

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

“Estudio y Simulación del Comportamiento del Cemento  
Portland Tipo I con la adición del 5% de Zeolita  
Ecuatoriana mediante Curado al Aire”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Carlos Andrés Boderó Bonini

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2008

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo.

## DEDICATORIA

ESTE TRABAJO  
REALIZADO CON  
ESFUERZO POR  
VARIOS MESES, ESTÁ  
DEDICADO A MIS  
PADRES, FAMILIARES  
Y AMIGOS.



TRIBUNAL DE GRADUACIÓN  
F. I. M. C. P.

## 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

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Boderó Bonini

## RESUMEN

En la actualidad las industrias tienen como uno de sus principales objetivos disminuir sus costos. En la industria de la construcción para alcanzar este objetivo se busca disminuir la cantidad de cemento agregando en su lugar materiales aditivos, que brinden al cemento propiedades similares o superiores a las del cemento sin aditivos. Los aditivos puzolánicos podrían ser una buena alternativa, ya que no requieren de un procesamiento tan costoso y contaminante como el empleado para obtener el clinker, el principal componente del cemento. Por lo tanto una mezcla cemento y puzolana podría ser menos costosa que una íntegramente conformada por cemento; entonces la mezcla cemento puzolana puede ser una alternativa a considerar si las propiedades mecánicas de dicha mezcla son mejores, o al menos similares, que el cemento sin aditivo.

El objetivo principal de esta tesis es analizar los efectos que generan la adición de un 5% de zeolita ecuatoriana y el tiempo de curado en las propiedades mecánicas del cemento, específicamente la resistencia a la compresión uniaxial. A través de la comparación de resultados obtenidos

mediante la modelación por computadora y la inclusión de datos obtenidos mediante la experimentación en el laboratorio.

En la etapa inicial se realizaron ensayos de laboratorio con probetas cubicas de pasta de cemento compuesto que comprende: Cemento tipo I, 5% de zeolita ecuatoriana como aditivo y agua. El material de tipo puzolánico a utilizar como aditivo es zeolita de origen ecuatoriano proveniente de sectores aledaños a Manglaralto y en cuanto a la condición de curado, fue al ambiente. Cada compuesto fue analizado para realizar ensayos mecánicos a 7, 14, 28 y 45 días, siendo la función de respuesta la resistencia a la compresión uniaxial.

Paralelamente otros tesisas, efectuaron experimentos bajo las mismas condiciones excepto en la cantidad de adición de zeolita que varían en 10%, 15%, 20% y 25%. Estos resultados fueron analizados estadísticamente para obtener modelos, con la ayuda de métodos numéricos, que puedan simular sus propiedades a diferentes tiempos de curado y distintas composiciones.

Al concluir esta tesis, se obtuvo un modelo que permite simular el comportamiento de la pasta de cemento, y se pudo reconocer si reemplazar un porcentaje de cemento por zeolita genera una resistencia

a la compresión uniaxial superior o igual a una pasta enteramente conformada por cemento.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS .....	VIII
SIMBOLOGÍA .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIV
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Justificación del Proyecto .....	3
1.2. Descripción del Problema.....	4
1.3. Objetivos de la Tesis .....	5
1.3.1. Objetivo General .....	5
1.3.2. Objetivos Específicos.....	6
1.4. Metodología del Estudio .....	7
1.5. Estructura de la Tesis.....	8

## CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO .....	10
2.1. Cemento .....	10
2.1.1. Estructura y Composición Química .....	11
2.1.2. Hidratación del cemento .....	12
2.2. Agregados .....	16
2.2.1. Agregado fino .....	17
2.2.2. Agregado grueso.....	17
2.3. Aditivos.....	17
2.4. Puzolana .....	18
2.5. Zeolita.....	21

## CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL .....	25
3.1. Preparación y Ensayo de probetas .....	25
3.2. Diseño experimental.....	46
3.3. Simulación Computacional.....	48

## CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS .....	55
4.1. Ensayo de compresión .....	55
4.2. Análisis estadísticos .....	65
4.3. Resultados de modelo.....	100

## CAPÍTULO 5

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	137
5.1. Conclusiones.....	137
5.2. Recomendaciones.....	140

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales)
<b>Def.</b>	Deformación
<b>d</b>	Días
<b>GL</b>	Grados de libertad
<b>h</b>	Horas
<b>Kg-f</b>	Kilogramos fuerza
<b>Lb-f</b>	Libras fuerza
<b>MEUA</b>	Máquina de Ensayos Universal Hidráulica Automática
<b>MEUM</b>	Máquina de Ensayos Universal Hidráulica Manual
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>mm</b>	Milímetros
<b>min</b>	Minutos
<b>HR</b>	Porcentaje de humedad relativa
<b>SC</b>	Suma de cuadrados
<b>CM</b>	Suma de cuadrados medios

## SIMBOLOGÍA

$\varepsilon_{max}$	Deformación unitaria máxima
$\sigma_y$	Esfuerzo de fluencia
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
<b>E</b>	Módulo de elasticidad
<i>a</i>	Parámetro adimensional a
<i>m</i>	Parámetro adimensional m
%	Porcentaje
$\sigma_u$	Resistencia máxima a la compresión

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Metodología de la tesis .....	7
Figura 2.1	Estructura de una zeolita (3) .....	21
Figura 3.1	Trituradora de mandíbulas .....	30
Figura 3.2	Trituradora de rodillos .....	31
Figura 3.3	Cuarteador de material .....	32
Figura 3.4	Ttamices .....	33
Figura 3.5	Trituradora de discos .....	34
Figura 3.6	Molino de bolas .....	35
Figura 3.7	Tamizador eléctrico, con tamiz # 350 y fondo .....	36
Figura 3.8	Molde de las probetas .....	37
Figura 3.9	Balanza electrónica encerada .....	39
Figura 3.10	Homogeneizado de la mezcla cemento-zeolita en seco .....	40
Figura 3.11	Orden de apisonamiento de especímenes (1) .....	41
Figura 3.12	Representación gráfica de las variables de entrada para la simulación .....	50
Figura 4.1	Histograma de la resistencia máxima a la compresión de una pasta de cemento con diferentes porcentajes de zeolita y ensayada a diferentes días de curado .....	67
Figura 4.2	Gráfico de las medias e intervalos de confianza del esfuerzo máximo para cada día de curado y un porcentaje de zeolita de 5% .....	71
Figura 4.3	Gráfico de las medias e intervalos de confianza del esfuerzo máximo por porcentaje de zeolita para cada día de curado .....	77
Figura 4.4	Gráfico de las medias e intervalos de confianza del esfuerzo máximo por día de curado para cada porcentaje de zeolita .....	78
Figura 4.5	Gráfico de la superficie de respuesta del esfuerzo máximo a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	101

Figura 4.6	Gráfico de las curvas de nivel de la superficie de respuesta del esfuerzo máximo a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	102
Figura 4.7	Gráfico de la superficie de respuesta del esfuerzo de fluencia a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado.....	103
Figura 4.8	Gráfico de las curvas de nivel de la superficie de respuesta del esfuerzo de fluencia a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	104
Figura 4.9	Gráfico de la superficie de respuesta del módulo elástico a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	105
Figura 4.10	Gráfico de las curvas de nivel de la superficie de respuesta del módulo elástico a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	106
Figura 4.11	Gráfico de la superficie de respuesta de la deformación máxima a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado.....	107
Figura 4.12	Gráfico de las curvas de nivel de la superficie de respuesta de la deformación máxima a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	108
Figura 4.13	Gráfico de la superficie de respuesta del parámetro $a$ para diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	109
Figura 4.14	Gráfico de las curvas de nivel de la superficie de respuesta del parámetro $a$ para diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	110
Figura 4.15	Gráfico de la superficie de respuesta del parámetro $m$ a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	111
Figura 4.16	Gráfico de las curvas de nivel de la superficie de respuesta del parámetro $m$ a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado .....	112
Figura 4.17	Curva que define el esfuerzo máximo para 5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	113
Figura 4.18	Curva que define el esfuerzo de fluencia para 5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	114
Figura 4.19	Curva que define el módulo de elasticidad para 5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	115
Figura 4.20	Curva que define la deformación máxima para 5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	116

Figura 4.21	Curva que define el parámetro $a$ para 5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	117
Figura 4.22	Curva que define el parámetro $m$ para 5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	118
Figura 4.23	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 5% de zeolita y 7 días de curado .....	121
Figura 4.24	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 5% de zeolita y 14 días de curado .....	122
Figura 4.25	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 5% de zeolita y 21 días de curado .....	123
Figura 4.26	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 5% de zeolita y 28 días de curado .....	124
Figura 4.27	Curva que define el esfuerzo máximo para 7.5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	125
Figura 4.28	Curva que define el esfuerzo de fluencia para 7.5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	126
Figura 4.29	Curva que define el módulo de elasticidad para 7.5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	127
Figura 4.30	Curva que define la deformación máxima para 7.5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	128
Figura 4.31	Curva que define el parámetro $a$ para 7.5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	130
Figura 4.32	Curva que define el parámetro $m$ para 7.5% de zeolita y distintos tiempo de curado .....	131
Figura 4.33	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 7.5% de zeolita y 4 días de curado .....	133

Figura 4.34	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 7.5% de zeolita y 11 días de curado .....	134
Figura 4.35	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 7.5% de zeolita y 18 días de curado .....	135
Figura 4.36	Gráfico de la curva esfuerzo-deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 7.5% de zeolita y 25 días de curado .....	136

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Porcentajes de óxidos de las muestras en promedio.....	23
Tabla 2	Porcentaje de elementos en las muestras promedio .....	24
Tabla 3	Composición mineralógica de las muestras.....	24
Tabla 4	Variaciones permisibles en los moldes de las probetas (1) .....	27
Tabla 5	Cantidad en gramos de material a ser usado en el experimento al 5 y 7.5% de zeolita .....	38
Tabla 6	Condiciones de temperatura y humedad en la preparación de las probetas .....	40
Tabla 7	Variaciones permisibles en los tiempos de curado (1).....	44
Tabla 8	Matriz de diseño experimental .....	47
Tabla 9	Matriz de diseño experimental para validación .....	48
Tabla 10	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 5% de zeolita ensayadas a los 7 días de curado.....	56
Tabla 11	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 5% de zeolita ensayadas a los 14 días de curado.....	57
Tabla 12	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 5% de zeolita ensayadas a los 21 días de curado.....	58
Tabla 13	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 5% de zeolita ensayadas a los 28 días de curado.....	59
Tabla 14	Resultados obtenidos para cada muestra de 5% de zeolita a los diferentes días de curado .....	60
Tabla 15	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de validación de 7.5% de zeolita ensayadas a los 4 días de curado. ....	61
Tabla 16	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de validación de 7.5% de zeolita ensayadas a los 11 días de curado. ....	62

Tabla 17	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de validación de 7.5% de zeolita ensayadas a los 18 días de curado. ....	63
Tabla 18	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de validación de 7.5% de zeolita ensayadas a los 25 días de curado. ....	64
Tabla 19	Resultados obtenidos para cada muestra de 5% de zeolita a los diferentes días de curado .....	65
Tabla 20	Datos de esfuerzo máximo de compresión para un porcentaje de zeolita de 5% a diferentes días de curado.....	69
Tabla 21	Errores estándar e intervalos de confianza del esfuerzo máximo para cada día de curado y un porcentaje de zeolita de 5%.....	70
Tabla 22	Tabla de análisis de varianza para el esfuerzo máximo de la pasta de cemento con 5% de zeolita .....	71
Tabla 23	Tabla de probabilidades para la prueba post hoc de tukey hsd del esfuerzo de compresión de una pasta de cemento con 5% de zeolita para cada día de curado .....	72
Tabla 24	Datos de esfuerzo máximo de compresión para el control y diferentes porcentaje de zeolita a diferentes días de curado .....	74
Tabla 25	Errores estándar e intervalos de confianza del esfuerzo máximo para cada porcentaje de zeolita y día de curado .....	76
Tabla 26	Tabla de análisis de varianza factorial del esfuerzo de compresión de una pasta de cemento con diferentes porcentajes de zeolita y para distintos días de curado.....	79
Tabla 27	Tabla de probabilidades para la prueba post hoc de dunnett (m<control) del esfuerzo de compresión de una pasta de cemento para cada día de curado con diferentes porcentajes de zeolita.....	82
Tabla 28	Resultados de la regresión lineal múltiple para simular los valores de los logaritmos naturales de los parámetros requeridos en el modelo de simulación.....	88
Tabla 29	Estimación de los parámetros para la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del esfuerzo máximo .....	90
Tabla 30	Estimación de los parámetros para la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del esfuerzo de fluencia.....	93
Tabla 31	Estimación de los parámetros para la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del módulo de elasticidad .....	96

Tabla 32	Estimación de los parámetros para la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del parámetro $m$ .....	99
Tabla 33	Parámetros de simulación obtenidos para cada muestra de 5% de zeolita a los diferentes días de curado.....	120
Tabla 34	Parámetros de simulación obtenidos para cada muestra de 5% de zeolita a los diferentes días de curado.....	132

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo evaluó la aplicación de zeolita ecuatoriana como aditivo al cemento, a fin de obtener una mezcla con menor porcentaje de cemento; pero que, posea una resistencia a la compresión similar o superior a una mezcla compuesta totalmente por cemento.

Actualmente, en Ecuador se explota zeolita cerca de Guayaquil para fines tan variados como filtros, captadores de nutrientes de suelos, agricultura, alimento para animales, etc. Sin embargo, la zeolita que se empleará como aditivo puzolánico en esta tesis, proviene de las cercanías de Manglaralto ubicada en la provincia de Santa Elena.

El afloramiento donde se puede hallar este tipo de zeolita, tiene varios centenares de kilómetros cuadrados y las condiciones en las que se encuentra dicha zeolita permitirían una explotación minera ambientalmente sustentable que beneficiaría a las comunas desde San Pablo hasta Puerto López.

Se efectuaron ensayos de resistencia a la compresión uniaxial, de una mezcla cemento – zeolita (5%), a diferentes tiempos de curado al aire; y

adicionalmente otros tesisas efectuaron experimentos bajo las mismas condiciones pero con porcentajes de zeolita de 10%, 15% 20% y 25%.

Los resultados de este estudio permitieron establecer que no existe una diferencia significativa entre los valores de resistencia a la compresión del cemento sin aditivos y la mezcla cemento – zeolita (5%) a los 28 días de curado. En cambio, para porcentajes de zeolita mayores al 5% el valor de resistencia a la compresión es significativamente mayor para el cemento sin aditivos en todos los días de curado.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Justificación del Proyecto

En la actualidad las industrias dentro de sus principales objetivos está el de disminuir sus costos y proteger el medio ambiente. En la industria de la construcción para alcanzar este objetivo como una de las alternativas está la de disminuir la cantidad de clinker en la formulación del cemento, agregando en su lugar materiales aditivos puzolánicos, con propiedades similares o superiores a las del cemento sin este aditivo.

Esta tesis se centró en un material puzolánico como aditivo del cemento, el cual es la zeolita. La zeolita a emplear en este estudio es proveniente de sectores aledaños a Manglaralto. El hecho que este mineral se encuentre en Ecuador representa que en comparación a

otros materiales puzolánicos podría ser más barato obtener este tipo de zeolita, y adicionalmente su explotación podría beneficiar a varias comunidades locales.

Entonces, resultó relevante conocer si efectivamente la adición de zeolita proveniente de Manglaralto, genera una mejora en las propiedades mecánicas del cemento, específicamente su resistencia a la compresión.

## **1.2. Descripción del Problema**

Los materiales puzolánicos empleados actualmente como aditivos para el cemento, son introducidos principalmente para aumentar su propiedad de resistir grandes fuerzas de compresión.

El alto costo de la obtención de clinker, y las altas emanaciones de CO<sub>2</sub> que dicho proceso genera; hace que la utilización de un material puzolánico, como la zeolita extraída de Manglaralto, sea una posible alternativa a disminuir la cantidad de clinker en la formulación del cemento, y por consiguiente podría significar una disminución de

costos y atenuar el problema ambiental debido a las emanaciones de CO<sub>2</sub>.

En esta tesis se elaboró un modelo que permitió simular el comportamiento del cemento tipo I con 5% de zeolita ecuatoriana como aditivo, a diferentes días de curado al aire, manteniendo constante la mezcla agua/cemento. Por medio de la simulación y del análisis de un modelo estadístico y matemáticamente conformado por los datos de diferentes porcentajes de zeolita 5%, 10%, 15%, 20% y 25% cada uno a 7, 14, 21 y 28 días de curado.

### **1.3. Objetivos de la Tesis**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Elaborar un modelo que permita simular el comportamiento de una pasta de cemento con zeolita ecuatoriana al 5% en diferentes tiempos de curado.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Estudiar el efecto en la resistencia a la compresión uniaxial de una pasta de cemento al adicionar zeolita ecuatoriana a diferentes porcentajes de adición.
- ✓ Determinar el efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión uniaxial de una pasta de cemento.
- ✓ Analizar los resultados con cada uno de los porcentajes de zeolita, con el cemento tipo I y cemento tipo IV.

#### 1.4. Metodología del Estudio



**FIGURA 1.1 METODOLOGÍA DE LA TESIS**

En la etapa inicial se efectuaron ensayos de laboratorio con probetas cúbicas de pasta de cemento compuesto que comprende: Cemento tipo I, 5% de zeolita ecuatoriana como aditivo y agua. El material de tipo puzolánico empleado como aditivo es zeolita de origen

ecuatoriano y en cuanto a la condición de curado, fue al ambiente. Cada compuesto fue analizado por los participantes para realizar ensayos mecánicos a 7, 14, 28 y 45 días, siendo la función de respuesta la resistencia a la compresión uniaxial.

En base a la información recolectada se emplearon métodos numéricos para generar un modelo que simule las propiedades de respuesta, particularmente la resistencia a la compresión uniaxial del compuesto de pasta de cemento, en función de las fases presentes, cómo cambian en el tiempo y su composición.

### **1.5. Estructura de la Tesis**

El presente trabajo se desarrolló a lo largo de cinco capítulos, que se detallan a continuación. De esta forma en este primer capítulo se describen los antecedentes que justifican el desarrollo del proyecto, así como los objetivos y la descripción de la metodología que se aplicó para conseguir dichos objetivos y la forma en que la tesis se estructuró. En el capítulo dos se revisan los fundamentos teóricos del cemento, así como de los diferentes materiales que se emplean para generar los materiales más comunes de construcción con la ayuda del cemento (tales como agregados, aditivos empleados para crear

concreto, mortero u hormigón); además de hacer énfasis a las puzolanas especialmente la zeolita. En el capítulo tres se revisan los procedimientos experimentales que se efectuaron, como se prepararon las probetas y se realizaron los ensayos, y finalmente como se elaboró la simulación computacional.

En el capítulo 4, se emplearon los resultados de los ensayos de compresión, para validar del modelo computacional por medio de análisis estadísticos y se obtuvieron los respectivos resultados que permitieron decidir si el modelo es adecuado o no. Este trabajo culmina en el quinto capítulo el cual está dedicado a la presentación de las conclusiones y recomendaciones que surgieron como consecuencia de la realización del proyecto de tesis.

# **CAPÍTULO 2**

## **2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO**

### **2.1. Cemento**

El cemento es una sustancia de polvo fino, hecha de argamasa de yeso capaz de formar una pasta blanda al mezclarse con agua y que se endurece espontáneamente en contacto con el aire.

En general, se llaman conglomerantes hidráulicos aquellos que, amasados con el agua fraguan, endurecen y son prácticamente estables en contacto con él. Los conglomerantes hidráulicos más importantes son los "Cementos", que se clasifican en: Cementos tipo Portland y Cementos especiales.

En la fabricación del cemento se trituran las materias primas mezcladas y se calientan hasta que se funden, formando el “clinker”, que a su vez se tritura hasta lograr un polvo fino.

Los cementos Pórtland son conglomerantes hidráulicos que se obtienen por pulverización del clínquer y sin más adición que la piedra de yeso natural. Se utilizan para todo tipo de construcciones de Concreto y concreto reforzado, y su resistencia es variable (9).

### **2.1.1. Estructura y Composición Química**

El cemento Portland está compuesto principalmente por óxidos de calcio, silicio, aluminio, hierro y manganeso. Las fases presentes comprenden principalmente el cemento son: silicato tricálcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y en menor proporción aluminato de calcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y ferroaluminato de calcio ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Los principales compuestos son los silicatos (tricálcico y dicálcico) son los componentes principales ya que suman alrededor del 80 % de los compuestos y son los responsables del desarrollo de resistencia del cemento Portland (8).

### 2.1.2. Hidratación del cemento

La hidratación es la reacción química entre las partículas de cemento y el agua. Debido a los diferentes compuestos químicos ocurren varias reacciones químicas en el proceso de hidratación. Los compuestos activos del cemento son inestables, y en presencia de agua reorganizan su estructura. El proceso de hidratación y asentamiento de la mezcla de cemento se conoce como curado, y durante el mismo se desprende calor.

El endurecimiento inicial del cemento se produce por la hidratación del silicato tricálcico, el cual actúa sobre el desarrollo de resistencia temprana hasta los 28 días, formando una sílice (dióxido de silicio) hidratada gelatinosa e hidróxido de calcio. Estas sustancias cristalizan, uniendo las partículas de arena o piedras —siempre presentes en las mezclas de argamasa de cemento— para crear una masa dura (7).

La reacción del aluminato tricálcico con el agua es inmediata y libera mucho calor, ocasionando que los aluminatos se hidraten más rápido que los silicatos; el aluminato tricálcico actúa sobre

el tiempo de fragüe, la resistencia a primeras horas del hormigón y su presencia hace vulnerable al hormigón a la acción de los sulfatos, pero no contribuye al endurecimiento final de la mezcla.

La hidratación del silicato dicálcico actúa de modo semejante, pero mucho más lentamente, endureciendo poco a poco durante varios años. Por esta razón aporta a la resistencia final de la mezcla.

El ferroaluminato de calcio se considera casi un subproducto de la fabricación de clinker y actúa principalmente sobre la coloración del cemento y aporta cierta vulnerabilidad a los sulfatos.

### ***Métodos de curado***

Durante el proceso de curado y primeros días de endurecimiento del concreto es necesario impedir la pérdida de agua necesaria, tanto para la hidratación del cemento, como para que dicho endurecimiento se lleve a cabo de una manera

uniforme, en caso contrario pueden originarse tensiones internas capaces de fisurar el concreto.

Últimamente se están empleando procedimientos especiales de curado, mediante la impermeabilización de la superficie del concreto, que impiden la evaporación de agua, para lo que se emplean distintos tipos de recubrimientos a base de aceites, resinas y plásticos. Otro método empleado es el de curado al vapor, que se utiliza sobre todo en elementos estructurales prefabricados, pues acelera considerablemente el endurecimiento del concreto, y cuya temperatura está comprendida entre 55° y 75° centígrados. La velocidad de calentamiento debe ser inferior al 20% por hora.

Durante los primeros días de endurecimiento del concreto, aparte de someterlo a un curado adecuado, conviene evitar todas las causas externas que puedan agrietarlo, tales como vibraciones y sobrecargas.

El período de curado mínimo del concreto debe ser de siete días y el período normal de curado es de 28 días.

El concreto, una vez fundido, debe conservarse a una temperatura mayor a 10° C y húmedo por lo menos durante los primeros siete días, después de la fundición, exceptuando el concreto de rápido endurecimiento, el que debe mantenerse húmedo por lo menos tres días.

En clima frío el concreto se debe proteger de heladas o temperaturas muy bajas. En clima cálido, se tomaran precauciones para reducir la temperatura del concreto y evitar la acelerada evaporación del agua (9).

### ***Curado al Aire***

El curado al aire consiste en mantener el concreto en un molde durante las primeras 24 h; luego de desmoldar se expone al ambiente del laboratorio. Generalmente se acepta que si las condiciones del ambiente proporcionan suficiente humedad y una temperatura favorable, en forma constante, no se requiere realizar acción alguna para curar al concreto, es decir, el curado al aire es admisible.

Powers (1947) encontró que la hidratación del cemento se reduce en forma substancial cuando la humedad dentro de los poros capilares de la pasta de cemento cae por debajo del 80%; de esto concluyó que para que se den las condiciones de humedad que permitan el curado natural, la humedad del aire debe ser al menos de un 80% para evitar que haya un flujo de humedad del concreto hacia el aire. Lo anterior únicamente sería válido si la evaporación no se diera por otras condiciones meteorológicas desfavorables como: alta velocidad del viento y diferencias significativas entre la temperatura del concreto y del aire (15).

## **2.2. Agregados**

Al combinar el cemento con agregados se obtiene una de las principales aplicaciones del mismo, que es el concreto. Estos constituyen del 60 al 80 por ciento del volumen del concreto. Como áridos ó materiales inertes, ya sea finos o gruesos, pueden emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de la trituración de piedra que reúnan en igual o superior grado, las características que se le exijan al concreto diseñado ó proyectado (9).

### **2.2.1. Agregado fino**

Debe cumplir las especificaciones ASTM C-33. Debe ser arena de río lavada, sus granos deben pasar tamiz de 3/8" y del 30% al 50%, pasar al tamiz No.4. No debe contener sustancias nocivas e impurezas orgánicas. Cuando estas impurezas originen un color más oscuro que el normal aprobado en una muestra representativa, será causa suficiente para que sea rechazado (9).

### **2.2.2. Agregado grueso**

Puede ser de grava limpia o roca triturada que se ajuste a los requerimientos ASTM C-33. Se recomienda que tenga una dimensión mínima de 1½" para cimientos y ¾" para piezas estructurales. El agregado estará exento de álcalis solubles en agua y sustancias que puedan causar expansión en el concreto a causa de su reacción con los álcalis del cemento (9).

## **2.3. Aditivos**

Las adiciones son materias minerales que se incorporan al cemento, generalmente en molienda conjunta, como ciertas rocas naturales o

no (puzolanas, escorias granulada de alto horno, caliza, micrisilice) que actúan, o bien mejorando las propiedades hidráulicas del cemento y otras cualidades por una adecuada granulometría (incremento de la trabajabilidad y retención de agua, disminución de la porosidad y capacidad, reducción de la fisuración).

Luego de la segunda guerra mundial, Europa debió de reconstruir muchas ciudades y obras de infraestructura, incrementando la producción del cemento de manera muy importante, la que generalizó el uso de adiciones puzolánicas y de escoria de alto horno. Posteriormente, en la década de los setentas a raíz de la crisis de energía se incremento la aplicación de adiciones minerales con las cenizas volantes y el líder calizo. En la actualidad todos los cementos normalizados introducen adiciones en niveles que varían entre el 5 y el 60% de las plantas de premezclado y el 50% del concreto que se despacha incluye cenizas volantes(fly ash) (10).

#### **2.4. Puzolana**

Se denomina puzolana a todos aquellos materiales inorgánicos, naturales o artificiales, los cuales se endurecen en agua cuando se

mezclan con hidróxido de calcio (cal) o con materiales que pueden liberar hidróxido de calcio (como el clinker del cemento Portland).

En la actualidad existen múltiples usos que pueden darse a la puzolana, siendo el más destacado la fabricación de cemento Portland Puzolánico.

La puzolana adicionada al cemento puede brindar ventajas como:

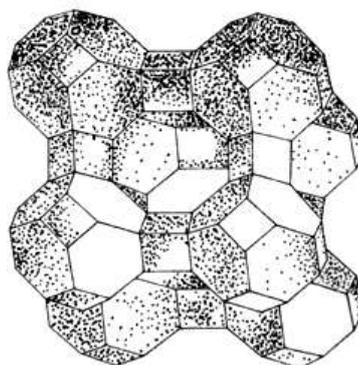
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el curado.
- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Reducción del calor de Hidratación.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la Abrasión.
- Aumento en la durabilidad del cemento.
- Disminuye la necesidad de agua.

La base de todas estas mejoras es el denominado “efecto puzolánico” en el cemento. Los Aluminosilicatos presentes en la puzolana, reaccionan con el Hidróxido de Calcio liberado en la hidratación del cemento Portland. Esto se realiza en una reacción lenta (que disminuye el calor), consume el Hidróxido de Calcio (lo que mejora su resistencia frente a ambientes ácidos), y al realizarse la reacción rellenan los espacios resultantes de la reacción de hidratación del cemento (lo que aumenta la impermeabilidad y la resistencia mecánica).

La actividad puzolánica en mayor o menor medida depende del tipo de material empleado como puzolana. Entre esos se encuentran las escorias de fundiciones de acero, la microsílica o humo de sílice que se genera como producto secundario en la fundición de aleaciones de ferrosilicatos, metacaolines procedentes del tratamiento térmico del caolín, y las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón en plantas térmicas. (6)

## 2.5. Zeolita

Las zeolitas comprenden un grupo de aluminosilicatos cristalinos hidratados de aluminio y cationes alcalinos y alcalino-térreos, con ordenación tridimensional (tectosilicatos). Se caracterizan por poseer una estructura abierta y por su capacidad para incorporar y ceder agua y cationes en su estructura, sin cambios importantes en la misma.



**FIGURA 2.1 ESTRUCTURA DE UNA ZEOLITA (3)**

Las zeolitas demuestran un comportamiento puzolánico evidenciado por su fuerte afinidad en reaccionar con la cal a temperaturas ambientales, en un medio preferentemente acuoso, propiciando la formación y posterior cristalización de silicatos cálcicos hidratados, que se caracterizan por una elevada estabilidad física y química.

Esta estabilidad proporciona a las estructuras fabricadas a base de cemento con puzolanas una vida útil prolongada, preservándolas de los ataques de agentes externos en medios altamente agresivos (5).

