

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

“Determinación de Variación en la Resistencia a la Compresión  
de la Pasta de Cemento Tipo 1 Mediante la Adición de 25% de  
Zeolita Tipo 1 y Curado al Aire”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Carlos Julio Guallpa Rivera

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres, a mi director de tesis el Ing. Mauricio Cornejo, y a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de esta tesis.

## DEDICATORIA

ESTA TESIS, ESTÁ  
DEDICADA  
A MIS PADRES Y  
HERMANOS.

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

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

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Rodrigo Perugachi B.

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”

---

Carlos Julio Gualpa Rivera

## RESUMEN

La presente tesis se llevó a cabo para la determinación de la variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 mediante la adición de 25% de zeolita tipo 1 y con un curado al aire.

El objetivo de este trabajo es determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 curado al ambiente cuando se le adiciona un 25% de zeolita tipo 1, a través de la simulación matemática de la relación esfuerzo deformación y datos experimentales.

La hipótesis central es *“la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 curado al ambiente aumentará con la adición de x% de zeolita tipo 1 con respecto a un control”*.

Para cumplir los objetivos propuestos se aplicó la siguiente metodología:

- Identificar las propiedades del cemento tipo I
- Diseño del experimento
- Experimentación
- Análisis de los resultados
- Modelización y validación de Resultados

El material utilizado fue una pasta de cemento, compuesto por cemento tipo 1, x% de zeolita y Agua. El primer paso de la metodología que se aplicó es la identificación de las propiedades del Cemento Tipo 1 en especial la propiedad mecánica de resistencia a la compresión.

Para el diseño del experimento se consideraron las distintas variables a ser controladas como la granulometría de la zeolita, la relación agua-cemento, el método y tiempo de curado y las dimensiones de las probetas. Las mismas que consistieron en cubos de 50mm de arista y se realizaron tres réplicas para cada ensayo de ruptura.

La relación agua/cemento para la mezcla se estableció en 0.3 y se realizó la adición de Zeolita tipo 1 en una relación de 25 y 27.5 en porcentaje de masa; para cada compuesto se realizaron ensayos mecánicos a 7, 14, 21, y 28 y a 4, 11, 18 y 25 días de curado respectivamente.

La experimentación se desarrolló siguiendo los estándares apropiados; en el caso de la preparación del material compuesto se usó la norma ASTM C 595-03 mientras que para realizar los ensayos mecánicos se usó la norma ASTM C 109/C 109M-02.

La experimentación se realizó en cinco partes: 1) el proceso de molienda, 2) el proceso de mezclado, 3) preparación de los moldes, 4) elaboración de las probetas y 5) el proceso de ruptura de las muestras.

Para el análisis de los resultados se usó el Software STATISTICA realizando pruebas de bondad de ajuste, análisis de varianza, pruebas de comparaciones múltiples así determinando los modelos de regresión dentro del rango experimental.

Para la modelación de la curva esfuerzo-deformación se implementó un algoritmo en el software Matlab y se analizaron los residuales entre la curva de simulación y los datos experimentales mediante pruebas de bondad de ajuste.

Finalmente se determinó un modelo de regresión para interpolar la resistencia a la compresión en función de los días de curado y porcentaje de adición de zeolita. Para lo cual se determinó la variación entre los datos obtenidos por regresión y los datos experimentales seleccionándose el mejor ajuste en los residuales.

Como principales conclusiones se pueden mencionar las siguientes:

- La máxima resistencia a la compresión se obtuvo con la adición de 25% y 27.5% de Zeolita a los 14 y 11 días de curado respectivamente.
- El porcentaje óptimo de adición de Zeolita es del 20% esto es debido a que tuvo una mayor resistencia a la compresión a los 28 días de curado que el control con un 95% de confianza.



- Las curvas de simulación del esfuerzo de compresión versus la deformación proporcionan un buen ajuste de los datos experimentales con excepción de la curva con adición de 27.5% de zeolita a los 18 días de curado con un 95% de confianza.
- El modelo que se obtuvo por regresión para predecir el esfuerzo último en función del porcentaje de zeolita adicionado y los días de curado, proporciona un buen ajuste de los datos experimentales sólo para adiciones mayores a 7.5% de zeolita y para un curado mayor a cuatro días con un 95% de confianza.

Entre las recomendaciones más importantes se pueden resaltar las siguientes:

- En la elaboración de las probetas se sugiere evitar el uso excesivo de agente engrasante en los moldes y eliminar las burbujas de aire mediante un apisonado de la mezcla dentro de los compartimentos de acuerdo a la norma. De esta manera se reducirán al máximo las porosidades en los especímenes con lo que se evitará que la resistencia a la compresión disminuya.
- Los ensayos de ruptura deben ser realizados en una misma máquina de Compresión, el uso de distintas prensas como en el caso de nuestro experimento pueden variar la exactitud de las lecturas debido a que las máquinas tienen diferentes calibraciones.

- Antes de realizar un ensayo de compresión se debe verificar la alineación entre la máquina y las probetas para evitar errores en la toma de las lecturas y más aun cuando existen partes móviles de la máquina que pueden originar precarga.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS.....	X
SÍMBOLOGIA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ÍNDICE DE PLANOS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	2
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.1.1. Justificación.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivos Generales.....	5
1.2.2. Objetivos Específicos.....	5
1.3. Metodología.....	6
1.4. Estructura de tesis.....	9

## CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Cemento Tipo I.....	11
2.2. Zeolita I.....	16
2.3. Curado del cemento.....	17
2.4. Modelos Estadísticos.....	19
2.5. Diseño Factorial.....	23
2.6. Estado del Arte del Modelamiento de cemento y adiciones minerales.....	25

## CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA.....	27
3.1. Diseño del experimento.....	27
3.2. Experimentación.....	28
3.3. Modelación.....	38

## CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	46
4.1. Tabulación de datos y resultados.....	46
4.2. Análisis de Resultados.....	49
4.3. Modelización de Resultados.....	66
4.4. Validación de Resultados.....	81

## CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
5.1. Conclusiones.....	90
5.2. Recomendaciones.....	91

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

INECYC	Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
ASTM C 595–03	Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
ASTM C 109	Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.
°C	Grados centígrados
HR	Humedad relativa
Kg.	Kilogramo
gr.	Gramo
min.	Minuto
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetro cuadrado
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetro cuadrado
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico

## SÍMBOLOGIA

$f'c$	Resistencia a la compresión
E	Módulo de elasticidad
$H_0$	Hipótesis nula
$H_a$	Hipótesis alternativa
N	Número total de la muestra
t	Número de tratamientos
r	Número de réplicas
Y	Variable de respuesta
u	Media de los tratamientos
SC	Suma de cuadrados
CM	Cuadrados Medios
K-S	Prueba de Kolmogorov Smirnov
F	Estadístico de prueba de Fisher.
$X^2$	Estadístico de prueba de distribución Ji cuadrada.
G2	Grupo de zeolita curado al aire
N	Newton
$\sigma_c$	Esfuerzo de compresión
$\sigma_Y$	Esfuerzo de fluencia
m	Constante positiva
a	Constante positiva

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Metodología de la investigación.....	6
Figura 3.1	Zeolita en estado bruto.....	29
Figura 3.2	Trituradora de mandíbulas.....	30
Figura 3.3	Cuarteo.....	30
Figura 3.4	Molino de discos.....	30
Figura 3.5	Molino de bolas.....	31
Figura 3.6	Tamaño de partículas de muestreo.....	31
Figura 3.7	Mezclador mecánico.....	34
Figura 3.8	Elaboración de la mezcla.....	34
Figura 3.9	Llenado de primera capa de mezcla.....	35
Figura 3.10	Orden de apisonamiento de especímenes.....	36
Figura 3.11	Probeta deformada en ensayo de ruptura.....	38
Figura 3.12	Carga uniaxial de una barra.....	39
Figura 3.13	Curva esfuerzo-deformación.....	43
Figura 4.1	Gráfico de bondad de ajuste del esfuerzo último con 25% de zeolita.....	50
Figura 4.2	Gráfico de distribución de medias del esfuerzo último para 25% de zeolita.....	52
Figura 4.3	Gráfico de bondad de ajuste del esfuerzo último con 27.5% de zeolita.....	52
Figura 4.4	Gráfico de distribución de medias del esfuerzo último para 27.5% de zeolita.....	54
Figura 4.5	Gráfico de bondad de ajuste de datos del esfuerzo último para el modelo.....	55
Figura 4.6	Distribución de esfuerzo último vs días de curado para datos del modelo.....	57
Figura 4.7	Gráfico del esfuerzo último vs días de curado y porcentaje de zeolita para datos del modelo.....	60
Figura 4.8	Gráfico de bondad de ajuste de datos del esfuerzo último para la validación.....	61
Figura 4.9	Distribución de esfuerzo último vs días de curado para datos de validación.....	63



Figura 4.10	Gráfico del esfuerzo último vs días de curado y porcentaje de zeolita para datos de validación.....	65
Figura 4.11	Curvas de $a$ y $m$ a diferentes días de curado con 25% de zeolita.....	68
Figura 4.12	Curvas esfuerzo deformación con 25% de zeolita a 7 días de curado.....	69
Figura 4.13	Curvas esfuerzo deformación con 25% de zeolita a 14 días de curado.....	69
Figura 4.14	Curvas esfuerzo deformación con 25% de zeolita a 21 días de curado.....	70
Figura 4.15	Curvas esfuerzo deformación con 25% de zeolita a 28 días de curado.....	70
Figura 4.16	Curvas esfuerzo deformación con 25% de zeolita a diferentes días de curado.....	71
Figura 4.17	Curva de regresión con 5% de zeolita.....	75
Figura 4.18	Curva de regresión con 10% de zeolita.....	75
Figura 4.19	Curva de regresión con 15% de zeolita.....	76
Figura 4.20	Curva de regresión con 20% de zeolita.....	76
Figura 4.21	Curva de regresión con 25% de zeolita.....	77
Figura 4.22	Superficie del modelo de regresión.....	80
Figura 4.23	Curvas de $a$ y $m$ a diferentes días de curado con 27.5% de zeolita.....	82
Figura 4.24	Curvas esfuerzo vs deformación con 27.5% de zeolita a 4 días de curado.....	83
Figura 4.25	Curvas esfuerzo vs deformación con 27.5% de zeolita a 11 días de curado.....	83
Figura 4.26	Curvas esfuerzo vs deformación con 27.5% de zeolita a 18 días de curado.....	84
Figura 4.27	Curvas esfuerzo vs deformación con 27.5% de zeolita a 25 días de curado.....	84
Figura 4.28	Curvas esfuerzo vs deformación con 27.5% de zeolita a diferentes días de curado.....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Tabla Anova.....	22
Tabla 2	Tamaño de partícula por tamiz.....	32
Tabla 3	Porcentajes de mezcla por unidad de especímenes.....	33
Tabla 4	Porcentajes de mezcla para doce especímenes.....	33
Tabla 5	Esfuerzos últimos de ruptura para el modelo.....	47
Tabla 6	Esfuerzos últimos de ruptura para la validación.....	48
Tabla 7	Intervalos de confianza de $f'c$ con 25% de zeolita.....	51
Tabla 8	Análisis de varianza de $f'c$ con 25% de zeolita.....	51
Tabla 9	Intervalos de confianza de $f'c$ con 27.5% de zeolita.....	53
Tabla 10	Análisis de varianza de $f'c$ con 27.5% de zeolita.....	53
Tabla 11	Intervalos de confianza de los datos de esfuerzo último para el modelo.....	56
Tabla 12	Resultados del test de dunnett de los datos de esfuerzo último para el modelo.....	59
Tabla 13	Intervalos de confianza de los datos de esfuerzo último para la validación.....	62
Tabla 14	Resultados del test de Dunnett de los datos de esfuerzo último para la validación.....	64
Tabla 15	Valores de respuestas del material bajo la adición de 25% de zeolita.....	67
Tabla 16	Residuales de curva de simulación con 25% de zeolita.....	71
Tabla 17	Bondad de ajuste para curva de simulación con 25% de zeolita.....	73
Tabla 18	Coeficientes de regresión para diferentes porcentajes de zeolita.....	74
Tabla 19	Análisis de varianza de los modelos de regresión para diferentes porcentajes de zeolita.....	77
Tabla 20	Resultados del estadístico de Mallows cp para distintos modelos de regresión.....	78
Tabla 21	Resultados del coeficiente de determinación para distintos modelos de regresión.....	79

Tabla 22	Análisis de varianza para el modelo de regresión seleccionado.....	80
Tabla 23	Valores de respuestas del material bajo la adición de 27.5% de zeolita.....	81
Tabla 24	Residuales de curva de simulación con 27.5% de zeolita.....	85
Tabla 25	Bondad de ajuste para curva de simulación con 27.5% de zeolita.....	87
Tabla 26	Residuales de curva de regresión.....	88
Tabla 27	Bondad de ajuste para curva de regresión.....	89

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1      Esquema de ensayo de compresión

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se llevó a cabo para la determinación de la variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 mediante la adición de 25% de zeolita tipo 1 y curado al aire.

El objetivo de esta tesis es determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 curado al ambiente cuando se le adiciona un 25% de zeolita tipo 1, a través de la simulación matemática de la relación esfuerzo deformación y datos experimentales.

Para cumplir los objetivos propuestos se desarrollaron una serie de experimentos, los mismos que culminaron con ensayos de ruptura a probetas de cemento tipo 1 con adición de 25% de zeolita a 7, 14, 21 y 28 días de curado. Para esto se implementó la norma ASTM C109 y ASTM C595.

Finalmente se implementó un algoritmo para la modelización de los resultados con su respectiva validación; para esto se realizaron también ensayos de ruptura a probetas de cemento tipo 1 con adición de 27.5% de zeolita a 4, 11, 18 y 25 días de curado.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Planteamiento del problema

En Ecuador el consumo de cemento Pórtland requiere del 100 por ciento de la producción de las cuatro industrias cementeras que actualmente existen en el país, constituyéndose como el material de construcción mas ampliamente usado y de mayor importancia.

Según el Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Concreto (INECYC), el consumo se incrementó de 2,8 millones de toneladas en 2000 a 4,1 millones de toneladas en 2006. El movimiento urbanístico es el principal motor que mueve a este sector, sin descartar la importancia de las obras de los gobiernos seccionales, que en la actualidad demandan más del 20 por ciento de la producción de cemento.

Frente a estos antecedentes es necesaria la realización de investigaciones con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas

del cemento Pórtland mediante la adición de ciertos materiales como las puzolanas.

Uno de los principales problemas de producción y procesamiento del cemento son los altos costos de la materia prima los mismos que se podrían reducir si se utilizan aditivos disponibles localmente, de bajo costo de procesamiento que le confieran al cemento las mismas propiedades que actualmente tiene o las mejore.

La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseños de puentes, de edificios y otras estructuras. El concreto de uso generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350 Kg./cm<sup>2</sup>, un concreto de alto desempeño tiene una resistencia a la compresión de por lo menos 420 Kg./cm<sup>2</sup>. Este es un factor decisivo para dimensionar una sección de concreto y es una limitación cuando se dispone de espacios reducidos. Por lo tanto sería muy favorable en el diseño de estructuras de hormigón el aumento de la resistencia a la compresión del cemento.

Uno de los principales factores que afectan la resistencia del cemento es la formación de poros llenos de agua y aire en la etapa de endurecimiento posterior al fraguado, ya que la resistencia esta en la parte sólida de la pasta en su mayoría en el hidrato de silicato de

calcio y en las fases cristalinas de esta manera entre menos porosa sea la pasta de cemento, será mas resistente.

### **1.1.1. Justificación**

En un mercado muy competitivo donde las industrias cementeras hacen esfuerzos para aumentar sus producciones frente a la creciente demanda del mercado nacional es imprescindible la producción de un cemento con mejores propiedades que las ya existentes, certificadas por estándares internacionales que permita la exportación de este producto generando mayores ingresos para el país.

En la provincia del Guayas en zonas aledañas a la vía a la costa existen grandes yacimientos de un tipo particular de puzolana conocido con el nombre de zeolita.

Las puzolanas añadidas en el cemento tienen la propiedad de fijar la cal liberada en la hidratación del clinker. Este proceso de liberación-fijación de cal se prolonga mucho en el tiempo con lo que el cemento va ganando resistencia mecánica con la edad al formarse nuevos compuestos resistentes de naturaleza muy estable. De lo anterior se deduce que la zeolita en proporciones adecuadas le confiere al hormigón una elevada densidad y



disminución de su porosidad haciéndolo mas compacto y por ende aumentando su resistencia mecánica.

La última es la principal razón que motiva la realización de esta tesis cuyos objetivos se detallan en la siguiente sección.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos Generales**

Determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 curado al ambiente cuando se le adiciona un 25% de zeolita tipo 1, a través de la simulación matemática de la relación esfuerzo deformación y datos experimentales.

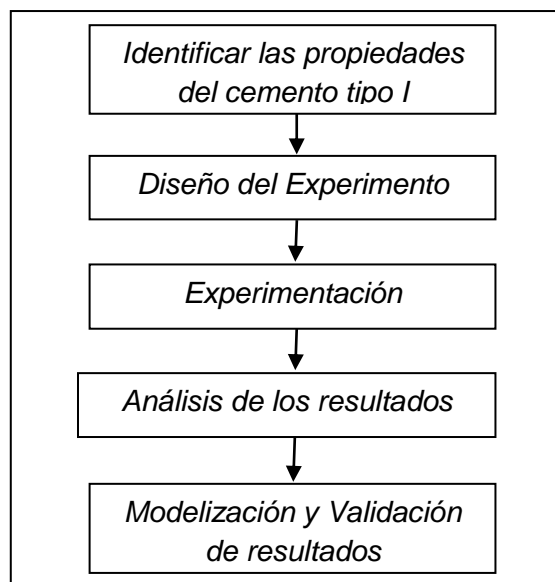
### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar la resistencia a la compresión de la pasta de Cemento Tipo I para establecer como variará ésta propiedad con la adición de un x% porcentaje de zeolita y un curado al ambiente.
- Implementar la metodología experimental establecida en la Norma ASTM C109 y ASTM C595 con excepción de la inclusión de agregado fino.

- Implementar un algoritmo en MATLAB que mediante el ingreso del módulo de Young y del esfuerzo de fluencia obtenidos experimentalmente, permita simular la gráfica esfuerzo vs deformación.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente de los diferentes porcentajes de zeolita incluido el control, mediante el uso del software “Estatística” para determinar cuál es el tratamiento que presenta la mayor resistencia a la compresión.

### 1.3. Metodología

La metodología de la siguiente tesis esta graficada en la figura 1.1 y se detalla a continuación:



**FIGURA 1.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

El primer paso de la metodología que se aplicará es la identificación de las propiedades del Cemento Tipo 1, en especial la propiedad mecánica de resistencia a la compresión, de esta manera al final de la investigación se cuantificará como afecta a la resistencia del cemento Pórtland tipo 1 la inclusión de distintos porcentajes de Zeolita Tipo 1 curado al aire.

Para el diseño del experimento se considerarán las distintas variables a ser controladas como la granulometría de la zeolita, la relación agua-cemento, el método y tiempo de curado y las dimensiones de las probetas. Las mismas que consistirán en cubos de 50mm de arista y se realizarán tres réplicas para cada ensayo de ruptura.

