy <sup>2</sup>		-0.00005766	0.00002819	-2.0452	0.044827	-0.000114	-0.000001	-1.56179	0.763643	-3.08646	-0.03713
y <sup>4</sup>		-0.00000425	0.00000111	-3.8156	0.000302	-0.000006	-0.000002	-5.33412	1.397985	-8.12529	-2.54295
y <sup>5</sup>		0.00000015	0.00000004	3.8723	0.000250	0.000000	0.000000	5.37536	1.388154	2.60382	8.14690

## APÉNDICE G

### Módulo de Elasticidad

$$E = 8.291765 - 0.080388x + 0.001983x^2$$

### ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Ln (Módulo de elasticidad)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		8.291765	0.085772	96.67240	0.000000	8.120655	8.462875				
x		-0.080388	0.016136	-4.98193	0.000004	-0.112578	-0.048198	-1.58500	0.318150	-2.21969	-0.950309
x <sup>2</sup>		0.001983	0.000620	3.19997	0.002078	0.000747	0.003218	1.01807	0.318150	0.38338	1.652762

**APÉNDICE H**  
**PARÁMETRO M**

$$m = e^{-6.7086143 - 0.0140861xy + 0.0014072xy^2 - 0.0000351xy^3}$$

**ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL PARÁMETRO M**

Ln (m)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		-6.7086143	0.231060	-29.0341	0.000000	-7.16969	-6.24754				
xy		-0.0140861	0.005709	-2.4675	0.016128	-0.02548	-0.00269	-2.30957	0.935990	-4.17731	-0.44184
xy <sup>2</sup>		0.0014072	0.000544	2.5866	0.011839	0.00032	0.00249	6.35531	2.457052	1.45233	11.25828
xy <sup>3</sup>		-0.0000351	0.000013	-2.7041	0.008646	-0.00006	-0.00001	-4.41731	1.633572	-7.67705	-1.15757

## APÉNDICE I

### PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO COMPUESTO CON 15% Y 17.5% DE ZEOLITA Y DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO

Variables Independientes		Variables Dependientes o Resultados					
Porc. (%)	Tiempo de Curado (días)	Esf. de Fluencia (Mpa)	Esf. Máx. (Mpa)	Def. Máx.	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
15	7	46,06	53,573	0,0322	1696,4686	0,169	0,001
15	14	51,8093	54,227	0,0313	1752,9786	0,045	0,001
15	21	45,6027	50,633	0,0279	1927,7049	0,111	0,0018
15	28	51,156	53,9	0,0366	1509,0114	0,053	0,0011
17,5	4	45,3413	49,98	0,0323	1575,4593	0,11	0,001
17,5	11	43,9693	48,673	0,0247	2003,7985	0,107	0,001
17,5	18	43,6427	49,327	0,0288	1789,6646	0,137	0,0014
17,5	25	47,04	50,307	0,0347	1526,1592	0,073	0,0015

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] *H. F. W. Taylor, La química de los cementos*, Mc Graw–Hill, Cuarta Edición en Español, Pág. 13-315.
- [2] \_\_\_\_\_. “Cemento Pórtland”, [www.comaceimport.com](http://www.comaceimport.com), Marzo, 2008.
- [3] \_\_\_\_\_. “El Hormigón”, [www.cement.org](http://www.cement.org), Marzo, 2008.
- [4] Bryant Mather, “Terminología del cemento y del Hormigón”, GOOGLE, Marzo, 2008.
- [5] SALTOS ARTEAGA CARLOS ORIOL, Efectos de la Adición de Zeolita en las Propiedades Mecánicas de un Hormigón Convencional de Cemento Portland Tipo I, TESIS - Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL, 2005., Pág. 4-51.
- [6] \_\_\_\_\_. “Zeolita”, [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com), Marzo, 2008.
- [7] ASTM C618-01, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete.
- [8] ASTM C 595 – 03, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
- [9] Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., MacLead N. and McGrath R, “Design and Control of Concrete Mixtures”, Seventh Canadian Edition 2002, Chapter 9. Pág. 213-223.
- [10] \_\_\_\_\_. “Curado del Concreto”, [www.google.com](http://www.google.com), Marzo, 2008.

- [11] ASTM C 511 – 03, Standard Specification for Moist Cabinets Moist Rooms and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes.
- [12] Robalino E. Paola, El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánico, TESIS – Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL, 2004. Pág. 18-22.
- [13] 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.
- [14] Jorge Calderón V., Ph.D, “Diseño de Experimentos”, Sesión 3, Marzo, 2008.
- [15] ASTM C 109/C109M – 02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 – in or [50 - mm] Cube Specimens).