Las principales aplicaciones de zeolitas son:

- ❖ *Control ambiental:* gestión de desechos radiactivos; tratamiento de efluentes de aguas residuales; tratamiento de aguas residuales agrícolas; limpieza total de gases emanados de chimeneas; producción de oxígeno.
- ❖ *Conservación de energía:* Gasificación de carbón; purificación de gas natural; usos en energía solar; producción de petróleo.
- ❖ *Agricultura:* Fertilización y remediación de suelos; adsorción de pesticidas, fungicidas y herbicidas; absorción de metales pesados de los suelos; nutrición animal; tratamiento de excremento animal.
- ❖ *Minería y metalurgia:* Adsorción de metales pesados de efluentes; adsorción de metales en procesos metalúrgicos

- ❖ *Aplicaciones varias:* En la industria del papel; construcción; aplicaciones médicas; detergentes; control de malos olores, camas de animales, etc (13).

En el Ecuador se explota zeolita cerca de Guayaquil para fines tan variados como filtros, captadores de nutrientes de suelos, agricultura, alimento para animales, etc. Sin embargo, la zeolita que se empleará como aditivo puzolánico en esta tesis proviene de en las cercanías de Manglaralto ubicada en la provincia de Santa Elena, donde dicho mineral es aún desconocido.

A continuación, se muestran las tablas 1, 2 y 3 que describen tanto la composición química como mineralógica de la zeolita obtenida en Manglaralto:

**TABLA 1**  
**PORCENTAJES DE ÓXIDOS DE LAS MUESTRAS EN PROMEDIO**

<b>SiO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> <b>(%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> <b>(%)</b>	<b>CaO</b> <b>(%)</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b> <b>(%)</b>	<b>MgO</b> <b>(%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b> <b>(%)</b>	<b>MnO</b> <b>(%)</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b> <b>(%)</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b> <b>(%)</b>
54.61	13.64	9.13	4.36	1.60	0.786	0.592	0.378	0.292	0.137

TABLA 2

## PORCENTAJE DE ELEMENTOS EN LAS MUESTRAS PROMEDIO

Si (%)	Al (%)	Fe (%)	Ca (%)	K (%)	Mg (%)	Ti (%)	Mn (%)	Na (%)	P (%)	PPC (%)
25.43	7.22	3.12	6.39	1.33	0.474	0.355	0.293	0.217	0.0597	14.47

TABLA 3

## COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS MUESTRAS

Fases mayoritarias	Porcentaje de presencia	Fases minoritarias	Porcentaje de presencia	Trazas
Clinoptilolita	30 – 35 %	Feldespatos	5 – 15 %	
Heulandita	35 – 40 %	Esmectitas	15 – 20 %	
Cuarzo	15 – 20 %			

# CAPÍTULO 3

## 3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

### 3.1. Preparación y Ensayo de probetas

Para la preparación y ensayo de probetas se tuvo en cuenta la norma ASTM C 109/C 109M “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”, pero efectuando ciertas modificaciones. Esta norma brinda un método adecuado para preparar y ensayar las probetas de experimentación adecuadamente y asegurando que los valores de resistencia a la compresión uniaxial son confiables. Con la diferencia que se emplearon probetas de pasta de cemento con zeolita (cemento + zeolita) con una relación agua mezcla de 0.3, en lugar de utilizar morteros (cemento + arena) como indica la norma. Otra modificación del procedimiento fue el método de curado, el cual fue distinto al mencionado en la norma la cual indica 1 día de curado dentro del molde y luego inmersos en

agua de cal hasta su ensayo; para las probetas a ensayar fueron curadas al aire en lugar de agua de cal.

### ***Instrumentos y equipos utilizados***

*Balanzas*, que cumplen con los requerimientos de la norma ASTM C 100. Para la medición de pesos en este estudio se empleó una balanza electrónica SARTORIUS con certificación ISO 9001.

*Recipientes graduados de vidrio*, para medir los volúmenes fueron lo suficientemente grandes para medir el volumen de agua a 20° C necesaria para la mezcla de cemento, con una variación permisible de 2 ml. Dichos recipientes tuvieron graduaciones subdivididas de al menos 5 ml, excepto que las líneas de graduación eran omitidas para los últimos 10 ml para un vaso de 250 ml y los 25 ml últimos para un vaso de 500 ml. Las divisiones principales eran circulares al contorno del recipiente y numeradas. El resto de las graduaciones tenían al menos una longitud de  $\frac{1}{7}$  de la circunferencia del vaso y las intermedias correspondieron a una extensión de al menos  $\frac{1}{5}$  de la circunferencia del vaso.

*Moldes*, fueron cubos de 50 mm de longitud. Estos moldes no tuvieron más de tres compartimientos y no más de 2 filas. El material utilizado para dichos moldes debió ser de un metal duro que no reaccione químicamente con el cemento, para el caso de moldes nuevos, la dureza Rockwell del metal no fue ser menor a 50 HRB lo que significa que las paredes del molde eran ser lo suficientemente rígidas para prevenir la deformación de la probeta. A continuación la Tabla 4 muestra las variaciones permisibles en dichos moldes por la norma ASTM C 109 /C 109 M.

**TABLA 4**  
**VARIACIONES PERMISIBLES EN LOS MOLDES DE LAS**  
**PROBETAS (1)**

<b>Molde de cubos de 50 mm</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Nuevo</b>	<b>En uso</b>
<b>Inclinación de caras</b>	+/- 0,025 mm	+/- 0,050 mm
<b>Distancias entre caras opuestas</b>	50 mm +/- 0,13 mm	50 mm +/- 0,50 mm
<b>Altura de cubo</b>	50 mm + 0,25 mm a -0,13 mm	50 mm + 0,25 mm a -0,38 mm
<b>Ángulo entre caras adyacentes</b>	90° +/- 0,5°	90° +/- 0,5°

*Mezcladora, tazón y paletas*, para este estudio se empleo una máquina mezcladora mecánica impulsada eléctricamente equipada con un tazón de mezclado y paletas de marca HOBART, que opera a

dos velocidades. La primera de velocidad baja puede mezclar a una razón de  $140 \pm 5$  rpm, y la segunda velocidad puede girar a razón de  $285 \pm 10$  rpm, cumpliendo así las especificaciones establecidas en la norma ASTM C 305.

*Apisonador*, se utilizó un apisonador de un material no frágil (un compuesto de goma con una dureza de  $80 \pm 10$  el cual es medido con un durómetro Shore A), no absorbente y abrasivo. Este apisonador tendrá una sección transversal de aproximadamente 1/2 por 1 pulgadas (13 por 25 mm) y una longitud de unos 5 a 6 pulgadas (120 a 150mm).

*Maquina de ensayos*, se emplearon dos maquinas universales, para los ensayos de las muestras a distintos días de curado. Una máquina de ensayos hidráulica manual, con capacidad hasta 120000 Lb-f y la segunda una máquina de ensayos hidráulica automática, con capacidad hasta 300000 Kg-f.

### ***Temperatura y humedad***

De acuerdo a los requerimientos de la especificación ASTM C 511. La temperatura del aire en las vecindades de las losas de mezclado, materiales secos, moldes, soportes y tazón de mezcla se mantuvo entre 20° C y 26° C. La temperatura del agua para la mezcla, cuarto húmedo, y el agua del tanque de almacenamiento estuvo comprendida entre 21° C y 25° C. La humedad relativa del laboratorio donde se realizaron los ensayos siempre fue superior a 50%.

### ***Procedimiento de molienda***

El proceso de experimentación comenzó con la molienda de la zeolita, para lo cual se efectuaron los siguientes pasos:

1. Una vez recolectada la piedra y llevada al laboratorio respectivo para la molienda, se pesó la zeolita en bruto hasta obtener aproximadamente el peso total requerido por el grupo.

2. Se procedió a descomponer la zeolita en bruto en piedras pequeñas con la ayuda de un combo que puedan ingresar fácilmente al primer molino, esto se hizo con un combo.
3. Una vez que se obtuvo la zeolita en piedras pequeñas de tal forma que puedan ingresar fácilmente al primer molino, el cual es la trituradora de mandíbulas. Esto se repitió hasta lograr que todo el material pase por la trituradora de mandíbulas.



**FIGURA 3.1 TRITURADORA DE MANDÍBULAS**

4. Luego de pasar todo el material por la trituradora de mandíbulas, se llevó el material a la trituradora de rodillos. Esto se repitió para todo el material.



**FIGURA 3.2 TRITURADORA DE RODILLOS**

5. Al terminar de pasar todo el material por la trituradora de rodillos, se procedió a cuartear el material.



**FIGURA 3.3 CUARTEADOR DE MATERIAL**

6. Se homogenizó una porción del material cuarteado para que esta sea representativa, y se pesan 100 g.
  
7. Llevar los 100 g pesados anteriormente al tamizador, con tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo. Obteniendo así una granulometría de: 1.4 cm, 40 mm, 425  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$  al pasar por cada tamizador respectivamente. Para el tamizado se usó un tamizador eléctrico



**FIGURA 3.4 TAMICES**

8. Luego de esto se pasó todo el material por la trituradora de discos.



**FIGURA 3.5 TRITURADORA DE DISCOS**

9. Una vez que todo el material pasó a través de la trituradora de discos, se analizó nuevamente su granulometría para lo cual se efectuó un segundo cuarteo del material.
10. Se homogenizó una porción del material cuarteado para que esta sea representativa, y se pesan 100 g.
11. Se llevó los 100 g pesados anteriormente al tamizador, con tamices # 50, 100, 200, 325 y fondo. Se obtuvo una granulometría de: 300  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$  , 45  $\mu\text{m}$  al pasar

por cada tamizador respectivamente. Para el tamizado se empleó un tamizador eléctrico.

12. Luego de esto se agregó todo el material al molino de bolas, el material fue molido por 45 minutos.



**FIGURA 3.6 MOLINO DE BOLAS**

13. Una vez que todo el material fue molido en el molino de bolas, se analizó nuevamente su granulometría para lo cual se efectuó un tercer cuarteo del material.

14. Se homogenizó una porción del material cuarteado para que esta sea representativa, y se pesan 100 g.
15. Se llevaron los 100 g pesados anteriormente al tamizador, con tamices # 325 y fondo. Se tuvo que repetir la molienda en el molino de bolas y los pasos posteriores, hasta lograr al menos un 60% de la muestra en el fondo.



**FIGURA 3.7 TAMIZADOR ELÉCTRICO, CON TAMIZ # 350 Y FONDO**

16. Al finalizar el tamizado se obtuvo una 80 por ciento de material en el fondo, es decir, que se obtuvo zeolita a una granulometría igual al del cemento que es de 45 micras.

### ***Preparación de los moldes***

1. Para preparar los moldes se aplicó una fina capa de agente deslizante con un trapo impregnado en las caras interiores del molde y en las placas base.
2. Se sellaron las superficies donde se unen las mitades del molde aplicando una capa de grasa ligera como “petrolatun”. La cantidad debió ser suficiente para poder comprimirse ligeramente cuando las dos mitades sean ajustadas.



**FIGURA 3.8 MOLDE DE LAS PROBETAS**

3. Luego de colocar el molde sobre su placa base se removi6 cuidadosamente con un pa6o seco cualquier exceso de aceite o grasa de la superficie del molde y de la placa base.

### ***Preparación de las probetas***

1. En total se tuvo una mezcla de cemento-zeolita de 3000 g para obtener 12 probetas de ensayo. Se utilizó para este experimento, una relación agua-cemento de 0.3. En la tabla 5, se muestran las cantidades de masa en gramos que se emplearon para obtener la mezcla tanto de las 12 probetas con 5% de zeolita, como de las 12 probetas de validación con 7.5% de zeolita.

**TABLA 5**

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

<b>Fracción de zeolita (%)</b>	<b>Zeolita (g)</b>	<b>Cemento tipo I (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
5	150	2850	900
7.5	2250	2775	900

2. Se pesó cada ingrediente, primero encerrando la balanza electrónica tomando en cuenta el peso del recipiente.



**FIGURA 3.9 BALANZA ELECTRÓNICA ENCERADA**

3. Primero se prepararon las probetas con 5% de zeolita, para lo cual se pesaron en la balanza electrónica 150 g de zeolita.
4. Luego se agregó el cemento tipo I al recipiente hasta completar los 3000 g de mezcla.
5. A continuación se pesó en la balanza electrónica los 900 g de agua requeridos para la mezcla.
6. Antes de proceder mezclar, se tomaron los datos de temperatura y humedad relativa del cuarto.

TABLA 6

**CONDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD EN LA PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS**

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
25.6	62

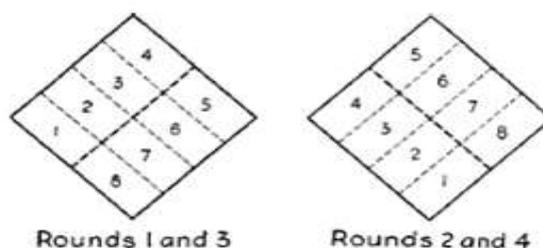
- Se colocó en la mezcladora el cemento y la zeolita por cerca de 10 minutos a la mínima velocidad para homogeneizar la mezcla.

**FIGURA 3.10 HOMOGENEIZADO DE LA MEZCLA CEMENTO-ZEOLITA EN SECO**

- Luego, a la mínima velocidad, se agregó el agua gradualmente a la mezcla cemento-zeolita hasta que se vertió

toda el agua en la mezcla. A continuación se continuó mezclando por 45 segundos adicionales.

9. A seguir se cambió a la máxima velocidad de rotación y se mezcló a dicha velocidad por alrededor de 2 min.
10. Los moldes se llenaron en dos capas, luego de la primera capa se apisonó. La presión de apisonado debió ser la suficiente para asegurar el correcto llenado del molde. Las 4 rondas de apisonado de los moldes se completaron en cada compartimento del molde antes de seguir con otro, y se efectuaron según indica la figura 3.11.



**FIGURA 3.11 ORDEN DE APISONAMIENTO DE ESPECÍMENES (1)**

11. Una vez completado el apisonado de la primera capa en todos los compartimentos del molde, se llenaron los compartimentos

y se volvió a apisonar tal como en el paso anterior. La mezcla se continuó agitando mientras se llenaron los moldes.

12. Al terminar el primer y segundo apisonado se compactó la mezcla dentro de los moldes, dando pequeños golpes en la base y lados de la misma, para que salgan las burbujas que se formaron en el interior al adicionar la mezcla.
13. Se removió el exceso de mezcla de los moldes, de forma que las probetas tendrán la forma cúbica deseada.
14. Finalmente, se cubrieron los moldes con un plástico para evitar la pérdida excesiva de humedad de las probetas. Se dejó reposar de esta forma por 24 horas.
15. Se repitieron los pasos anteriores, pero con los porcentajes de zeolita y cemento tipo I requeridos para preparar las probetas de validación.

### ***Desmolde y almacenamiento de las probetas***

1. Se retiró el plástico que cubre los moldes; y se removió el exceso de mezcla de la cara superior.
2. Se abrieron los moldes y se retiraron todas las probetas de dichos moldes.
3. Se identificó cada probeta en su cara superior, de acuerdo al código establecido.
4. Se agruparon todas las probetas y se las almacenaron de tal forma que estuvieron expuestas al ambiente del laboratorio.

### ***Ensayo de las probetas***

1. Las probetas se ensayaron inmediatamente luego de ser removidas de su lugar de curado. Todos los especímenes de prueba para un tiempo de curado dado, fueron ensayados dentro del rango permisible descrito en la Tabla 7.

**VARIACIONES PERMISIBLES EN LOS TIEMPOS DE CURADO (1)**

<b>Tiempo de Curado</b>	<b>Tolerancia Permitida</b>
24 h	$\pm \frac{1}{2}$ h
7 días	$\pm 1$ h
14 días	$\pm 3$ h
28 días	$\pm 12$ h

2. Se tomaron las lecturas de temperaturas y humedad relativa del laboratorio.
  
3. Antes del ensayo cada espécimen fue limpiado para obtener una condición de superficie seca, y se removieron los granos sueltos o incrustaciones de las caras que estaban en contacto con los bloques de soporte de la máquina de ensayos. Se aseguró que dichas caras fueron completamente planas, en caso de existir una curvatura se maquinó la superficie hasta aplanarla o se descartó el espécimen.
  
4. Se aplicó la carga, en las superficies de los especímenes que estuvieron en contacto con las superficies realmente planas del molde. Cada probeta se colocó cuidadosamente en la

máquina de ensayos por debajo del centro de la parte superior de los soportes de bloque.

5. Se encendió la máquina de ensayos universal y el medidor de deformación.
6. Se marcó el esfuerzo obtenido para cada deformación de 5 milésimas de pulgada, hasta la ruptura del espécimen.
7. Una vez terminado el ensayo, se retiró el espécimen de la máquina universal y se lo depositó en un recipiente.
8. A continuación se recopiló todos los datos de carga para cada deformación, para dicho espécimen.
9. Se repitieron los pasos anteriores hasta ensayar en total los 3 especímenes correspondientes al día de ensayo. Finalmente, se colocaron fragmentos de los 3 especímenes ensayados en una funda con su debida identificación.

### **3.2. Diseño experimental**

El diseño experimental que se empleó fue un diseño factorial con el cual se pretende analizar el efecto de dos factores (variables independientes) a varios niveles (valores que toma cada factor) en la respuesta (variable dependiente).

#### ***Variables independientes***

Esta tesis trata exclusivamente en efectuar la experimentación con solo una variable independiente, la cual es el tiempo de curado. El tiempo de curado fue analizado en 4 niveles los cuales comprenden: 7, 14, 28 y 45 días.

Adicionalmente, se analizaron los datos obtenidos en el grupo con el mismo tipo curado y tipo de zeolita para analizar finalmente el efecto de diferentes porcentajes de zeolita. El porcentaje de zeolita se estudió en 5 niveles: 5%, 10%, 15%, 20% y 25%.

#### ***Variables dependientes***

La variable dependiente es la que manifiesta la influencia de las variables independientes, es decir la respuesta deseada. Para este estudio se tomó como variable dependiente la resistencia a la compresión uniaxial, debido a que es un indicador que permitirá conocer el efecto de las variables independientes (porcentaje de zeolita y tiempo de curado) en las propiedades mecánicas de la pasta de cemento.

### ***Matriz de Diseño Experimental***

A continuación se detalla la matriz de diseño experimental donde se puede observar claramente que se pretende obtener una respuesta para cada combinación de factores. Para cada combinación de factores se ensayaran 3 especímenes.

**TABLA 7**  
**MATRIZ DE DISEÑO EXPERIMENTAL**

	<b>5%</b>	<b>10%</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>25%</b>
<b>7 Días</b>	S1	S5	S9	S13	S17
<b>14 Días</b>	S2	S6	S10	S14	S18
<b>21 Días</b>	S3	S7	S11	S15	S19
<b>28 Días</b>	S4	S8	S12	S16	S20

### ***Matriz de Diseño Experimental de Validación***

A continuación se detalla la matriz de diseño experimental para las muestras de validación del modelo de simulación. Para lograr validar el modelo se escogieron porcentajes intermedios que serán ensayados a días de curado intermedios. Al igual que para las muestras de análisis, para cada combinación de factores se ensayaron 3 especímenes.

**TABLA 8**

#### **MATRIZ DE DISEÑO EXPERIMENTAL PARA VALIDACIÓN**

	<b>7.5%</b>	<b>12.5%</b>	<b>17.5%</b>	<b>22.5%</b>	<b>27.5%</b>
<b>4 Días</b>	V1	V5	V9	V13	V17
<b>11 Días</b>	V2	V6	V10	V14	V18
<b>18 Días</b>	V3	V7	V11	V15	V19
<b>25 Días</b>	V4	V8	V12	V16	V20

### **3.3. Simulación Computacional**

A partir de la información recolectada de los ensayos de compresión, se procedió a aplicar un modelo informático que simule el

comportamiento de las pasta de cemento a partir de sus propiedades.

### ***Variables de Entrada***

Las propiedades o variables de entrada requeridas para la simulación son las siguientes:

- *Módulo de Elasticidad, E*: es la propiedad que define el modulo de elasticidad de la parte elástica para la muestra simulada.
- *Esfuerzo de Fluencia,  $\sigma_{y0}$* : es el esfuerzo que define donde termina la parte elástica para la muestra simulada.
- *Parámetro a*: parámetro adimensional que relaciona el esfuerzo de fluencia con el esfuerzo máximo de ruptura. Esta relación se define de la siguiente forma:

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

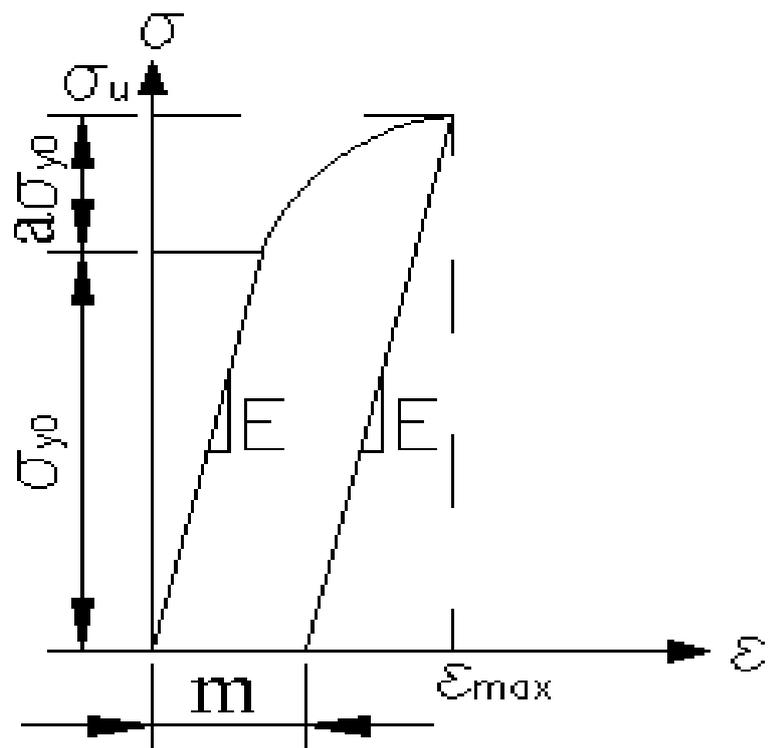
- *Parámetro m*: parámetro adimensional que relaciona la deformación unitaria donde ocurre el esfuerzo máximo, con el esfuerzo máximo de ruptura (el cual es la deformación unitaria

máxima para la pasta de cemento) y el módulo de elasticidad.

Esta relación se define de la siguiente manera:

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

Estas variables fueron obtenidas a partir de una curva esfuerzo–deformación experimental, tal como se muestra en la figura 3.12 a continuación:



**FIGURA 3.12 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS VARIABLES DE ENTRADA PARA LA SIMULACIÓN**

### ***Variables adicionales de entrada***

Son las variables que proveen información de cómo se desarrolla la simulación:

- *Límite máximo de deformación, ef:* es el máximo valor de deformación para el cual se va a simular la gráfica esfuerzo-deformación, no necesariamente debe ser la deformación máxima de la muestra simulada.
- *Intervalos de deformación, de:* es la magnitud de cada partición de deformación a la cual se aplicará la simulación; conforme menor es dicho intervalo se obtiene mayor precisión, pero mayor tiempo de procesamiento.
- *Número de intervalos de deformación, n:* define el número de particiones de longitud definidas por *de*.
- *Tolerancia, tol:* define la tolerancia para aplicar el método iterativo de Newton–Raphson.

### ***Asunciones del Modelo de Simulación***

El modelo de simulación asume básicamente dos formas de comportamiento para el material: comportamiento elástico y plástico.

Para el régimen elástico se asumió un comportamiento lineal definido, cuya pendiente está determinada por el módulo de elasticidad. El régimen elástico ocurre mientras el esfuerzo sea menor al esfuerzo de fluencia del material.

Para el régimen plástico se definió un comportamiento no lineal con pendiente variable definida por el módulo de plasticidad  $H'$  la cual se define a partir de un esfuerzo de fluencia variable definido de la siguiente forma:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left( 1 + \frac{2a}{m + \lambda} \sqrt{m \lambda} \right)$$

Donde,  $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$

Finalmente, se tiene que el módulo de plasticidad definido como:

$$H'(\Delta\lambda) = \frac{\delta\sigma_y}{\delta\lambda}(\Delta\lambda)$$

### ***Lógica del Modelo de Simulación***

A continuación, se describe la secuencia de las operaciones a programar en el modelo de simulación para cada intervalo de deformación unitaria:

1. Se calculó un esfuerzo de prueba, considerando dicho esfuerzo parte de la zona elástica:

$$\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n + E\Delta\varepsilon$$

2. Se determina si el esfuerzo de prueba está en la zona elástica:

$$F_{n+1}^{tr} = |\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{y,n} > 0$$

3. En caso de ser negativo, se establecieron los valores:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}$$

$$\sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n}$$

4. En caso de ser positivo, se aplica el método de Newton-Rapshon y se itera hasta conseguir:

$$F_{n+1}(\Delta\lambda) = F_{n+1}^{tr} - \Delta\lambda(E + H'_{n+1}(\Delta\lambda)) = 0$$

5. Se establecieron los valores:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\lambda \operatorname{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr})$$

$$\sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n} + H'_{n+1}\Delta\lambda$$

### ***Programación del Modelo de Simulación en MATLAB***

De esta forma el modelo de simulación tiene por objetivo recibir datos de porcentaje y tiempo de curado, y simular su comportamiento mediante el gráfico de su respectiva curva esfuerzo-deformación. La programación completa del modelo de simulación en MATLAB puede ser consultada en el Apéndice 1.

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

### 4.1. Ensayo de compresión

A partir de la experimentación, se obtuvieron los datos de esfuerzo de compresión y deformación unitaria para cada una de las 3 muestras ensayadas cada día de curado.

Para los 7 días de curado, se utilizó la máquina de ensayos hidráulica automática (denominada en las tablas con MEUA), cuyas unidades de trabajo son Kg-f; para los días 14, 21 y 28 se empleó la máquina de ensayos hidráulica manual (denominada en las tablas como MEUM), cuyas unidades de trabajo son Lb-f.

A continuación, se muestran en tablas los esfuerzos y deformaciones unitarias obtenidas para cada muestra, así como las condiciones

ambientales y el tipo de máquina empleada para cada ensayo. Los valores en color rojo son los que se ubican en la parte plástica del la curva esfuerzo-deformación de la muestra.

**TABLA 9**  
**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES**  
**PARA LAS MUESTRAS DE 5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS**  
**7 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 7 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	26.0 °C	Humedad	68.7% HR	Máquina	MEUA
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 7 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	0.7840	0.00254	0.9016	0.00254	1.1760
0.00508	2.3520	0.00508	2.3912	0.00508	3.3320
0.00762	5.2920	0.00762	5.2920	0.00762	6.2720
0.01016	9.2512	0.01016	9.0160	0.01016	9.9960
0.01270	14.8960	0.01270	12.9360	0.01270	15.0920
0.01524	22.5400	0.01524	18.1104	0.01524	20.5800
0.01778	31.9480	0.01778	24.1080	0.01778	26.4600
0.02032	43.1200	0.02032	30.5760	0.02032	32.3400
0.02184	46.0600	0.02286	37.8280	0.02286	37.8280
		0.02540	45.0800	0.02540	44.1000
		0.02794	51.5480	0.02794	50.5680
		0.03048	55.4680	0.03048	55.4680
		0.03302	59.7800	0.03200	57.8200

TABLA 10

**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES  
PARA LAS MUESTRAS DE 5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS  
14 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 14 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	26.1 °C	Humedad	69.2% HR	Máquina	MEUM
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 7 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	3.5562	0.00254	3.9118	0.00254	2.8450
0.00508	15.1140	0.00508	10.6687	0.00508	9.2462
0.00762	27.5607	0.00762	25.9604	0.00762	24.0045
0.01016	40.5516	0.01016	41.7856	0.01016	41.4300
0.01270	52.4543	0.01270	52.4543	0.01270	56.8996
0.01524	60.4558	0.01524	64.0120	0.01524	63.1230
0.01778	64.0120	0.01778	66.6792	0.01778	67.5683

TABLA 11

**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES  
PARA LAS MUESTRAS DE 5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS  
21 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 21 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	26.0 °C	Humedad	68.7% HR	Máquina	MEUM
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 7 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	1.4225	0.00254	0.8891	0.00254	1.9559
0.00508	2.3115	0.00508	1.7781	0.00508	8.0015
0.00762	4.2675	0.00762	3.5562	0.00762	20.0927
0.01016	12.6246	0.01016	11.5577	0.01016	43.2081
0.01270	32.8951	0.01270	36.2735	0.01270	65.7901
0.01524	59.5668	0.01524	56.8996	0.01524	73.7916
0.01778	64.0120	0.01778	64.0120	0.01778	76.4588
0.02032	66.6792	0.02032	66.6792		

TABLA 12

**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES  
PARA LAS MUESTRAS DE 5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS  
28 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 28 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	25.9 °C	Humedad	69.2% HR	Máquina	MEUM
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 28 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	1.4225	0.00254	2.4894	0.00254	3.3784
0.00508	2.8450	0.00508	9.2462	0.00508	11.5577
0.00762	6.0456	0.00762	21.8708	0.00762	23.6489
0.01016	15.1140	0.01016	34.3176	0.01016	35.3844
0.01270	24.0045	0.01270	48.8981	0.01270	47.1200
0.01524	36.4513	0.01524	57.7886	0.01524	59.5668
0.01778	44.2750	0.01778	62.2339	0.01778	68.4573
0.02032	56.0105	0.02032	68.4573	0.02032	71.1245
0.02286	64.0120			0.02286	73.7916
0.02540	65.7901				
0.02794	67.5683				

A partir de estos datos, se determinó el esfuerzo máximo de compresión de cada muestra, así como los parámetros necesarios para elaborar el modelo que permita simular el comportamiento de la muestra de 5% de zeolita a diferentes días de curado.