La adición de Zeolita tipo 1 será en una relación de 25 y 27.5 en porcentaje de masa; para cada compuesto se realizarán ensayos mecánicos a 7, 14, 21, y 28 y a 4, 11, 18 y 25 días de curado respectivamente.

La experimentación se desarrollará siguiendo los estándares apropiados; en el caso de la preparación del material compuesto se usará la norma ASTM C 595-03 y para la preparación de las probetas y los ensayos mecánicos se usará la norma ASTM C 109/C 109M-02.

La experimentación se realizará en cinco partes: 1) el proceso de molienda, 2) el proceso de mezclado, 3) preparación de los moldes, 4) elaboración de las probetas y 5) el proceso de ruptura de las muestras.

Para el análisis de los resultados se usará el Software STATISTICA, con el mismo se realizarán pruebas de bondad de ajuste, análisis de varianza, pruebas de comparaciones múltiples y se determinarán modelos de regresión.

Para la modelación de la curva esfuerzo-deformación se implementará un algoritmo en el software Matlab y se analizarán los residuales de la curva de simulación y los datos experimentales mediante pruebas de bondad de ajuste.

Finalmente se determinará un modelo de regresión para interpolar la resistencia a la compresión en función de los días de curado y porcentaje de adición de zeolita y se realizará la respectiva validación. Para lo cual se determinará la variación entre los datos obtenidos por regresión y los datos experimentales seleccionándose el mejor ajuste en los residuales.

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

La presente tesis se encuentra dividida en cinco capítulos, los mismos que se describen a continuación:

El capítulo 1 se llama Generalidades, en esta sección se detallarán el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos que motivan la realización de esta tesis. Al final de este capítulo se describirá la Metodología que se aplicará en esta investigación y la estructura de la tesis; en esta última parte se describirá brevemente el contenido de las diferentes partes en que está dividida la misma.

El Capítulo 2 se llama Marco Teórico, en esta parte se explicarán los temas más importantes concernientes a esta investigación. Estos temas incluyen la clasificación, composición y propiedades del cemento, zeolita I, métodos de curado del cemento, modelos estadísticos, diseño factorial y estado del arte del modelamiento del cemento y adiciones minerales.

El capítulo 3 se llama Metodología, en esta sección se explicará el diseño del experimento y la experimentación que consistirán en la implementación de las normas apropiadas. El último punto que se tratará en este capítulo es la implementación de un algoritmo para modelar la curva esfuerzo-deformación mediante la inclusión de datos experimentales.

El capítulo 4 se llama Resultados y Análisis, en esta sección primeramente se tabularán los datos y resultados de los ensayos de compresión. Estos resultados se analizarán mediante la estadística inferencial y serán modelados mediante un programa en Matlab. Al final de este capítulo se realizará la validación de los resultados para lo cual se determinará el grado de ajuste de los modelos encontrados.

El capítulo 5 se llama Conclusiones y Recomendaciones, en esta última parte de la tesis se detallarán cuales de los objetivos se cumplieron y se mencionarán las recomendaciones necesarias para el desarrollo de futuras investigaciones en temas relacionados con el cemento.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Cemento Tipo I

El cemento es el conglomerante hidráulico más importante el mismo que al ser amasado con el agua fragua y endurece tanto expuesto al aire como sumergido en agua, por ser estables en tales condiciones los compuestos resultantes de su hidratación. De una manera muy general pueden clasificarse como cementos Pórtland y cementos especiales [1].

El cemento constituye la parte activa y aglomerante del hormigón, producto de una reacción química con el agua, en donde se requiere tiempo y condiciones favorables de humedad y temperatura.

#### **Clasificación del cemento según su composición**

Los cementos de uso más común en construcción son:

Cemento Pórtland, cemento Blanco, cemento Puzolánico, cemento Siderúrgico, cemento de fraguado rápido y cemento aluminoso. A continuación únicamente se describen los cementos Pórtland y los cementos puzolánicos.

**Cementos Pórtland.-** Los cementos Pórtland se obtienen por molienda conjunta del clinker y de la cantidad adecuada del regulador de fraguado que es normalmente, piedra de yeso natural. Se llama clinker de cemento Pórtland al producto que se obtiene al calcinar hasta fusión parcial (unos 1400 °C a 1500 °C) mezclas muy íntimas preparadas artificialmente, de calizas y arcillas hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes.

**Cementos Puzolánicos.-** Son cementos que se obtienen por molienda conjunta de clinker de cemento Pórtland y regulador del fraguado, en proporción inferior al 80 % en peso, y puzolana en proporción superior al 20% en peso.

Se denomina puzolana en sentido estricto al producto natural de origen volcánico que, finamente dividido no posee ninguna propiedad hidráulica pero contiene constituyentes (sílice y alúmina) capaces de fijar cal a la temperatura ambiente en presencia de agua. En sentido amplio, el término puzolana se aplica también a otros productos artificiales o naturales de origen no volcánico que tienen análogas



propiedades, tales como las cenizas volantes, la tierra de diatomeas y las arcillas activadas, etc.

### **Norma ASTM**

Los cementos deben ajustarse a las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), para el cemento Pórtland la norma aceptada es la ASTM C 150 la misma que especifica cinco tipos de cemento:

- 1) El Tipo I, es el más fácil de conseguir, se usa cuando no se requieren las propiedades especiales de los demás tipos.
- 2) El Tipo II se destina a uso general, pero en particular cuando se requiere resistencia moderada a los sulfatos o calor moderado de hidratación. Algunos cementos reúnen los requisitos correspondientes a ambos tipos y se denominan tipo I/II.
- 3) El cemento Tipo III se usa para obtener alta resistencia temprana.
- 4) El Tipo IV se usa cuando se requiere bajo calor de hidratación.
- 5) El Tipo V se usa para obtener alta resistencia a los sulfatos.

### **Composición Química del Cemento Pórtland.**

La propiedad de liga de las pastas de cemento Pórtland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación.

El cemento Pórtland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% o más del peso del cemento Pórtland y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio férrico tetracálcico. Además de estos componentes principales, existen otros que desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los tipos de cemento Pórtland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

### **Características Físicas y Mecánicas del Cemento Pórtland**

Las características físicas y mecánicas más importantes son: finura del molido, peso específico, fraguado, expansión, resistencia mecánica y módulo de elasticidad [2].

**a) Finura del Molido.-** es una característica que influye en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y primer endurecimiento del cemento. El diámetro promedio de una partícula de cemento típica es de aproximadamente 10 micras.

La finura de un cemento se mide por sus residuos en dos tamices tipo, de 900 y 4900 mallas por centímetro cuadrado, respectivamente; o bien determinando su superficie específica por algún procedimiento adecuado.

- b) Peso Específico.-** Este varía muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 3 y 3.15 g/cm<sup>3</sup>.
- c) Fraguado.-** Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, los mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas. Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto.
- d) Expansión.-** La expansión puede medirse por el método del autoclave o por el método de las agujas. En estos métodos se pone de manifiesto a corto plazo el carácter más o menos expansivo que tendrá un cemento a largo plazo debido a la existencia de magnesia o de cal libre en exceso.
- e) Resistencias Mecánicas.-** La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente

se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) a una edad de 28 días se le designa con el símbolo  $f' c$ . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas en especímenes de mortero o de concreto.

**f) El módulo de elasticidad.-** denotado por medio del símbolo  $E$ , se puede definir como la relación del esfuerzo normal y la deformación correspondiente, para esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material. Para concretos de peso normal,  $E$  fluctúa entre 140,600 y 422,000  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ , y se puede aproximar como 15,100 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

## **2.2. Zeolita I**

La Zeolita es una roca compuesta de aluminio, silicio, y oxígeno. En otras palabras son aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos que al deshidratarse desarrollan, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimos de 3 a 10 ángstrom [3].

### **Propiedades químicas.**

Las aplicaciones de las zeolitas naturales hacen uso de uno o más de sus propiedades químicas, que generalmente incluye el intercambio de iones, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas

propiedades están en función de la estructura del cristal de cada especie, y su estructura y composición catiónica. Entre las principales propiedades tenemos:

**Propiedades de adsorción.-** Las zeolitas cristalinas son los únicos minerales adsorbentes. Los grandes canales centrales de entrada y las cavidades de las zeolitas se llenan de moléculas de agua que forman las esferas de hidratación alrededor de dos cationes cambiabiles. Si el agua es eliminada y las moléculas tienen diámetros seccionales suficientemente pequeños para que estas pasen a través de los canales de entrada entonces son fácilmente adsorbidos en los canales deshidratados y cavidades centrales. Las moléculas demasiado grandes no pasan dentro de las cavidades centrales y se excluyen dando origen a la propiedad de tamiz molecular una propiedad de las zeolitas.

### **2.3. Curado del Cemento**

Durante el proceso de fraguado y primeros días de endurecimiento, se producen pérdidas de agua por evaporación, creándose una serie de huecos o capilares en el concreto que disminuyen su resistencia. Para compensar estas pérdidas y permitir que se desarrollen nuevos procesos de hidratación con aumento de resistencias el concreto

debe curarse con abundancia de agua [1]. Los aspectos más importantes en el curado del cemento son los siguientes:

**Agua de Curado.-** Tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura. En mayor grado que el agua de amasado debe reunir ciertas condiciones para desempeñar eficazmente su función y evitar efectos perjudiciales ya que la aportación de agua de curado es mucho más amplia y de actuación más duradera.

**Tiempo de Curado.-** Para condiciones medias con cemento Pórtland normal y para elementos de hormigón armado, el periodo de curado mínimo debe ser de siete días, plazo que puede reducirse a la mitad si el cemento es de altas resistencias iniciales. Por el contrario, hay que aumentarlo a quince días cuando se trate de cementos lentos o de elementos de hormigón en masa.

En general y de acuerdo a las recomendaciones del Comité Europeo del Hormigón, el proceso de curado debe prolongarse hasta que el hormigón haya alcanzado el 70% de su resistencia de cálculo.

**Procedimientos para curar el Cemento.-** Una vez que inicia el endurecimiento del cemento este se protegerá del sol y del viento mediante algún procedimiento que le conserve su humedad propia o le aporte nueva humedad.

## 2.4. Modelos Estadísticos

Un modelo estadístico es una expresión simbólica en forma de igualdad o ecuación que se emplea en todos los diseños experimentales y en la regresión para indicar los diferentes factores que modifican la variable de respuesta [4].

Antes de describir los modelos estadísticos es necesario conocer los términos y conceptos aplicados a los estudios de investigación científica.

**Los Tratamientos.-** Son el conjunto de circunstancias creadas para el experimento, en respuesta a la hipótesis de investigación.

**Factor.-** es un grupo específico de tratamientos, las diversas categorías de un factor se denominan niveles del factor.

**La réplica.-** es la repetición independiente del experimento básico. De tal manera que cada tratamiento se aplica de manera independiente a dos o más unidades experimentales.

**Error Experimental** es la diferencia en las respuestas entre unidades experimentales, atribuibles sólo al error experimental.

**Análisis de Varianza.-** considera el problema de decidir si las diferencias observadas entre más de dos medias muestrales se

pueden atribuir al azar o si hay diferencias reales entre las medias de las poblaciones muestreadas.

**Hipótesis Estadística.-** es una afirmación o conjetura acerca de la distribución de una o más variables aleatorias.

**Diseño Experimental Completamente Aleatorizado.-** cuando todas las variaciones causadas por factores ajenos no controlados pueden incluirse así bajo el encabezado de variación fortuita

### **Modelos estadísticos lineales**

Es conocido como análisis de varianza en un sentido, es el análisis de varianza de un factor de tal manera que una variable independiente está representada por más de dos tratamientos. En este modelo la variable de respuesta de interés se expresa como:

$$Y_{ij} = u + a_i + e_{ij}$$

$$U_i = u + a_i$$

$$i = 1, 2, \dots, t \quad j = 1, 2, \dots, r$$

Donde  $u$  es la gran media,  $a_i$  son los efectos del tratamiento y  $e_{ij}$  son los valores de  $rt$  variables aleatorias, independientes que tienen distribuciones normales con medias cero y varianza común [5].



El modelo establece la condición de la hipótesis nula donde todas las observaciones pertenecen a la misma población con media  $\mu$ .

$$H_0 : \mu_i = \mu \text{ para } i = 1, 2, \dots, t$$

La correspondiente hipótesis alterna establece que sólo existen algunas diferencias entre las medias de los tratamientos.

$$H_A : \mu_i \neq \mu \text{ para al menos un valor de } i$$

La característica principal de este modelo es que permite al observador realizar un análisis en relación a las diferencias observadas considerando todos los tratamientos en un sólo cálculo.

El procedimiento para aplicar este modelo es el siguiente:

1) Estimación de los parámetros del modelo con mínimos cuadrados. Este es el método que más se usa para estimar los parámetros, propiamente las medias de los tratamientos. Para el modelo completo se usa el siguiente estimador:

$$\hat{\mu}_i = \frac{y_i}{r} = \bar{y}_i \quad i = 1, 2, \dots, t$$

Para el modelo reducido se usa el siguiente estimador:

$$\hat{\mu} = \bar{y} = \frac{y_{..}}{N}$$

2) Suma de cuadrados para identificar fuentes de variación importantes; corresponde a la suma del cuadrado del error, para el modelo completo se define como:

$$SCE = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \hat{\mu}_i)^2 = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

3) Grados de libertad; para el modelo reducido se define como número total de casos menos uno ( $N - 1$ ) y para el modelo completo como ( $N - t$ ).

4) Resumen en la tabla de análisis de varianza; consiste en construir una tabla semejante a la que se muestra en la Tabla 1.

**TABLA 1**

**TABLA ANOVA [5]**

Fuente de variación	Grados de Libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados Medios
Tratamientos	$t - 1$	SC tratamiento	$CMT = SCT / t-1$
Error	$N - t$	SC Error	$CME = SCE / N - t$
Total	$N - 1$	SC Total	

5) Pruebas de hipótesis sobre modelos lineales; en este punto se aplica un conjunto explícito de reglas para decidir si aceptamos la hipótesis nula o la rechazamos en favor de la hipótesis alternativa.

6) Determinar un modelo estadístico que se ajuste a los datos del experimento; en base al análisis se determina si el modelo completo o alterno es el que mejor caracteriza los datos del experimento.

Las ventajas de este método es que permite al investigador decidir si tiene sentido realizar análisis adicionales comparando tratamientos específicos.

Las desventajas de este método es que sólo considera a un factor como el responsable de la diferencia entre las medias entonces de alguna manera se debe asegurar que los demás factores no intervienen en el fenómeno observado [6].

## **2.5. Diseño Factorial**

Para diseños experimentales totalmente aleatorizados el diseño factorial es un tipo especial de diseño de tratamiento usado para analizar la influencia simultánea de dos o más variables independientes llamadas factores sobre la variable dependiente y la interacción entre ellas.

Un diseño factorial es un diseño experimental completo en el que se utilizan todas las combinaciones posibles de los valores seleccionados de las variables independientes. La anterior definición establece que los diseños factoriales se utilizan para manipular las

variables independientes simultáneamente y permiten evaluar por separado los efectos de cada variable independiente al igual que la interacción entre ellas [7].

Los diseños factoriales tienen las siguientes ventajas:

- 1) Analizan la interacción entre las variables
- 2) Analiza simultáneamente dos o más variables independientes en un sólo experimento.
- 3) Permite una mejor comprobación de hipótesis.

Además de las siguientes desventajas:

- 1) Incremento en el número de unidades experimentales necesarias para llevar a cabo una realización completa de un diseño factorial.
- 2) Al incrementarse el número de niveles de algunos factores o el número de factores es grande, puede ser difícil la detección de efectos significativos en el experimento (la variabilidad se puede incrementar).

### **Regresión**

Se define como un procedimiento mediante el cual se trata de determinar si existe o no relación de dependencia entre dos o más variables. Es decir, conociendo los valores de una variable

independiente, se trata de estimar los valores, de una o más variables dependientes.

Como la Estadística Inferencial permite trabajar con una variable a nivel de intervalo o razón, así también se puede comprender la relación de dos o más variables que permita relacionar mediante ecuaciones una variable en relación de la otra variable llamándose Regresión Lineal y una variable en relación a otras variables llamándose Regresión múltiple.

Casi constantemente en la práctica de la investigación estadística, se encuentran variables que de alguna manera están relacionadas entre sí, por lo que es posible que una de las variables puedan relacionarse matemáticamente en función de una u otras variables [5].

## **2.6. Estado del arte del modelamiento de cemento y adiciones minerales**

Las Investigaciones relacionadas con la adición de materiales puzolánicos al cemento Pórtland con el objeto de mejorar sus propiedades mecánicas son numerosas pero aun faltan muchos estudios para analizar la variación de estas propiedades.

En la actualidad varias investigaciones han permitido conocer satisfactoriamente las propiedades físicas y mecánicas del hormigón

endurecido. En estas investigaciones se encontró que el comportamiento mecánico del hormigón es complejo y altamente no lineal, incluso para niveles moderados de tensión [8].

Otros tipos de estudios han analizado la variación con el tiempo del módulo elástico del concreto mediante la adición de materiales puzolanicos como cenizas volantes, humo de sílice y escoria de alto horno.

El conocimiento del módulo de elasticidad y la resistencia de compresión a edad temprana es muy importante para predecir efectos a largo plazo y durabilidad de estructuras de concreto [9].

# CAPÍTULO 3

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. Diseño del experimento

El material que se analizó fue una pasta de cemento, compuesto que comprende:

- Cemento tipo I
- x % de zeolita tipo I
- Agua

Se moldearon probetas con forma cúbica de 50mm de arista, procediéndose a realizar tres réplicas por cada día de ensayo.

La relación agua/cemento para la mezcla se estableció en 0.3 y se realizó la adición de Zeolita tipo 1 en una relación de 25% en porcentaje de masa, similar a esto también se realizaron probetas con 27.5% de zeolita, para cada compuesto se realizaron ensayos mecánicos a 3, 7, 14 y 28, y a 4, 11, 18 y 25 días de curado respectivamente.

Para el análisis de los resultados se plantearon las hipótesis y prueba de hipótesis correspondientes a cada caso. Para las pruebas de hipótesis se determinaron los estadísticos de prueba mediante el Software STATISTICA. Para el análisis de varianza se verificó la normalidad de los datos mediante pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov.

Dentro del análisis de los resultados se realizaron pruebas de comparaciones múltiples con un material referencial (0% aditivo) al que llamaremos control. De esta manera se estableció cual es el porcentaje de zeolita que presenta mayor resistencia a la compresión que el control.

### **3.2. Experimentación**

La experimentación se desarrolló conforme a los estándares apropiados. En el caso de la preparación del material compuesto se usó la norma “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” (ASTM C 595–03) [10] mientras que para realizar los ensayos mecánicos se usó el “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars” (ASTM C 109/C 109M-02) [11].

La experimentación se realizó en cinco partes: 1) el proceso de molienda, 2) el proceso de mezclado, 3) preparación de los moldes,



4) elaboración de las probetas y 5) el proceso de ruptura de las probetas.

### 1) Proceso de Molienda.

Las muestras de Zeolita en bruto se recolectaron en el Sector de Casas Viejas vía a la Costa, debido a su estado, se realizó un proceso de molienda para obtener la zeolita en el tamaño de grano requerido.