TABLA 13

**RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA MUESTRA DE 5% DE  
ZEOLITA A LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
5	7	46.0600	43.1200	2122.047	0.02184	0.0682	0.00100
5	7	59.7800	51.5480	1844.954	0.03302	0.1597	0.00100
5	7	57.8200	55.4680	1819.816	0.03200	0.0424	0.00100
5	14	64.0120	52.4543	4130.260	0.01778	0.2203	0.00228
5	14	66.6792	64.0120	4200.265	0.01778	0.0417	0.00191
5	14	67.5683	56.8996	4480.282	0.01778	0.1875	0.00270
5	21	66.6792	59.5668	3908.580	0.02032	0.1194	0.00326
5	21	66.6792	56.8996	3733.569	0.02032	0.1719	0.00246
5	21	76.4588	65.7901	5180.326	0.01778	0.1622	0.00302
5	28	67.5683	64.0120	2800.176	0.0279	0.0556	0.00381
5	28	68.4573	48.8981	3850.243	0.0203	0.4000	0.00254
5	28	73.7916	59.5668	3908.580	0.0229	0.2388	0.00398

Las muestras de validación de 7.5% de zeolita se ensayaron a los 4, 11, 18 y 25 días de curado. Para los 4 y 11 días de curado se empleo la máquina de ensayos hidráulica automática (denominada en las tablas con MEUA), cuyas unidades de trabajo son Kg-f; para los días 18 y 25 se utilizó la máquina de ensayos hidráulica manual (denominada en las tablas como MEUM), cuyas unidades de trabajo son Lb-f.

A continuación se muestran en tablas los esfuerzos y deformaciones unitarias obtenidas para cada muestra de validación, así como las condiciones ambientales y el tipo de máquina empleada para cada ensayo.

**TABLA 14**  
**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES**  
**PARA LAS MUESTRAS DE VALIDACIÓN DE 7.5% DE ZEOLITA**  
**ENSAYADAS A LOS 4 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 4 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	25.3 °C	Humedad	69.4% HR	Máquina	MEUA
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 4 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	1.5288	0.00254	0.9800	0.00254	1.1368
0.00508	3.6848	0.00508	1.9600	0.00508	3.7240
0.00762	8.3496	0.00762	5.2920	0.00762	9.2120
0.01016	14.6216	0.01016	9.6040	0.01016	16.3856
0.01270	19.9920	0.01270	16.0720	0.01270	21.9520
0.01524	26.6560	0.01524	22.5400	0.01524	31.3600
0.01778	33.3200	0.01778	29.4000	0.01778	40.7680
0.02032	39.2000	0.02032	35.8680	0.02032	49.9800
0.02286	45.2760	0.02286	43.3160	0.02337	56.2520
0.02540	50.9600	0.02540	49.0000		
0.02794	56.4480	0.02794	55.8600		
0.03048	61.7400	0.03048	57.8200		
0.03302	63.7000				

TABLA 15

**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES  
PARA LAS MUESTRAS DE VALIDACIÓN DE 7.5% DE ZEOLITA  
ENSAYADAS A LOS 11 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 11 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	27.4 °C	Humedad	69.4% HR	Máquina	MEUA
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 11 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	0.9800	0.00254	0.9800	0.00254	0.5880
0.00508	2.1560	0.00508	1.9600	0.00508	1.3720
0.00762	4.9000	0.00762	2.9400	0.00762	2.4696
0.01016	8.6240	0.01016	6.8600	0.01016	4.9000
0.01270	13.9160	0.01270	11.5640	0.01270	9.4080
0.01524	21.1680	0.01524	14.5040	0.01524	14.7000
0.01778	28.4200	0.01778	18.6200	0.01778	20.9720
0.02032	34.3000	0.02032	23.5200	0.02032	25.0880
0.02286	42.1400	0.02286	28.4200	0.02286	33.9080
0.02540	47.6280	0.02540	36.2600	0.02540	40.1800
0.02794	54.8800	0.02794	44.1000	0.02794	47.0400
0.03048	61.7400	0.03048	51.9400	0.03048	53.5080
0.03302	66.6400	0.03302	60.1720	0.03302	59.7800
		0.03556	68.4040	0.03556	62.7200
		0.03810	71.5400		

TABLA 16

**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES  
PARA LAS MUESTRAS DE VALIDACIÓN DE 7.5% DE ZEOLITA  
ENSAYADAS A LOS 18 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 18 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	25.2 °C	Humedad	69.5% HR	Máquina	MEUM
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 18 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	2.3115	0.00254	3.2006	0.00254	2.8450
0.00508	5.6900	0.00508	10.3130	0.00508	10.1352
0.00762	12.8024	0.00762	28.4498	0.00762	18.6702
0.01016	28.4498	0.01016	43.0303	0.01016	39.2963
0.01270	46.5865	0.01270	64.9011	0.01270	55.1215
0.01524	64.0120	0.01524	77.3479	0.01524	68.4573
0.01778	68.4573	0.01778	81.7932	0.01778	72.9026

TABLA 17

**DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES  
PARA LAS MUESTRAS DE VALIDACIÓN DE 7.5% DE ZEOLITA  
ENSAYADAS A LOS 25 DÍAS DE CURADO.**

CONDICIONES DEL ENSAYO A LOS 25 DÍAS DE CURADO					
Temperatura	26.5 °C	Humedad	66.8% HR	Máquina	MEUM
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 25 DÍAS DE CURADO					
Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Deformación Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0.00254	1.9559	0.00254	2.8450	0.00254	2.8450
0.00508	6.9346	0.00508	9.6018	0.00508	8.3571
0.00762	28.9832	0.00762	23.6489	0.00762	22.2264
0.01016	44.0972	0.01016	40.5410	0.01016	36.8069
0.01270	59.5668	0.01270	54.2324	0.01270	52.4543
0.01524	68.4573	0.01524	65.7901	0.01524	64.0120
0.01829	72.0135	0.01778	69.3464	0.01778	65.7901
		0.02032	72.0135		

A partir de estos datos, se determinó el esfuerzo máximo de compresión de cada muestra de validación, así como los parámetros necesarios para validar el modelo que simulará el comportamiento de la muestra de 7.5% de zeolita a diferentes días de curado.

**TABLA 18**  
**RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA MUESTRA DE 7.5% DE**  
**ZEOLITA A LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
7.5	4	63.7000	61.7400	2025.591	0.03302	0.0317	0.00157
7.5	4	57.8200	55.8600	1999.284	0.03048	0.0351	0.00156
7.5	4	56.2520	49.9800	2459.646	0.02337	0.1255	0.00100
7.5	11	66.6400	61.7400	2025.591	0.03302	0.0794	0.00100
7.5	11	71.5400	68.4040	1923.622	0.03810	0.0458	0.00100
7.5	11	62.7200	59.7800	1810.418	0.03556	0.0492	0.00100
7.5	18	68.4573	64.0120	4200.265	0.01778	0.0694	0.00148
7.5	18	81.7932	77.3479	5110.322	0.01778	0.0575	0.00177
7.5	18	72.9026	68.4573	4491.950	0.01778	0.0649	0.00155
7.5	25	72.0135	59.5668	4690.295	0.0183	0.2090	0.00293
7.5	25	72.0135	65.7901	4316.939	0.0203	0.0946	0.00364
7.5	25	65.7901	64.0120	4200.265	0.0178	0.0278	0.00212

#### 4.2. Análisis estadísticos

##### *Análisis de Normalidad de los datos de Resistencia Máxima a la Compresión*

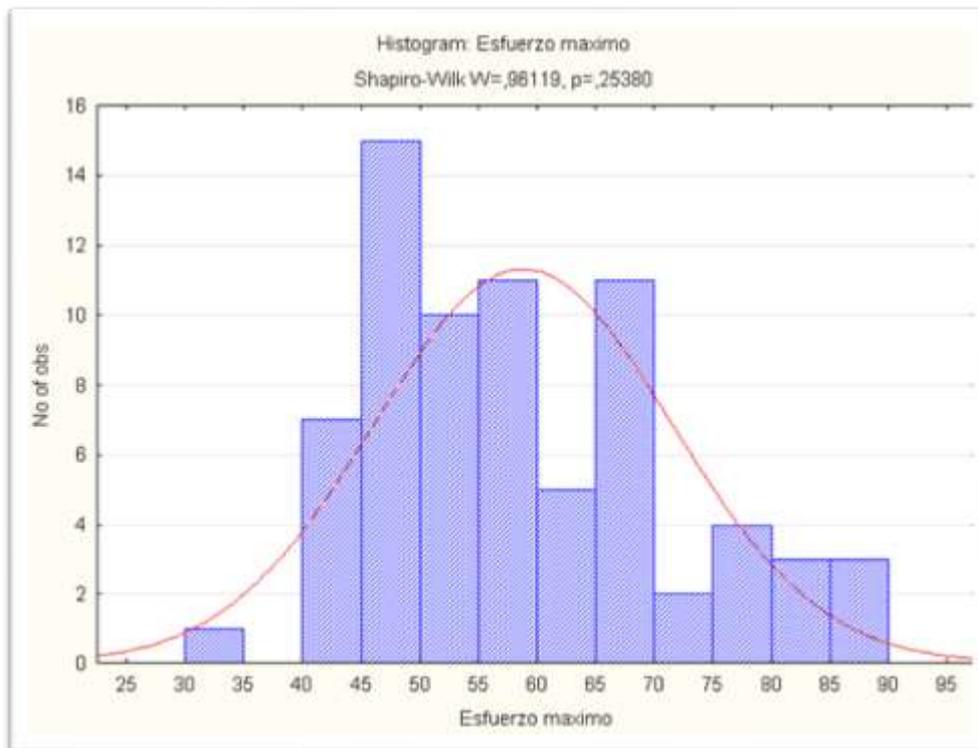
Se analizó estadísticamente, por medio de un contraste de normalidad Shapiro-Wilks, para comprobar si los resultados de

resistencia máxima a la compresión obtenidos en los ensayos de compresión, provienen de una población con distribución normal

Entonces en este análisis se consideraron las siguientes hipótesis nula y alterna respectivamente:

- ◆ *H0*: La muestra proviene de una población normal
- ◆ *H1*: La muestra no proviene de una población normal

Por medio del programa STATISTICA con los datos se obtuvieron los siguientes resultados con una confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ):



**FIGURA 4.1 HISTOGRAMA DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y ENSAYADA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Por el contraste de normalidad Shapiro-Wilks se obtuvo un valor  $p = 0.25380$  mayor al valor de significancia escogido  $p > 0.05$ , la hipótesis nula es aceptada. Entonces, se concluye que, los resultados de resistencia máxima a la compresión obtenidos en los ensayos de compresión, provienen de una población con distribución normal.

***Análisis de varianza del Esfuerzo de Compresión de una pasta de cemento con 5% de zeolita a diferentes días de curado***

Se analizó estadísticamente, por medio de un análisis de varianza ANOVA de una vía, el efecto que tiene el tiempo de curado en el esfuerzo de compresión de una pasta de cemento con 5% de zeolita.

Se tomaron como variables independientes el porcentaje de zeolita y el tiempo de curado; y como variable dependiente el esfuerzo máximo de compresión. A continuación se muestra en la tabla 20, los datos empleados para este análisis.

**TABLA 19**  
**DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO DE COMPRESIÓN PARA UN**  
**PORCENTAJE DE ZEOLITA DE 5% A DIFERENTES DÍAS DE**  
**CURADO**

Variables Independientes		Variable Dependiente
Porcentaje de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)
5	7	46.0600
5	7	59.7800
5	7	57.8200
5	14	64.0120
5	14	66.6792
5	14	67.5683
5	21	66.6792
5	21	66.6792
5	21	76.4588
5	28	67.5683
5	28	68.4573
5	28	73.7916

Para efectos del análisis se supone que cada condición de tratamiento (día de curado) tiene una población de referencia con una media  $\mu$  y se supone que la varianza  $\sigma^2$  es la misma para cada población y no la afecta el tratamiento. Es decir, se supone que la varianza de las poblaciones de tratamiento es homogénea.

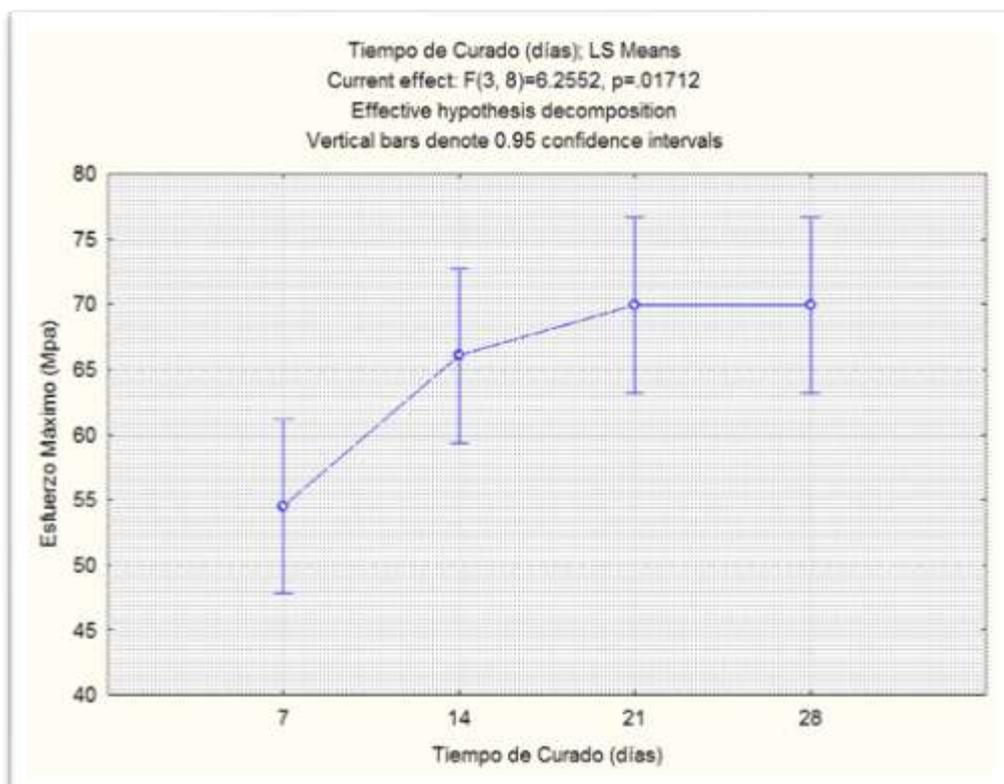
Entonces en este análisis se consideraron las siguientes hipótesis nula y alterna respectivamente:

- ◆  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$
- ◆  $H_1$ : Al menos una de las medias poblacionales no son iguales

Por medio del programa STATISTICA con los datos se obtuvieron los siguientes resultados con una confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ):

**TABLA 20**  
**ERRORES ESTÁNDAR E INTERVALOS DE CONFIANZA DEL**  
**ESFUERZO MÁXIMO PARA CADA DÍA DE CURADO Y UN**  
**PORCENTAJE DE ZEOLITA DE 5%**

Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)				N
	Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
			-95.00%	+95.00%	
7	54.55333	2.911153	47.84020	61.26646	3
14	66.08650	2.911153	59.37336	72.79963	3
21	69.93907	2.911153	63.22594	76.65220	3
28	69.93907	2.911153	63.22594	76.65220	3



**FIGURA 4.2 GRÁFICO DE LAS MEDIAS E INTERVALOS DE CONFIANZA DEL ESFUERZO MÁXIMO PARA CADA DÍA DE CURADO Y UN PORCENTAJE DE ZEOLITA DE 5%**

**TABLA 21**

**TABLA DE ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ESFUERZO MÁXIMO DE LA PASTA DE CEMENTO CON 5% DE ZEOLITA**

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F	p
Intercepto	50902.21	1	50902.21	2002.098	0.000000
Tiempo de Curado (días)	477.11	3	159.04	6.255	0.017124
Error	203.40	8	25.42		

Del análisis de varianza los cuadrados medios requeridos son  $CMT = 159.04$  con 3 grados de libertad y  $CME = 25.42$  con 8 grados de libertad. Como  $p = 0.017124$  es menor al valor de significancia escogido  $p < 0.05$ , la hipótesis nula fue rechazada porque el estadístico observado  $F_0$  está en la región crítica. Al rechazar la hipótesis nula a favor de la alternativa, se concluyó que los tratamientos difieren respecto al esfuerzo máximo de la pasta de cemento con 5% de zeolita bajo diferentes días de curado.

Debido a que el estadístico F correspondiente al efecto del tiempo de curado es significativo, se efectuaron comparaciones post hoc. Entonces por medio de la prueba post hoc de Tukey HSD se determinó donde existen las diferencias significativas.

**TABLA 22**

**TABLA DE PROBABILIDADES PARA LA PRUEBA POST HOC DE TUKEY HSD DEL ESFUERZO DE COMPRESIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 5% DE ZEOLITA PARA CADA DÍA DE CURADO**

	Tiempo de Curado (días)	{1}	{2}	{3}	{4}
		54.553	66.086	69.939	69.939
1	7		0.088140	0.023892	0.023892
2	14	0.088140		0.787438	0.787438
3	21	0.023892	0.787438		1.000000
4	28	0.023892	0.787438	1.000000	

Las probabilidades de la prueba post hoc de Tukey HSD indicaron con un 95% de confianza que, sólo entre los días 7 y 21, 7 y 28 existen diferencias significativas entre las medias del esfuerzo máximo de compresión. Adicionalmente, como las medias de los días 21 y 28 son mayores que la media del día 7 se concluyó que para a partir del día 21 se obtienen valores de esfuerzo máximo significativamente mayores que los obtenidos a 7 días de curado. Esto también se puede notar en la tabla 20 y la figura 4.1, donde se observa claramente que el máximo del intervalo de confianza para el día 7 es menor que el mínimo del intervalo de confianza para los días 21 y 28, adicionalmente se puede ver que dichas medias son iguales.

***Análisis de varianza factorial del Esfuerzo de Compresión de una pasta de cemento con diferentes porcentajes de zeolita y para distintos días de curado***

Se determinó estadísticamente, por medio de un análisis de varianza ANOVA factorial, si las respuestas medias (esfuerzo máximo de compresión) de los tratamientos (porcentaje y días de curado) son iguales, incluyendo el cemento tipo I (porcentaje de zeolita 0%) y del cemento tipo IV. De esta forma se estableció si el porcentaje de

zeolita, el tiempo de curado y la acción combinada de porcentaje de zeolita y tiempo de curado influyen significativamente en el esfuerzo máximo de compresión.

Se tomaron como variables independientes el porcentaje de zeolita y el tiempo de curado; y como variable dependiente el esfuerzo máximo de compresión. A continuación se muestra la tabla de datos empleada para este análisis.

**TABLA 23**

**DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO DE COMPRESIÓN PARA EL CONTROL Y DIFERENTES PORCENTAJE DE ZEOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Tiempo de Curado (días)	Porcentaje de Zeolita (%)						
	0 Control	5	10	15	20	25	Tipo IV
7	80.015	46.060	62.132	49.980	49.000	33.320	49.9570
7	80.015	59.780	57.820	57.820	47.040	45.668	45.2441
7	82.682	57.820	56.252	52.920	44.100	47.236	45.2441
14	87.128	64.012	53.900	59.780	44.100	41.160	50.8996
14	88.017	66.679	57.820	55.860	49.000	45.080	49.9570
14	88.017	67.568	59.780	47.040	55.860	50.960	49.0144
21	63.700	66.679	40.180	48.020	51.940	42.140	45.2441
21	63.308	66.679	44.100	51.940	48.020	43.120	40.5311
21	66.640	76.459	45.080	51.940	54.880	49.980	42.4163
28	77.348	67.568	62.720	59.780	67.568	54.880	40.5311
28	76.459	68.457	65.660	47.040	68.457	45.080	42.4163
28	77.348	73.792	71.540	54.880	65.790	50.960	42.9819

Para efectos del análisis se supone que cada condición de tratamiento (porcentaje de zeolita y día de curado) tiene una población de referencia con una media  $\mu$  y se supone que la varianza  $\sigma^2$  es la misma para cada población y no la afecta el tratamiento. Es decir, se supone que la varianza de las poblaciones de tratamiento es homogénea.

Entonces en este análisis se consideraron las siguientes hipótesis nula y alterna respectivamente:

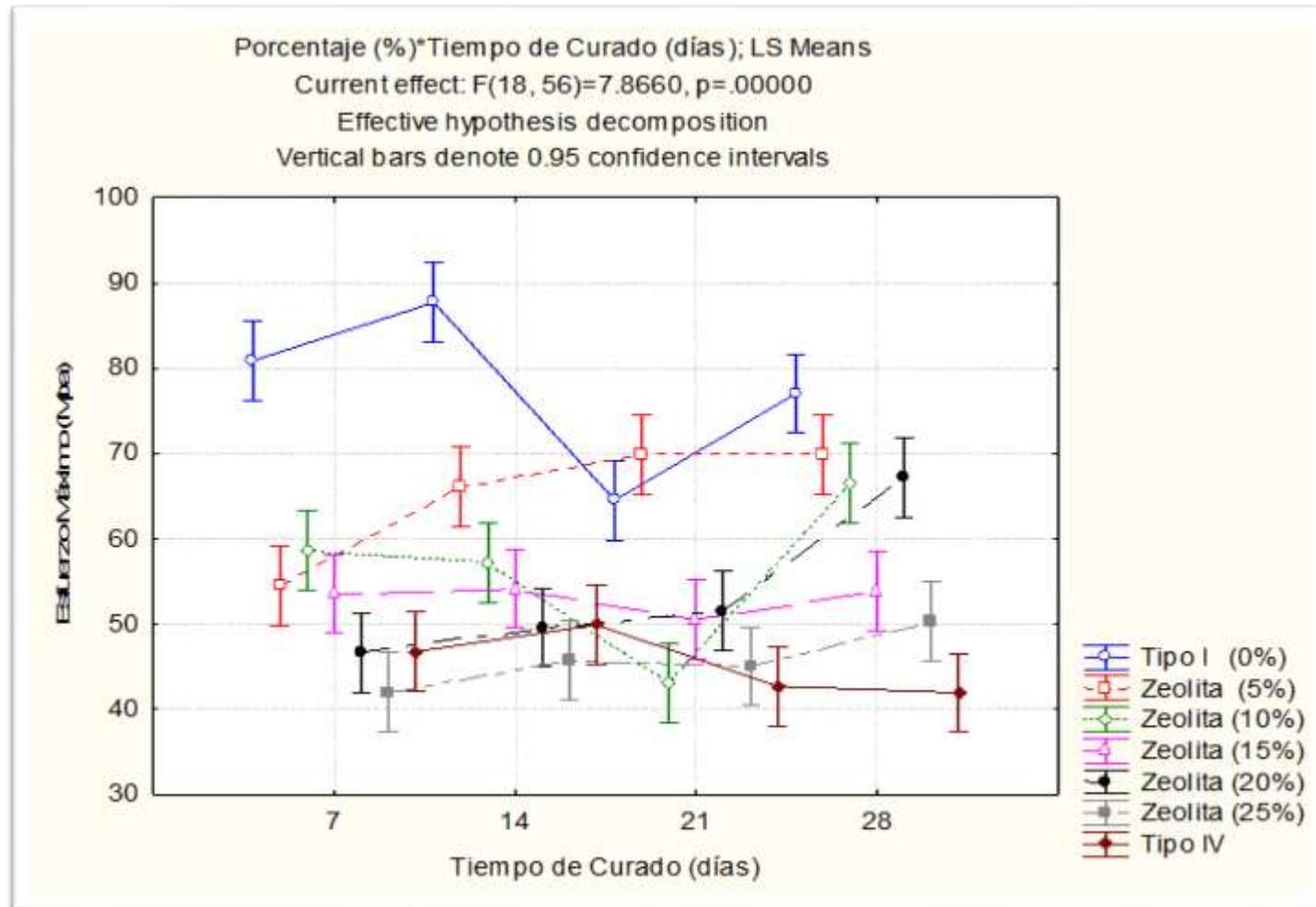
- ◆  $H_0$ : las medias de las poblaciones definidas por los niveles del factor son iguales.
- ◆  $H_1$ : el efecto de las interacciones es nula.

Por medio del programa STATISTICA con los datos se obtuvieron los siguientes resultados con una confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ):

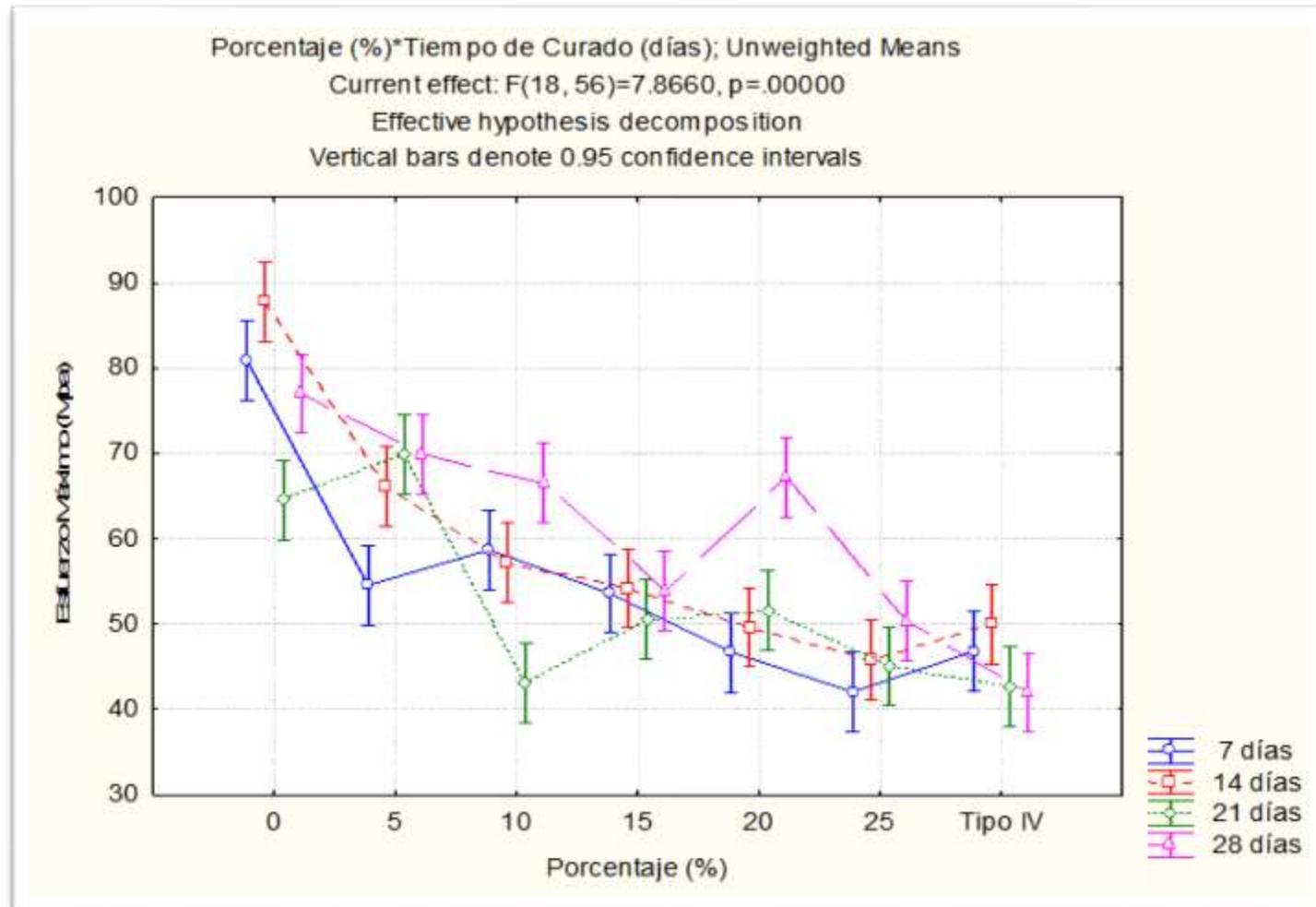
TABLA 24

**ERRORES ESTÁNDAR E INTERVALOS DE CONFIANZA DEL  
ESFUERZO MÁXIMO PARA CADA PORCENTAJE DE ZEOLITA Y  
DÍA DE CURADO**

% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)				N
		Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
				-95.00%	+95.00%	
0	7	80.90410	2.464735	75.94841	85.85978	3
0	14	87.72019	2.464735	82.76451	92.67587	3
0	21	64.54933	2.464735	59.59365	69.50502	3
0	28	77.05152	2.464735	72.09584	82.00720	3
5	7	54.55333	2.464735	49.59765	59.50902	3
5	14	66.08650	2.464735	61.13081	71.04218	3
5	21	69.93907	2.464735	64.98339	74.89475	3
5	28	69.93907	2.464735	64.98339	74.89475	3
10	7	58.73467	2.464735	53.77898	63.69035	3
10	14	57.16667	2.464735	52.21098	62.12235	3
10	21	43.12000	2.464735	38.16432	48.07568	3
10	28	66.64000	2.464735	61.68432	71.59568	3
15	7	53.57333	2.464735	48.61765	58.52902	3
15	14	54.22667	2.464735	49.27098	59.18235	3
15	21	50.63333	2.464735	45.67765	55.58902	3
15	28	53.90000	2.464735	48.94432	58.85568	3
20	7	46.71333	2.464735	41.75765	51.66902	3
20	14	49.65333	2.464735	44.69765	54.60902	3
20	21	51.61333	2.464735	46.65765	56.56902	3
20	28	67.27190	2.464735	62.31622	72.22759	3
25	7	42.07467	2.464735	37.11898	47.03035	3
25	14	45.73333	2.464735	40.77765	50.68902	3
25	21	45.08000	2.464735	40.12432	50.03568	3
25	28	50.30667	2.464735	45.35098	55.26235	3
Tipo IV	7	46.81504	2.72102	1.570980	40.05566	3
Tipo IV	14	49.95698	0.94258	0.544201	47.61547	3
Tipo IV	21	42.73050	2.37212	1.369544	36.83783	3
Tipo IV	28	41.97643	1.28321	0.740861	38.78877	3



**FIGURA 4.3 GRÁFICO DE LAS MEDIAS E INTERVALOS DE CONFIANZA DEL ESFUERZO MÁXIMO POR PORCENTAJE DE ZEOLITA PARA CADA DÍA DE CURADO**



**FIGURA 4.4 GRÁFICO DE LAS MEDIAS E INTERVALOS DE CONFIANZA DEL ESFUERZO MÁXIMO POR DÍA DE CURADO PARA CADA PORCENTAJE DE ZEOLITA**

TABLA 25

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

<b>Efecto</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Grados de Libertad</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Intercepto</b>	270412.6	1	270412.6	16715.72	0.000000
<b>Porcentaje (%)</b>	9296.9	6	1549.5	95.78	0.000000
<b>Tiempo de Curado (días)</b>	914.9	3	305.0	18.85	$1.414 \times 10^{-8}$
<b>Porcentaje (%) * Tiempo de Curado (días)</b>	2290.5	18	127.2	7.87	$1.097 \times 10^{-9}$
<b>Error</b>	905.9	56	16.2		

En esta tabla las filas Porcentaje y Tiempo de Curado recogen los efectos principales, es decir, los efectos individuales de los dichos factores incluidos en el modelo. Los niveles críticos (p) indican que, los grupos definidos por la variable porcentaje poseen esfuerzos máximos medios significativamente diferentes ( $p = 0.000000 < 0.05$ ), de igual manera los esfuerzos máximos medios de los grupos definidos por la variable Tiempo de Curado también difieren significativamente ( $p = 1.414 \times 10^{-8} < 0.05$ ).

La siguiente fila Porcentaje\*Tiempo de Curado contiene información sobre el efecto de la interacción entre las variables Porcentaje y

Tiempo de Curado. El estadístico F correspondiente a este efecto lleva asociado un nivel crítico de  $p = 1.097 \times 10^{-9}$ , lo cual indica que la interacción Porcentaje – Tiempo de Curado genera un efecto significativo sobre el esfuerzo máximo de compresión.

***Comparación del Esfuerzo de Compresión de una pasta de cemento con diferentes porcentajes de zeolita y para diferentes días de curado***

Debido a que los estadísticos F correspondientes a los efectos principales son significativos, se efectuaron comparaciones post hoc. Los estadísticos F del ANOVA factorial efectuado anteriormente únicamente nos permitieron contrastar la hipótesis general de que los promedios comparados son iguales. Al rechazar esa hipótesis, se concluyó que existen diferencias, pero no se sabe dónde se encuentran.

Entonces por medio de la prueba post hoc de Dunnett se determinó si las respuestas medias de los distintos porcentajes de zeolita son menores que el control para cada día de curado. Es decir que se consideró que el tratamiento de control (0% de zeolita) es mejor en cada día de curado, en caso de ser falsa dicha afirmación se

determinaría el porcentaje con el cual se obtiene un mayor esfuerzo máximo.

A partir de los datos empleados para el análisis anterior, ahora solo se analizaron los datos con un mismo día de curado y se consideró el porcentaje de zeolita como variable independiente; y como variable dependiente el esfuerzo máximo de compresión.

De igual manera se supone que cada condición de tratamiento (porcentaje de zeolita y día de curado) tiene una población de referencia con una media  $\mu$  y se supone que la varianza  $\sigma^2$  es la misma para cada población.

Entonces se efectuó un análisis de varianza del esfuerzo máximo de compresión en función de los porcentajes de zeolita, para cada día de curado se consideraron las siguientes hipótesis nula y alterna respectivamente:

- ◆  $H_0: \mu_1 > \mu_k$ , donde  $k$  representa a la media de cada uno de los niveles del factor porcentaje.

- ♦  $H1$ : La media del grupo de control no es menor que la media de la población.

Por medio del programa STATISTICA con los datos se obtuvieron los siguientes resultados con una confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ):

**TABLA 26**

**TABLA DE PROBABILIDADES PARA LA PRUEBA POST HOC DE DUNNETT ( $M < \text{CONTROL}$ ) DEL ESFUERZO DE COMPRESIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO PARA CADA DÍA DE CURADO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA**

	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

Las probabilidades de la prueba post hoc de Dunnett ( $M < \text{Control}$ ) indican que, para los 7 y 14 días de curado todos los grupos definidos por la variable Porcentaje (5, 10, 15, 20 y 25) poseen esfuerzos máximos medios significativamente menores ( $p < 0.05$ ) que los del grupo de control (80.904 y 87.720 MPa respectivamente). Para los 21 y 28 días de curado sólo los grupos 10, 15, 20 y 25

definidos por la variable Porcentaje poseen esfuerzos máximos medios significativamente menores ( $p < 0.05$ ) que los esfuerzos máximos medios del grupo de control (64.549 y 77.052 MPa respectivamente) del grupo control son significativamente mayores sólo para los grupos 10, 15, 20 y 25.

A partir de estos resultados se determinó con un 95% de confianza que la inclusión de cualquier porcentaje de zeolita proveniente de Manglaralto en una pasta de cemento no aumenta significativamente el esfuerzo máximo a la compresión para los 7 y 14 días de curado; mientras que para los 21 y 28 días sólo los porcentajes de zeolita (10, 15, 20 y 25) no muestran un significativo mayor esfuerzo máximo con respecto al grupo de control.

En definitiva se puede indicar con un 95% de confianza que sólo para los 21 y 28 días de curado, los esfuerzos máximos medios de una pasta de cemento con un 5% de zeolita no son significativamente menores que los obtenidos para una pasta de cemento sin porcentaje alguno de zeolita.

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

Para poder implementar el modelo de simulación se necesitó definir los parámetros que requiere el modelo para poder simular la curva esfuerzo deformación. Estos parámetros son:

- *Módulo de Elasticidad, E*: es la propiedad que define el modulo de elasticidad de la parte elástica para la muestra simulada.
- *Esfuerzo de Fluencia,  $\sigma_y$* : es el esfuerzo que define donde termina la parte elástica para la muestra simulada.
- *Parámetro a*: parámetro adimensional que relaciona el esfuerzo de fluencia con el esfuerzo máximo de ruptura. Esta relación se define de la siguiente forma:

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

- *Parámetro m*: parámetro adimensional que relaciona la deformación unitaria donde ocurre el esfuerzo máximo, con el esfuerzo máximo de ruptura (el cual es la deformación unitaria máxima para la pasta de cemento) y el módulo de elasticidad. Esta relación se define de la siguiente manera:

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

A partir de la experimentación se obtuvieron datos de todos estos parámetros, incluyendo el esfuerzo máximo y la deformación máxima, como se tiene en definitiva 6 parámetros, de las cuales solo se requieren 4 y los otros 2 son definidos a partir de éstos se definirán superficies de respuesta para los parámetros:

- ◆ Esfuerzo Máximo
- ◆ Esfuerzo de Fluencia
- ◆ Módulo de Elasticidad
- ◆ Parámetro m

Y los demás términos, se definieron a partir de las siguientes relaciones:

- ◆ Parámetro a:

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

◆ Deformación Máxima:

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

Para determinar las superficies de respuesta de cada parámetro propuesto se utilizó el método de regresión múltiple reducido para los logaritmos naturales de cada parámetro, donde se consideró como modelo completo la expansión binomial de grado 5 de las 2 variables independientes estudiadas (porcentaje de zeolita,  $x$ , y tiempo de curado,  $y$ ). Entonces el modelo de regresión completo sería de la forma:

$$\ln Z = \beta_0 + \beta_{11}x + \beta_{12}y + \beta_{21}x^2 + \dots + \beta_{55}x y^4 + \beta_{56}y^5$$

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

Entonces a partir del modelo completo definido anteriormente y con los logaritmos naturales de los datos experimentales correspondientes a los diferentes porcentajes de zeolita para cada día de curado, se obtuvo por medio del programa STATISTICA con

una confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ) las superficies de respuesta que definieron los parámetros requeridos para la simulación computacional. La tabla a continuación muestra los resultados de la regresión lineal múltiple para cada parámetro:

**TABLA 27**

**RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA SIMULAR 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		
<b>Ln (Esfuerzo Máximo)</b>	0.841215	0.707643	0.685494	2.299637	5	0.459927	0.950078	66	0.014395	31.95023	0.000000
<b>Ln (Esfuerzo de Fluencia)</b>	0.795573	0.632936	0.605128	1.713736	5	0.342747	0.993862	66	0.015059	22.76101	0.000000
<b>Ln (Módulo Elástico)</b>	0.671475	0.450878	0.434962	6.088924	2	3.044462	7.415655	69	0.107473	28.32762	0.000000
<b>Ln (m)</b>	0.373461	0.139473	0.101509	13.58470	3	4.528232	83.81529	68	1.232578	3.673790	0.016270

### **Esfuerzo Máximo**

La superficie de respuesta que define el comportamiento del esfuerzo máximo es:

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

donde  $x$  = porcentaje de zeolita e  $y$  = tiempo de curado.

De acuerdo a la Tabla 26 se pudo deducir a partir del coeficiente de regresión ajustado ( $R^2$  ajustado) en función del número de variables incluidas en la superficie de respuesta; que el 68.55% de la variabilidad observada de Ln (Esfuerzo Máximo) es explicada por la inclusión en el modelo de regresión lineal simple de las 5 variables:  $x$ ,  $x^2y$ ,  $y^4$ ,  $x^3y^2$ , e  $y^5$ . La prueba F (con  $p < 0.05$ ) nos dice con un 95% de confianza que por lo menos una de estas variable es significativa en explicar la variación de Ln (Esfuerzo Máximo). Por último se tiene otro dato importante que es la varianza del error la cual es CM (Residual) = 0.014395.

A continuación se muestran los resultados de la estimación de cada uno de los parámetros que conforman la superficie de respuesta:

TABLA 28

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 ( $\beta$ )	Error Estándar $\beta$	Intervalo de Confianza $\beta$	
						-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
$y$	Removido										
$x^2$	Removido										
$xy$	Removido										
$y^2$	Removido										
$x^3$	Removido										
$x^2y$		0.00008097	0.00002806	2.88590	0.005269	0.00002495	0.00013699	1.76288	0.610861	0.54326	2.98251
$xy^2$	Removido										
$y^3$	Removido										
$x^4$	Removido										
$x^3y$	Removido										
$x^2y^2$	Removido										
$xy^3$	Removido										
$y^4$		-0.00000341	0.00000094	-3.62171	0.000569	-0.00000528	-0.00000153	-3.89865	1.076468	-6.04789	-1.74941
$x^5$	Removido										
$x^4y$	Removido										
$x^3y^2$		-0.00000007	0.00000003	-2.17905	0.032903	-0.00000014	-0.00000001	-0.96490	0.442808	-1.84899	-0.08081
$x^2y^3$	Removido										
$xy^4$	Removido										
$y^5$		0.00000012	0.00000003	3.73675	0.000392	0.00000006	0.00000018	3.93859	1.054013	1.83418	6.04299

La Tabla 27 permite conocer los valores estimados de los coeficientes de la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del esfuerzo máximo, así como los parámetros del modelo de regresión completo que fueron removidos para generar el modelo reducido. Para los coeficientes considerados en el modelo de regresión reducido se detallan su respectivo error estándar e intervalo de confianza.

Es importante además tener en cuenta el valor  $p$  de cada uno de los coeficientes, el cual permite evaluar la hipótesis nula de que dicho coeficiente es cero. Como para todos coeficientes de los términos considerados en el modelo de regresión reducido son  $p < 0.05$ , se concluye con un 95% de confianza que cada uno de dichos términos tiene un efecto demostrable en el esfuerzo máximo.

### ***Esfuerzo de fluencia***

La superficie de respuesta que define el comportamiento del esfuerzo de fluencia es:

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

donde  $x$  = porcentaje de zeolita e  $y$  = tiempo de curado.

De acuerdo a la Tabla 26 a partir del coeficiente de regresión ajustado ( $R^2$  ajustado) en función del número de variables incluidas en la superficie de respuesta; que el 60.51% de la variabilidad observada de Ln (Esfuerzo de Fluencia) es explicada por la inclusión en el modelo de regresión lineal simple de las 5 variables:  $x$ ,  $xy$ ,  $xy^2$ ,  $y^4$ , e  $y^5$ . La prueba F (con  $p < 0.05$ ) nos dice con un 95% de confianza que por lo menos una de estas variable es significativa en explicar la variación de Ln (Esfuerzo de Fluencia). Por último se tiene otro dato importante que es la varianza del error la cual es  $CM$  (Residual) = 0.015059.

A continuación se muestran los resultados de la estimación de cada uno de los parámetros que conforman la superficie de respuesta:

**TABLA 29**

**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 ( $\beta$ )	Error Estándar $\beta$	Intervalo de Confianza $\beta$	
						-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
$y$	Removido										
$x^2$	Removido										
$xy$		0.00268210	0.00098245	2.7300	0.008112	0.000721	0.004644	2.63757	0.966140	0.70861	4.56653
$y^2$	Removido										
$x^3$	Removido										
$x^2y$	Removido										
$xy^2$		-0.00005766	0.00002819	-2.0452	0.044827	-0.000114	-0.000001	-1.56179	0.763643	-3.08646	-0.03713
$y^3$	Removido										
$x^4$	Removido										
$x^3y$	Removido										
$x^2y^2$	Removido										
$xy^3$	Removido										
$y^4$		-0.00000425	0.00000111	-3.8156	0.000302	-0.000006	-0.000002	-5.33412	1.397985	-8.12529	-2.54295
$x^5$	Removido										
$x^4y$	Removido										
$x^3y^2$	Removido										
$x^2y^3$	Removido										
$xy^4$	Removido										
$y^5$		0.00000015	0.00000004	3.8723	0.000250	0.000000	0.000000	5.37536	1.388154	2.60382	8.14690

La Tabla 28 muestra los valores estimados de los coeficientes de la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del esfuerzo de fluencia, así como los parámetros del modelo de regresión completo que fueron removidos para generar el modelo reducido. Para los coeficientes considerados en el modelo de regresión reducido se detallan su respectivo error estándar e intervalo de confianza.

Es importante además tener en cuenta el valor p de cada uno de los coeficientes, el cual permitió evaluar la hipótesis nula de que dicho coeficiente es cero. Como para todos coeficientes de los términos considerados en el modelo de regresión reducido son  $p < 0.05$ , se concluye con un 95% de confianza que cada uno de dichos términos tiene un efecto demostrable en el esfuerzo de fluencia.

### ***Módulo de Elasticidad***

La superficie de respuesta que define el comportamiento del módulo de elasticidad es:

$$E = e^{8.291765 - 0.080388x + 0.001983x^2}$$

donde  $x$  = porcentaje de zeolita e  $y$  = tiempo de curado.

De acuerdo a la Tabla 26 se deduce a partir del coeficiente de regresión ajustado ( $R^2$  ajustado) en función del número de variables incluidas en la superficie de respuesta; que el 43.50% de la variabilidad observada de Ln (Módulo de Elasticidad) es explicada por la inclusión en el modelo de regresión lineal simple de las 2 variables:  $x$  y  $x^2$ . La prueba F (con  $p < 0.05$ ) indica con un 95% de confianza que por lo menos una de estas variable es significativa en explicar la variación de Ln (Módulo de Elasticidad). Por último se tiene otro dato importante que es la varianza del error la cual es  $CM$  (Residual) = 0.107473.

A continuación se muestran los resultados de la estimación de cada uno de los parámetros que conforman la superficie de respuesta:

TABLA 30

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 ( $\beta$ )	Error Estándar $\beta$	Intervalo de Confianza $\beta$	
						-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
$y$	Removido										
$x^2$		0.001983	0.000620	3.19997	0.002078	0.000747	0.003218	1.01807	0.318150	0.38338	1.652762
$xy$	Removido										
$y^2$	Removido										
$x^3$	Removido										
$x^2y$	Removido										
$xy^2$	Removido										
$y^3$	Removido										
$x^4$	Removido										
$x^3y$	Removido										
$x^2y^2$	Removido										
$xy^3$	Removido										
$y^4$	Removido										
$x^5$	Removido										
$x^4y$	Removido										
$x^3y^2$	Removido										
$x^2y^3$	Removido										
$xy^4$	Removido										
$y^5$	Removido										

La Tabla 29 permite conocer los valores estimados de los coeficientes de la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del módulo de elasticidad, así como los parámetros del modelo de regresión completo que fueron removidos para generar el modelo reducido. Para los coeficientes considerados en el modelo de regresión reducido se detallan su respectivo error estándar e intervalo de confianza.

Es importante además tener en cuenta el valor  $p$  de cada uno de los coeficientes, el cual permitió evaluar la hipótesis nula de que dicho coeficiente es cero. Como para todos coeficientes de los términos considerados en el modelo de regresión reducido son  $p < 0.05$ , se concluye con un 95% de confianza que cada uno de dichos términos tiene un efecto demostrable en el módulo de elasticidad.

### ***Parámetro $m$***

La superficie de respuesta que define el comportamiento del parámetro  $m$  es:

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

donde  $x$  = porcentaje de zeolita e  $y$  = tiempo de curado.

De acuerdo a la Tabla 26 se deduce a partir del coeficiente de regresión ajustado ( $R^2$  ajustado) en función del número de variables incluidas en la superficie de respuesta; que el 10.15% de la variabilidad observada de  $\ln(m)$  es explicada por la inclusión en el modelo de regresión lineal simple de las 3 variables:  $xy$ ,  $xy^2$ , y  $xy^3$ . La prueba F (con  $p < 0.05$ ) indica con un 95% de confianza que por lo menos una de estas variable es significativa en explicar la variación de  $\ln(m)$ . Por último, otro dato importante que es la varianza del error la cual es  $CM(\text{Residual}) = 1.232578$ .

A continuación se muestran los resultados de la estimación de cada uno de los parámetros que conforman la superficie de respuesta:

TABLA 31

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 ( $\beta$ )	Error Estándar $\beta$	Intervalo de Confianza $\beta$	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		-6.7086143	0.231060	-29.0341	0.000000	-7.16969	-6.24754				
$x$	Removido										
$y$	Removido										
$x^2$	Removido										
$xy$		-0.0140861	0.005709	-2.4675	0.016128	-0.02548	-0.00269	-2.30957	0.935990	-4.17731	-0.44184
$y^2$	Removido										
$x^3$	Removido										
$x^2y$	Removido										
$xy^2$		0.0014072	0.000544	2.5866	0.011839	0.00032	0.00249	6.35531	2.457052	1.45233	11.25828
$y^3$	Removido										
$x^4$	Removido										
$x^3y$	Removido										
$x^2y^2$	Removido										
$xy^3$		-0.0000351	0.000013	-2.7041	0.008646	-0.00006	-0.00001	-4.41731	1.633572	-7.67705	-1.15757
$y^4$	Removido										
$x^5$	Removido										
$x^4y$	Removido										
$x^3y^2$	Removido										
$x^2y^3$	Removido										
$xy^4$	Removido										
$y^5$	Removido										

La Tabla 30 muestra los valores estimados de los coeficientes de la regresión lineal múltiple del logaritmo natural del parámetro  $m$ , así como los términos del modelo de regresión completo que fueron removidos para generar el modelo reducido. Para los coeficientes considerados en el modelo de regresión reducido se detallan su respectivo error estándar e intervalo de confianza.

Es importante además tener en cuenta el valor  $p$  de cada uno de los coeficientes, el cual permitió evaluar la hipótesis nula de que dicho coeficiente es cero. Como para todos coeficientes de los términos considerados en el modelo de regresión reducido son  $p < 0.05$ , se concluye con un 95% de confianza que cada uno de dichos términos tiene un efecto demostrable en el parámetro  $m$ .

#### **4.3. Resultados de modelo**

A partir de las superficies obtenidas anteriormente se observó el comportamiento de los diferentes parámetros. A continuación se exponen los gráficos obtenidos de las superficies de respuesta y sus curvas de nivel para los diferentes parámetros de interés:

3D Surface Plot of Esfuerzo Máximo (Mpa) against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

8v\*72c

$$\text{Esfuerzo Máximo (Mpa)} = \text{Exp}(4.39645023 - 0.03867087 * x + 0.00008097 * x^2 * y - 0.00000341 * y^4 - 0.00000007 * x^3 * y^2 + 0.00000012 * y^5)$$

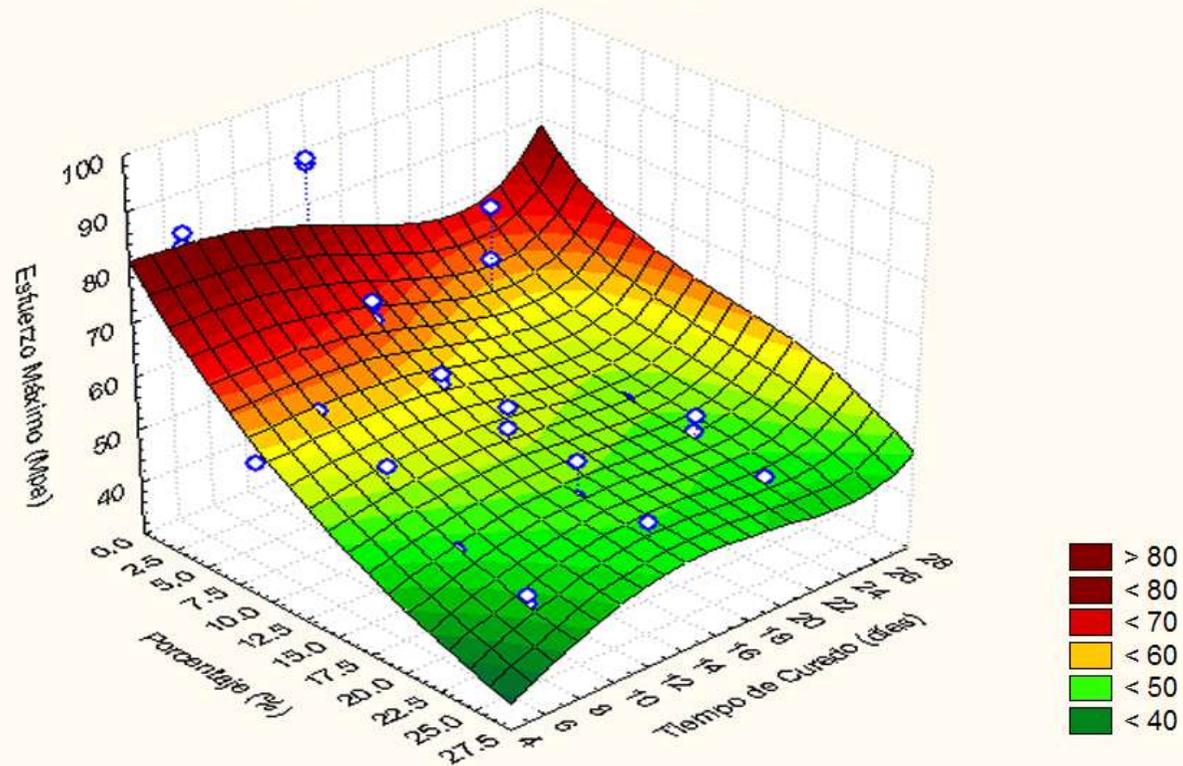
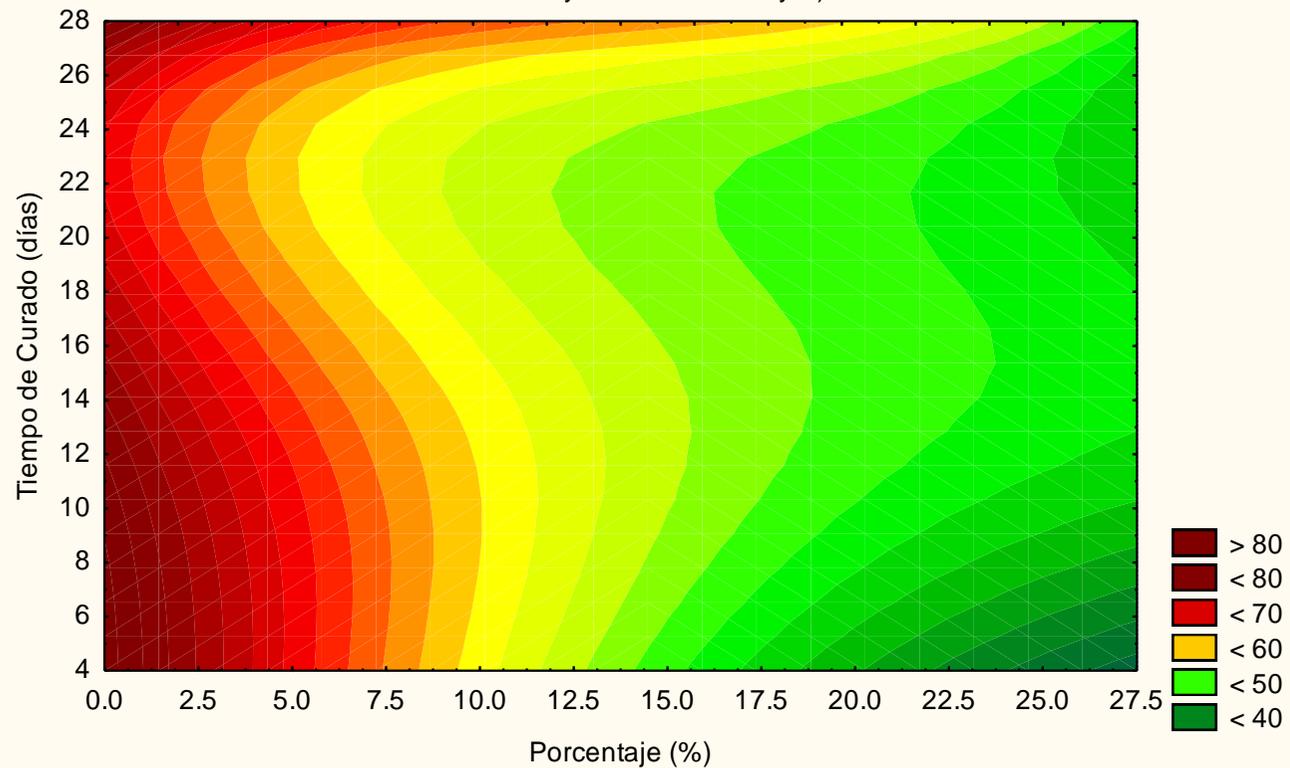


FIGURA 4.5 GRÁFICO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ESFUERZO MÁXIMO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO

3D Contour Plot of Esfuerzo Máximo (Mpa) against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

8v\*72c

$$\text{Esfuerzo Máximo (Mpa)} = \text{Exp}(4.39645023 - 0.03867087 * x + 0.00008097 * x^2 * y - 0.00000341 * y^4 - 0.00000007 * x^3 * y^2 + 0.00000012 * y^5)$$



**FIGURA 4.6 GRÁFICO DE LAS CURVAS DE NIVEL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ESFUERZO MÁXIMO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO**

3D Surface Plot of Esfuerzo de Fluencia (Mpa) against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

$8v^{*72c}$

$$\text{Esfuerzo de Fluencia (Mpa)} = \text{Exp}(4.20033657 - 0.04108693 * x + 0.0026821 * x * y - 0.00005766 * x * y^2 - 0.00000425 * y^4 + 0.00000015 * y^5)$$

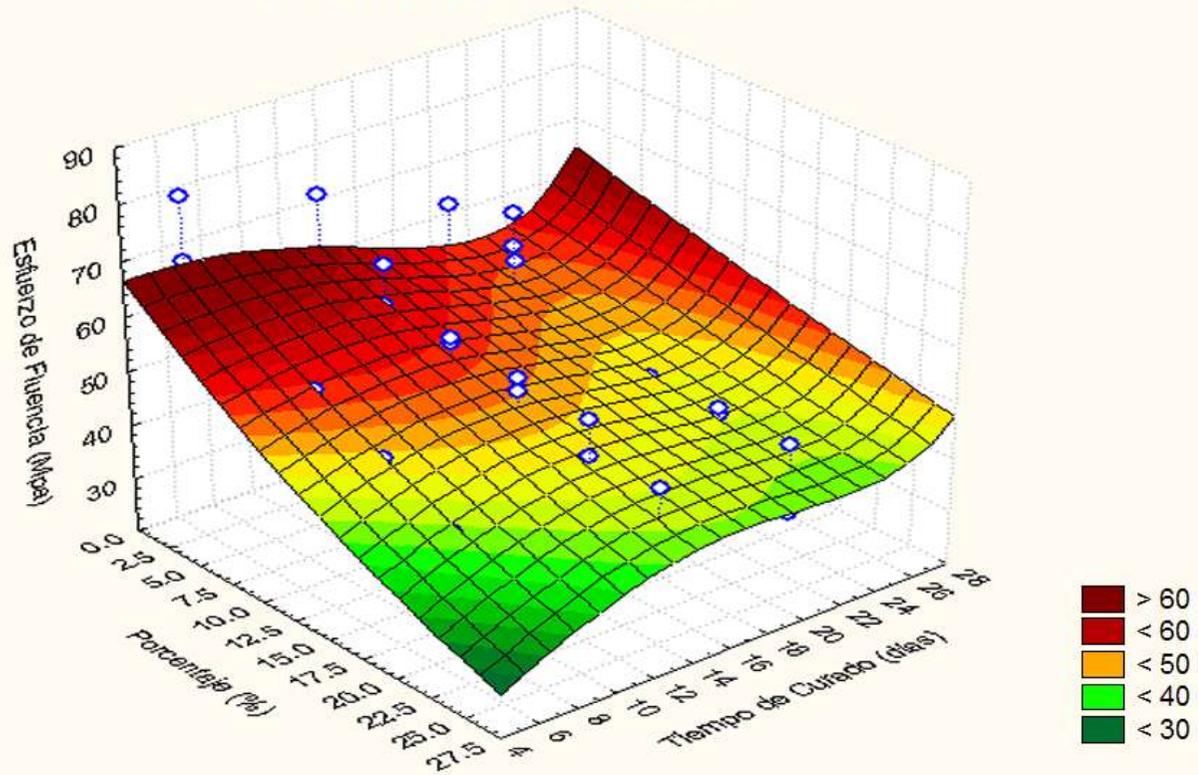
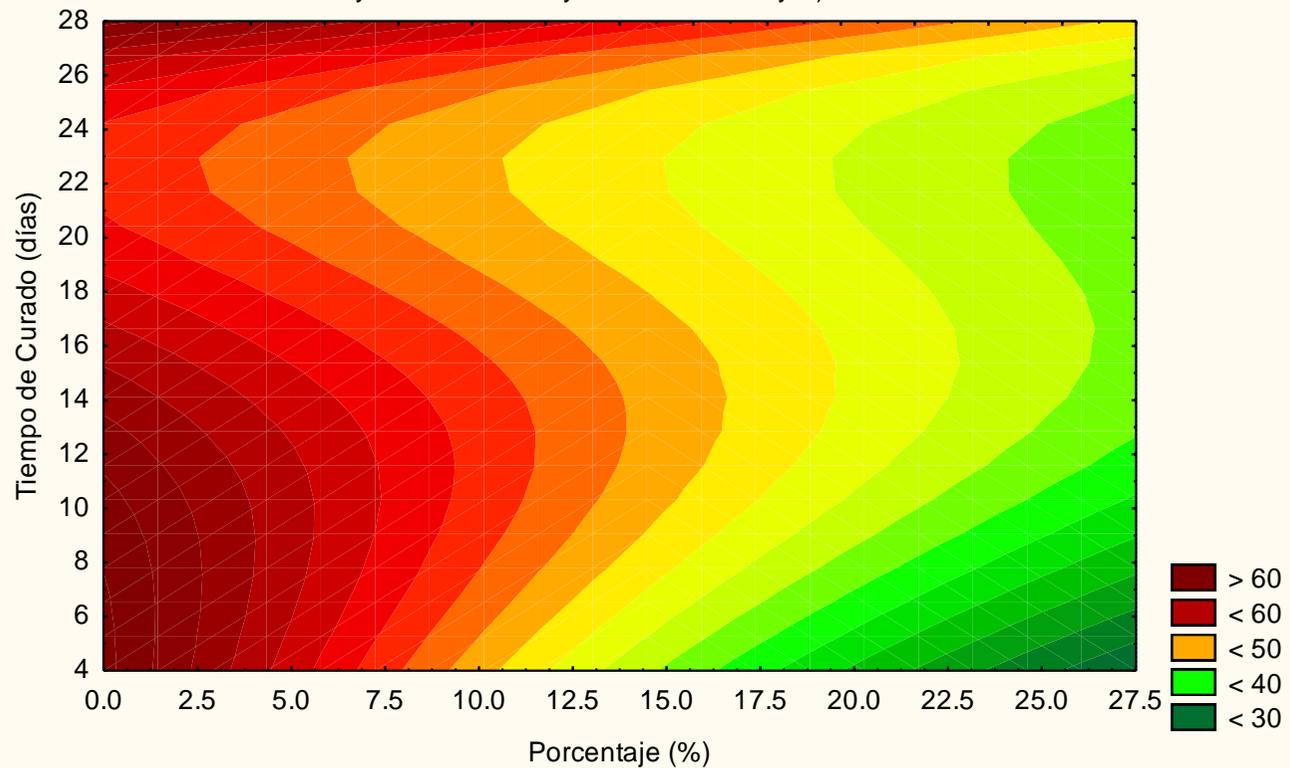