**FIGURA 3.1. ZEOLITA EN ESTADO BRUTO**

En el proceso de molienda el objetivo fue lograr un tamaño de partícula de 45micras, para ello las muestras de Zeolita en bruto primeramente se redujeron a un tamaño aproximado de 5 cm mediante el uso de un combo. Luego estas muestras se redujeron en una trituradora de mandíbulas por un periodo de tiempo de 2min.



**FIGURA 3.2. TRITURADORA DE MANDÍBULAS**

En la trituradora de mandíbulas los fragmentos de roca se redujeron a un tamaño aproximado de 1cm y se cuartearon antes de pasar por el molino de disco por un periodo aproximado de 5min.



**FIGURA 3.3. CUARTEO**



**FIGURA 3.4. MOLINO DE DISCOS**

Una vez que se pasaron las muestras por el molino de disco, el último paso para reducir la granulometría de la zeolita se alcanzó mediante la introducción de las muestras en el molino de bolas durante un periodo de 40 min. y posteriormente se volvió a cuartear.



**FIGURA 3.5. MOLINO DE BOLAS**

Una vez terminado todo este proceso se pesó 100gr de Zeolita y se tamizó en los tamices de (14, 18, 20, 40, 50, y fondo) durante 15 minutos y se obtuvo los tamaños de partícula como se muestra en la siguiente figura.



**FIGURA 3.6. TAMAÑO DE PARTICULAS DE MUESTREO**

Se realizó una segunda pasada del material por el molino de bolas y se volvió a tamizar con tamices de 50, 100, 200, 325 y fondo; los tamaños de grano para cada uno de los tamices se muestran en la siguiente tabla.

**TABLA 2**

**TAMAÑO DE PARTÍCULA POR TAMIZ**

TAMIZ Nº	TAMAÑO DE PARTICULA
14	1,4cm
18	40mm
40	425µm
50	300µm
100	150µm
200	75µm
325	45µm

Después de esto, se pesó por segunda vez la muestra en los tamices hasta obtener 70 gramos de zeolita en el fondo.

**2) Proceso de Mezclado**

Para efectos de validar los resultados, se realizaron dos mezclas de 250 gramos, con diferentes porcentajes cada una, para este caso particular se realizó una mezcla con 25% y 27.5% de Zeolita con una proporción de agua-cemento de 0.3, como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 3

## PORCENTAJES DE MEZCLA POR UNIDAD DE ESPECÍMENES

<b>% de zeolita</b>	<b>Masa de Zeolita (gr.)</b>	<b>% de cemento</b>	<b>Masa Cemento (gr.)</b>	<b>Masa de agua (gr.)</b>
25%	62.5	75%	187.5	75
27.50%	82.5	72.50%	167.5	75

Las pruebas de ruptura con 25% y 27% de zeolita se realizaron en cuatro diferentes días de curado, a razón de tres cubitos por día por lo tanto la mezcla total se realizó como se muestra en la tabla 4.

TABLA 4

## PORCENTAJES DE MEZCLA PARA DOCE ESPECÍMENES

<b>% de zeolita</b>	<b>Masa de Zeolita (gr.)</b>	<b>% de cemento</b>	<b>Masa Cemento (gr.)</b>	<b>Masa de agua (gr.)</b>
25%	750	75%	2250	900
27,50%	990	72,50%	2010	900

Una vez constituida la composición de las mezclas, el mezclador usado fue de tipo electro-mecánico equipado con remo y tazón como se muestra en la figura 3.7, se mezcló el cemento y la zeolita hasta que se obtuvo un compuesto completamente homogéneo.



**FIGURA 3.7. MEZCLADOR MECANICO**

Posteriormente se mezcló el lote completo (750 gr. Zeolita+2250 gr. de cemento) y el lote de (990 gr. Zeolita +2010 gr. de cemento) para la mezcla a 25% y la mezcla a 27.5% respectivamente con los 900 gr. de agua, durante 15 s a velocidad media hasta que se obtuvo una pasta completamente homogénea.



**FIGURA 3.8. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA**

### 3) Preparación de los Moldes

Los moldes que se usaron son metálicos los mismos poseen 3 compartimientos cúbicos con lados lo suficientemente rígidos para prevenir extensiones u ondulamiento.

La preparación de los moldes se siguió teniendo en cuenta lo establecido en la norma C-109, una vez que se colocó el molde sobre su placa base se aplicó una fina capa de aceite y luego se removió el exceso de aceite de la superficie del molde.

### 4) Elaboración de Probetas

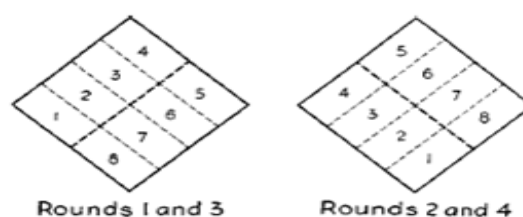
Una vez lista la mezcla y preparados los moldes se procedió a lo siguiente:

Se colocó la pasta de cemento (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde) en todos los compartimientos cúbicos como se muestra en la figura 3.9



**FIGURA 3.9. LLENADO DE PRIMERA CAPA DE MEZCLA**

Se apisonó la mezcla en cada compartimiento cúbico mediante 32 golpes durante 10 s en 4 rondas, cada ronda fue en ángulos rectos con respecto a la otra y las mismas consistieron de ocho golpes contiguos sobre la superficie de la mezcla, como se muestra en la Figura 3.10.



**FIGURA 3.10. ORDEN DE APISONAMIENTO DE ESPECÍMENES**

La presión de apisonado fue la suficiente para asegurar el correcto llenado del molde. Luego se colocó la segunda capa de la mezcla, se llenó los compartimentos y se volvió a repetir el método de apisonado hasta que el borde superior del molde se cubrió con la mezcla.

Luego de este procedimiento los moldes con la mezcla se sellaron con una película plástica, y se tomó lectura de la humedad relativa y la temperatura del cuarto. Después de 24 horas las probetas se desmoldaron para su posterior secado al aire.

Por último se marcaron las probetas según el porcentaje de adición de zeolita y los días de curado mediante un código, por ejemplo para la proporción de 25%, con un curado de 7 días el código que se usó



es G2/25/7, donde G2 es la denominación dada al grupo Zeolita 1 curado al aire, al cual pertenece esta experimentación.

### **5) Proceso de Ruptura de las Probetas**

Los especímenes de prueba inmediatamente después de su remoción, pasados los (4, 11, 18, 25) y (7, 14, 21, 28) días de curado para el caso de la mezcla al 27.5% de Zeolita y del 25% de Zeolita respectivamente se sometieron a un ensayo de compresión del tipo destructivo dentro de la tolerancia permisible prescrita en la norma ASTM C-109, un esquema de este ensayo se muestra en el plano 1.

Antes de la ruptura se limpió con un trapo a las tres probetas correspondientes a cada día de ensayo y se removió cualquier incrustación de las caras.

Se aplicó la carga a las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las caras planas del molde. Cuidadosamente el espécimen se colocó en la máquina de pruebas debajo del centro del bloque de soporte superior.

Antes de probar un cubo, se verificó que el bloque cilíndrico se encuentre alineado con la máquina, luego de esto se aplicó la carga a una velocidad relativamente constante durante cada desplazamiento de cinco milésimas de pulgada entre las platinas

superiores e inferiores de la máquina se tomaron las lecturas de la carga ejercida, hasta alcanzar el límite de ruptura, como se muestra en la figura 3.11



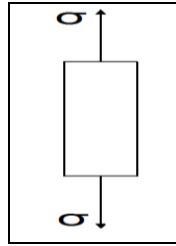
**FIGURA 3.11. PROBETA DEFORMADA EN ENSAYO DE RUPTURA**

### **3.3. Modelación**

Para Simular la curva esfuerzo versus deformación se aplicaron conceptos básicos de Teoría de Inelasticidad, la cual se analizó mediante mecánica del continuo.

Para determinar la resistencia a la compresión se aplicó el método Deformation Driven en este caso se conocen las deformaciones para calcular el esfuerzo.

Para el algoritmo se consideró una barra elasto-plástica sujeta a tensión uniaxial tal como se muestra en la siguiente Figura.



**FIGURA 3.12. CARGA UNIAXIAL DE UNA BARRA**

Se asumió que la curva esfuerzo–deformación está dada por una relación bilineal, donde  $E$  es el módulo de Young y  $\sigma_Y$  es el esfuerzo de fluencia.

Para la barra sometida a tensión, el rango elástico está dado por  $\sigma_{YT} > 0$ , en cambio el rango elástico para la barra sometida a compresión está dado por  $-\sigma_{YC} < 0$ , puesto que la barra se soporta lateralmente para prevenir el pandeo por simplicidad se asumió que  $\sigma_{YT} = \sigma_{YC} = \sigma_Y$ .

De lo anterior se definió la región elástica como:

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid -\sigma_{Y0} < \sigma < \sigma_{Y0}\}$$

En cualquier punto más allá del esfuerzo de fluencia, la deformación axial total de la barra se puede descomponer aditivamente en una parte elástica y una plástica

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

Donde  $\varepsilon$  = Deformación axial total.

$\varepsilon^e$  = Deformación en la zona elástica.

$\varepsilon^p$  = Deformación en la zona plástica

La ecuación constitutiva para la barra está dada por:

$$\sigma = E \varepsilon^e = E(\varepsilon - \varepsilon^p)$$

Para cualquier aplicación de carga adicional que produce deformación plástica adicional, la derivada con respecto al tiempo del esfuerzo axial está dado por:

$$\dot{\sigma} = E(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^p)$$

A continuación se definió la función fluencia inicial como

$$f(\sigma, \sigma_{Y0}) = |\sigma| - \sigma_{Y0} = 0$$

Por lo tanto, la región elástica inicial puede ser escrita como:

$$E_0 = \{\sigma \in R | f(\sigma, \sigma_{Y0}) < 0\}$$

Se asumió que la barra está sujeta a carga diferencial, la cual produce deformación axial plástica diferencial. Esto es posible si la barra está fluyendo en tensión y es alargada aún más, o si está fluyendo en compresión y se comprime aún más. Se denotó la magnitud de la tasa de deformación plástica por  $\lambda' \geq 0$ , y se tiene lo siguiente:

$$\dot{\varepsilon}^p \begin{cases} +\lambda', & \text{if } \sigma > 0 \\ -\lambda', & \text{if } \sigma < 0 \end{cases}$$

Alternativamente se puede escribir

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\delta f}{\delta \lambda}, \quad \frac{\delta f}{\delta \lambda} = \text{sign}(\sigma)$$

La ecuación anterior se llama regla de flujo para la tasa de deformación plástica. La regla de flujo contiene la magnitud de la tasa de deformación  $\lambda'$ , como el sentido  $\frac{\delta f}{\delta \lambda}$ .

Se asumió que la barra continúa a fluencia en tensión y que el esfuerzo de fluencia cambia del valor inicial  $\sigma_{Y0}$  al valor actual  $\sigma_Y$ .

Se asumió también que el esfuerzo de fluencia en compresión se mantiene igual al esfuerzo de fluencia en tensión, entonces la función fluencia actual se puede escribir como:

$$f(\sigma, \sigma_Y) = |\sigma| - \sigma_Y = 0$$

Y la región elástica actual se escribe como:

$$E_0 = \{\sigma \in R | f(\sigma, \sigma_Y) < 0\}$$

Una simple ley que describe la evolución de  $\sigma_Y$  con la continuada deformación plástica está dada por la ecuación

$$\dot{\sigma}_Y = H' |\dot{\epsilon}^p| = H' \dot{\lambda}$$

Por definición, la barra exhibe una respuesta de endurecimiento si  $H' > 0$ , una respuesta de plasticidad perfecta si  $H' = 0$ , y una respuesta de ablandamiento si  $H' < 0$ .

### **Carga / Descarga y condiciones de consistencia**

Existen algunas limitaciones en la zona plástica que son:

$$\dot{\lambda} \geq 0, \quad f(\sigma, \sigma) = \leq 0$$

Dentro del régimen elástico:  $f < 0$ ,  $\dot{\lambda} = 0$

Dentro del régimen plástico:  $f = 0$ ,  $\dot{\lambda} > 0$

La última ecuación recibe el nombre de condición de Kuhn-Tucker y representa una condición que debe cumplirse tanto para deformación elástica como para plástica [12].

### Algoritmo

Para implementar el algoritmo se consideró un intervalo típico en el tiempo  $t \in [t_n, t_{n+1}]$  y se asumió que  $\sigma_n$  y  $\sigma_{y,n}$  son conocidos.

Se debe encontrar  $\sigma_{n+1}$  y  $\sigma_{y,n+1}$  los cuales deben satisfacer la condición de Kuhn-Tucker para un incremento de deformación  $\Delta\varepsilon$ .

Se definió también  $\sigma_{n+1}^{tr}$  como el predictor del esfuerzo elástico y  $E \Delta\varepsilon^p$  como el corrector del esfuerzo plástico. Para modelar la curva esfuerzo-deformación se consideraron los pasos que se muestran a continuación:

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

Paso 2:  $F_{n+1}^{tr} = |\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{y,n} > 0?$

No,  $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}$ ,  $\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n}$  y salir.

Paso 3: Si, empieza Newton – Raphson e itere hasta

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

Paso 4:  $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\lambda \text{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr})$  y

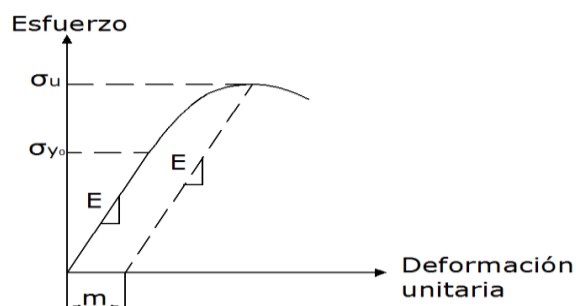
$$\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n} + H'_{n+1}(\Delta\lambda) \text{ y salir.}$$

Se agregaron las siguientes fórmulas para completar el algoritmo

$$\sigma_{\mu} = \sigma_{Y0}(1 + a)$$

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0} \left( 1 + \frac{2a}{m + \lambda} \sqrt{m\lambda} \right)$$

Donde las constantes m y a son positivas.



**FIGURA 3.13. CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN.**

Para la modelación de los resultados obtenidos se implementó el algoritmo descrito anteriormente en el software Matlab, el mismo que se presenta a continuación:

```
E= ; m= ; a= ; de= ; et= ; sigmay(1,1)= ;%ingresar estos valores%
epsilon=0:de:et;
```

```

ntotal=et/de;

sigma=zeros(ntotal,1);

sigma(1,1)=0;

sigmay=zeros(ntotal,1);

tol=1e-15; L(1,1)=0;

for n=1:ntotal

st(n,1)=sigma(n,1)+E*de;

Ft(n,1)=abs(st(n,1))-sigmay(n,1);

if Ft(n,1)>0; %DEFORMACION PLASTICA%

    kdl(1,1)=tol;

    for k=1:50

        KL(k,1)=kdl(k,1)+L(n,1);

        H(n,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/KL(k,1))*((m-
KL(k,1))/(m+KL(k,1))^2);

        r(k,1)=Ft(n,1)-kdl(k,1)*(E+H(n,1));

        nr(k,1)=norm(r(k,1));

        if nr(k,1)<tol*nr(1,1)

            end

            A=-

1/2*(2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^2*kdl(k,1)+
6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)^2
+12*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*L

```



```

(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,
1)^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1))^(
3/2)*L(n,1)^3+kdl(k,1)*m^4*a*sigmay(1,1)+2*m^4*a*sigmay(1,1)*L(n,
1)-3*kdl(k,1)*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^2-
2*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^3-6*kdl(k,1)^2*m^3*a*sigmay(1,1)-
6*kdl(k,1)*m^3*a*sigmay(1,1)*L(n,1)+kdl(k,1)^3*m^2*a*sigmay(1,1))/(
m+kdl(k,1)+L(n,1))^3/(m*KL(k,1))^(3/2);
    rdl(k+1,1)=-(r(k,1)/A);
    kdl(k+1,1)=kdl(k,1)+rdl(k+1,1);
end
dl(n+1,1)=kdl(k,1); L(n+1,1)=KL(k,1);
sigma(n+1,1)=st(n,1)-E*dl(n+1,1)*sign(st(n,1));
sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1)+H(n)*dl(n+1,1);
else
    L(n+1,1)=0;
    sigma(n+1,1)=st(n,1);
    sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1);
end
end
plot(epsilon',sigma, 'r') %Curva de Simulación%

```

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Tabulación de datos y resultados.

Los principales parámetros del experimento se tabularon en los apéndices A1 y A2 donde se muestran tablas que incluyen las condiciones atmosféricas como temperatura, humedad relativa y los datos de las muestras como son el área y la masa. Los datos de esfuerzo de compresión y deformación tomados del ensayo a las probetas de cemento con adición de 25% y 27.5% de zeolita se tabularon en los apéndices B1, B2, B3, B4 y C1, C2, C3 y C4 respectivamente.

Para los ensayos realizados por los demás investigadores de zeolita tipo1 curado en aire (G2) se presentan en las siguientes tablas, los esfuerzos últimos de compresión para el modelo y la validación que corresponden a la adición de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de zeolita tipo 1 con 7, 14, 21, y 28 días de curado y a la adición de 7.5%,

12.5%, 17.5%, 22.5% y 27.5% de zeolita tipo 1 con 4, 11, 18 y 25 días de curado respectivamente; además se incluyen los datos del control.

**TABLA 5**

**ESFUERZOS ÚLTIMOS DE RUPTURA PARA EL MODELO.**

% de Zeolita	Esfuerzo Último (MPa)			
	7 días	14 días	21 días	28 días
Tipo IV	49,96	50,90	45,24	40,53
	45,24	49,96	40,53	42,42
	48,07	49,01	42,42	42,98
0%	76,96	83,80	63,15	74,39
	76,96	84,65	63,15	73,54
	79,52	84,65	71,64	74,39
5%	65,96	53,95	77,07	80,49
	63,11	64,22	74,50	75,36
	66,50	58,23	74,50	86,49
10%	64,13	55,85	64,13	61,57
	63,15	62,42	64,73	55,58
	56,56	61,57	59,86	59,86
15%	58,14	61,56	64,13	65,84
	56,55	62,42	64,13	68,40
	54,30	68,40	65,84	64,13
20%	52,75	62,73	76,05	87,34
	54,63	58,40	62,38	88,20
	53,05	59,69	83,74	86,46
25%	59,00	68,27	47,03	53,87
	62,42	67,55	59,00	38,62
	60,71	73,23	54,72	51,81

TABLA 6

## ESFUERZOS ÚLTIMOS DE RUPTURA PARA LA VALIDACIÓN.

% de Zeolita	Esfuerzo Último (MPa)			
	4 días	11 días	18 días	25 días
Tipo IV	45,24	42,42	40,53	46,75
	39,59	46,11	44,30	37,32
	38,65	42,23	36,76	44,30
0%	67,55	82,94	83,80	88,08
	68,41	82,94	97,48	81,23
	76,96	84,65	82,94	83,80
7,5%	66,88	76,21	20,21	68,51
	62,73	74,50	25,43	72,79
	55,76	74,50	22,95	67,65
12,5%	37,70	23,09	55,58	76,96
	34,88	64,13	72,68	74,39
	58,44	59,86	72,68	76,96
17,5%	54,67	57,49	62,42	68,40
	54,67	56,93	55,58	68,40
	46,18	51,84	59,85	64,13
22,5%	52,75	61,23	70,93	71,62
	52,37	64,99	71,43	77,76
	45,21	62,23	69,22	76,15
27,5%	35,06	65,84	62,42	50,45
	41,45	61,56	56,43	49,59
	33,34	55,58	57,29	49,59

## 4.2. Análisis de resultados

Para el análisis de los resultados se usó el programa Statistica, primeramente se analizaron los datos individuales y posteriormente los datos de G2, en ambos casos se analizaron los datos para el modelo como para la validación.