FIGURA 4.7 GRÁFICO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ESFUERZO DE FLUENCIA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO

3D Contour Plot of Esfuerzo de Fluencia (Mpa) against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

8v\*72c

$$\text{Esfuerzo de Fluencia (Mpa)} = \text{Exp}(4.20033657 - 0.04108693 * x + 0.0026821 * x * y - 0.00005766 * x * y^2 - 0.00000425 * y^4 + 0.00000015 * y^5)$$

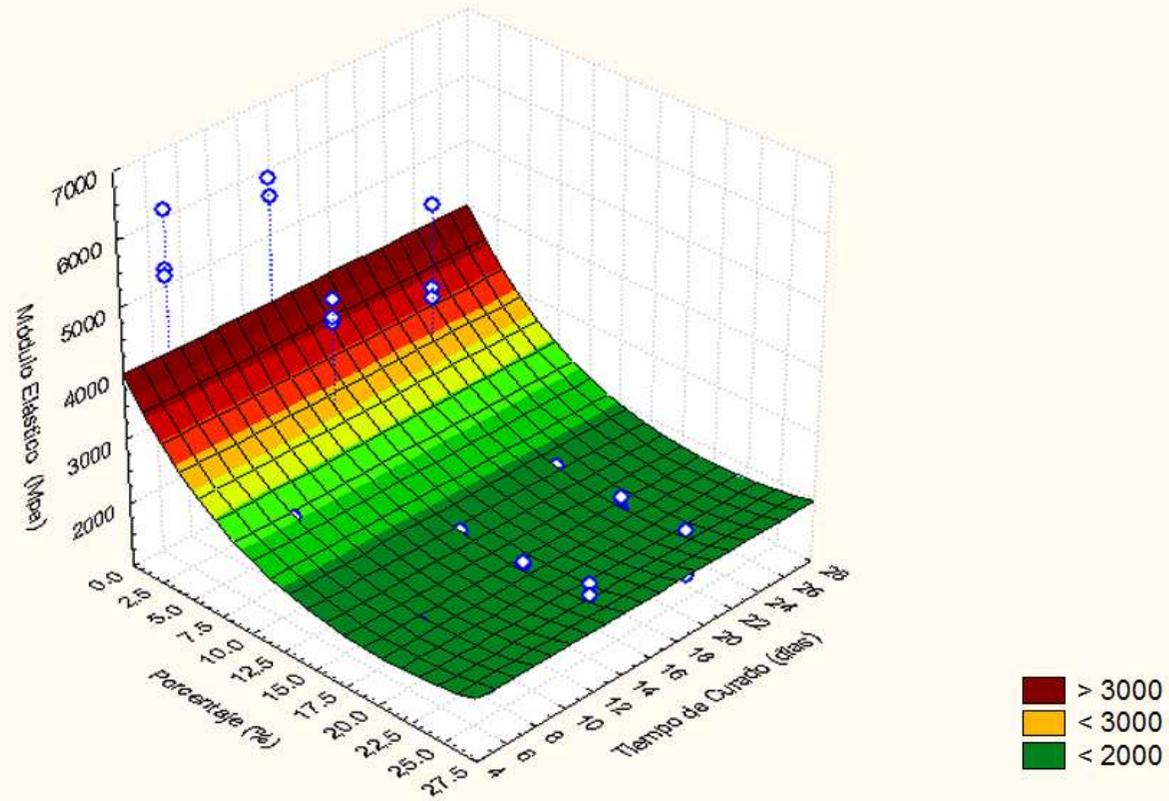


**FIGURA 4.8 GRÁFICO DE LAS CURVAS DE NIVEL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL ESFUERZO DE FLUENCIA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO**

3D Surface Plot of Módulo Elástico (Mpa) against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

$8v^{\wedge}72c$

$$\text{Módulo Elástico (Mpa)} = \text{Exp}(8.29176537 - 0.08038786 * x + 0.00198252 * x^{\wedge}2)$$

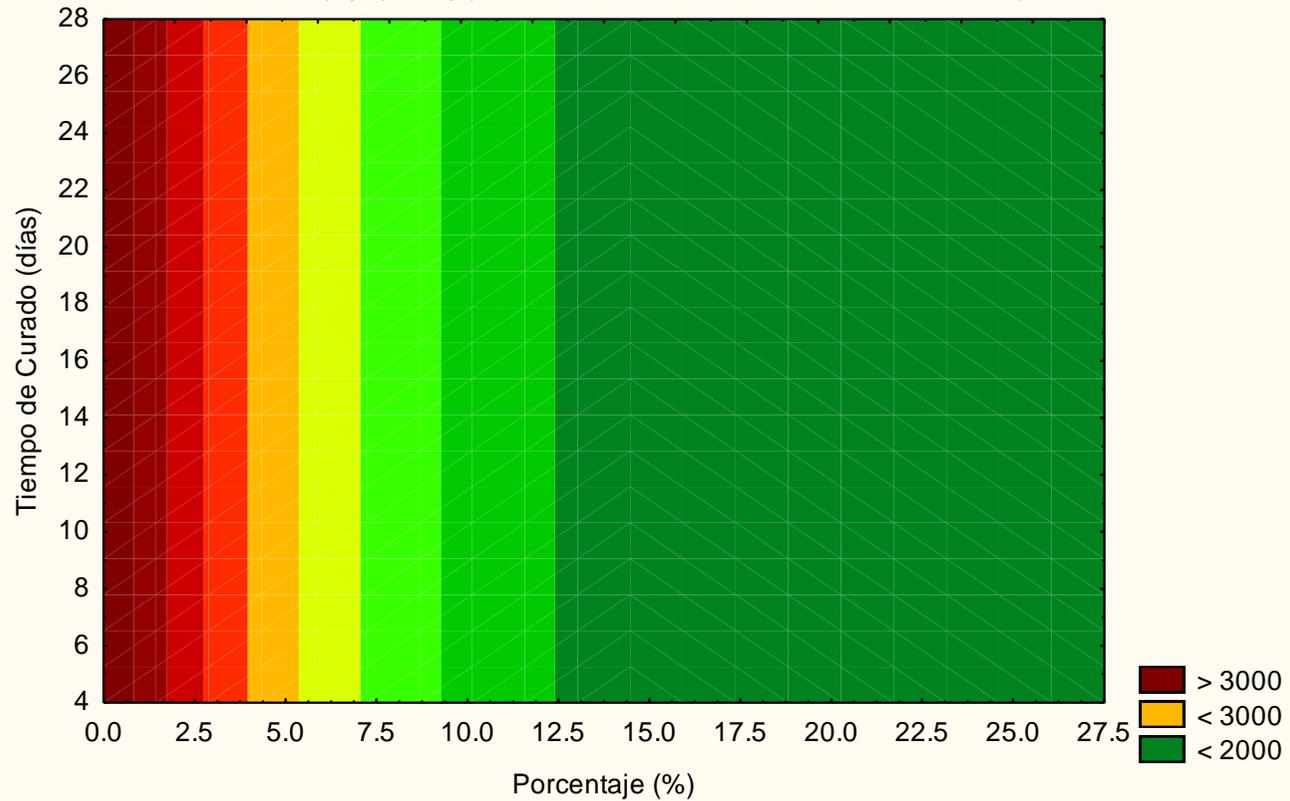


**FIGURA 4.9 GRÁFICO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL MÓDULO ELÁSTICO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO**

3D Contour Plot of Módulo Elástico (Mpa) against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

$8v*72c$

$$\text{Módulo Elástico (Mpa)} = \text{Exp}(8.29176537 - 0.08038786 * x + 0.00198252 * x^2)$$



**FIGURA 4.10 GRÁFICO DE LAS CURVAS DE NIVEL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL MÓDULO ELÁSTICO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO**

3D Surface Plot of Deformación Máxima against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

8v\*72c

$$\text{Deformación Máxima} = \text{Exp}(-6.70861434 - 0.01408608 * x * y + 0.00140719 * x^2 * y^2 - 0.00003506 * x^2 * y^3) + \text{Exp}(-3.89531513 + 0.04171699 * x - 0.00198252 * x^2 + 0.00008097 * x^2 * y - 0.00000341 * y^4 - 0.00000007 * x^3 * y^2 + 0.00000012 * y^5)$$

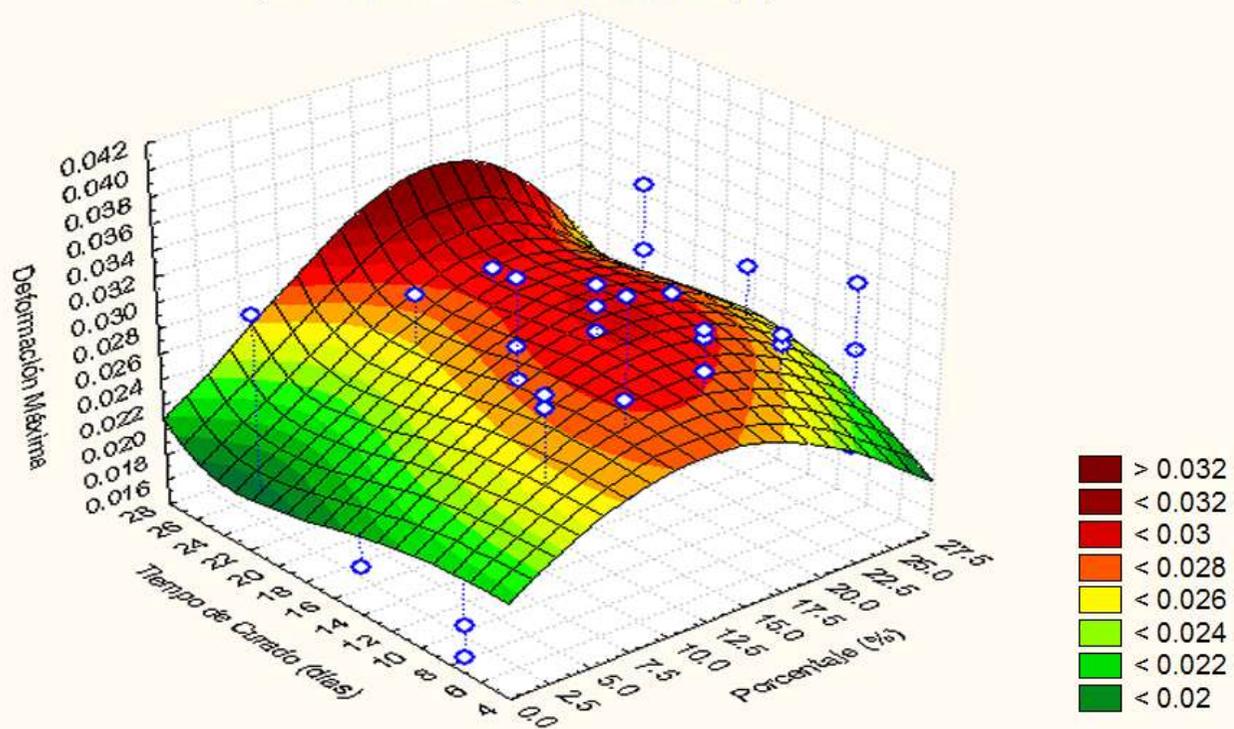
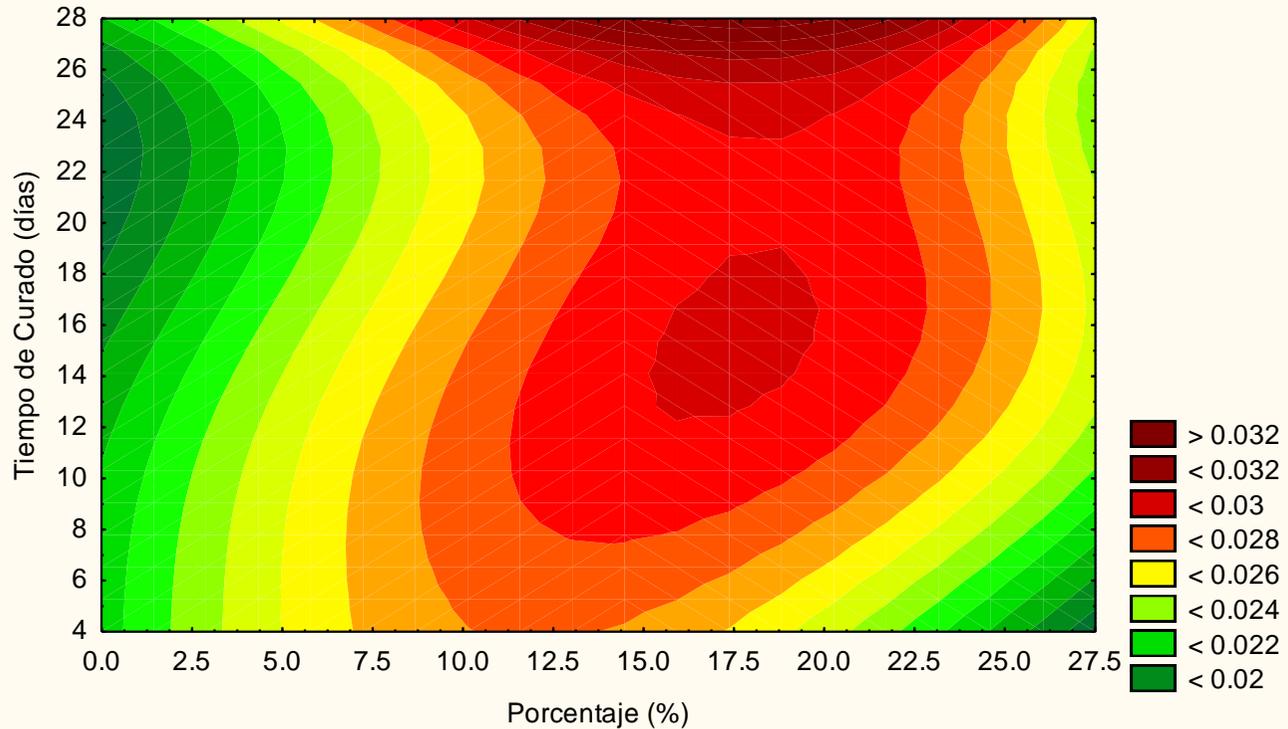


FIGURA 4.11 GRÁFICO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO

3D Contour Plot of Deformación Máxima against Porcentaje (%) and Tiempo de Curado (días)

8v\*72c

$$\text{Deformación Máxima} = \text{Exp}(-6.70861434 - 0.01408608 * x * y + 0.00140719 * x^2 * y^2 - 0.00003506 * x^3 * y^3) + \text{Exp}(-3.89531513 + 0.04171699 * x - 0.00198252 * x^2 + 0.00008097 * x^2 * y - 0.00000341 * y^4 - 0.00000007 * x^3 * y^2 + 0.00000012 * y^5)$$



**FIGURA 4.12 GRÁFICO DE LAS CURVAS DE NIVEL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO**

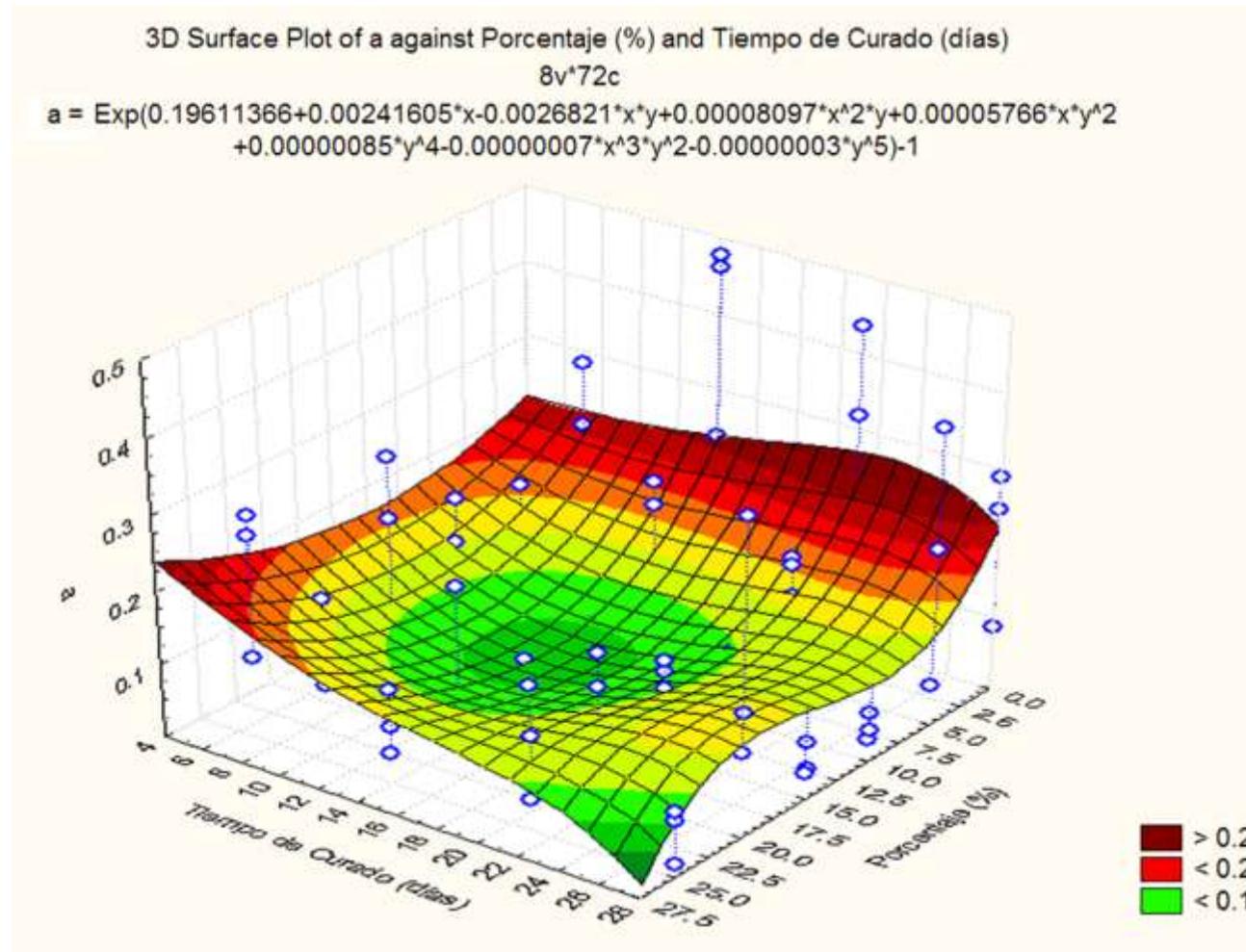
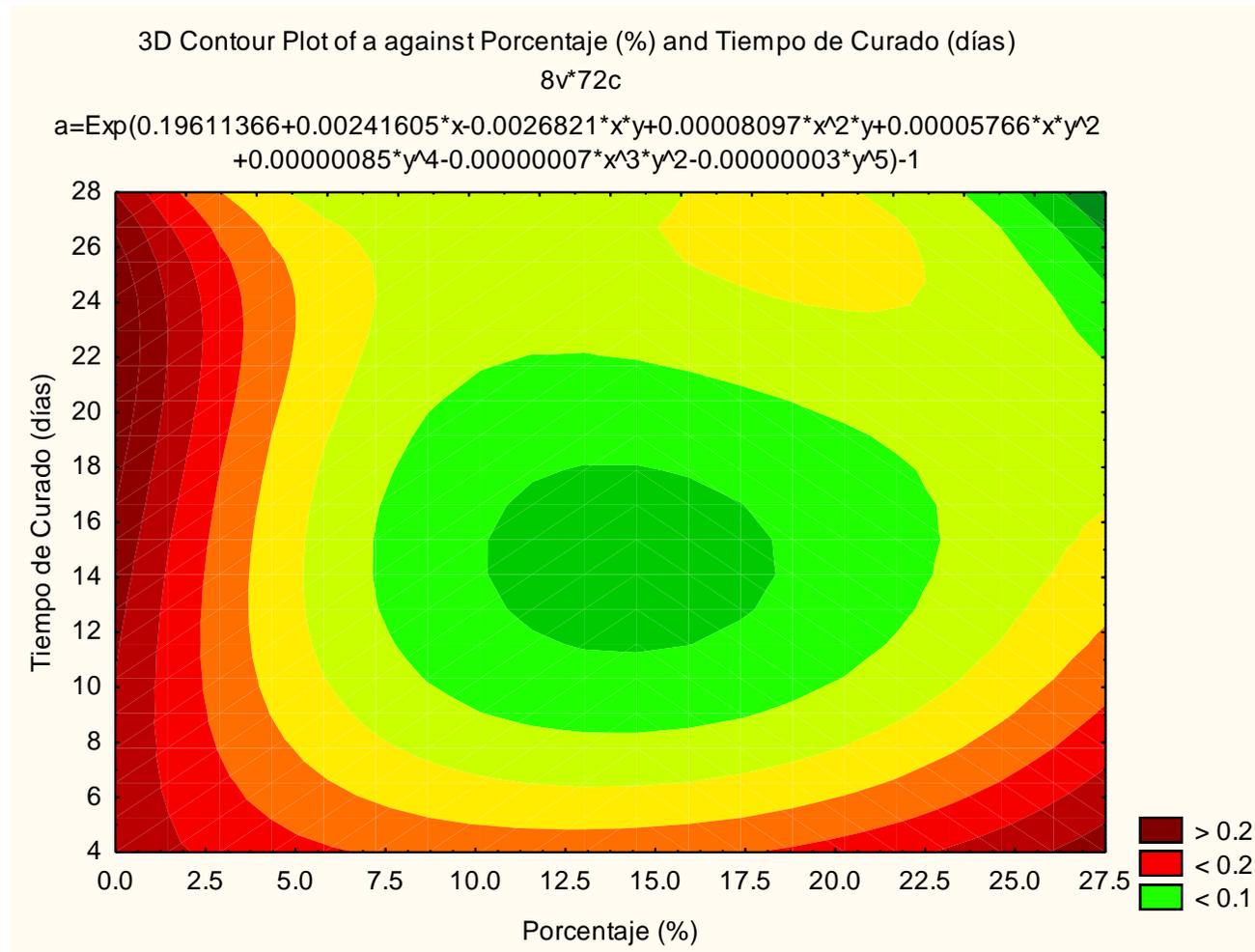
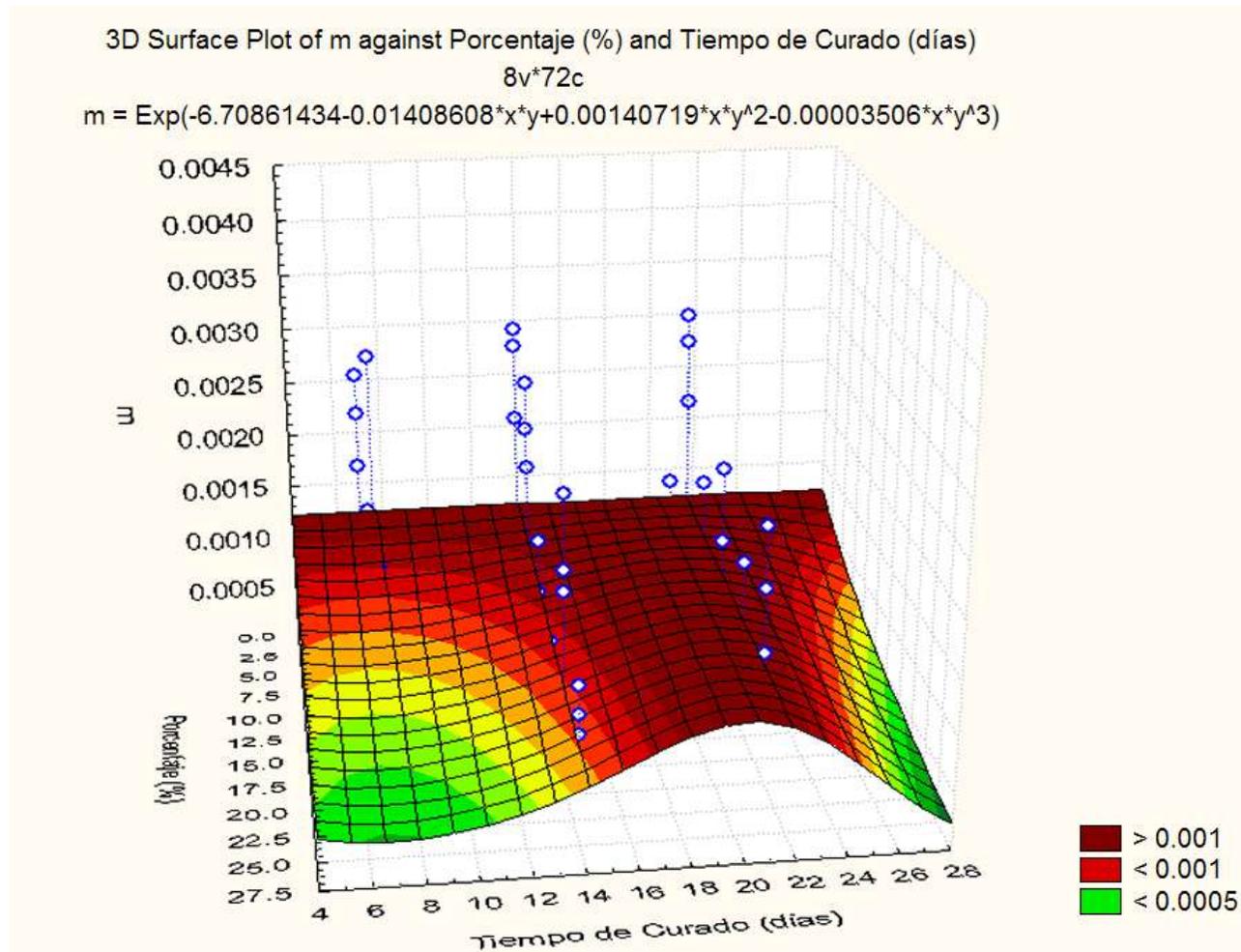


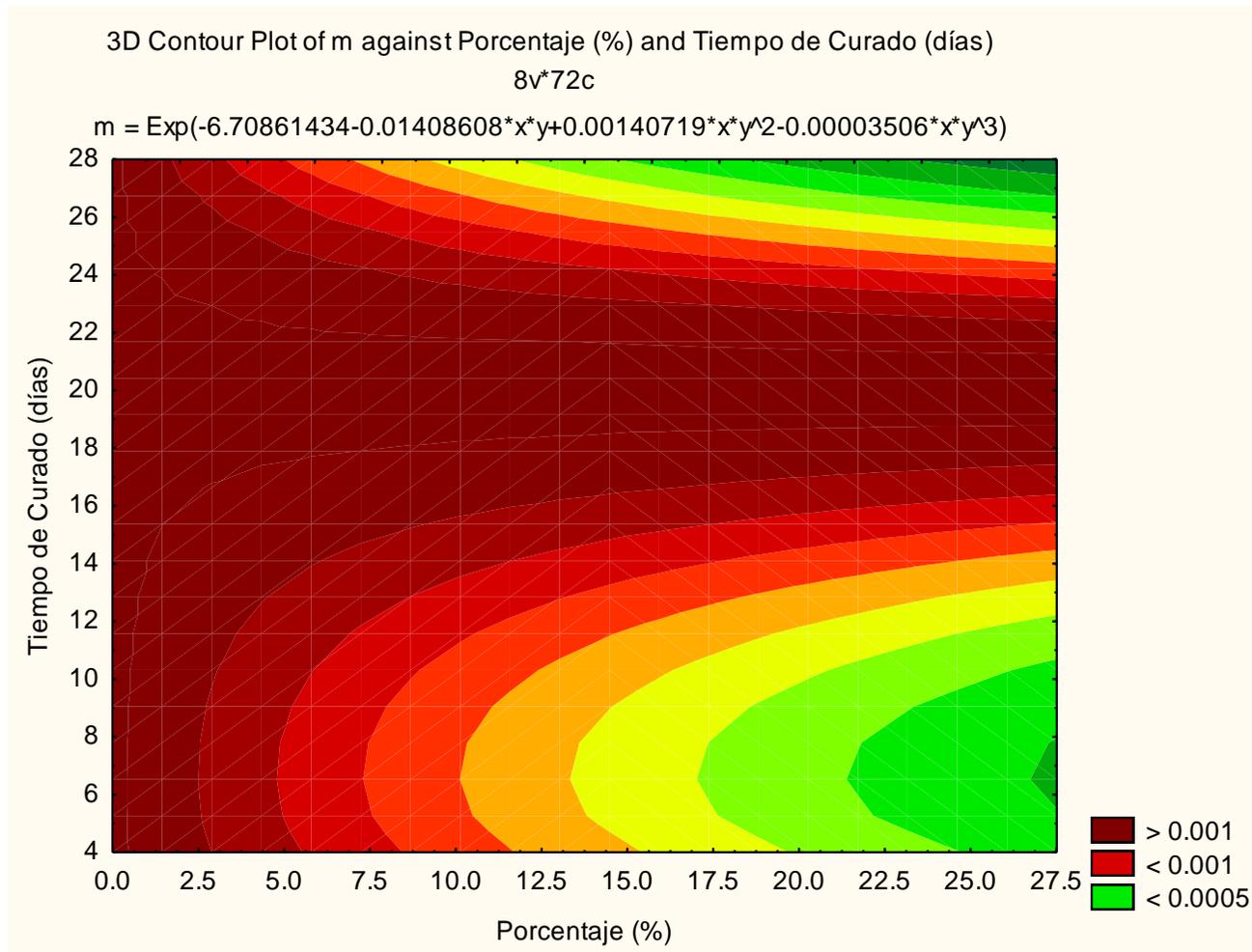
FIGURA 4.13 GRÁFICO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL PARÁMETRO A PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO



**FIGURA 4.14 GRÁFICO DE LAS CURVAS DE NIVEL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL PARÁMETRO A PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO**

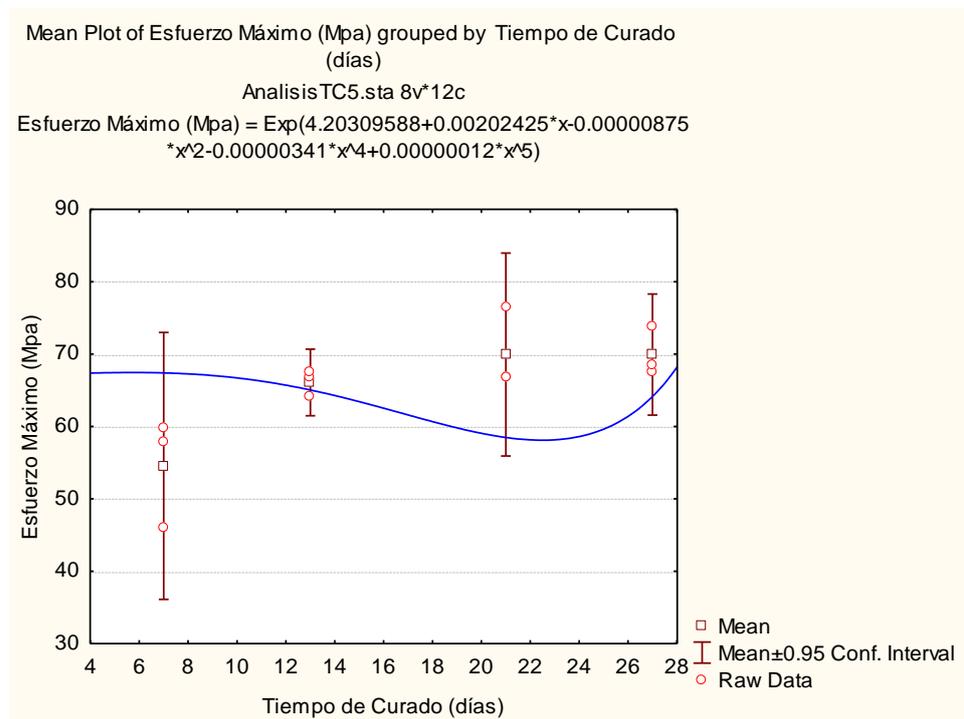


**FIGURA 4.15 GRÁFICO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL PARÁMETRO M A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADO**



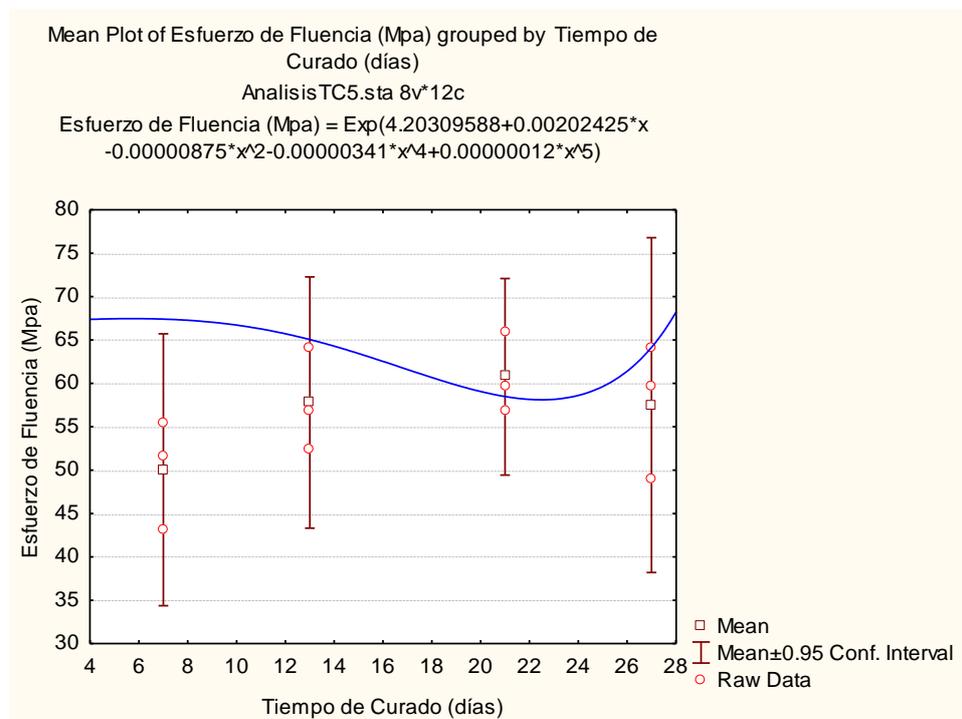
**FIGURA 4.16 GRÁFICO DE LAS CURVAS DE NIVEL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL PARÁMETRO M A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPO DE CURADOD**

Una vez establecidas las superficies de respuesta para determinar los parámetros que requiere el modelo de simulación computacional, se analizaron con más detalle los parámetros obtenidos para una pasta de cemento con 5% de zeolita. Entonces se determinaron las funciones de los distintos parámetros y examinó su aproximación con respecto a los datos experimentales, a continuación se muestran las gráficas de las curvas obtenidas a partir de las superficies de respuesta con 5% de zeolita:



**FIGURA 4.17 CURVA QUE DEFINE EL ESFUERZO MÁXIMO PARA 5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

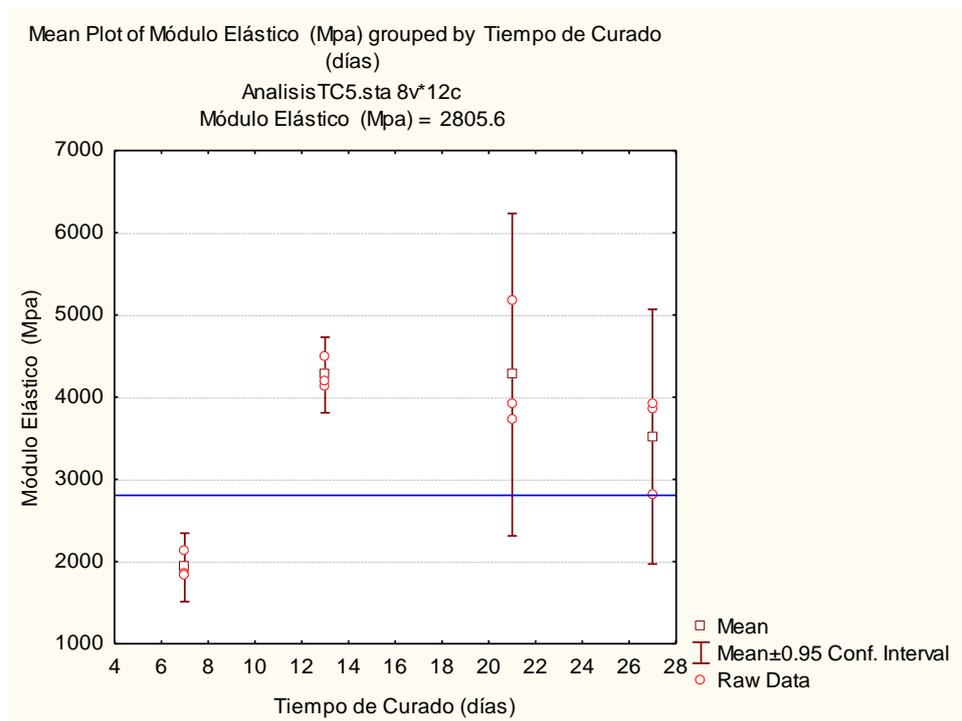
En la gráfica se puede observar que el esfuerzo máximo predicho por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en todos los días de curado ensayados. Lo cual indica que la superficie de respuesta del esfuerzo máximo en el porcentaje de 5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales.



**FIGURA 4.18 CURVA QUE DEFINE EL ESFUERZO DE FLUENCIA PARA 5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que el esfuerzo de fluencia pronosticado por la superficie de respuesta se encuentra en los

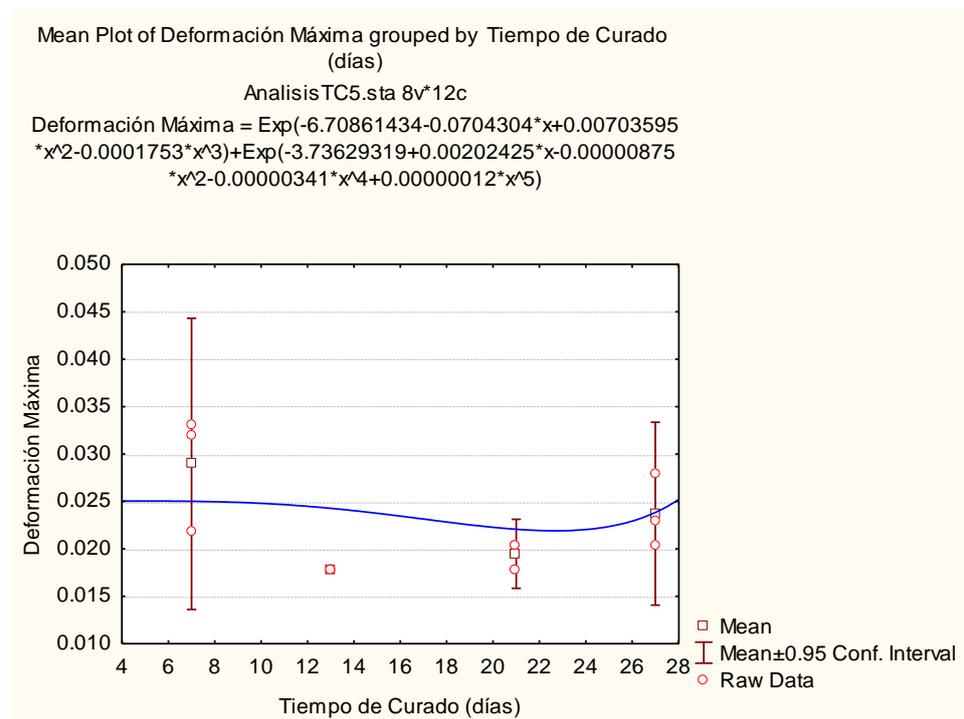
intervalos de 95% de confianza en los días de curado ensayados 14, 21 y 28. Lo cual indica que la superficie de respuesta del esfuerzo máximo en el porcentaje de 5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales en los días 14, 21 y 28.



**FIGURA 4.19 CURVA QUE DEFINE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA 5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

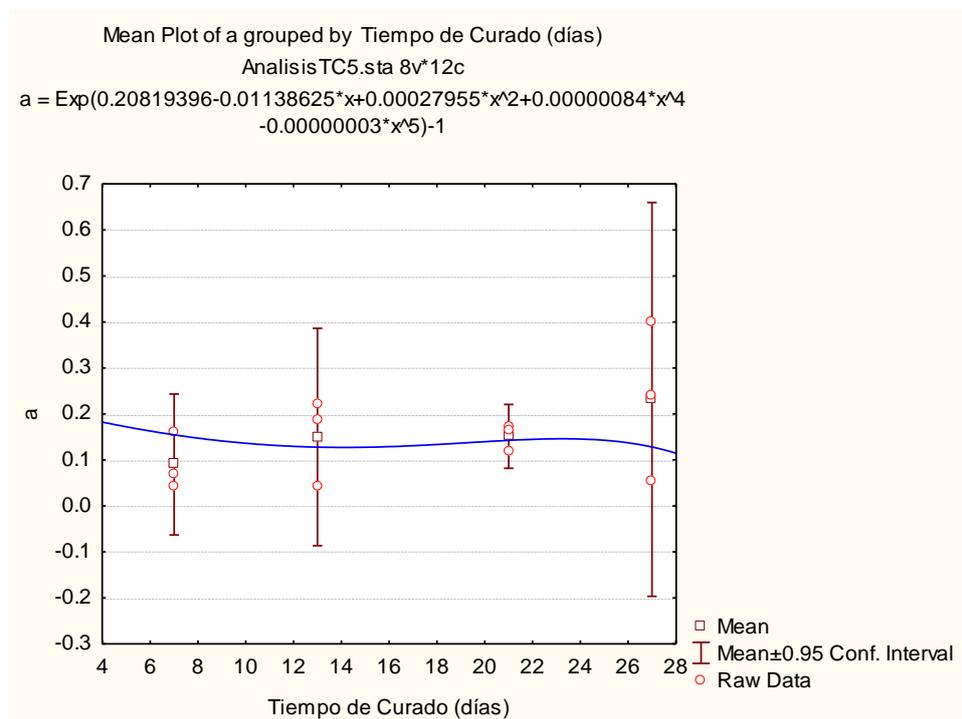
En la gráfica se puede observar que el módulo de elasticidad pronosticado por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en los días de curado ensayados 21 y 28. Lo cual indica que la superficie de respuesta del módulo de

elasticidad en el porcentaje de 5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales en los días 21 y 28. Como se puede notar módulo de elasticidad en el día 7 es significativamente menor que en el resto de días lo cual puede ser debido a que se emplearon diferentes maquinas de ensayos en dichos días (la electromecánica el día 7 y la hidráulica los días 14, 21 y 28). Siendo este un factor a considerar en el error de estimación del modelo, en especial para este parámetro donde la variación fue notoria.



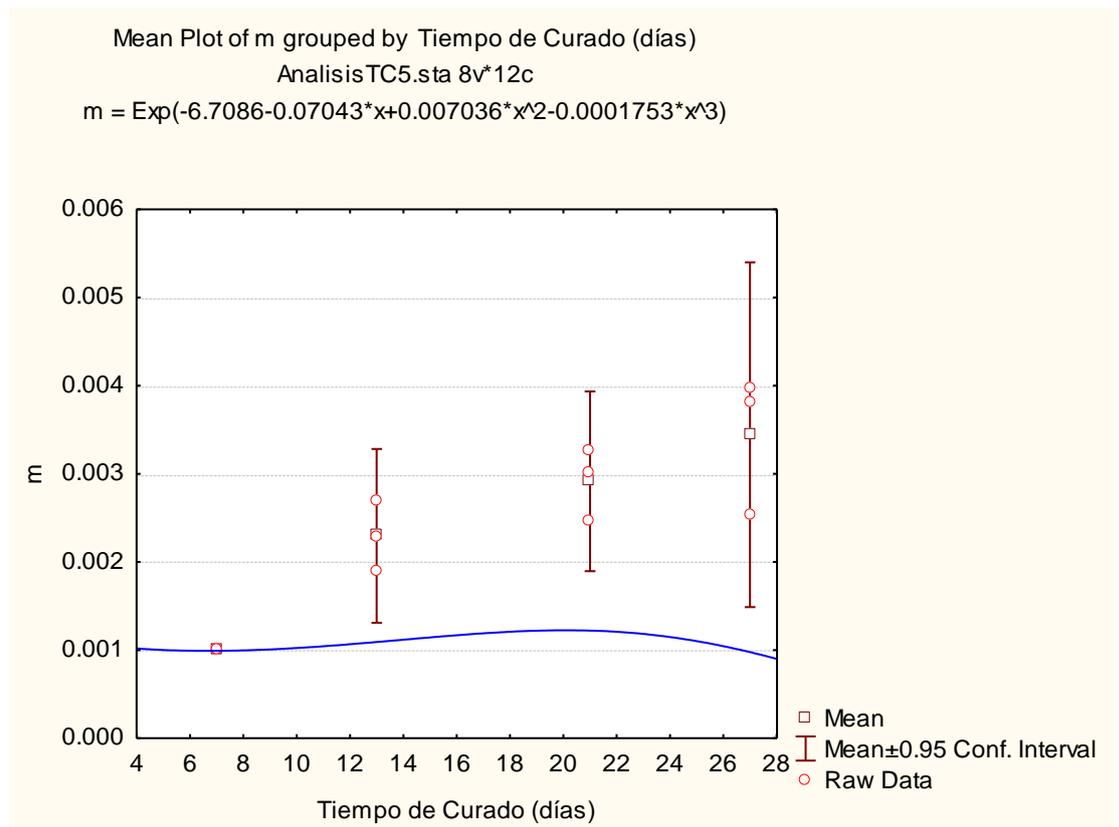
**FIGURA 4.20 CURVA QUE DEFINE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA PARA 5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que la deformación máxima vaticinada por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en los días de curado ensayados 7, 21 y 28. Lo cual indica que la superficie de respuesta de la deformación máxima en el porcentaje de 5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales en los días 7, 21 y 28. Al igual que para el módulo de elasticidad se noto gran variación al emplear diferentes máquinas de ensayo en este parámetro, por lo que es un factor a considerar en el error de estimación del modelo.



**FIGURA 4.21 CURVA QUE DEFINE EL PARÁMETRO A PARA 5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que el parámetro  $m$  predicho por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en todos los días de curado ensayados. Lo cual indica que la superficie de respuesta del parámetro  $m$  en el porcentaje de 5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales. Esto se debe a que el parámetro  $m$  depende de los valores de esfuerzo máximo y esfuerzo de fluencia que predicen de igual forma los valores experimentales.



**FIGURA 4.22 CURVA QUE DEFINE EL PARÁMETRO M PARA 5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que el parámetro  $m$  pronosticado por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza sólo para el séptimo día de curado ensayado. Lo cual indica que la superficie de respuesta del parámetro  $m$  en el porcentaje de 5% de zeolita sólo describe adecuadamente en este día de curado. Debido a que este parámetro depende del módulo de elasticidad y la deformación máxima y en dichos parámetros se noto gran variación al emplear diferentes máquinas de ensayo, es de esperarse que se genere una pobre aproximación del modelo para este parámetro.

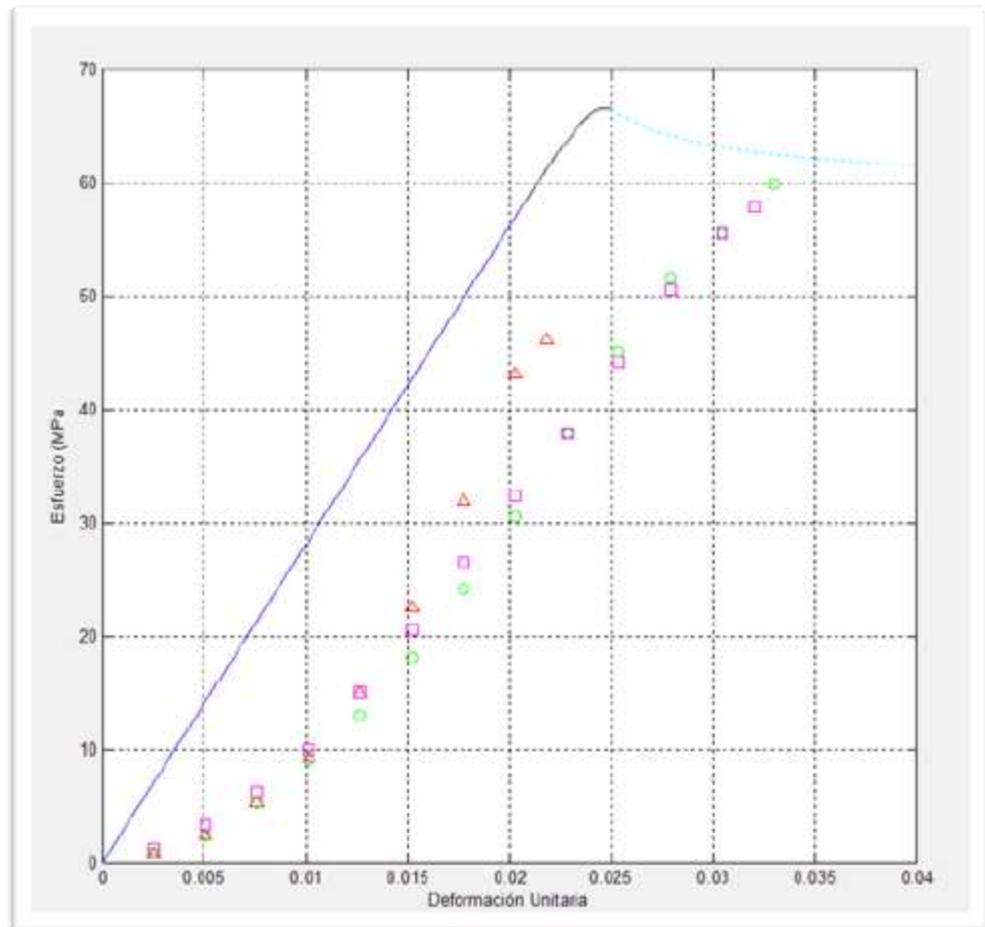
Entonces para poder aplicar la simulación se obtuvieron los valores de los diferentes parámetros que requiere el modelo de simulación. Los datos obtenidos por medio de la superficie de respuesta para una pasta con 5% de zeolita y los días de curado 7, 14, 21 y 28 se muestran en la tabla 33:

TABLA 32

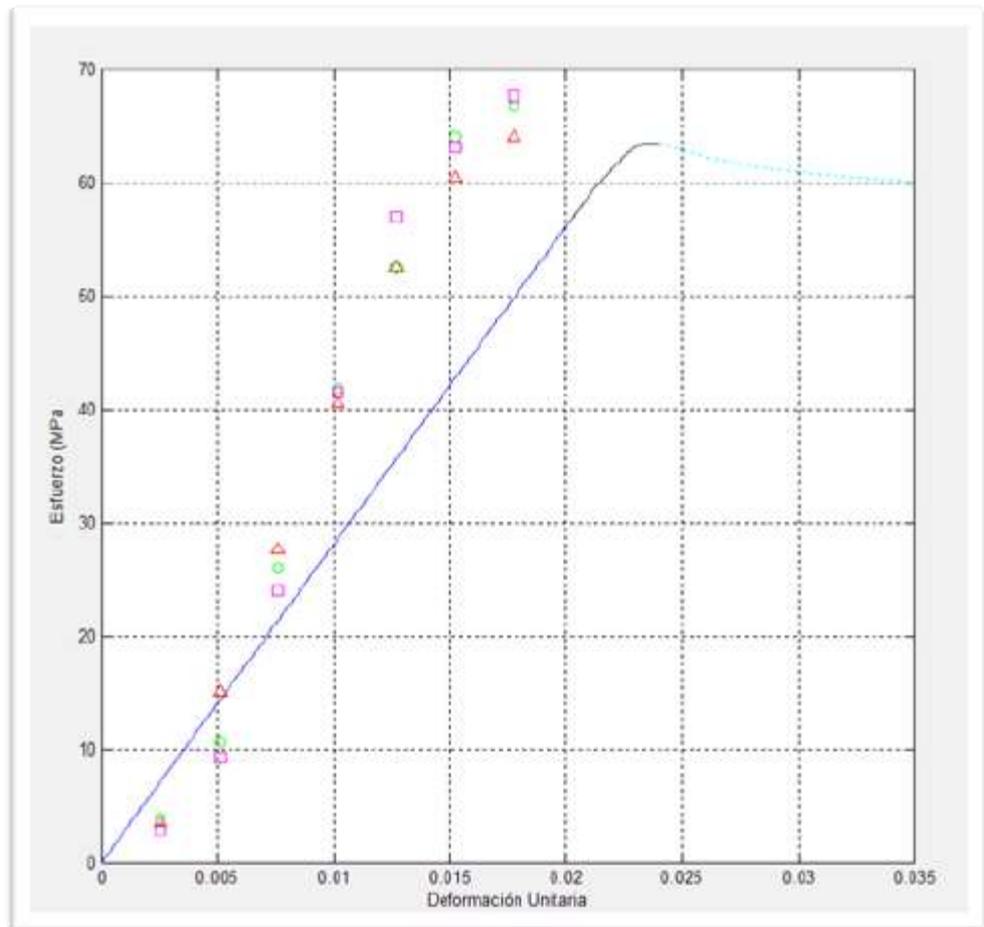
**PARÁMETROS DE SIMULACIÓN OBTENIDOS PARA CADA MUESTRA DE 5% DE ZEOLITA A LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
5	7	67.401	58.380	2805.6	0.025014	0.1545	0.00099
5	14	64.281	57.028	2805.6	0.024029	0.1272	0.00112
5	21	58.478	51.185	2805.6	0.022064	0.1425	0.00122
5	28	68.182	61.169	2805.6	0.025202	0.1147	0.00090

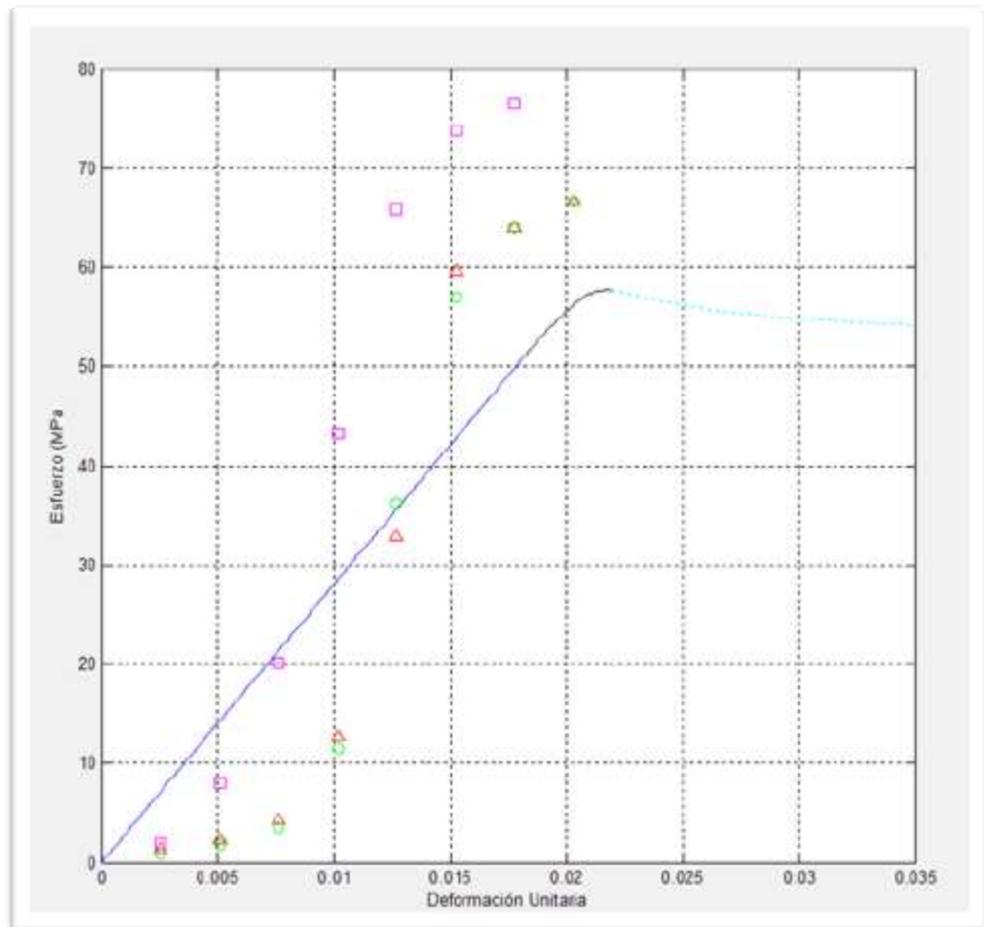
Con estos parámetros se aplicó el modelo de simulación implementado en MATLAB y se obtuvieron las graficas esfuerzo deformación de cada día establecido. A continuación se muestran las gráficas simuladas comparadas con los datos experimentales obtenidos:



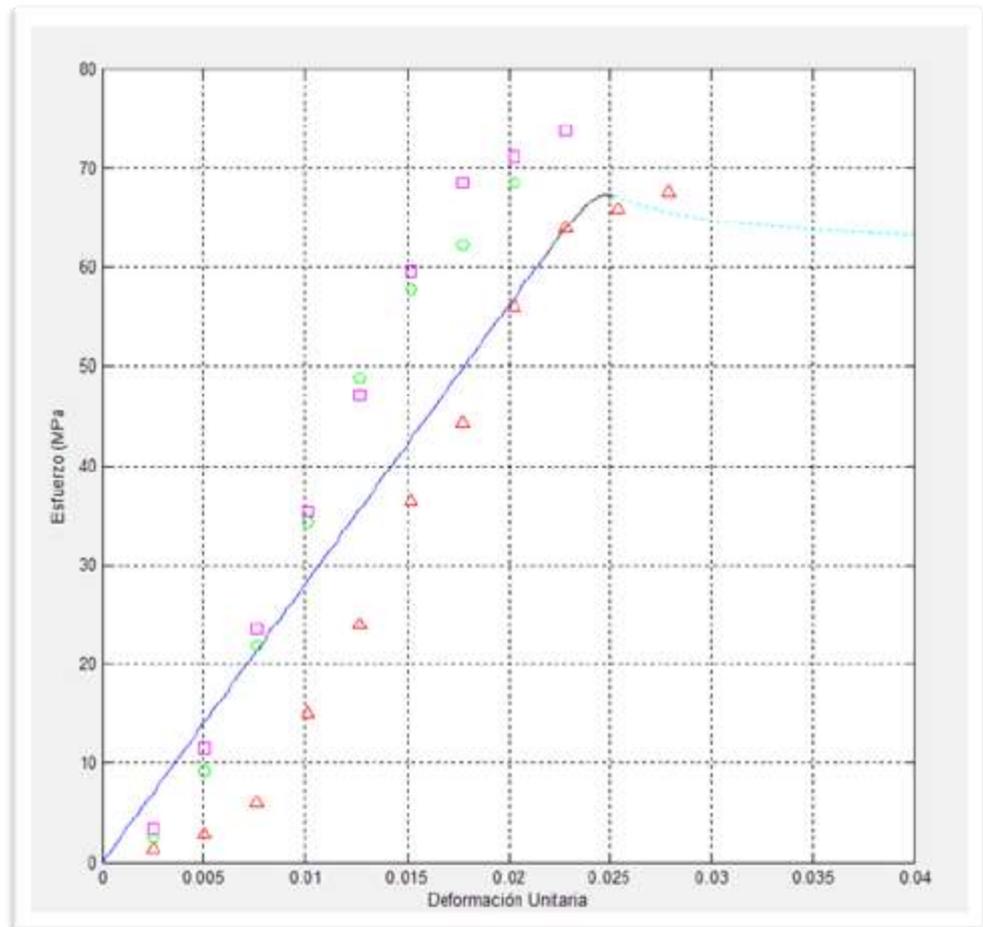
**FIGURA 4.23 GRÁFICO DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 5% DE ZEOLITA Y 7 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.24 GRÁFICO DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 5% DE ZEOLITA Y 14 DÍAS DE CURADO**



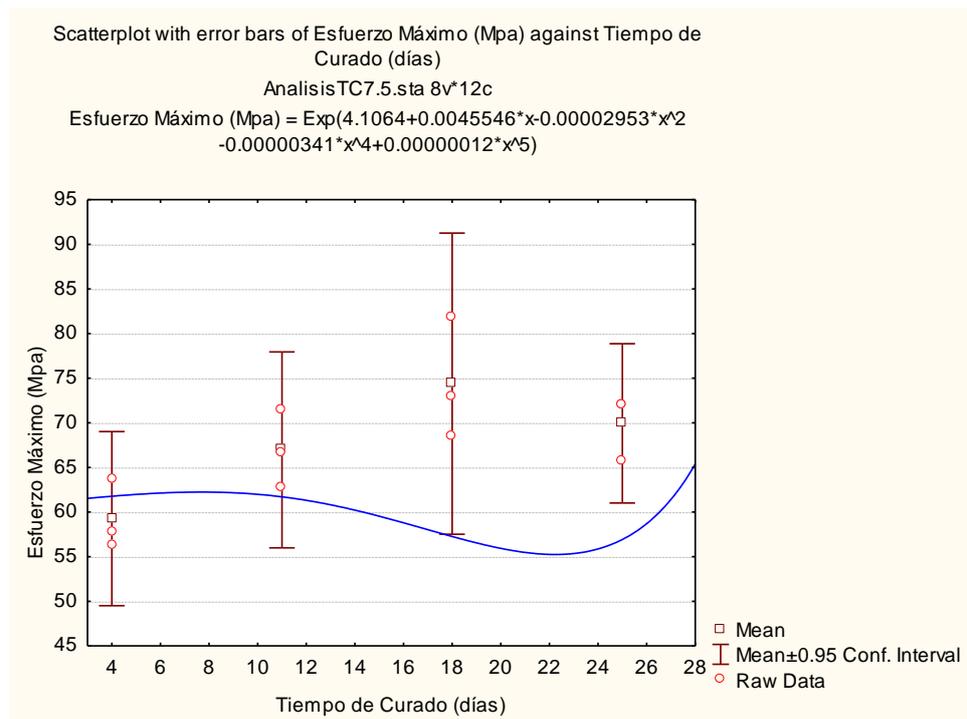
**FIGURA 4.25 GRÁFICO DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 5% DE ZEOLITA Y 21 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.26 GRÁFICO DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 5% DE ZEOLITA Y 28 DÍAS DE CURADO**

Para validar nuestro modelo de simulación se contrastó la curva esfuerzo-deformación simulada con los datos experimentales. Entonces primero se determinaron las funciones de los distintos parámetros y se observó su aproximación con respecto a los datos experimentales, a continuación se muestran las gráficas de las

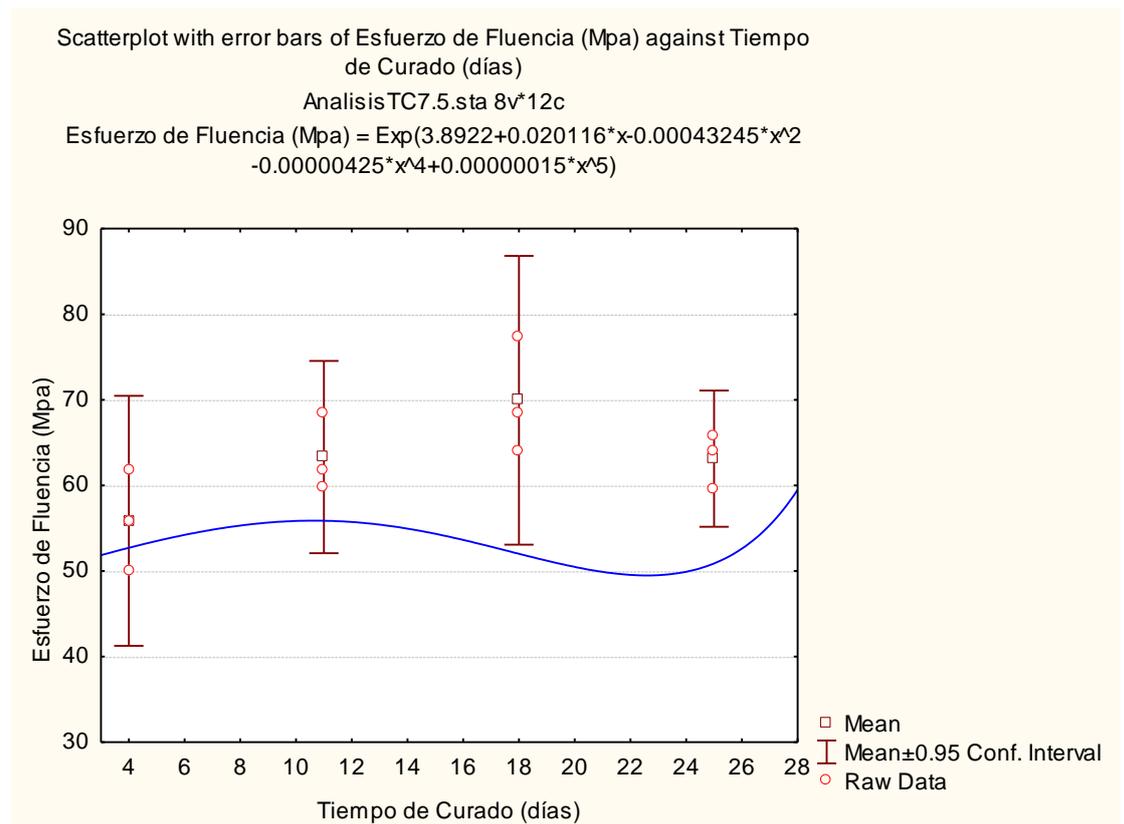
curvas obtenidas a partir de las superficies de respuesta con 7.5% de zeolita:



**FIGURA 4.27 CURVA QUE DEFINE EL ESFUERZO MÁXIMO PARA 7.5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que el esfuerzo máximo predicho por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza para los días de curado ensayados 4 y 11. Lo cual indica que la superficie de respuesta del esfuerzo máximo en el porcentaje de 7.5% de zeolita describe adecuadamente los datos

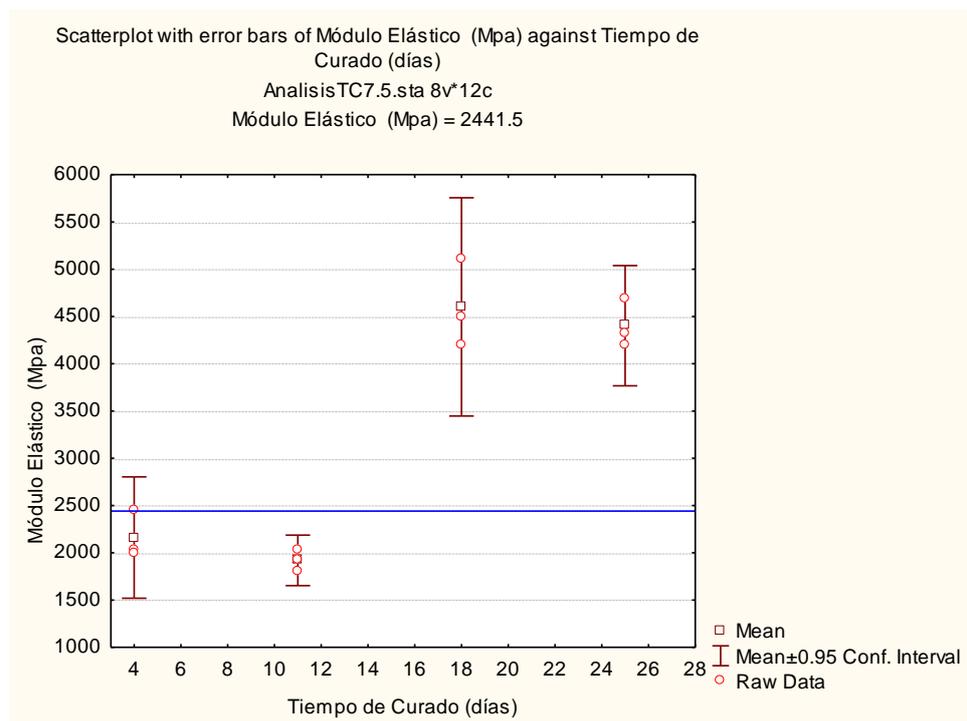
experimentales sólo en esos porcentajes y para los días 18 y 25 predice un valor menor al experimental



**FIGURA 4.28 CURVA QUE DEFINE EL ESFUERZO DE FLUENCIA PARA 7.5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que el esfuerzo de fluencia pronosticado por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en los días de curado ensayados 4 y 11. Lo cual indica que la superficie de respuesta del esfuerzo máximo

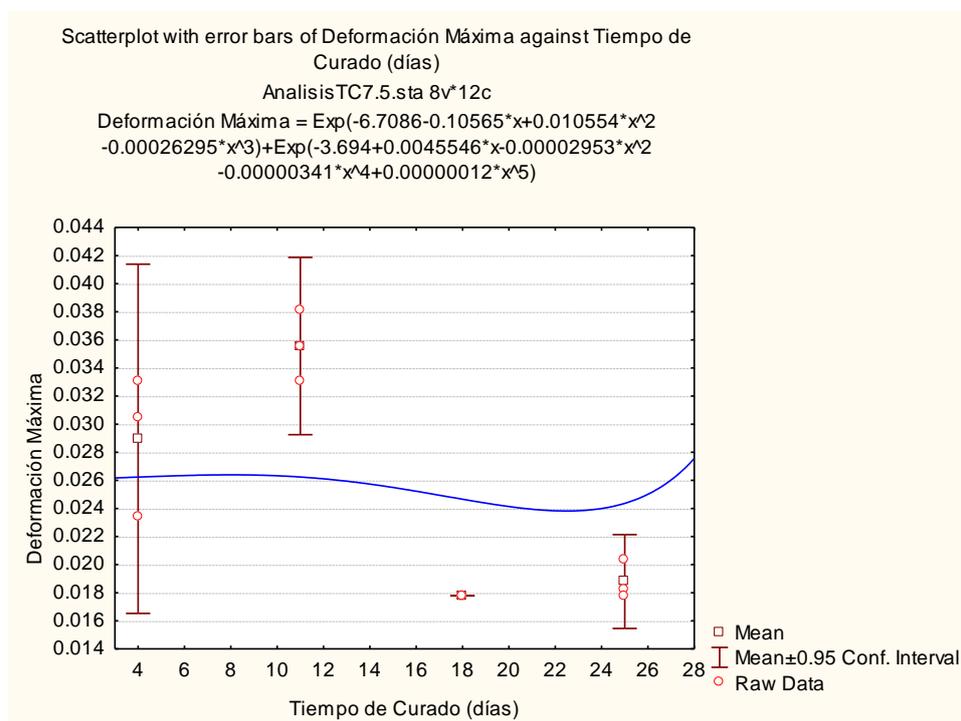
en el porcentaje de 7.5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales en los días 4 y 11; y para los días 18 y 25 predice un valor menor al experimenta.



**FIGURA 4.29 CURVA QUE DEFINE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA 7.5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

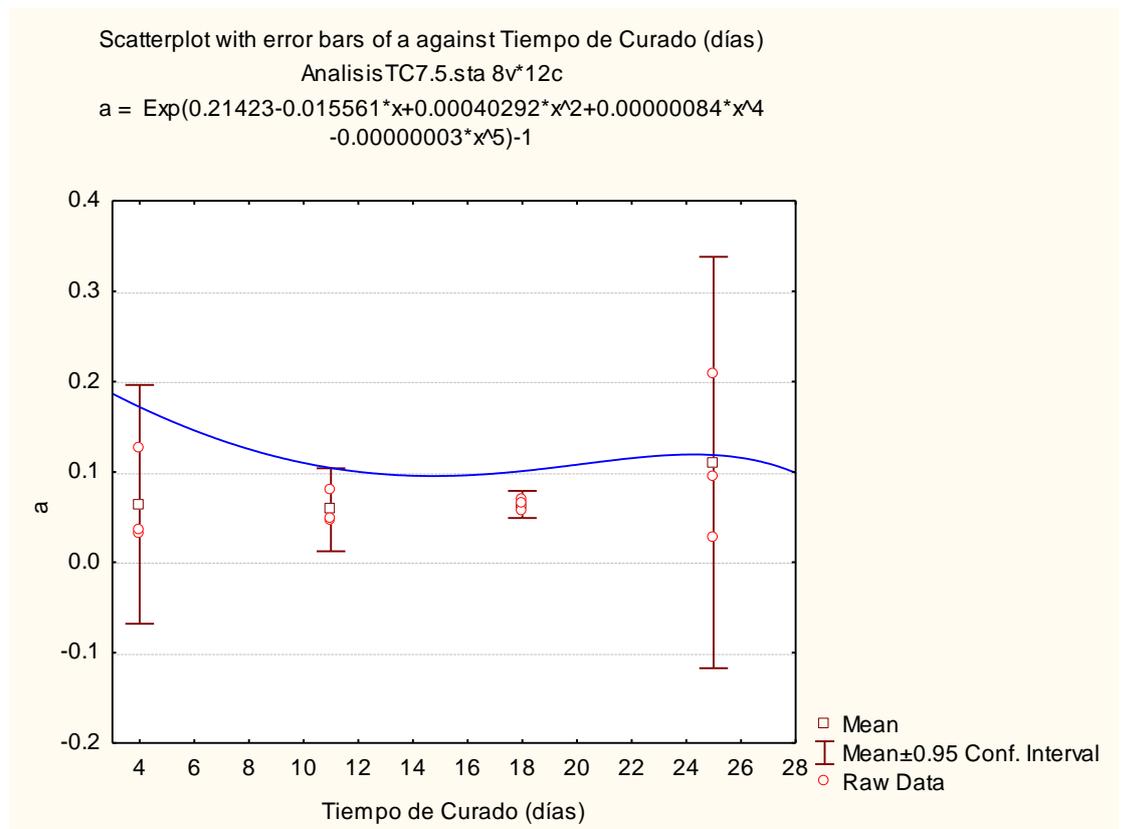
En la gráfica se puede observar que el módulo de elasticidad pronosticado por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en el cuarto día de curado ensayado. Lo cual indica que la superficie de respuesta del módulo de

elasticidad en el porcentaje de 7.5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales en ese día. Como se puede notar módulo de elasticidad en los días 4 y 11 es significativamente menor que en el resto de días lo cual puede ser debido a que se emplearon diferentes maquinas de ensayos en dichos días (la electromecánica los días 4 y 11, y la hidráulica los días 18 y 25). Siendo este un factor a considerar en el error de estimación del modelo, en especial para este parámetro donde la variación fue notoria.



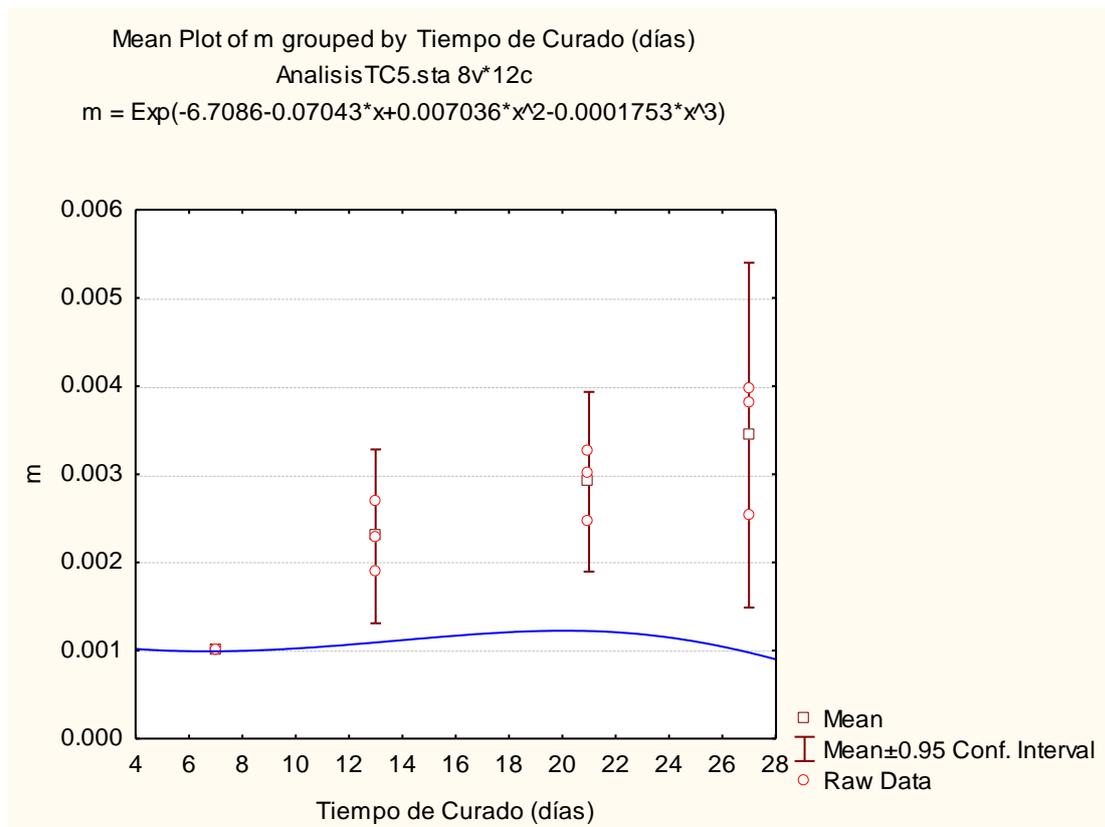
**FIGURA 4.30 CURVA QUE DEFINE LA DEFORMACIÓN MÁXIMA PARA 7.5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que la deformación máxima vaticinada por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en el cuarto día de curado ensayado. Lo cual indica que la superficie de respuesta de la deformación máxima en el porcentaje en 7.5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales sólo en este día. Al igual que para el módulo de elasticidad se noto gran variación al emplear diferentes máquinas de ensayo en este parámetro, por lo que es un factor a considerar en el error de estimación del modelo.



**FIGURA 4.31 CURVA QUE DEFINE EL PARÁMETRO A PARA 7.5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que el parámetro a predicho por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza en los días de curado ensayados 4, 11 y 25. Lo cual indica que la superficie de respuesta del parámetro a en el porcentaje de 7.5% de zeolita describe adecuadamente los datos experimentales en estos días.



**FIGURA 4.32 CURVA QUE DEFINE EL PARÁMETRO M PARA 7.5% DE ZEOLITA Y DISTINTOS TIEMPO DE CURADO**

En la gráfica se puede observar que el parámetro m pronosticado por la superficie de respuesta se encuentra en los intervalos de 95% de confianza sólo para el cuarto día de curado ensayado. Lo cual indica que la superficie de respuesta del parámetro m en el porcentaje de 7.5% de zeolita sólo describe adecuadamente en este día de curado. Debido a que este parámetro depende del módulo de elasticidad y la deformación máxima y en dichos parámetros se noto gran variación

al emplear diferentes máquinas de ensayo, es de esperarse que se genere una pobre aproximación del modelo para este parámetro.

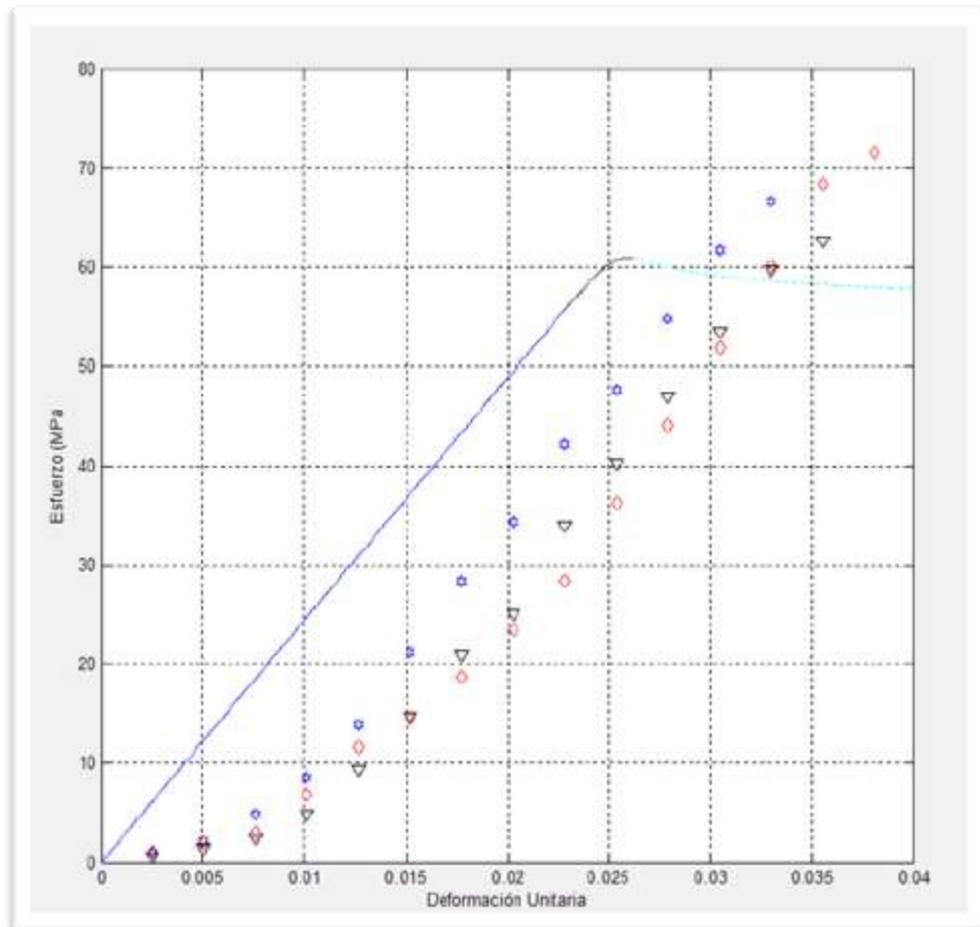
Entonces para poder aplicar la simulación se obtuvieron los valores de los diferentes parámetros que requiere el modelo de simulación para los días en los que se ensayaron las muestras de validación. Se determinaron los parámetros a partir de las superficies de respuesta, para una pasta de cemento con 7.5% de zeolita con los días de curado 4, 11, 18 y 25 se muestran en la tabla a continuación los parámetros obtenidos:

**TABLA 33**  
**PARÁMETROS DE SIMULACIÓN OBTENIDOS PARA CADA MUESTRA DE 7.5% DE ZEOLITA A LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

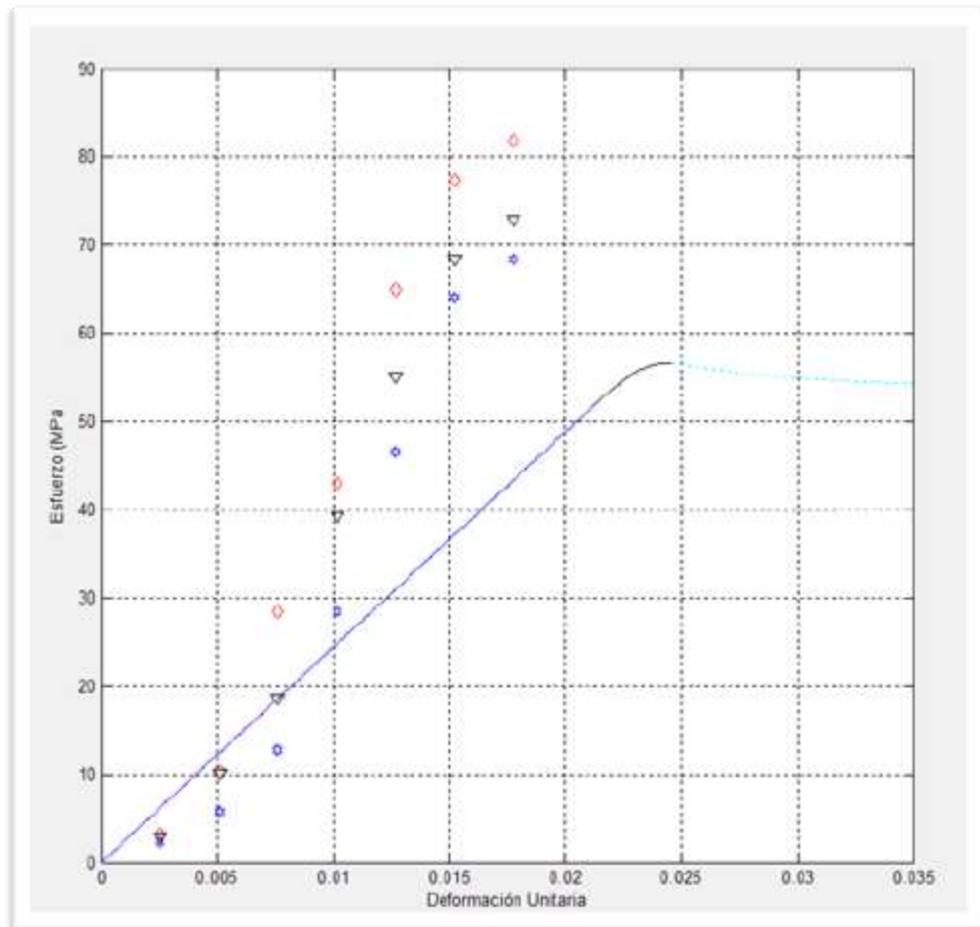
Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
7.5	4	61.770	52.709	2441.5	0.026231	0.1719	0.00093
7.5	11	61.704	55.872	2441.5	0.026238	0.1044	0.00097
7.5	18	57.261	52.010	2441.5	0.024654	0.1009	0.00120
7.5	25	56.921	50.881	2441.5	0.024361	0.1187	0.00105

Con estos parámetros se aplica el modelo de simulación implementado en MATLAB obteniéndose las graficas esfuerzo

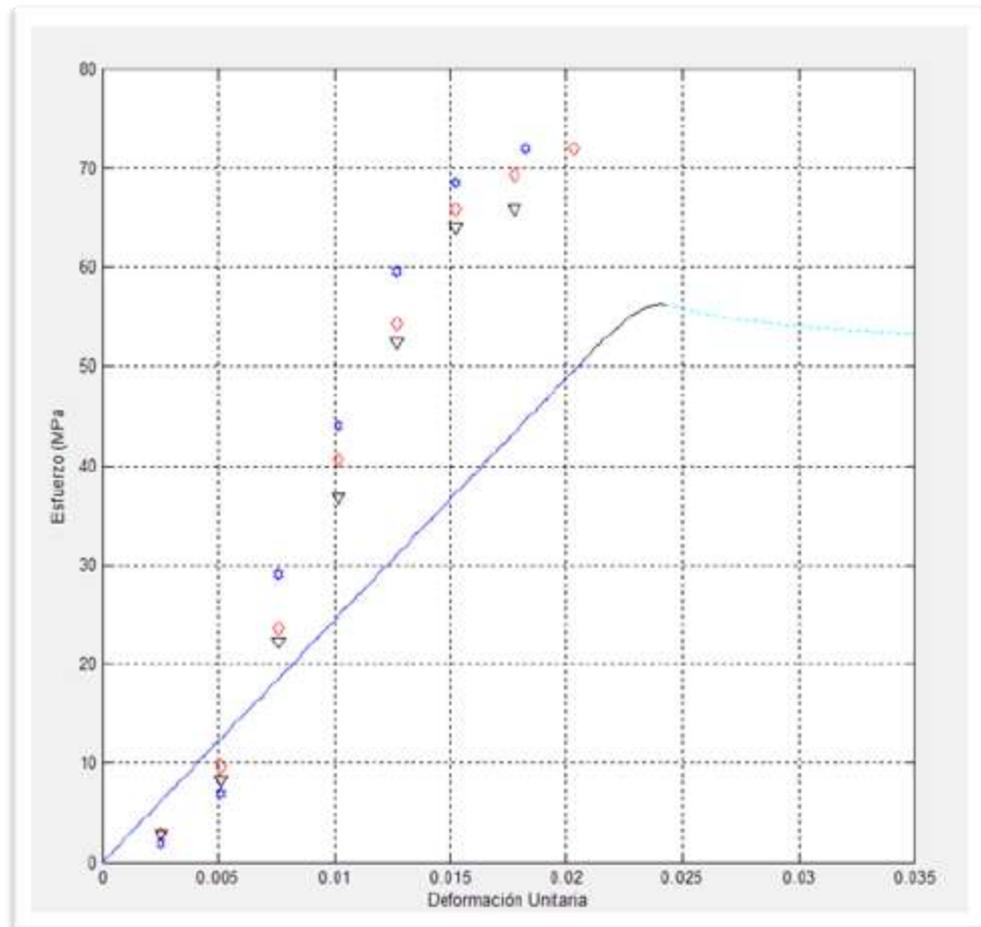




**FIGURA 4.34 GRÁFICO DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 7.5% DE ZEOLITA Y 11 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.35 GRÁFICO DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 7.5% DE ZEOLITA Y 18 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.36 GRÁFICO DE LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN SIMULADA Y DE LOS DATOS DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA UNA PASTA DE CEMENTO CON 7.5% DE ZEOLITA Y 25 DÍAS DE CURADO**

# CAPÍTULO 5

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Conclusiones

En este trabajo de tesis se tuvo como objetivo principal estudiar el comportamiento de la resistencia máxima de compresión de una pasta de cemento con 5% de zeolita ecuatoriana extraída de Manglaralto con un curado al aire. A partir del análisis estadístico de los datos obtenidos experimentalmente se pudo observar que conforme aumentaba el tiempo de curado mayor era la resistencia a la compresión, a excepción de los 21 y 28 días de curado donde se obtuvieron resistencias medias iguales para dichos tratamientos. Además se debe considerar que sólo se observaron diferencias significativas con un 95% de confianza de la resistencia a la compresión entre los días 7 y 21, 7 y 28.