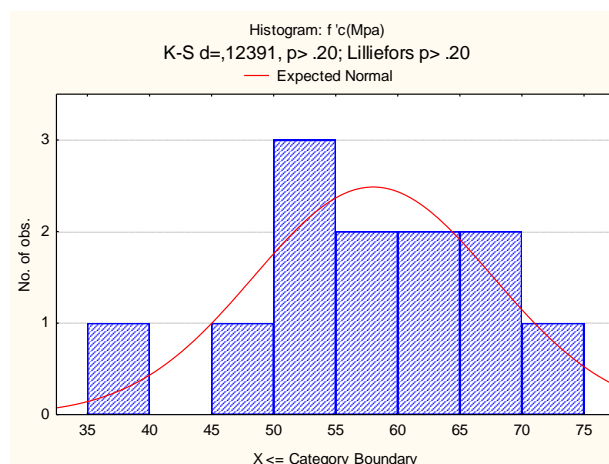
Para los datos correspondientes al modelo con 25% de zeolita y 7, 14, 21 y 28 días de curado primeramente se verificó que los datos de esfuerzo último sigan una distribución normal, para esto se usó el método de KOLMOGOROV SMIRNOV.

Para los datos de esfuerzo último con adición de 25% de zeolita a diferentes días de curado se plantearon las hipótesis y contraste de hipótesis descritas a continuación:

Ho: Los datos de  $f_c$  siguen una distribución normal.

Ha: Los datos de  $f_c$  no siguen una distribución normal.

Rechazo  $H_0$  si  $D_{MAX \text{ Calculado}} > D_{MAX(0.05, 12)}$  y el valor  $p < 0.05$ ; donde  $D_{MAX \text{ Calculado}}$  se obtuvo del programa Statistica y  $D_{MAX(0.05, 12)}$  se obtuvo de la tabla K-S mostrada en el apéndice D.



**FIGURA 4.1. GRÁFICO DE BONDAD DE AJUSTE DEL ESFUERZO ULTIMO CON 25% DE ZEOLITA**

Del gráfico anterior  $D_{MAX}$  Calculado=0.124, el valor  $p=0.20$  y  $D_{MAX(0.05, 12)}=0.375$  por lo tanto el estadístico de prueba es menor que 0.375 y el valor  $p$  es mayor que 0.05; entonces con un 95% de confianza se concluyó que los datos siguen una distribución normal.

Una vez que se verificó la normalidad se realizó el análisis de varianza en un solo sentido para esto se plantearon las hipótesis y contraste de hipótesis descritas a continuación:

$H_0$ : Todas las medias aritméticas son iguales.

$H_a$ : Al menos una de las medias es diferente.

Rechazo  $H_0$  si se cumple que  $F_o > F_{(v_1, v_2)}$  y el valor  $p < 0.05$ .

Donde  $F_o$  se obtuvo del programa Statistica, mientras que  $F_{(v_1, v_2)}$  se obtuvo de la tabla de Fisher que se incluyó en el apéndice E.

TABLA 7

INTERVALOS DE CONFIANZA DE  $f'c$  CON 25% DE ZEOLITA.

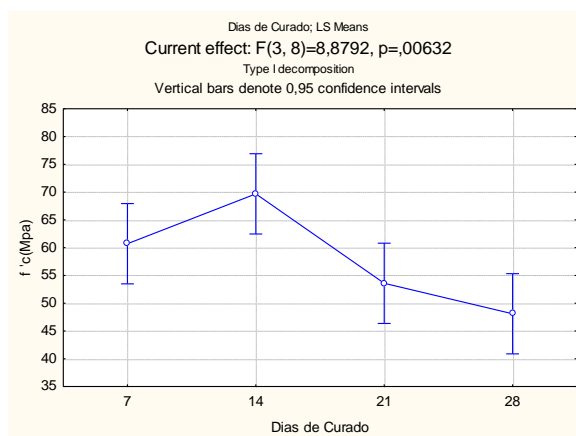
Dias de Curado; Unweighted Means (Sheet1) Current effect: $F(3, 8)=8,8792$ , $p=,00632$ Type I decomposition						
Cell No.	Dias de Curado	$f'c$ (Mpa) Mean	$f'c$ (Mpa) Std.Err.	$f'c$ (Mpa) -95,00%	$f'c$ (Mpa) +95,00%	N
1	7	60,71000	3,132368	53,48675	67,93325	3
2	14	69,68333	3,132368	62,46008	76,90659	3
3	21	53,58333	3,132368	46,36008	60,80659	3
4	28	48,10000	3,132368	40,87675	55,32325	3

TABLA 8

ANÁLISIS DE VARIANZA DE  $f'c$  CON 25% DE ZEOLITA.

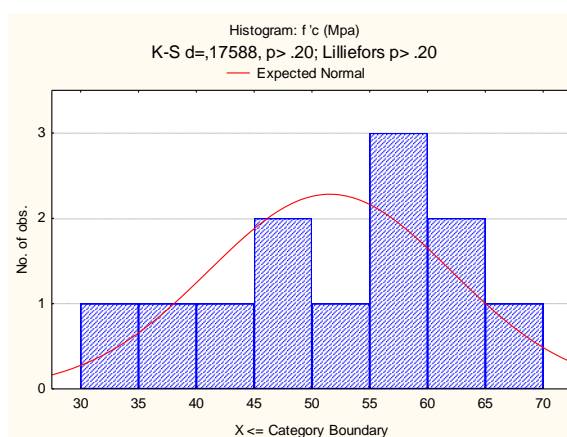
Univariate Tests of Significance for $f'c$ (Mpa) (Sheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	40394,68	1	40394,68	1372,326	0,000000
Dias de Curado	784,08	3	261,36	8,879	0,006321
Error	235,48	8	29,44		

Los resultados mostrados en las tablas anteriores muestran el estadístico de prueba  $F_0=8.88$ , el valor  $p=0.006$  y de la tabla de Fisher  $F_{0.05(3,8)}=4.07$  por lo tanto el estadístico de prueba es mayor que 4.07 y valor  $p$  es menor que 0.05; entonces con un 95% de confianza se rechazó  $H_0$ , lo que significa que existen diferencias significativas entre las medias, como se muestra en el siguiente gráfico.



**FIGURA 4.2. GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIAS DEL ESFUERZO ÚLTIMO PARA 25% DE ZEOLITA.**

Para los datos correspondientes a la validación con 27.5% de zeolita y 4, 11, 18 y 25 días de curado primeramente se verificó que los datos de esfuerzo último sigan una distribución normal por medio de la prueba de bondad de ajuste K-S y se usaron las hipótesis y contraste de hipótesis planteadas para los datos del modelo.



**FIGURA 4.3. GRÁFICO DE BONDAD DE AJUSTE DEL ESFUERZO ÚLTIMO CON 27.5% DE ZEOLITA.**



Del gráfico anterior  $D_{MAX \text{ Calculado}} = 0.176$ , el valor  $p = 0.20$  y de la tabla K-S  $D_{MAX(0.05, 12)} = 0.375$  por lo tanto  $D_{MAX \text{ Calculado}}$  es menor que  $0.375$  y el valor  $p$  es mayor que  $0.05$ ; entonces con un  $95\%$  de confianza se concluyó que los datos siguen una distribución normal.

Una vez que se verificó la normalidad se realizó el análisis de varianza en un solo sentido para esto se usó las hipótesis y contraste de hipótesis planteadas para los datos del modelo.

**TABLA 9**

**INTERVALOS DE CONFIANZA DE  $f'c$  CON 27.5% DE ZEOLITA.**

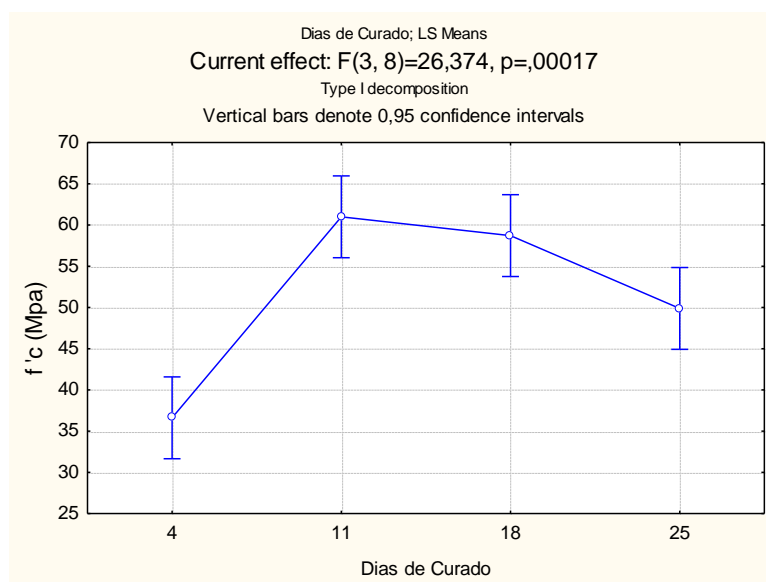
Dias de Curado; Unweighted Means (Sheet1) Current effect: F(3, 8)=26,374, p=,00017 Type I decomposition						
Cell No.	Dias de Curado	f 'c (Mpa) Mean	f 'c (Mpa) Std.Err.	f 'c (Mpa) -95,00%	f 'c (Mpa) +95,00%	N
1	4	36,61667	2,151630	31,65500	41,57833	3
2	11	60,99333	2,151630	56,03167	65,95500	3
3	18	58,71333	2,151630	53,75167	63,67500	3
4	25	49,87667	2,151630	44,91500	54,83833	3

**TABLA 10**

**ANÁLISIS DE VARIANZA DE  $f'c$  CON 27.5% DE ZEOLITA.**

Univariate Tests of Significance for f 'c (Mpa) (Sheet1) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	31888,83	1	31888,83	2296,055	0,000000
Días de Curado	1098,88	3	366,29	26,374	0,000168
Error	111,11	8	13,89		

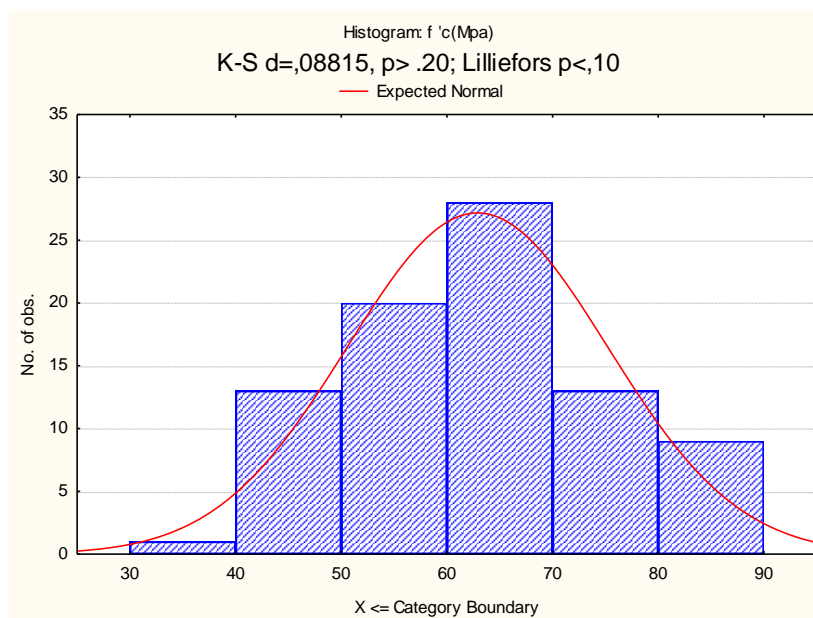
Los resultados de las tablas anteriores muestran que el estadístico de prueba  $F_o=26.37$ , el valor  $p=0.0002$  y de la tabla de Fisher  $F_{0.05(3,8)}=4.07$  por lo tanto el estadístico de prueba es mayor que 4.07 y valor  $p$  es menor que 0.05; entonces con un 95% de confianza se rechazó la hipótesis nula, lo que significa que existen diferencias significativas entre las medias, como se muestra en el siguiente gráfico.



**FIGURA 4.4. GRÁFICO DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIAS DEL ESFUERZO ÚLTIMO PARA 27.5% DE ZEOLITA.**

Para los datos correspondientes al modelo con adición de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de zeolita con 7, 14, 21 y 28 días de curado incluyendo los datos del control, primeramente se verificó que los datos de esfuerzo último sigan una distribución normal por medio de la

prueba de bondad de ajuste K-S, para esto se usaron las hipótesis y contraste de hipótesis que se plantearon para los análisis anteriores.



**FIGURA 4.5. GRÁFICO DE BONDAD DE AJUSTE DE DATOS DEL ESFUERZO ÚLTIMO PARA EL MODELO.**

Del gráfico anterior  $D_{MAX} = 0.09$ , el valor  $p = 0.20$ , y de la tabla K-S  $D_{MAX(0.05, 84)} = 0.147$  por lo tanto  $D_{MAX}$  Calculado es menor que  $0.147$  y el valor  $p$  es mayor que  $0.05$ ; entonces con un 95% de confianza se concluyó que los datos siguen una distribución normal.

Una vez que se verificó la normalidad se realizó el análisis de varianza para esto se plantearon las siguientes hipótesis y contraste de hipótesis:

$H_0$ : Todas las medias aritméticas son iguales.

Ha: Al menos una de las medias es diferente.

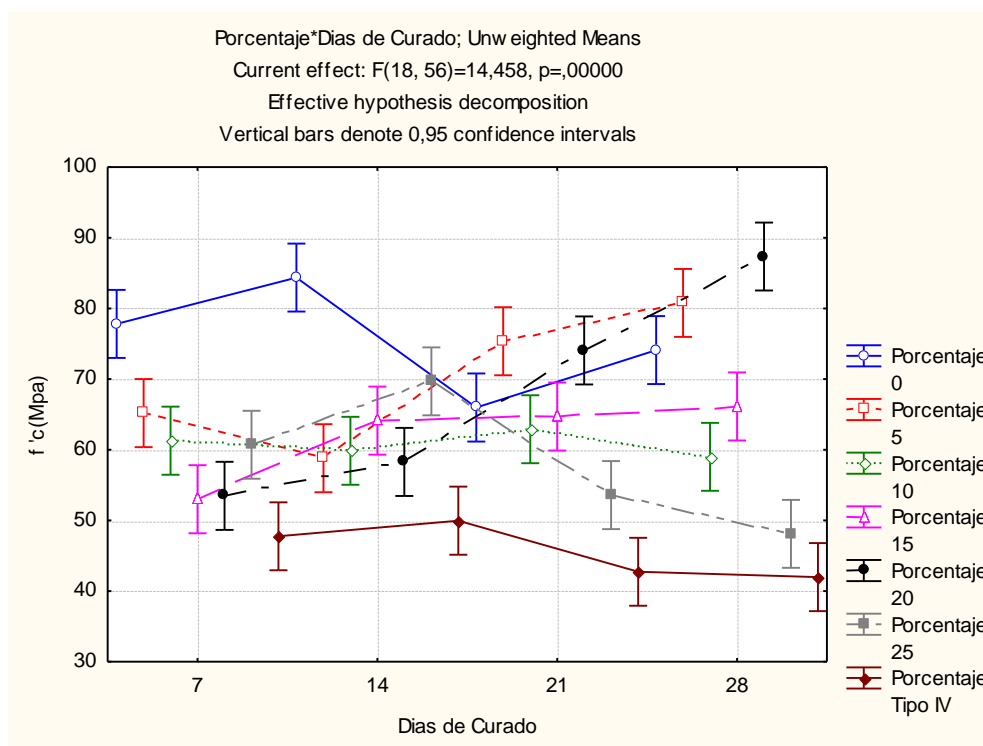
Rechazo  $H_0$  si se cumple que  $F_0 > F_{(v_1, v_2)}$  y el valor  $p < 0.05$ .

**TABLA 11**

**INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS DATOS DE ESFUERZO  
ÚLTIMO PARA EL MODELO.**

Porcentaje*Dias de Curado; Unweighted Means (Shees)							
Current effect: F(18, 56)=14,458, p=,00000							
Effective hypothesis decomposition							
Cell No.	Porcentaje	Dias de Curado	f 'c(Mpa) Mean	f 'c(Mpa) Std.Err.	f 'c(Mpa) -95,00%	f 'c(Mpa) +95,00%	N
1	0	7	77,81333	2,402646	73,00025	82,62641	3
2	0	14	84,36667	2,402646	79,55359	89,17975	3
3	0	21	65,98000	2,402646	61,16692	70,79308	3
4	0	28	74,10667	2,402646	69,29359	78,91975	3
5	5	7	65,19000	2,402646	60,37692	70,00308	3
6	5	14	58,80000	2,402646	53,98692	63,61308	3
7	5	21	75,35667	2,402646	70,54359	80,16975	3
8	5	28	80,78000	2,402646	75,96692	85,59308	3
9	10	7	61,28000	2,402646	56,46692	66,09308	3
10	10	14	59,85667	2,402646	55,04359	64,66975	3
11	10	21	62,90667	2,402646	58,09359	67,71975	3
12	10	28	59,00333	2,402646	54,19025	63,81641	3
13	15	7	52,99667	2,402646	48,18359	57,80975	3
14	15	14	64,12667	2,402646	59,31359	68,93975	3
15	15	21	64,70000	2,402646	59,88692	69,51308	3
16	15	28	66,12667	2,402646	61,31359	70,93975	3
17	20	7	53,47667	2,402646	48,66359	58,28975	3
18	20	14	58,27333	2,402646	53,46025	63,08641	3
19	20	21	74,05667	2,402646	69,24359	78,86975	3
20	20	28	87,34333	2,402646	82,53025	92,15641	3
21	25	7	60,71000	2,402646	55,89692	65,52308	3
22	25	14	69,68333	2,402646	64,87025	74,49641	3
23	25	21	53,58333	2,402646	48,77025	58,39641	3
24	25	28	48,10000	2,402646	43,28692	52,91308	3
25	Tipo IV	7	47,75667	2,402646	42,94359	52,56975	3
26	Tipo IV	14	49,95667	2,402646	45,14359	54,76975	3
27	Tipo IV	21	42,73000	2,402646	37,91692	47,54308	3
28	Tipo IV	28	41,97667	2,402646	37,16359	46,78975	3

Los resultados de la tabla anterior muestran que el estadístico de prueba  $F_0=14.46$ , el valor  $p<0.05$  y de la tabla de Fisher  $F_{0.05}(18,56)=1.78$  por lo tanto el estadístico de prueba es mayor que 1.78 entonces con un 95% de confianza se rechazó  $H_0$ , lo que significa que existen diferencias significativas entre las medias, como se muestra en el siguiente gráfico.



**FIGURA 4.6. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZO ÚLTIMO VS DÍAS DE CURADO PARA DATOS DEL MODELO.**

Para establecer que porcentaje de zeolita presenta la mayor resistencia a la compresión se usó el método de comparación de Dunnett en el mismo se estableció como un control al valor de la

media que corresponde al cemento sin adición de Zeolita para cada uno de los días de curado.

Las hipótesis formuladas para el método y el contraste de hipótesis se establecieron de la siguiente manera:

$H_0$ = La media aritmética de los diferentes porcentajes es menor o igual al control (0%)

$$\mu_i \leq \mu_c$$

$H_a$ = Existe al menos una media mayor al control.

$$\mu_i > \mu_c$$

Rechazo  $H_0$  si se cumple que el valor  $p < 0.05$

Donde  $\mu_c$ , pertenece a la media aritmética del control y  $\mu_i$  es la media aritmética de los otros porcentajes.

Para los datos de f 'c del modelo los resultados del método se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 12

**RESULTADOS DEL TEST DE DUNNETT DE LOS DATOS DE  
ESFUERZO ÚLTIMO PARA EL MODELO.**

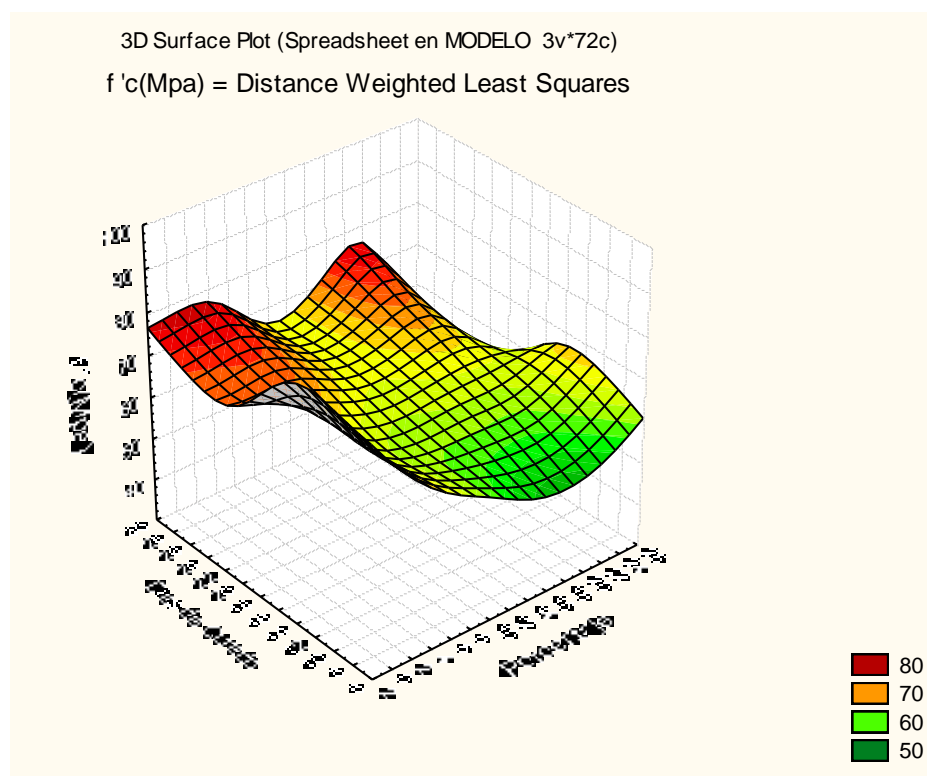
Dunnett test ; variable Esfuerzo de Ruptura Probabilities for Post Hoc Test (M>Control)							
7 días de curado		14 días de curado		21 días de curado		28 días de curado	
Error: Between MS = 19,896, df = 12,000		Error: Between MS = 16,939, df = 12,000		Error: Between MS = 31,348, df = 12,000		Error: Between MS = 19,101, df = 12,000	
% de Zeolita	{1}	% de Zeolita	{1}	% de Zeolita	{1}	% de Zeolita	{1}
	77,813		84,367		65,98		74,107
0		0		0		0	
5	0,999947	5	0,999982	5	0,105076	5	0,139034
10	0,999980	10	0,999982	10	0,958692	10	0,999978
15	0,999981	15	0,999981	15	0,901983	15	0,999307
20	0,999981	20	0,999982	20	0,162166	20	0,005997
25	0,999980	25	0,999981	25	0,999797	25	0,999982
Error: Between MS = 5,59, df = 12,000		Error: Between MS = 14,027, df = 12,000		Error: Between MS = 28,28, df = 12,000		Error: Between MS = 19,336, df = 12,000	
Tipo IV	47,76	Tipo IV	49,96	Tipo IV	42,73	Tipo IV	41,98
5	0,000024	5	0,025471	5	0,000037	5	0,000022
10	0,000053	10	0,013130	10	0,001194	10	0,001020
15	0,001702	15	0,001220	15	0,000610	15	0,000067
20	0,022576	20	0,034409	20	0,000045	20	0,000022
25	0,000069	25	0,000090	25	0,050231	25	0,177258

De la tabla anterior se obtuvo los siguientes resultados:

Tomando como control al cemento tipo I a los 28 días de curado con 20% de zeolita el valor p es menor que 0.05 lo que indica que la media aritmética es mayor por lo tanto con un 95% de confianza se rechazó la hipótesis nula, es decir la diferencia entre las medias son significativas.

Tomando como control al cemento tipo IV, los valores p son menores que 0.05 lo que indica que estos tratamientos son mejores al control con excepción de la adición de 25% de zeolita a los 21 y 28 días de curado con un 95% de confianza.

Como comparación de todos estos resultados en la siguiente gráfica se muestra el esfuerzo último para los distintos porcentajes de adición de Zeolita incluido el control y distintos días de curado.

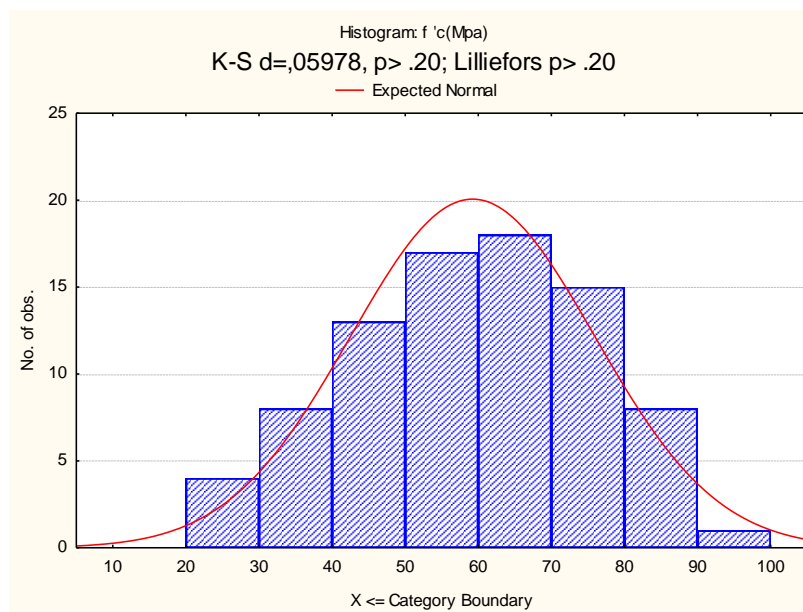


**FIGURA 4.7. GRÁFICO DEL ESFUERZO ÚLTIMO VS. DÍAS DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA PARA DATOS DEL MODELO.**

Para los datos correspondientes a la validación con adición de 7.5%, 12.5%, 17.5%, 22.5% y 27.5% de zeolita a 4, 11, 18 y 25 días de curado primeramente se verificó que los datos de esfuerzo último sigan una distribución normal, para esto se usó la prueba de bondad



de ajuste K-S, y se usaron las hipótesis y contraste de hipótesis que se plantearon para los análisis anteriores.



**FIGURA 4.8. GRÁFICO DE BONDAD DE AJUSTE DE DATOS DEL ESFUERZO ÚLTIMO PARA LA VALIDACIÓN.**

Del gráfico anterior  $D_{MAX} = 0.06$ ,  $p = 0.20$  y de la tabla K-S  $D_{MAX(0.05, 84)} = 0.147$  por lo tanto  $D_{MAX}$  Calculado es menor que 0.147 y el valor  $p$  es mayor que 0.05 entonces con un 95% de confianza se concluyó que los datos siguen una distribución normal.

Una vez que se verificó la normalidad se realizó el análisis de varianza para esto se usaron las mismas hipótesis y contraste de hipótesis que se plantearon para los datos del modelo.

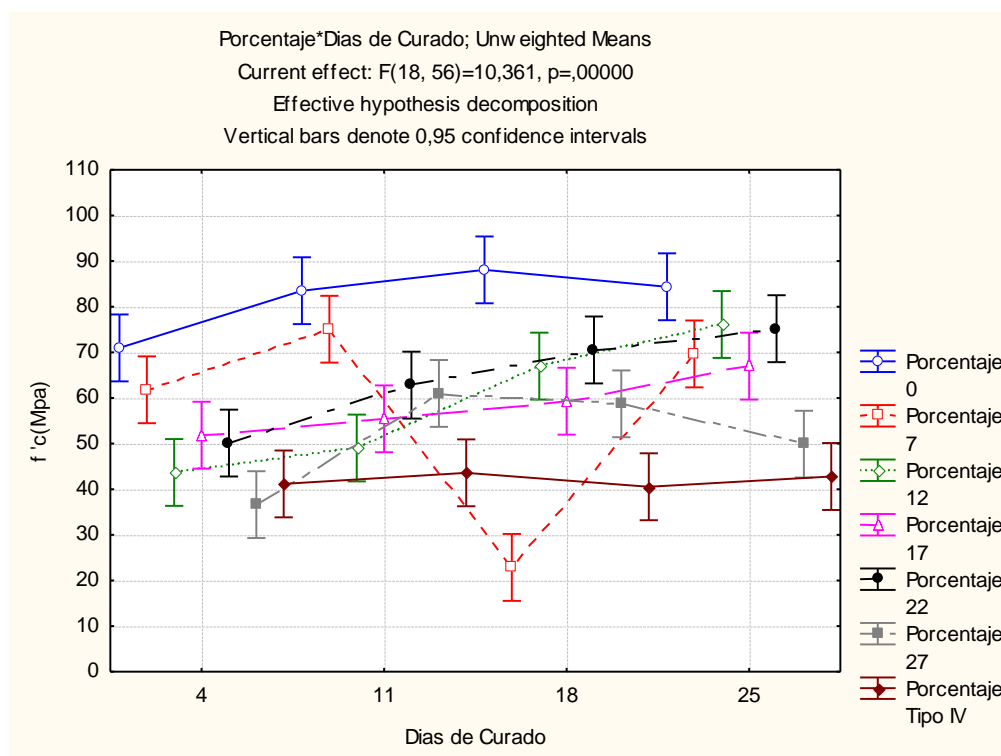
TABLA 13

**INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS DATOS DE ESFUERZO  
ÚLTIMO PARA LA VALIDACIÓN.**

Porcentaje*Dias de Curado; Unweighted Means (Sheet)							
Current effect: F(18, 56)=10,361, p=,00000							
Effective hypothesis decomposition							
Cell No.	Porcentaje	Dias de Curado	f 'c(Mpa) Mean	f 'c(Mpa) Std.Err.	f 'c(Mpa) -95,00%	f 'c(Mpa) +95,00%	N
1	0	4	70,97333	3,658077	63,64532	78,30134	3
2	0	11	83,51000	3,658077	76,18199	90,83801	3
3	0	18	88,07333	3,658077	80,74532	95,40134	3
4	0	25	84,37000	3,658077	77,04199	91,69801	3
5	7	4	61,79000	3,658077	54,46199	69,11801	3
6	7	11	75,07000	3,658077	67,74199	82,39801	3
7	7	18	22,86333	3,658077	15,53532	30,19134	3
8	7	25	69,65000	3,658077	62,32199	76,97801	3
9	12	4	43,67333	3,658077	36,34532	51,00134	3
10	12	11	49,02667	3,658077	41,69866	56,35468	3
11	12	18	66,98000	3,658077	59,65199	74,30801	3
12	12	25	76,10333	3,658077	68,77532	83,43134	3
13	17	4	51,84000	3,658077	44,51199	59,16801	3
14	17	11	55,42000	3,658077	48,09199	62,74801	3
15	17	18	59,28333	3,658077	51,95532	66,61134	3
16	17	25	66,97667	3,658077	59,64866	74,30468	3
17	22	4	50,11000	3,658077	42,78199	57,43801	3
18	22	11	62,81667	3,658077	55,48866	70,14468	3
19	22	18	70,52667	3,658077	63,19866	77,85468	3
20	22	25	75,17667	3,658077	67,84866	82,50468	3
21	27	4	36,61667	3,658077	29,28866	43,94468	3
22	27	11	60,99333	3,658077	53,66532	68,32134	3
23	27	18	58,71333	3,658077	51,38532	66,04134	3
24	27	25	49,87667	3,658077	42,54866	57,20468	3
25	Tipo IV	4	41,16000	3,658077	33,83199	48,48801	3
26	Tipo IV	11	43,58667	3,658077	36,25866	50,91468	3
27	Tipo IV	18	40,53000	3,658077	33,20199	47,85801	3
28	Tipo IV	25	42,79000	3,658077	35,46199	50,11801	3

La tabla anterior muestra que el estadístico de prueba es  $F_0=10.36$ , el valor  $p<0.05$  y de la tabla de Fisher  $F_{0.05 (18,56)}=1.78$  por lo tanto el estadístico de prueba es mayor que 1.78 y valor p es menor que 0.05;

entonces con un 95% de confianza se rechazó  $H_0$ , lo que significa que existen diferencias significativas entre las medias, como se muestra en el siguiente gráfico.



**FIGURA 4.9. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZO ÚLTIMO VS DÍAS DE CURADO PARA DATOS DE VALIDACIÓN.**

Para los datos de  $f'c$  (MPa) de la validación se aplicó el método de comparación de Dunnett con las mismas hipótesis y contraste de hipótesis formuladas para el modelo; los resultados del método se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 14

**RESULTADOS DEL TEST DE DUNNETT DE LOS DATOS DE  
ESFUERZO ÚLTIMO PARA LA VALIDACIÓN.**

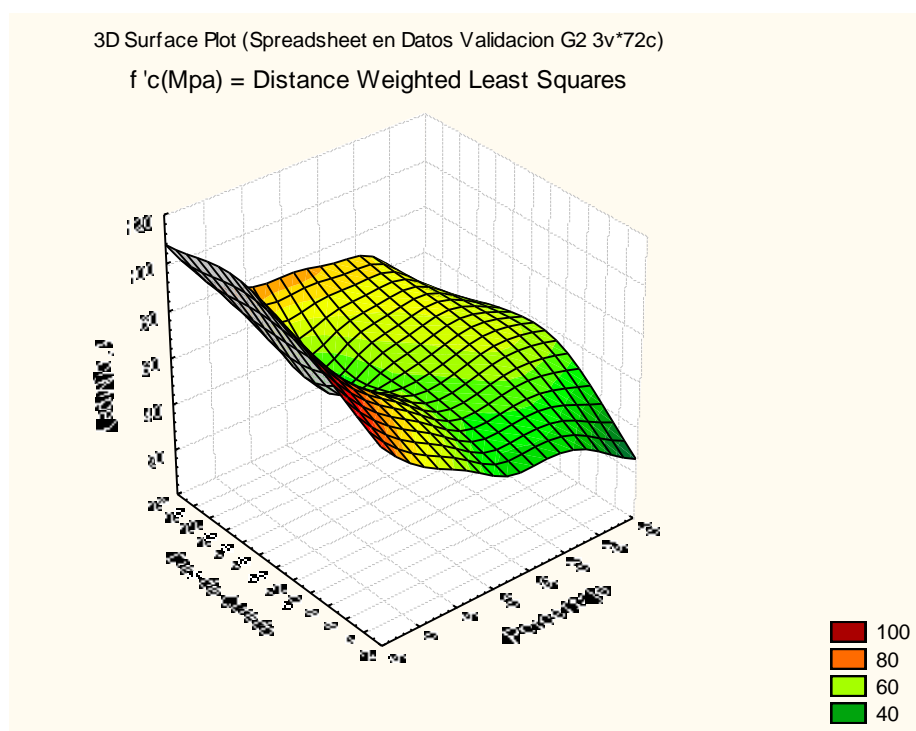
Dunnett test ; variable Esfuerzo de Ruptura Probabilities for Post Hoc Test (M>Control)							
4 días de curado		11 días de curado		18 días de curado		25 días de curado	
Error: Between MS = 47,417, df = 12,000		Error: Between MS = 91,847, df = 12,000		Error: Between MS = 32,434, df = 12,000		Error: Between MS = 6,3692, df = 12,000	
% de Zeolita	{1}	% de Zeolita	{1}	% de Zeolita	{1}	% de Zeolita	{1}
	70,973		83,51		88,073		84,37
0		0		0		0	
7,5	0,996569	7,5	0,984922	7,5	0,999982	7,5	0,999981
12,5	0,999981	12,5	0,999979	12,5	0,999980	12,5	0,999974
17,5	0,999940	17,5	0,999957	17,5	0,999981	17,5	0,999982
22,5	0,999964	22,5	0,999761	22,5	0,999967	22,5	0,999979
27,5	0,999981	27,5	0,999861	27,5	0,999981	27,5	0,999982
Error: Between MS = 45,04, df = 12,000		Error: Between MS = 92,48, df = 12,000		Error: Between MS = 23,71, df = 12,000		Error: Between MS = 8,36, df = 12,000	
Tipo IV	41,16	Tipo IV	43,58	Tipo IV	40,53	Tipo IV	42,79
5	0,005430	5	0,003541	5	0,999979	5	0,000022
10	0,666353	10	0,563238	10	0,000072	10	0,000022
15	0,123172	15	0,233529	15	0,001064	15	0,000022
20	0,196329	20	0,054726	20	0,000037	20	0,000022
25	0,971700	25	0,080511	25	0,001350	25	0,021016

De la tabla anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Tomando al cemento tipo I como el control, a los 4, 11, 18 y 25 días de curado los valores p son mayores a 0.05 lo que indica que las medias aritméticas de los comparadores son menores; por lo tanto con un 95% de confianza se aceptó la hipótesis nula, es decir la diferencia de promedios entre el control y los tratamiento con diferentes porcentajes de Zeolita no son significativamente diferentes.

Tomando como control al cemento tipo IV, los valores p son menores que 0.05 para la adición de 5% de zeolita con 4, 11 y 25 días de curado y para la adición de 10, 15, 20 y 25 % de zeolita con 18 y 25 días de curado; en estos casos con un 95% de confianza se rechazó la hipótesis nula, lo que indica que estos tratamientos son mejores que el control.