Al analizar los datos experimentales, obtenidos por otros tesisistas que efectuaron los ensayos de compresión con pastas de cemento que contenían porcentajes de zeolita de 10, 15, 20 y 25; y la pasta de cemento de control enteramente de cemento tipo I (0% de zeolita); se pudo determinar con un 95% de confianza que el efecto del porcentaje de zeolita, el tiempo de curado y el efecto combinado de ambos son significativos en la resistencia máxima a la compresión. Con el mismo nivel de confianza se pudo concluir que para los días 7 y 14 la resistencia a la compresión del control es significativamente mayor que las mezclas de pasta de cemento con algún porcentaje de zeolita; algo similar ocurrió para los días 21 y 28 donde la resistencia a la compresión resultó significativamente mayor solo para los porcentajes de zeolita 10, 15, 20 y 25. En conclusión con un 95% se puede señalar que no existen diferencias significativas entre las resistencias a la compresión de una pasta de cemento sin zeolita y una con 5% de zeolita.

Para poder implementar la simulación se requirió obtener funciones que permitan simular los valores de los parámetros necesarios para la simulación para diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado. Por medio del método de regresión lineal múltiple,

considerando reducción de los términos del modelo de regresión completo que consistía del desarrollo binomial de grado 5.

Se obtuvieron funciones que expliquen la variabilidad de los logaritmos naturales de los parámetros para simulación, por lo que las superficies de respuesta obtenidas fueron de tipo exponencial. Entonces se obtuvo una superficie de respuesta para el Ln(Esfuerzo Máximo) que explica su variabilidad observada (coeficiente de regresión ajustado) en un 68.55%. Para el Ln (Esfuerzo de Fluencia) su superficie de respuesta explica el 60.51% de su variabilidad. Mientras que las superficies de respuesta del Ln (Módulo Elástico) y Ln (m) sus superficies de respuesta mostraron un coeficiente de regresión ajustado de 43.50% y 10.15% respectivamente; estos bajos coeficientes se deben al notorio cambio de las propiedades del módulo elástico y deformación máxima al emplear diferentes máquinas en los ensayos de compresión.

El modelo de simulación depende de las propiedades esfuerzo a la fluencia, módulo de elasticidad y los parámetros  $a$  y  $m$ , que están relacionados con las propiedades de esfuerzo máximo y deformación máxima. Entonces la fiabilidad de la simulación está directamente ligada a la capacidad de los modelos de regresión múltiple para

simular las propiedades para las que se determinaron (esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia, modulo de elasticidad y el parámetro  $m$ ). De esta forma a partir de las figuras donde se contrastan los datos experimentales de una pasta de cemento con 5% de zeolita, con la curva esfuerzo–deformación sólo para el día de curado 28 se obtuvo una gráfica que simula fielmente lo que ocurre en la experimentación. Para el porcentaje de validación, 7.5% de zeolita, se encuentra que la gráfica simulada que más se acerca a representar los datos experimentales es la obtenida a los 4 días.

Debido a factores externos no considerados en el modelo de regresión tales como tipo de máquina empleada para las pruebas, temperatura y humedad; el modelo de simulación no es lo suficientemente confiable para simular el diagrama esfuerzo–deformación para una pasta de cemento con 5% de zeolita.

## **5.2. Recomendaciones**

Para obtener resultados de mayor precisión es recomendable efectuar las pruebas de resistencia a la compresión en una misma máquina de ensayo debido a que en las pruebas experimentales efectuadas para propósitos de esta tesis se emplearon dos maquinas

diferentes, con mecanismos de acción diferentes (electromecánico e hidráulico). Este factor genero una notable variación tanto en el módulo de elasticidad y la deformación máxima, y no se puede descartar su posible incidencia en los demás propiedades como esfuerzo máximo de compresión y esfuerzo de fluencia.

Para lograr una mayor certeza sería propicio emplear un mayor número de muestras experimentales ensayadas para cada porcentaje de zeolita, en cada día de curado de esta manera al poseer más datos se podrían obtener resultados que reflejen con mayor fidelidad lo que ocurre experimentalmente.

# APÉNDICES

## APÉNDICE 1

### PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN EN MATLAB

```
%===NON LINEAR HARDENING===
%Por: Carlos Bodero
function NonlinearHardening(p,tc)
%Limpieza de variables y pantalla
clear;
clc;

%Datos del problema

E=moduloelasticidad(p,tc);      %Modulo de Elasticidad
Sy0=esfuerzofluencia(p,tc);    %Esfuerzo de Fluencia
def=defmaxima(p,tc);           %Deformación máxima
ef=round(def/0.005+2.5)*0.005; %Deformación final a graficar
a=parametroa(p,tc);            %Parámetro a del modelo teórico de Sy
m=parametrom(p,tc);           %Parámetro m del modelo teórico de Sy
de=1e-4;                       %Longitud de los intervalos numéricos
tol=1e-6;                      %Tolerancia aplicada para Newton-
Raphson

%Definición de la función F y dF para la iteración de Newton Raphson
syms lambda dlambda Ftrn;
Sy=Sy0*(1+2*a/(m+lambda)*sqrt(m*lambda)); %Función Sy en la parte
plástica
Hn=diff(Sy,lambda);             %definición de H'n+1
Fn=Ftrn-dlambda*(E+Hn);        %función Residuo de Newton
Raphson
dFn=diff(Fn,dlambda);          %Diferencial de la función
Residuo

%Definición de parámetros e inicialización de variables
n=round(ef/de);
s=zeros(1,n+1);
st=zeros(1,n+1);
e=zeros(1,n+1);
sy=zeros(1,n+1);
sy(1)=Sy0;
l(1)=0;

%Algoritmo de la para determinar el esfuerzo no lineal
for i=1:n,
    e(i+1)=de*i;
    st(i+1)=s(i)+E*de;
    Ftr(i+1)=abs(st(i+1))-sy(i);
```

```

if Ftr(i+1) > 0,
    dlk(1)=tol;
    Ftrn=Ftr(i+1);

%Método de Newton Raphson para determinar delta lambda
for k=1:200,
    dlambda=dlk(k);
    lambda=dlk(k)+l(i);
    r(k)=eval(Fn);
    A=eval(dFn);
    dlk(k+1)=dlk(k)-(A)^(-1)*r(k);
    if dlk(k+1)==0
        dlk(k+1)=tol;
    end
    if (abs(r(k))<=tol*abs(r(1)))
        break
    end
end
if k==200,
    fprintf('No hubo convergencia del metodo Newton
Raphson\n');
    break;
end
%Fin del método de Newton-Raphson

H(i)=eval(Hn);
dl(i)=dlk(k);
l(i+1)=dl(i)+l(i);
s(i+1)=st(i+1)-E*dl(i)*sign(st(i+1));
sy(i+1)=sy(i)+H(i)*dl(i);
else
    s(i+1)=st(i+1);
    sy(i+1)=sy(i);
    l(i+1)=0;
end
end

%Determina los indices para los cuales existe deformación elástica
ie=find((s<=Sy0) & (e<=def));

%Determina los indices para los cuales existe deformación plástica
ip=find((s>Sy0) & (e<=def)); ip=[ip(1)-1,ip];

%Determina los indices posteriores a la ruptura
ir=find(e>def); ir=[ir(1)-1,ir];

hold off

%Graficar la curva Esfuerzo vs Deformación
%plot(e,s,'-b');
plot(e(ie),s(ie),'-b'); %Grafica la región elástica
hold on

```

```
plot(e(ip),s(ip),'-k');           %Grafica la región plástica
plot(e(ir),s(ir),':c');           %Grafica la región posterior a la
ruptura

xlabel('Deformación Unitaria');
ylabel('Esfuerzo (MPa)');
xlim([0 ef]);
grid on;
```

## APÉNDICE 2

### PROGRAMACIÓN DE FUNCIONES ADICIONALES REQUERIDAS PARA EL MODELO DE SIMULACIÓN EN MATLAB

#### Esfuerzo máximo a la compresión

```
function sigmau=esfuerzomaximo(x,y)
%Función que define el esfuerzo máximo a la compresión a partir del
%porcentaje de zeolita y el tiempo de curado, por medio de la
%superficie de respuesta obtenida por regresión lineal múltiple.

sigmau=exp(4.39645023-0.03867087.*x+0.00008097.*x.*x.*y-
0.00000341.*y.*y.*y.*y-
0.00000007.*x.*x.*x.*y.*y+0.00000012.*y.*y.*y.*y.*y);
```

#### Esfuerzo a la Fluencia

```
function sigmay=esfuerzofluencia(x,y)
%Función que define el esfuerzo de fluencia a partir del porcentaje
%de zeolita y el tiempo de curado, por medio de la superficie de
%respuesta obtenida por regresión lineal múltiple.

sigmay=exp(4.20033657-0.04108693.*x+0.0026821.*x.*y-
0.00005766.*x.*y.*y-
0.00000425.*y.*y.*y.*y+0.00000015.*y.*y.*y.*y.*y);
```

#### Módulo de Elasticidad

```
function modelas=moduloelasticidad(x,y)
%Función que define el módulo de elasticidad a partir del porcentaje
%de zeolita y el tiempo de curado, por medio de la superficie de
%respuesta obtenida por regresión lineal múltiple.
```

```
modelas=exp(8.29176537-0.08038786.*x+0.00198252.*x.*x);
```

## Parámetro m

```
function m=parametrom(x,y)
%Función que define el parámetro m a partir del porcentaje de
%zeolita y el tiempo de curado, por medio de la superficie de
%respuesta obtenida por regresión lineal múltiple.

m=exp(-6.70861434-0.01408608.*x.*y+0.00140719.*x.*y.*y-
0.00003506.*x.*y.*y.*y);
```

## Deformación Máxima

```
function definal=defmaxima(x,y)
%Función que define el parámetro a a partir del porcentaje de
%zeolita y el tiempo de curado, por medio de las superficie de
%respuesta del esfuerzo máximo a la compresión, el módulo de
%elasticidad y el parámetro m obtenidas por regresión lineal
%múltiple.

definal=parametrom(x,y)+esfuerzomaximo(x,y)./moduloeelasticidad(x,y);
```

## Parámetro a

```
function a=parametroa(x,y)
%Función que define el parámetro a a partir del porcentaje de
%zeolita y el tiempo de curado, por medio de las superficie de
%respuesta del esfuerzo máximo a la compresión y el esfuerzo a la
%fluencia obtenidas por regresión lineal múltiple.

a=esfuerzomaximo(x,y)./esfuerzofluencia(x,y)-1;
```

### APÉNDICE 3

#### RESULTADOS OBTENIDOS PARA CADA MUESTRA A DISTINTOS PORCENTAJES DE ZEOLITA PARA DIFERENTES DÍAS DE CURADO

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
0	7	80.0150	66.6792	5250.33	0.01778	0.200000	0.00254
0	7	80.0150	62.2339	6125.39	0.01524	0.285714	0.00218
0	7	82.6822	78.2369	5133.66	0.01778	0.056818	0.00167
0	14	87.1275	59.5668	5862.87	0.01778	0.462687	0.00292
0	14	88.0165	71.1245	5600.35	0.01778	0.237500	0.00206
0	14	88.0165	59.5668	5862.87	0.01778	0.477612	0.00277
0	21	63.7000	61.3480	2012.73	0.03302	0.038339	0.00137
0	21	63.3080	44.1000	1929.13	0.03302	0.435556	0.00100
0	21	66.6400	50.5680	2039.37	0.03302	0.317829	0.00100
0	28	77.3479	71.1245	3500.22	0.02286	0.087500	0.00100
0	28	76.4588	61.3449	3450.22	0.02286	0.246377	0.00100
0	28	77.3479	59.9224	3370.21	0.02295	0.290801	0.00100
5	7	46.0600	43.1200	2122.05	0.02184	0.068182	0.00100
5	7	59.7800	51.5480	1844.95	0.03302	0.159696	0.00100
5	7	57.8200	55.4680	1819.82	0.03200	0.042403	0.00100
5	14	64.0120	52.4543	4130.26	0.01778	0.220339	0.00228
5	14	66.6792	64.0120	4200.26	0.01778	0.041667	0.00191
5	14	67.5683	56.8996	4480.28	0.01778	0.187500	0.00270
5	21	66.6792	59.5668	3908.58	0.02032	0.119403	0.00326
5	21	66.6792	56.8996	3733.57	0.02032	0.171875	0.00246
5	21	76.4588	65.7901	5180.33	0.01778	0.162162	0.00302
5	28	67.5683	64.0120	2800.18	0.02794	0.055556	0.00381
5	28	68.4573	48.8981	3850.24	0.02032	0.400000	0.00254
5	28	73.7916	59.5668	3908.58	0.02286	0.238806	0.00398

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
10	7	62.1320	52.3320	1716.93	0.03810	0.187266	0.00191
10	7	57.8200	55.8600	1999.28	0.03048	0.035088	0.00156
10	7	56.2520	49.9800	2459.65	0.02337	0.125490	0.00100
10	14	53.9000	50.9600	2006.30	0.02794	0.057692	0.00107
10	14	57.8200	55.8600	1999.28	0.03048	0.035088	0.00156
10	14	59.7800	56.8400	1721.38	0.03556	0.051724	0.00100
10	21	40.1800	38.2200	1367.93	0.03048	0.051282	0.00111
10	21	44.1000	43.1200	1886.26	0.02540	0.022727	0.00202
10	21	45.0800	41.3560	1809.10	0.02540	0.090047	0.00100
10	28	62.7200	58.8000	1653.54	0.03810	0.066667	0.00100
10	28	65.6600	63.7000	1671.92	0.04064	0.030769	0.00137
10	28	71.5400	68.6000	1800.52	0.04064	0.042857	0.00100
15	7	49.9800	38.8080	1697.64	0.03302	0.287879	0.00358
15	7	57.8200	48.0200	1718.68	0.03366	0.204082	0.00100
15	7	52.9200	49.9800	1788.83	0.03048	0.058824	0.00100
15	14	59.7800	55.8600	1832.68	0.03302	0.070175	0.00100
15	14	55.8600	53.5080	1915.10	0.02946	0.043956	0.00100
15	14	47.0400	46.0600	1511.15	0.03150	0.021277	0.00100
15	21	48.0200	43.1200	1886.26	0.02794	0.113636	0.00248
15	21	51.9400	46.0600	1813.39	0.03048	0.127660	0.00184
15	21	51.9400	47.6280	2083.46	0.02540	0.090535	0.00100
15	28	59.7800	55.4680	1559.84	0.03835	0.077739	0.00100
15	28	47.0400	45.0800	1479.00	0.03302	0.043478	0.00121
15	28	54.8800	52.9200	1488.19	0.03810	0.037037	0.00122
20	7	49.0000	42.9240	1877.69	0.02611	0.141553	0.00100
20	7	47.0400	42.1400	1659.06	0.03048	0.116279	0.00213
20	7	44.1000	43.1200	1414.70	0.03119	0.022727	0.00100
20	14	44.1000	36.2600	1586.18	0.03048	0.216216	0.00268
20	14	49.0000	48.0200	1890.55	0.02794	0.020408	0.00202
20	14	55.8600	54.4880	1950.18	0.03048	0.025180	0.00184

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
20	21	51.9400	43.7080	1911.99	0.02794	0.188341	0.00100
20	21	48.0200	47.0400	1851.97	0.02794	0.020833	0.00201
20	21	54.8800	48.0200	2100.61	0.02613	0.142857	0.00100
20	28	67.5683	57.7886	3791.91	0.01782	0.169231	0.00100
20	28	68.4573	61.3449	4830.30	0.01524	0.115942	0.00107
20	28	65.7901	46.2309	3733.57	0.01778	0.423077	0.00100
25	7	33.3200	29.9880	1686.61	0.02032	0.111111	0.00100
25	7	45.6680	35.0840	1726.57	0.02794	0.301676	0.00149
25	7	47.2360	37.0440	1458.43	0.03302	0.275132	0.00100
25	14	41.1600	38.2200	2149.61	0.02032	0.076923	0.00117
25	14	45.0800	39.9840	1967.72	0.02296	0.127451	0.00100
25	14	50.9600	49.0000	1753.76	0.03048	0.040000	0.00142
25	21	42.1400	35.2800	1388.98	0.03302	0.194444	0.00268
25	21	43.1200	38.2200	1671.92	0.02794	0.128205	0.00215
25	21	49.9800	48.0200	2100.61	0.02540	0.040816	0.00161
25	28	54.8800	50.9600	1543.31	0.03556	0.076923	0.00100
25	28	45.0800	41.3560	1480.17	0.03048	0.090047	0.00100
25	28	50.9600	49.9800	1513.63	0.03556	0.019608	0.00189

### APÉNDICE 4

#### DATOS DE LOS LOGARITMOS NATURALES EMPLEADOS PARA DETERMINAR SUPERFICIES DE RESPUESTA PARA CADA MUESTRA A DISTINTOS PORCENTAJES DE ZEOLITA PARA DIFERENTES DÍAS DE CURADO

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Ln Esfuerzo de Fluencia (Ln Mpa)	Ln Esfuerzo Máximo (Ln Mpa)	Ln Deformación Máxima	Ln Módulo Elástico (Ln Mpa)	Ln a	Ln m
0	7	1.903171	1.823990	3.720187	-1.750068	-0.698970	-2.595166
0	7	1.903171	1.794027	3.787134	-1.817015	-0.544068	-2.661544
0	7	1.917412	1.893412	3.710427	-1.750068	-1.245514	-2.777284
0	14	1.940155	1.775004	3.768110	-1.750068	-0.334713	-2.534617
0	14	1.944564	1.852019	3.748215	-1.750068	-0.624336	-2.686133
0	14	1.944564	1.775004	3.768110	-1.750068	-0.320925	-2.557520
0	21	1.804139	1.787800	3.303786	-1.481223	-1.416359	-2.863279
0	21	1.801459	1.644439	3.285361	-1.481223	-0.360956	-3.000000
0	21	1.823735	1.703876	3.309496	-1.481223	-0.497806	-3.000000
0	28	1.888449	1.852019	3.544095	-1.640924	-1.057992	-3.000000
0	28	1.883427	1.787778	3.537847	-1.640924	-0.608400	-3.000000
0	28	1.888449	1.777589	3.527657	-1.639217	-0.536404	-3.000000
5	7	1.663324	1.634679	3.326756	-1.660747	-1.166330	-3.000000
5	7	1.776556	1.712212	3.265985	-1.481223	-0.796706	-3.000000
5	7	1.762078	1.744043	3.260028	-1.494850	-1.372603	-3.000000
5	14	1.806261	1.719781	3.615977	-1.750068	-0.656909	-2.642065
5	14	1.823990	1.806261	3.623276	-1.750068	-1.380208	-2.718967
5	14	1.829743	1.755109	3.651305	-1.750068	-0.726999	-2.568636
5	21	1.823990	1.775004	3.592019	-1.692076	-0.922985	-2.486782
5	21	1.823990	1.755109	3.572124	-1.692076	-0.764787	-2.609065
5	21	1.883427	1.818161	3.714357	-1.750068	-0.790051	-2.519993

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Ln Esfuerzo de Fluencia (Ln Mpa)	Ln Esfuerzo Máximo (Ln Mpa)	Ln Deformación Máxima	Ln Módulo Elástico (Ln Mpa)	Ln a	Ln m
5	28	1.829743	1.806261	3.447186	-1.553774	-1.255269	-2.419075
5	28	1.835420	1.689292	3.585488	-1.692076	-0.397940	-2.595166
5	28	1.868007	1.775004	3.592019	-1.640924	-0.621955	-2.400117
10	7	1.793315	1.718767	3.234753	-1.419075	-0.727541	-2.718967
10	7	1.762078	1.747101	3.300874	-1.515985	-1.454841	-2.806875
10	7	1.750138	1.698796	3.390873	-1.631341	-0.901391	-3.000000
10	14	1.731589	1.707229	3.302396	-1.553774	-1.238884	-2.970616
10	14	1.762078	1.747101	3.300874	-1.515985	-1.454841	-2.806875
10	14	1.776556	1.754654	3.235877	-1.449038	-1.286308	-3.000000
10	21	1.604010	1.582291	3.136064	-1.515985	-1.290035	-2.954677
10	21	1.644439	1.634679	3.275602	-1.595166	-1.643458	-2.694649
10	21	1.653984	1.616539	3.257463	-1.595166	-1.045531	-3.000000
10	28	1.797406	1.769377	3.218415	-1.419075	-1.176089	-3.000000
10	28	1.817301	1.804139	3.223215	-1.391046	-1.511887	-2.863279
10	28	1.854549	1.836324	3.255398	-1.391046	-1.367978	-3.000000
15	7	1.698796	1.588921	3.229846	-1.481223	-0.540790	-2.446117
15	7	1.762078	1.681422	3.235195	-1.472886	-0.690195	-3.000000
15	7	1.723620	1.698796	3.252569	-1.515985	-1.230445	-3.000000
15	14	1.776556	1.747101	3.263087	-1.481223	-1.153818	-3.000000
15	14	1.747101	1.728419	3.282191	-1.530767	-1.356982	-3.000000
15	14	1.672467	1.663324	3.179308	-1.501689	-1.672090	-3.000000
15	21	1.681422	1.634679	3.275602	-1.553774	-0.944484	-2.605548
15	21	1.715502	1.663324	3.258491	-1.515985	-0.893945	-2.735182
15	21	1.715502	1.677862	3.318785	-1.595166	-1.043183	-3.000000
15	28	1.776556	1.744043	3.193080	-1.416235	-1.109361	-3.000000
15	28	1.672467	1.653984	3.169968	-1.481223	-1.361730	-2.917215
15	28	1.739414	1.723620	3.172658	-1.419075	-1.431364	-2.913640
20	7	1.690196	1.632700	3.273624	-1.583193	-0.849081	-3.000000
20	7	1.672467	1.624695	3.219862	-1.515985	-0.934499	-2.671620
20	7	1.644439	1.634679	3.150664	-1.505985	-1.643458	-3.000000

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Ln Esfuerzo de Fluencia (Ln Mpa)	Ln Esfuerzo Máximo (Ln Mpa)	Ln Deformación Máxima	Ln Módulo Elástico (Ln Mpa)	Ln a	Ln m
20	14	1.644439	1.559428	3.200352	-1.515985	-0.665112	-2.571865
20	14	1.690196	1.681422	3.276588	-1.553774	-1.690200	-2.694649
20	14	1.747101	1.736301	3.290075	-1.515985	-1.598944	-2.735182
20	21	1.715502	1.640561	3.281486	-1.553774	-0.725055	-3.000000
20	21	1.681422	1.672467	3.267634	-1.553774	-1.681248	-2.696804
20	21	1.739414	1.681422	3.322345	-1.582861	-0.845098	-3.000000
20	28	1.829743	1.761842	3.578858	-1.749092	-0.771520	-3.000000
20	28	1.835420	1.787778	3.683974	-1.817015	-0.935759	-2.970616
20	28	1.818161	1.664932	3.572124	-1.750068	-0.373581	-3.000000
25	7	1.522705	1.476948	3.227015	-1.692076	-0.954243	-3.000000
25	7	1.659612	1.545109	3.237184	-1.553774	-0.520459	-2.826814
25	7	1.674273	1.568718	3.163886	-1.481223	-0.560459	-3.000000
25	14	1.614475	1.582291	3.332360	-1.692076	-1.113944	-2.931814
25	14	1.653984	1.601886	3.293963	-1.639028	-0.894657	-3.000000
25	14	1.707229	1.690196	3.243970	-1.515985	-1.397940	-2.847712
25	21	1.624695	1.547529	3.142696	-1.481223	-0.711205	-2.571865
25	21	1.634679	1.582291	3.223215	-1.553774	-0.892095	-2.667562
25	21	1.698796	1.681422	3.322345	-1.595166	-1.389170	-2.793174
25	28	1.739414	1.707229	3.188453	-1.449038	-1.113944	-3.000000
25	28	1.653984	1.616539	3.170312	-1.515985	-1.045531	-3.000000
25	28	1.707229	1.698796	3.180020	-1.449038	-1.707567	-2.723538

## BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM C 109/C 109M – 02 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”
2. ASTM C 311 – 77. “Sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland cement concrete”
3. BOSCH PEDRO / SCHIFTER ISAAC, “La Zeolita una Piedra que Hierve” ([http://www.jovenclub.cu/libros/Libros\\_1/ciencia2/55/htm/SEC\\_3.HTM](http://www.jovenclub.cu/libros/Libros_1/ciencia2/55/htm/SEC_3.HTM))
4. CANALS LLUÍS, “Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes, de la planta térmica de Mudunuru (India), en materiales de construcción” (<http://hdl.handle.net/2099.1/3325>)
5. COSTAFREDA JORGE y CALVO BENJAMÍN, “Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento.” ([http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Consultas/influencia\\_zeolita\\_mortero.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Consultas/influencia_zeolita_mortero.pdf))

6. CORTÉS, VALERIO, “La Puzolana”, Boletín Informativo N° 10, Asociación de Antiguos Alumnos de la Universidad Politécnica de Almadén [España], Diciembre de 2007. ([www.uclm.es/CR/EUP-ALMADEN/aaa eup a/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf](http://www.uclm.es/CR/EUP-ALMADEN/aaa eup a/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf))
7. ENCARTA, "Cemento," Enciclopedia Microsoft® Encarta® Online 2008
8. ESCALANTE JOSÉ, “Materiales alternativos al cemento Pórtland”, Revista Avance y Perspectiva vol. 21, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional [México], Marzo-Abril de 2002.
9. GARCIA ADOLFO, “Consideraciones Generales Sobre Concreto Reforzado” (Tesis, Facultad de Arquitectura, Universidad De San Carlos De Guatemala, Julio de 2005).
10. GONZÁLES DE LA COTERA MANUEL, “Nuevos Conceptos en Cementos y Aditivos” ([http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/cementoMGC60\\_aditivos.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/cementoMGC60_aditivos.pdf)).

11. JIMENEZ HECTOR, "Obtención de Concreto de Alta Resistencia mediante adición en el diseño de un Superplastificante y Ceniza de Cascarilla de Arroz" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2001).
  
12. MARTÍNEZ LESDAY, QUINTANA RAFAEL y MARTIRENA JOSÉ, "Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante", Revista Ingeniería de Construcción Vol. 22 No2, Agosto de 2007.
  
13. MORANTE FEMANDO, "Las zeolitas de la costa de Ecuador (Guayaquil) : geología, caracterización y aplicaciones", (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2004).
  
14. POWERS, T.C., "A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete", Research Department Bulletin 25, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1947.

15. SOLÍS RÓMEL y MORENO ERIC “Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo”  
Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Asociación de Antiguos  
Volumen 9 N° 3, Universidad Autónoma de Yucatán [México], Septiembre  
- Diciembre 2005.