Como comparación de estos resultados, la gráfica a continuación muestra el esfuerzo último para los distintos porcentajes de adición de Zeolita incluido el control y distintos días de curado.



**FIGURA 4.10. GRÁFICO DEL ESFUERZO ÚLTIMO VS. DÍAS DE CURADO Y PORCENTAJE DE ZEOLITA PARA DATOS DE VALIDACIÓN.**

### 4.3. Modelización de resultados

La modelización de los resultados se realizó mediante la simulación de los esfuerzos de compresión versus días de curado y posteriormente se usó un modelo de regresión para estimar el esfuerzo último en función de los días de curado y adición de zeolita.

En la primera parte se realizó la simulación de los valores de esfuerzos último versus deformación, para esto se usó la herramienta de programación Matlab en base a datos experimentales.

Para determinar el esfuerzo de fluencia se graficaron en Excel las curvas de esfuerzo–deformación promedio para las tres réplicas y gráficamente se determinó el límite de proporcionalidad. Para esto se extrapoló un punto para extender la parte lineal e interceptarla con la parte no lineal, los resultados obtenidos muestran que el esfuerzo de fluencia se ubicó entre el 75% y 85% del esfuerzo último.

Para efectos de calcular los valores de las constantes características del material “a” y “m”, se aplicó las relaciones dadas mediante la teoría de inelasticidad que establecen las siguientes expresiones:

$$m = \text{def}_{\text{ultima}} - (\sigma_u/E)$$

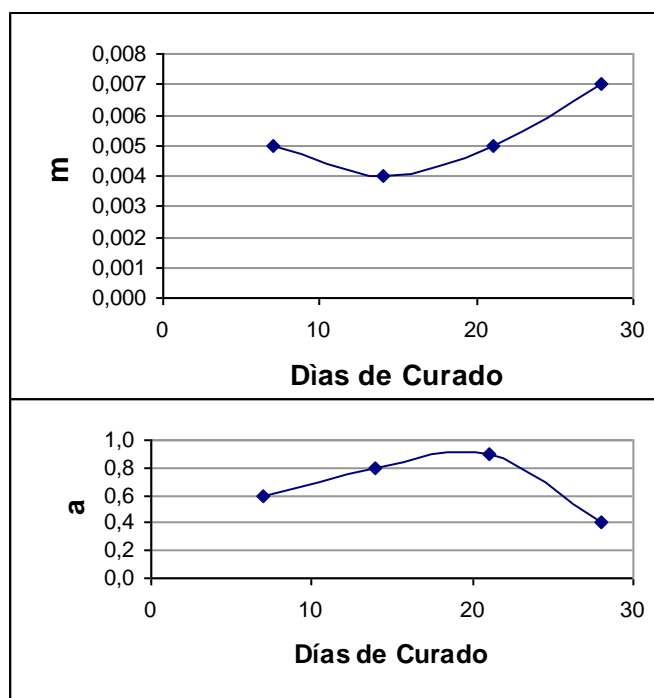
$$a = (\sigma_u/\sigma_y)^{-1}$$

Una vez establecidos estos valores, se corrió el algoritmo y se obtuvo una curva de simulación la misma que se ajustó a los datos experimentales variando las constantes  $a$  y  $m$ . Estas constantes se muestran en la siguiente tabla junto con los datos experimentales promedio de módulo de elasticidad, esfuerzo último y esfuerzo de fluencia

**TABLA 15**

**VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN  
DE 25% DE ZEOLITA**

<b>DÍAS DE CURADO</b>	<b>E</b>	<b><math>\sigma_U</math></b>	<b><math>\sigma_Y</math></b>	<b>m</b>	<b>A</b>
7	4463,80	60,71	49	0,005	0,6
14	4149,04	68,40	52	0,004	0,8
21	3902,96	53,58	39	0,005	0,9
28	2017,39	51,81	45	0,007	0,4

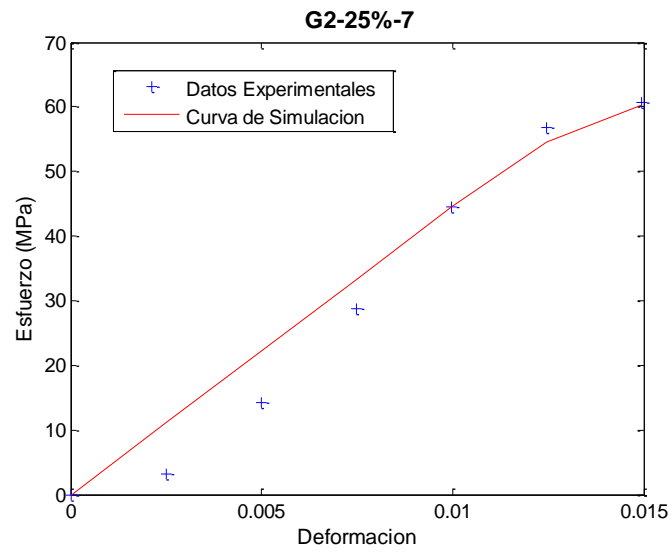


**FIGURA 4.11. CURVAS DE  $a$  Y  $m$  A DIFERENTES DÍAS DE CURADO CON 25% DE ZEOLITA**

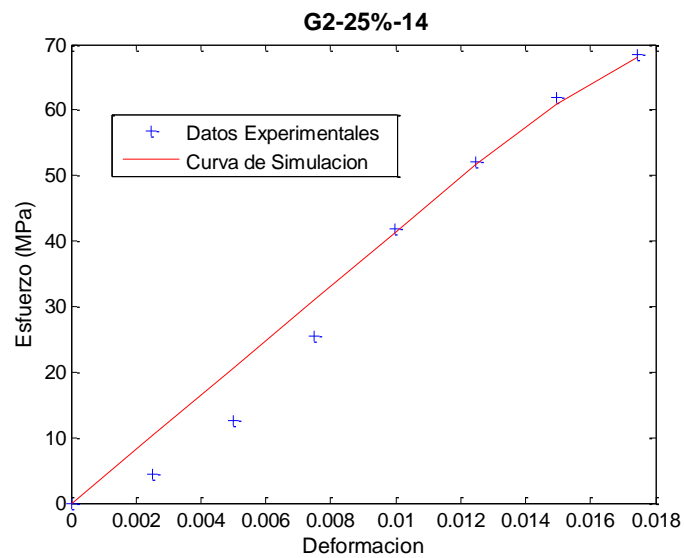
Como se observa en la gráfica anterior la constante  $a$  varía entre 0.4 y 0.9 y el valor de  $m$  varía entre 0.004 y 0.007

Las curvas de simulación para la pasta de cemento con adición de 25% de zeolita tipo I para cada uno de los días de curado se muestran a continuación, para efectos de comparación se graficaron también los datos experimentales promedio:

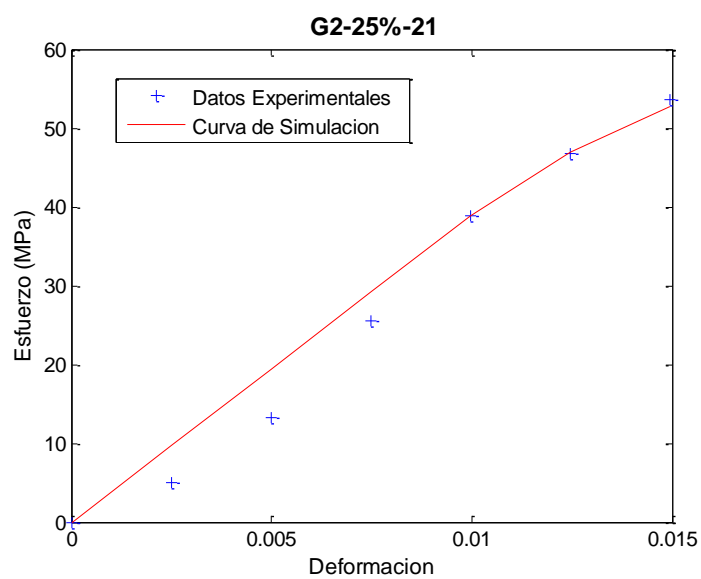




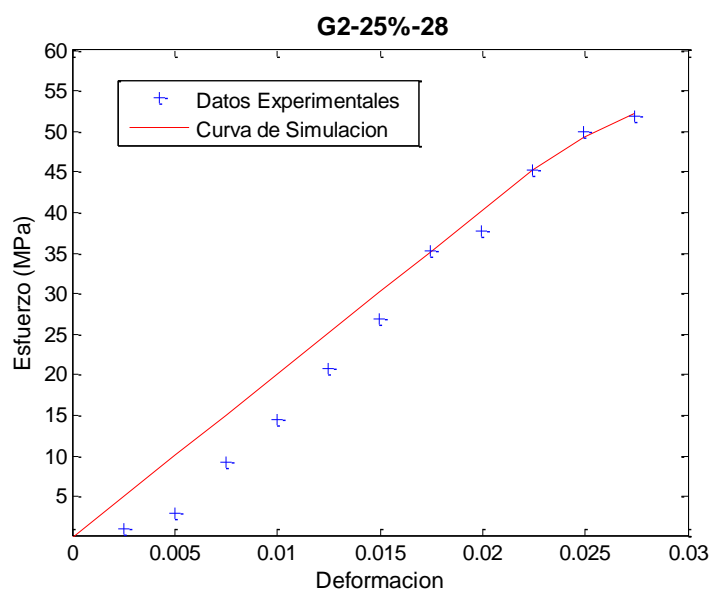
**FIGURA 4.12. CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN CON 25%  
DE ZEOLITA A 7 DÍAS DE CURADO**



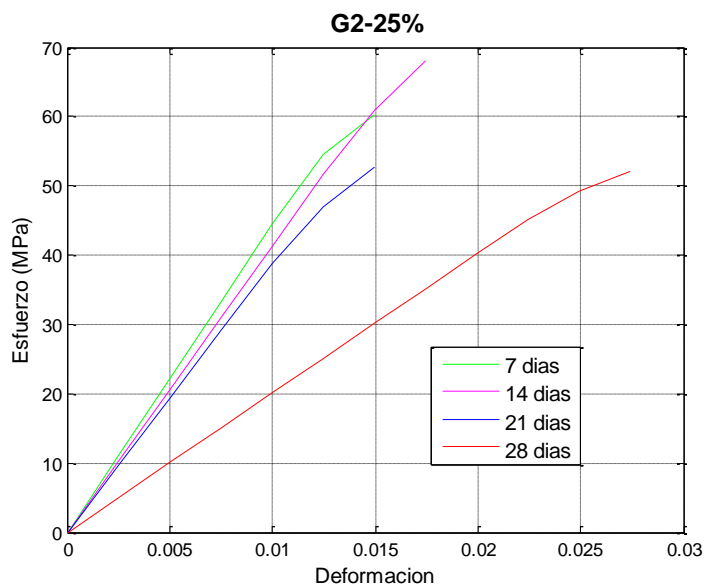
**FIGURA 4.13. CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN CON 25%  
DE ZEOLITA A 14 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.14. CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN CON 25%  
DE ZEOLITA A 21 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.15. CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN CON 25%  
DE ZEOLITA A 28 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.16. CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN CON 25%  
DE ZEOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

En la siguiente tabla se muestra el esfuerzo observado que corresponde a los datos experimentales, el esfuerzo predecido que corresponde a los datos de simulación, los residuales y el porcentaje de error.

**TABLA 16  
RESIDUALES DE CURVA DE SIMULACIÓN CON 25% DE  
ZEOLITA.**

	<b>Esfuerzo Observado</b>	<b>Esfuerzo Predecido</b>	<b>Residuales</b>	<b>Error</b>
<b>7 DIAS</b>	3,14	11,12	7,9757	254%
	14,19	22,23	8,0415	57%
	28,67	33,35	4,6772	16%

	44,46	44,46	0,0029	0%
	56,72	54,53	2,1864	4%
	60,71	60,19	0,5162	1%
<b>14 DIAS</b>	4,39	10,33	5,9419	135%
	12,60	20,66	8,0638	64%
	25,54	31,00	5,4558	21%
	41,84	41,33	0,5123	1%
	52,16	51,66	0,5004	1%
	61,99	60,86	1,1268	2%
	68,40	68,14	0,2598	0%
<b>21 DIAS</b>	5,07	9,72	4,6491	92%
	13,22	19,44	6,2183	47%
	25,59	29,16	3,5674	14%
	38,88	38,88	0,0035	0%
	46,74	46,94	0,2046	0%
	53,58	52,66	0,9236	2%
<b>28 DIAS</b>	1,04	5,02	3,9837	384%
	2,92	10,05	7,1274	244%
	9,14	15,07	5,9311	65%
	14,51	20,09	5,5848	39%
	20,72	25,12	4,3985	21%
	26,85	30,14	3,2922	12%
	35,32	35,17	0,1541	0%
	37,68	40,19	2,5096	7%
	45,21	45,21	0,0016	0%
	49,92	49,25	0,6746	1%
	51,81	52,17	0,3555	1%

De la tabla anterior se observa que los residuales son muy elevados para las tres o cuatro primeras lecturas de cada ensayo de compresión lo que por ende da errores grandes; esto se debió principalmente a problemas de alineación de partes móviles de la máquina, velocidad de compresión, toma de lecturas, etc.

Para las curvas de esfuerzo-deformación se determinó el grado de ajuste de la curva de simulación en nuestro caso se usó la prueba Ji-Cuadrada para esto se plantearon las siguientes hipótesis y contraste de hipótesis:

$H_0$ : La curva de simulación proporciona un buen ajuste de los datos experimentales.

$H_A$ : La curva de simulación no proporciona un buen ajuste de los datos experimentales.

Rechazo  $H_0$  si  $X^2_{\text{calculado}} \geq X^2_{(k-1), 0.05}$

**TABLA 17**

**BONDAD DE AJUSTE PARA CURVA DE SIMULACIÓN CON 25%  
DE ZEOLITA.**

<b>Días de Curado</b>	<b><math>X^2_{\text{calculado}}</math></b>	<b>k</b>	<b><math>X^2_{(k-1), 0.05}</math></b>	<b>Prueba de Hipótesis</b>
7	9,38	6	11,07	Acepto $H_0$
14	7,56	7	12,59	Acepto $H_0$
21	4,67	6	11,07	Acepto $H_0$
28	13,40	11	18,31	Acepto $H_0$

Como se muestra en la tabla anterior para 7, 14, 21 y 28 días de curado los estadísticos de prueba son menores que  $X^2_{(k-1), 0.05}$  por lo tanto con un 95% de confianza se aceptó la hipótesis nula que la

curva de simulación proporciona un buen ajuste de los datos experimentales.

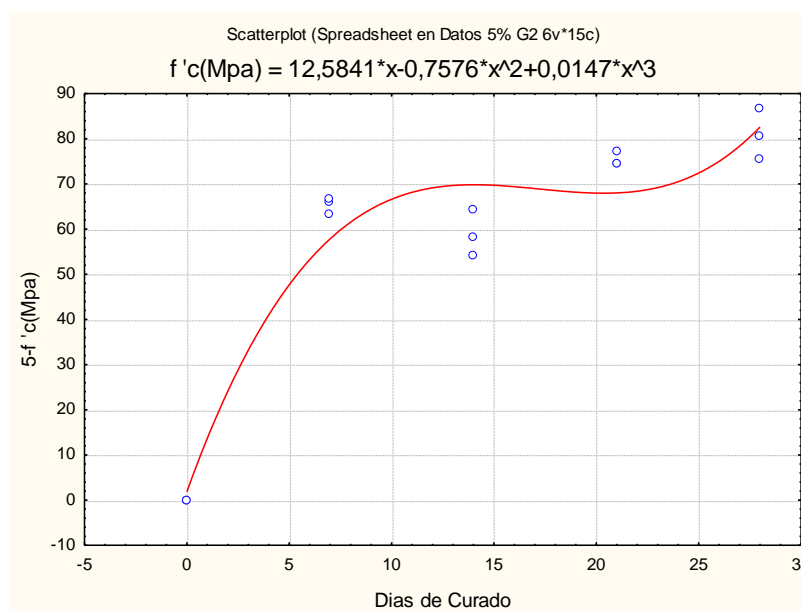
La segunda parte de la modelización comprende el análisis por regresión polinómica para interpolar el esfuerzo último en función de los días de curado y finalmente el análisis por regresión múltiple para interpolar el esfuerzo último en función del porcentaje de zeolita adicionado y los días de curado.

Para Interpolar el esfuerzo último en función de los días de curado, se probaron diferentes modelos de regresión; el mejor ajuste se obtuvo mediante un modelo de regresión polinómica de grado 3, cuyos coeficientes de regresión para los distintos porcentajes de zeolita se muestran en la siguiente tabla:

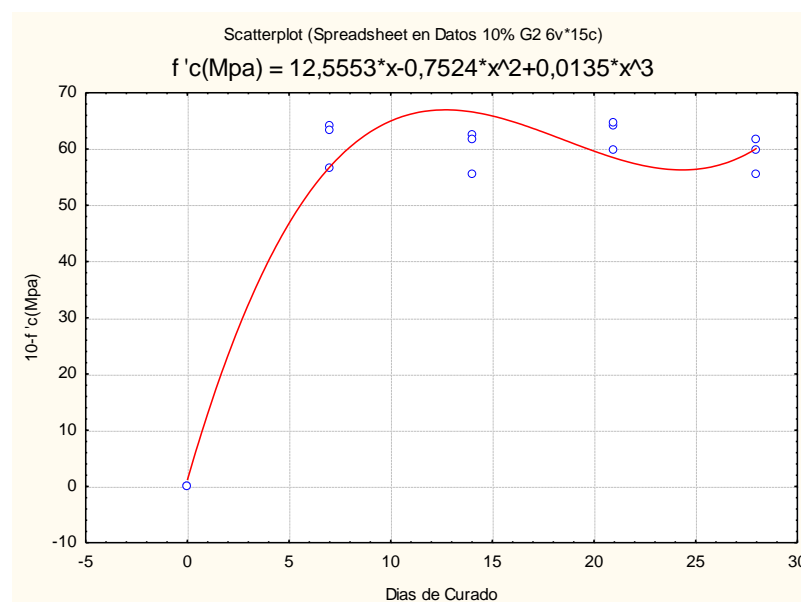
**TABLA 18**  
**COEFICIENTES DE REGRESION PARA DIFERENTES**  
**PORCENTAJES DE ZEOLITA.**

Effect	Parameter Estimates (Sheet1 in Datos Dias Modelo G2) Sigma-restricted parameterization				
	5-f 'c(Mpa) Param.	10-f 'c(Mpa) Param.	15-f 'c(Mpa) Param.	20-f 'c(Mpa) Param.	25-f 'c(Mpa) Param.
Intercept	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Dias de Curado	12,58414	12,55529	11,07092	10,35020	14,08321
Dias de Curado^2	-0,75760	-0,75240	-0,60166	-0,57241	-0,86579
Dias de Curado^3	0,01469	0,01354	0,01038	0,01122	0,01515

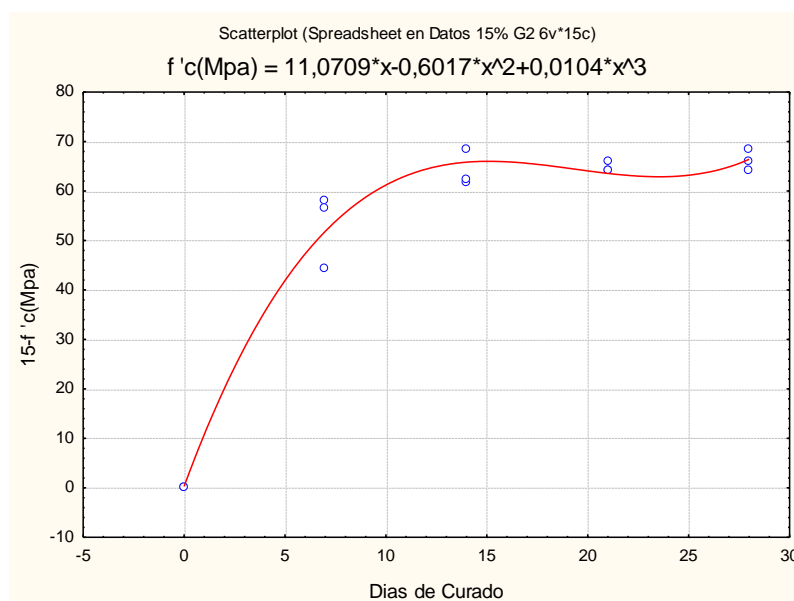
Las curvas de regresión para 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de zeolita se muestran a continuación:



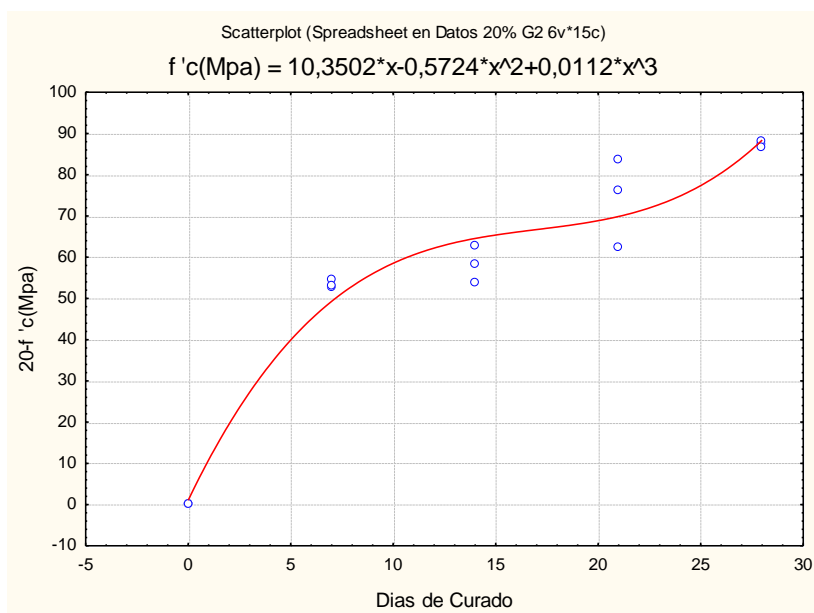
**FIGURA 4.17. CURVA DE REGRESIÓN CON 5% DE ZEOLITA**



**FIGURA 4.18. CURVA DE REGRESIÓN CON 10% DE ZEOLITA**

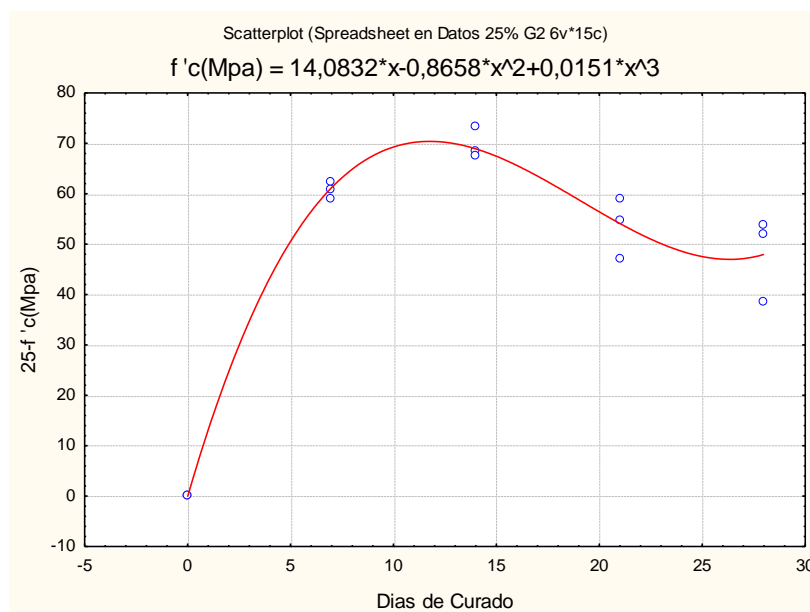


**FIGURA 4.19. CURVA DE REGRESIÒN CON 15% DE ZEOLITA**



**FIGURA 4.20. CURVA DE REGRESIÒN CON 20% DE ZEOLITA**





**FIGURA 4.21. CURVA DE REGRESIÒN CON 25% DE ZEOLITA**

**TABLA 19**

**ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS MODELOS DE REGRESIÒN  
PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA.**

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (Sheet1 in Datos Dias Modelo G2)						
	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	SS Residual	df Residual	F	p
5-f'c(Mpa)	0,916811	11942,22	3	835,1703	11	52,4302	0,000001
10-f'c(Mpa)	0,949041	8622,30	3	359,6302	11	87,9100	0,000000
15-f'c(Mpa)	0,977618	9534,61	3	170,6777	11	204,8320	0,000000
20-f'c(Mpa)	0,952543	13110,47	3	507,7973	11	94,6671	0,000000
25-f'c(Mpa)	0,966572	8859,52	3	238,9736	11	135,9352	0,000000

La tabla ANOVA muestra la potencia de correlaciòn para cada uno de los modelos,  $R^2 \times 100$  se encuentra entre el 92% y 98% lo que significa que existe una variaciòn de entre el 8% y el 2% la misma que no es explicada por los modelos y es atribuida al error.

Finalmente, para predecir  $f'c$  en función del porcentaje de zeolita adicionado y los días de curado se usó regresión múltiple. En nuestro caso se consideraron las siguientes variables candidatas para estimar el esfuerzo último dentro del rango experimental:

(días, porcentaje, días<sup>2</sup>, porcentaje<sup>2</sup>, días\*porcentaje)

Con 5 variables se tiene  $2^5-1=31$  posibles modelos de regresión, el criterio para seleccionar el mejor modelo esta basado en el coeficiente de Mallows  $C_p$ , el número de parámetros del modelo  $p$  y el coeficiente de determinación  $R^2$  y es el siguiente:

$C_p \leq p+1$ ,  $p$  debe ser el menor y  $R^2$  debe ser el mayor.

**TABLA 20**

**RESULTADOS DEL ESTADISTICO DE MALLOW'S  $C_p$  PARA  
DISTINTOS MODELOS DE REGRESIÓN.**

Summary of best subsets; variable(s): $f'c$ (Mpa) (Sheet1 DATOS.xls)							
Mallow's $C_p$ and standardized regression coefficients for each submodel							
Subset No.	Mallows' $C_p$	No. of Effects	Porcentaje	Días de Curado	1 <sup>2</sup>	2 <sup>2</sup>	1*2
1	2,4570	3		2,337468		-1,37638	-0,103744
2	3,0097	4	0,054738	2,277945		-1,31504	-0,148437
3	3,1365	4		2,302037	0,048404	-1,32924	-0,150581
4	6,8187	2		2,251805		-1,37638	
5	7,8987	3		2,295742	-0,028699	-1,40433	
6	8,1822	3	-0,026939	2,299261		-1,40656	
7	9,7147	4	0,051012	2,272233	-0,072040	-1,38937	
8	146,5762	4	0,487510	0,963490	-0,180143		-0,327480
9	147,3106	3	0,312836	1,001873			-0,359174
10	163,1827	3		1,057072	0,259068		-0,354428

TABLA 21

**RESULTADOS DEL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PARA  
DISTINTOS MODELOS DE REGRESIÓN.**

Summary of best subsets; variable(s): f 'c(Mpa) (Sheet1 DATOS.xls)							
R square and standardized regression coefficients for each submodel							
Subset No.	R square	No. of Effects	Porcentaje	Días de Curado	1^2	2^2	1*2
1	0,954240	4	0,054738	2,277945		-1,31504	-0,148437
2	0,954171	4		2,302037	0,04840	-1,32924	-0,150581
3	0,953460	3		2,337468		-1,37638	-0,103744
4	0,950630	4	0,051012	2,272233	-0,07204	-1,38937	
5	0,950531	3		2,295742	-0,02870	-1,40433	
6	0,950379	3	-0,026939	2,299261		-1,40656	
7	0,950036	2		2,251805		-1,37638	
8	0,876958	4	0,487510	0,963490	-0,18014		-0,327480
9	0,875486	3	0,312836	1,001873			-0,359174
10	0,866942	3		1,057072	0,25907		-0,354428
11	0,858548	3	0,561248	0,771138	-0,39820		
12	0,850402	2	0,141766	0,820631			
13	0,845106	2		0,861780	0,09289		
14	0,842864	2		1,001873			-0,103744
15	0,839439	1		0,916209			
16	0,756563	3	1,084644		-0,73278	0,54505	
17	0,736392	3	0,454683			0,72272	-0,226810
18	0,727333	2	0,335009			0,61146	
19	0,702276	3			0,31242	0,74666	-0,122084
20	0,699882	2			0,24929	0,68114	

De la tabla anterior  $R^2=0.95$  es el mayor, con un  $C_P=3$  y  $p=4$ ; con estos resultados el mejor modelo para predecir el esfuerzo último se obtuvo con la siguiente expresión:

$$f'c=B_0+B_1*Porcentaje+B_2*días+B_3*días^2+B_4*días*Porcentaje+Error$$

TABLA 22

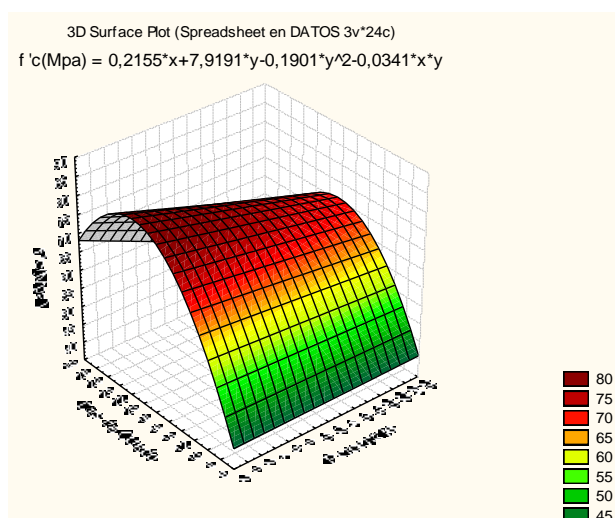
**ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO DE REGRESIÓN  
SELECCIONADO.**

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (Sheet1 DATOS.xls)							
	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	SS Residual	df Residual	F	p
f 'c(Mpa)	0,954240	0,952111	305150,1	4	14633,45	86	448,3376	0,00

De la tabla anterior la potencia de explicación del modelo es del 95% esto significa que existe un 5% de variación que no es explicado por el modelo y se atribuye al error.

Con la expresión que se encontró mediante regresión se graficó la siguiente superficie:

$$f'c = 0,2155 * \text{Porcentaje} + 7,9191 * \text{días} - 0,1901 * \text{días}^2 - 0,0341 * \text{porcentaje} * \text{días}.$$



**FIGURA 4.22. SUPERFICIE DEL MODELO DE REGRESIÓN**

Al comparar la figura 4.22 con la figura 4.7 se observó que la superficie del modelo difiere de la curva experimental debido a que los datos experimentales tienen distintas tendencias según el porcentaje de zeolita adicionado como se observa en las figuras 4.6 y 4.9.

#### 4.4. Validación de resultados

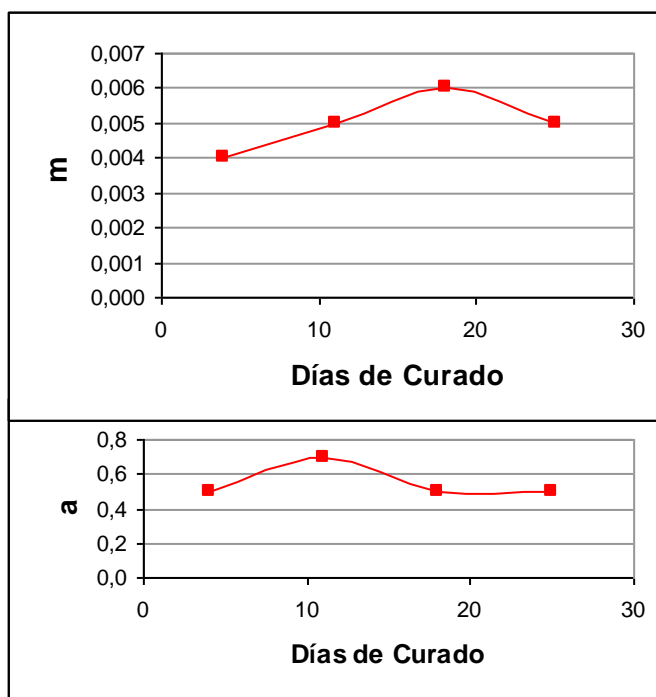
Similar que los datos del modelo, los datos de validación del esfuerzo último versus deformación también se simularon usando la herramienta de programación Matlab.

Las constantes  $a$  y  $m$  se muestran en la siguiente tabla junto con los datos experimentales promedio de módulo de elasticidad, esfuerzo último y esfuerzo de fluencia

**TABLA 23**

**VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN  
DE 27.5% DE ZEOLITA**

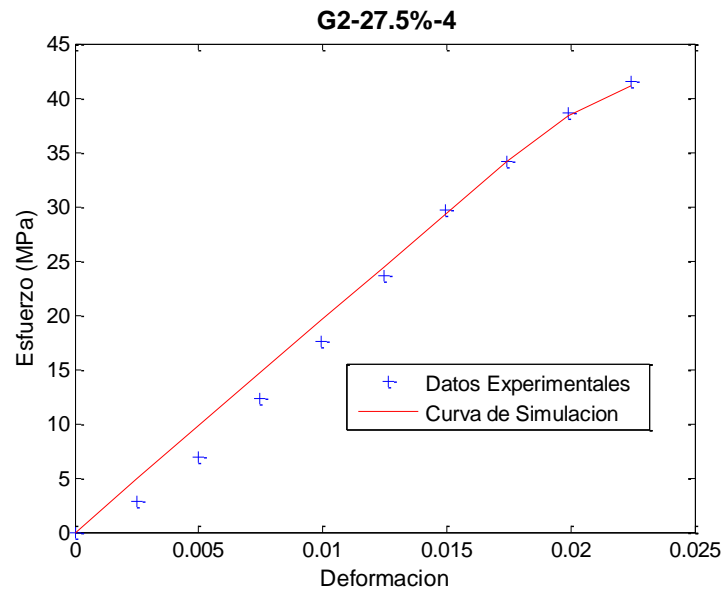
<b>DIAS DE CURADO</b>	<b>E</b>	<b><math>\sigma_U</math></b>	<b><math>\sigma_Y</math></b>	<b>m</b>	<b>a</b>
4	1956,15	41,45	34,5	0,004	0,5
11	5007,46	61,56	49	0,005	0,7
18	3529,07	58,71	52	0,006	0,5
25	3223,09	50,02	42	0,005	0,5



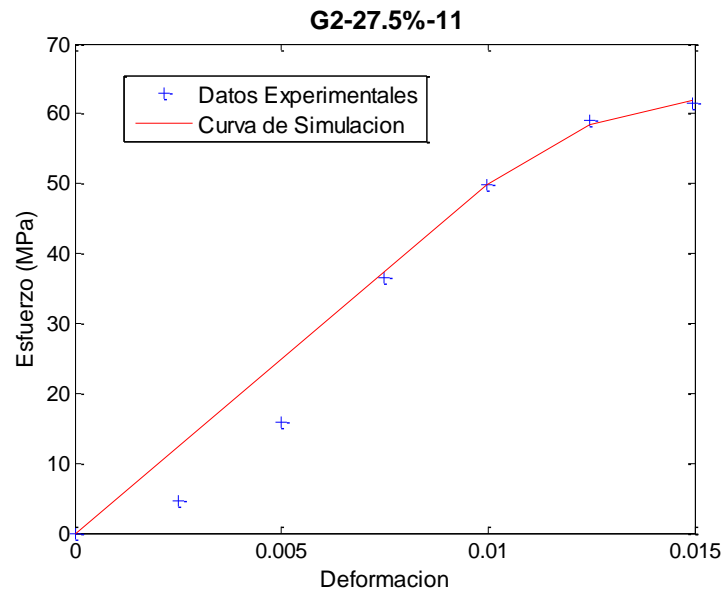
**FIGURA 4.23. CURVAS DE  $a$  Y  $m$  A DIFERENTES DÍAS DE CURADO CON 27.5% DE ZEOLITA**

Como se observa en la gráfica anterior la constante  $a$  varía entre 0.5 y 0.7 y el valor de  $m$  varía entre 0.004 y 0.006, estos valores no difieren significativamente de los valores que se obtuvieron para el modelo.

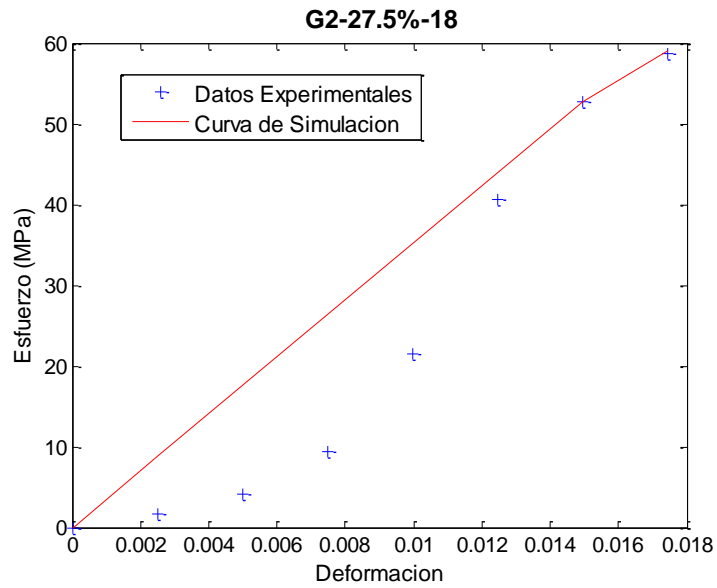
Las curvas de simulación para la pasta de cemento con adición de 27,5% de zeolita tipo 1 se muestran a continuación



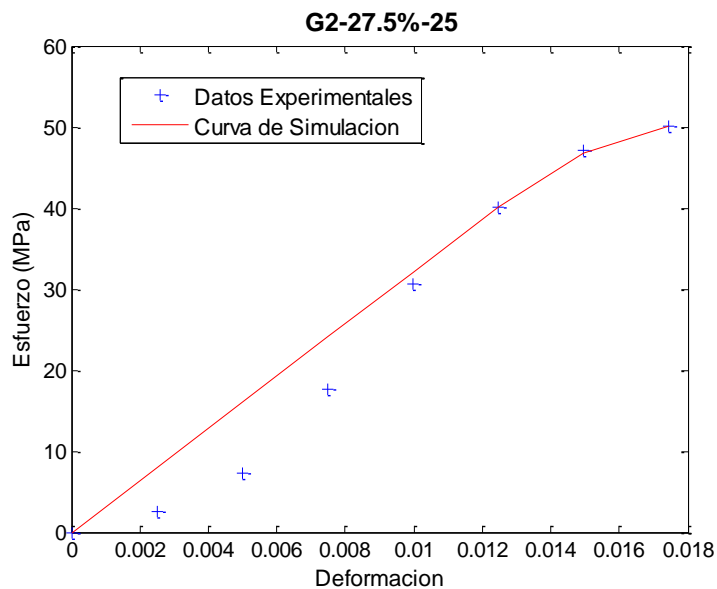
**FIGURA 4.24. CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN CON  
27.5% DE ZEOLITA A 4 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.25. CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN CON  
27.5% DE ZEOLITA A 11 DÍAS DE CURADO**

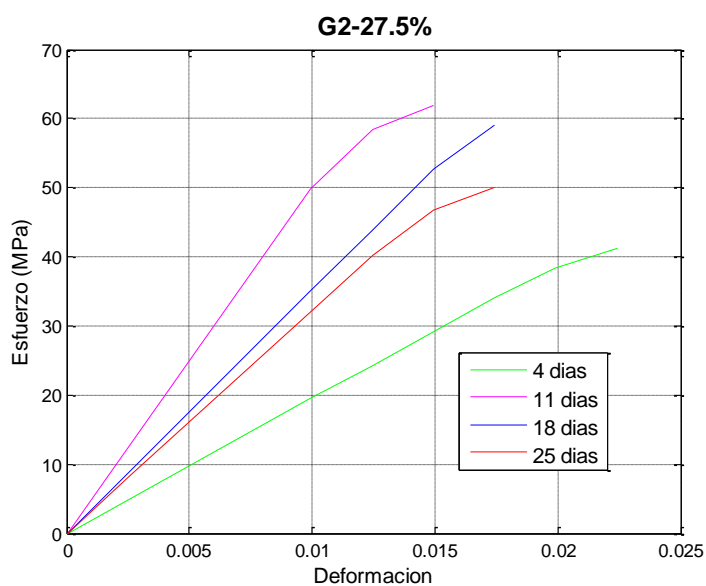


**FIGURA 4.26. CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN CON  
27.5% DE ZEOLITA A 18 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.27. CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN CON  
27.5% DE ZEOLITA A 25 DÍAS DE CURADO**





**FIGURA 4.28. CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN CON  
27.5% DE ZEOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

En la siguiente tabla se muestra el esfuerzo observado, el esfuerzo predicho, los residuales y el porcentaje de error.

**TABLA 24**

**RESIDUALES DE CURVA DE SIMULACIÓN CON 27.5% DE  
ZEOLITA.**

	<b>Sigma Observado</b>	<b>Sigma Predicho</b>	<b>Residuales</b>	<b>% Error</b>
<b>4 DIAS</b>	2,79	4,87	2,0812	75%
	6,90	9,74	2,8424	41%
	12,25	14,61	2,3636	19%
	17,61	19,48	1,8748	11%
	23,64	24,36	0,7160	3%
	29,67	29,23	0,4428	1%

	34,10	34,10	0,0016	0%
	38,62	38,35	0,2746	1%
	41,45	41,17	0,2765	1%
<b>11 DIAS</b>	4,56	12,47	7,9096	173%
	15,90	24,94	9,0391	57%
	36,48	37,41	0,9287	3%
	49,88	49,86	0,0177	0%
	59,00	58,39	0,6109	1%
	61,56	62,01	0,4536	1%
<b>18 DIAS</b>	1,60	8,79	7,1881	450%
	4,05	17,58	13,5262	334%
	9,46	26,36	16,9042	179%
	21,55	35,15	13,6023	63%
	40,59	43,94	3,3504	8%
	52,73	52,71	0,0175	0%
	58,71	58,99	0,2769	0%
<b>25 DIAS</b>	2,48	8,03	5,5461	224%
	7,21	16,05	8,8423	123%
	17,56	24,08	6,5184	37%
	30,61	32,10	1,4945	5%
	40,13	40,13	0,0006	0%
	47,03	46,77	0,2582	1%
	50,02	50,03	0,0067	0%

Similar a los datos del modelo en la tabla anterior se observa que los residuales son muy elevados para las tres o cuatro primeras lecturas de cada ensayo de compresión.

Para las curvas de esfuerzo-deformación se determinó el grado de ajuste de la curva de simulación para esto se aplicó la prueba Ji Cuadrada y se usaron las hipótesis y contraste de hipótesis que se plantearon para los datos del modelo.

**TABLA 25**

**BONDAD DE AJUSTE PARA CURVA DE SIMULACIÓN CON 27.5%  
DE ZEOLITA.**

<b>Días de Curado</b>	$X^2_{\text{calculado}}$	<b>k</b>	$X^2_{(k-1), 0.05}$	<b>Prueba de Hipótesis</b>
4	2,31	9	15,51	Acepto Ho
11	8,33	6	11,07	Acepto Ho
18	32,65	7	12,59	Rechazo Ho
25	10,54	7	12,59	Acepto Ho

Como se muestra en la tabla anterior para 4, 11 y 28 días de curado los estadísticos de prueba son menores que  $X^2_{(k-1), 0.05}$  por lo tanto con un 95% de confianza se aceptó la hipótesis nula que la curva de simulación proporciona un buen ajuste de los datos experimentales. Por el contrario a 18 días de curado se rechazó la hipótesis nula por lo tanto la curva de simulación no proporciona un buen ajuste de los datos experimentales.

Finalmente se validó la expresión encontrada mediante regresión para interpolar f'c en función del porcentaje de zeolita adicionado y los días de curado, la expresión es la siguiente:

$$f'c = 0,2155 * \text{Porcentaje} + 7,9191 * \text{días} - 0,1901 * \text{días}^2 - 0,0341 * \text{porcentaje} * \text{días}.$$

En la siguiente tabla se muestra el esfuerzo observado, el esfuerzo predicho, los residuales y el porcentaje de error.

**TABLA 26**

**RESIDUALES DE CURVA DE REGRESION.**

Porcentaje	Días de Curado	f 'c(MPa)			Error
		Predicado	Observado	Residual	
0	4	28,63	70,97	42,34	60%
0	11	64,11	83,51	19,40	23%
0	18	80,95	88,07	7,12	8%
0	25	79,17	84,37	5,20	6%
7,5	4	29,23	61,79	32,56	53%
7,5	11	62,91	75,07	12,16	16%
7,5	18	77,96	22,86	55,10	241%
7,5	25	74,39	69,65	4,74	7%
12,5	4	29,62	43,67	14,05	32%
12,5	11	62,11	49,03	13,09	27%
12,5	18	75,97	66,98	8,99	13%
12,5	25	71,20	76,10	4,90	6%
17,5	4	30,02	51,84	21,82	42%
17,5	11	61,32	55,42	5,90	11%
17,5	18	73,98	59,28	14,70	25%
17,5	25	68,02	66,98	1,04	2%
22,5	4	30,41	50,11	19,70	39%
22,5	11	60,52	62,82	2,30	4%
22,5	18	71,99	70,53	1,46	2%
22,5	25	64,83	75,18	10,34	14%
27,5	4	30,81	36,62	5,81	16%
27,5	11	59,72	60,99	1,27	2%
27,5	18	70,00	58,71	11,28	19%
27,5	25	61,65	49,88	11,77	24%

En la tabla anterior se muestra que hasta 7.5% de zeolita los residuales son muy elevados y desde este porcentaje los residuales son menores con excepción de los primeros cuatro días de curado.

Para la superficie de regresión se determinó el grado de ajuste para esto se aplicó la prueba Ji Cuadrada y se usaron las hipótesis y contraste de hipótesis que se plantearon en el análisis anterior.

**TABLA 27**

**BONDAD DE AJUSTE PARA CURVA DE REGRESION.**

$X^2_{\text{calculado}}$	<b>k</b>	$X^2_{(k-1), 0.05}$	<b>Prueba de Hipótesis</b>
13,71	12	21,03	Acepto Ho

La expresión que se obtuvo para interpolar el esfuerzo último en función del porcentaje de zeolita adicionado y los días de curado, sólo presenta un buen ajuste para adiciones mayores a 7.5% de zeolita y para un curado mayor a cuatro días. Bajo estas condiciones el estadístico de prueba es menor que  $X^2_{(k-1), 0.05}$  por lo tanto con un 95% de confianza se aceptó la hipótesis nula que la curva de regresión proporciona un buen ajuste de los datos experimentales.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos de compresión realizados a las probetas con los distintos porcentajes de adición de Zeolita para los distintos días de curado, se establecieron las siguientes conclusiones:

- La máxima resistencia a la compresión para la adición de 25% y 27.5% de Zeolita se obtuvo a los 14 y 11 días de curado respectivamente.
- El porcentaje óptimo de adición de Zeolita es del 20% esto es debido a que tuvo una mayor resistencia a la compresión a los 28 días de curado que el cemento tipo I con un 95% de confianza.
- Todos los tratamientos presentaron una mayor resistencia a la compresión que el cemento tipo IV con excepción de la adición de 25% de zeolita a 21 y 28 días de curado con un 95% de confianza,

esto es debido a que el cemento tipo IV tuvo una menor resistencia que el tipo I.

- Los valores de las constantes “m” y “a” se encontraron relativamente dentro de los mismos rangos con variaciones pequeñas del orden de 0.003 y 0.5 respectivamente para los datos del modelo (25% de Zeolita) y del orden de 0.002 y 0.2 respectivamente para los datos de la validación (27.5% de Zeolita).
- Las curvas de simulación del esfuerzo de compresión versus la deformación proporcionan un buen ajuste de los datos experimentales con excepción de la curva con adición de 27.5% de zeolita a los 18 días de curado con un 95% de confianza.
- El modelo que se obtuvo por regresión para estimar el esfuerzo último dentro del rango experimental en función del porcentaje de zeolita adicionado y los días de curado proporciona un buen ajuste sólo para adiciones mayores a 7.5% de zeolita y para un curado mayor a cuatro días con un 95% de confianza.

## **5.2. Recomendaciones**

De acuerdo a las observaciones realizadas durante la experimentación y el posterior análisis y modelización de los resultados se pueden establecer las siguientes recomendaciones:

- En la elaboración de las probetas se sugiere evitar el uso excesivo de agente engrasante en los moldes y eliminar las burbujas de aire mediante un apisonado de la mezcla dentro de los compartimentos de acuerdo a la norma. De esta manera se reducirán al máximo las porosidades en los especímenes con lo que se evitará que la resistencia a la compresión disminuya.
- Los ensayos de ruptura deben ser realizados en una misma máquina de Compresión, el uso de distintas prensas como en el caso de nuestro experimento pueden variar la exactitud de las lecturas debido a que las máquinas tienen diferentes calibraciones.
- Antes de realizar un ensayo de compresión se debe verificar la alineación entre la máquina y las probetas para evitar errores en la toma de las lecturas y más aun cuando existen partes móviles de la máquina que pueden originar precarga.
- Se recomienda para otros trabajos evaluar los costos de producción del cemento tipo I con adición de 20% de zeolita con respecto al cemento tipo IV que contiene comúnmente puzolanas de origen volcánico. Se infiere que para el mercado local los costos de transporte de la zeolita serian menores por encontrarse en zonas aledañas a la vía a la costa.



## **APÉNDICES**

## APÉNDICE A 1

### CONDICIONES DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 25% DE ZEOLITA

Fecha	Días de Curado	Masa (gr.)			Área (mm <sup>2</sup> )	Temperatura (° C)	HR
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3			
26-Ago-08	7	257,30	259,00	260,20	2601	25,1	77,0%
02-Sep-08	14	254,60	253,90	251,60	2601	25,2	72,1%
09-Sep-08	21	256,40	258,00	260,60	2601	27,8	69,0%
16-Sep-08	28	250,40	253,80	251,20	2601	26,1	70,1%

## APÉNDICE A 2

### CONDICIONES DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 27,5% DE ZEOLITA

Fecha	Días de Curado	Masa (gr.)			Área (mm <sup>2</sup> )	Temperatura (° C)	HR
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3			
19-Ago-08	4	253,60	256,20	255,10	2601	25,5	72,5%
26-Ago-08	11	254,00	254,50	252,60	2601	25,1	77,0%
02-Sep-08	18	258,60	261,40	258,60	2601	25,2	72,1%
09-Sep-08	25	249,40	250,90	250,80	2601	27,8	69,0%

## APÉNDICE B 1

### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 25% DE ZEOLITA A 7 DIAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	3,25	3,76	2,39	3,14	1259,02
0,004980	17,27	16,42	8,89	14,19	4440,90
0,007471	33,86	30,27	21,89	28,67	5814,38
0,009961	47,88	47,03	38,48	44,46	6340,88
0,012451	59,00	62,42	48,74	56,72	4921,62
0,014941			60,71	60,71	1602,39

## APÉNDICE B 2

### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 25% DE ZEOLITA A 14 DIAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	1,54	10,77	0,86	4,39	1762,63
0,004980	5,81	27,70	4,28	12,60	3296,34
0,007471	19,32	46,17	11,12	25,54	5196,32
0,009961	34,89	61,56	29,07	41,84	6546,90
0,012451	42,75	67,55	46,17	52,16	4143,32
0,014941	59,85		64,13	61,99	3948,74
0,017431	63,27		73,53	68,40	2575,27

## APÉNDICE B 3

### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 25% DE ZEOLITA A 21 DIAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	5,99	4,79	4,45	5,07	2037,32
0,004980	12,65	13,00	14,02	13,22	3273,45
0,007471	22,92	26,16	27,70	25,59	4967,40
0,009961	39,33	37,96	39,33	38,88	5333,66
0,012451	44,46	49,59	46,17	46,74	3158,99
0,014941	47,03	59,00	54,72	53,58	2746,95

#### APÉNDICE B 4

#### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 25% DE ZEOLITA A 28 DIAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	2,74	1,13	0,94	1,04	416,09
0,004980	11,63	3,39	2,45	2,92	756,52
0,007471	19,84	8,10	10,17	9,14	2496,53
0,009961	31,98	13,94	15,07	14,51	2156,09
0,012451	41,90	20,72	20,72	20,72	2496,53
0,014941	53,87	27,32	26,37	26,85	2458,70
0,017431		38,62	32,03	35,32	3404,35
0,019922			37,68	37,68	945,65
0,022412			45,21	45,21	3026,09
0,024902			49,92	49,92	1891,31
0,027392			51,81	51,81	756,52

#### APÉNDICE C 1

#### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 27,5% DE ZEOLITA A 4 DIAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	5,99	2,26	3,32	2,79	1119,65
0,004980	15,39	5,65	8,14	6,90	1649,22
0,007471	27,36	11,68	12,81	12,25	2148,53
0,009961	35,06	17,33	17,90	17,61	2156,09
0,012451		23,55	23,74	23,64	2420,87
0,014941		29,58	29,77	29,67	2420,87
0,017431		34,85	33,34	34,10	1777,83
0,019922		38,62		38,62	1815,66

0,022412		41,45		41,45	1134,78
----------	--	-------	--	-------	---------

### APÉNDICE C 2

#### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 27,5% DE ZEOLITA A 11 DÍAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	6,84	2,74	4,10	4,56	1831,30
0,004980	21,03	10,26	16,42	15,90	4555,36
0,007471	39,85	23,43	46,17	36,48	8263,74
0,009961	51,30	42,75	55,58	49,88	5379,45
0,012451	65,84	52,16		59,00	3662,60
0,014941		61,56		61,56	1030,11

### APÉNDICE C 3

#### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 27,5% DE ZEOLITA A 18 DÍAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	1,71	1,20	1,88	1,60	640,96
0,004980	5,13	2,74	4,28	4,05	984,32
0,007471	12,83	5,99	9,58	9,46	2174,67
0,009961	25,99	15,90	22,74	21,55	4852,95
0,012451	47,03	29,41	45,32	40,59	7645,68
0,014941	59,00	45,32	53,87	52,73	4875,84
0,017431	62,42	56,43	57,29	58,71	2403,58

## APÉNDICE C 4

### DATOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN CON 27,5% DE ZEOLITA A 25 DÍAS DE CURADO

Deformación	Esfuerzo (MPa)				E (MPa)
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	Promedio
0,000000	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,002490	3,08	2,74	1,62	2,48	995,77
0,004980	7,18	8,98	5,47	7,21	1899,97
0,007471	16,08	22,74	13,85	17,56	4154,76
0,009961	29,07	36,25	26,51	30,61	5242,10
0,012451	36,77	45,32	38,31	40,13	3822,84
0,014941	46,17	49,59	45,32	47,03	2769,84
0,017431	50,45		49,59	50,02	1201,79

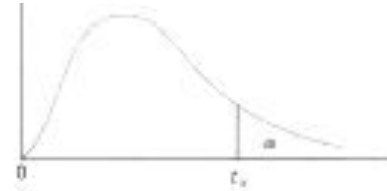
## APÉNDICE D

### VALORES CRÍTICOS DE LA PRUEBA DE SMIRNOV-KOLMOGOROV

Prueba de Smirnov-Kolmogorov. Valores críticos $D_{\max}(\alpha, n)$					
Tamaño de la muestra	Nivel de significancia $\alpha$				
	.20	.15	0.10	0.05	0.01
1	.900	.925	.950	.875	.995
2	.684	.726	.776	.842	.929
3	.565	.597	.642	.708	.828
4	.494	.525	.564	.624	.733
5	.446	.474	.510	.565	.669
6	.410	.436	.470	.521	.618
7	.381	.405	.438	.486	.577
8	.358	.381	.411	.457	.543
9	.339	.360	.388	.432	.514
10	.322	.342	.368	.410	.490
11	.307	.326	.352	.391	.468
12	.295	.313	.338	.375	.450
13	.284	.302	.325	.361	.433
14	.274	.292	.314	.349	.418
15	.266	.283	.304	.338	.404
16	.258	.274	.295	.328	.392
17	.250	.266	.286	.318	.381
18	.244	.259	.278	.309	.371
19	.237	.252	.272	.301	.363
20	.231	.246	.264	.294	.356
25	.210	.220	.240	.270	.320
30	.190	.200	.220	.240	.290
35	.18	.190	.201	.230	.270
$\geq 35$	$1.07/\sqrt{N}$	$1.14/\sqrt{N}$	$1.22/\sqrt{N}$	$1.36/\sqrt{N}$	$1.63/\sqrt{N}$

## APÉNDICE E

### VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F



**Tabla A.6\*** Valores críticos de la distribución F

$$f_{\alpha,05}(v_1, v_2)$$

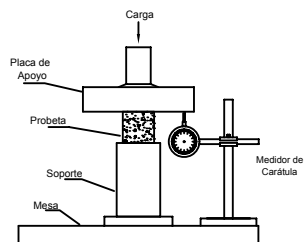
$v_2$	$v_1$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96
$\infty$	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88



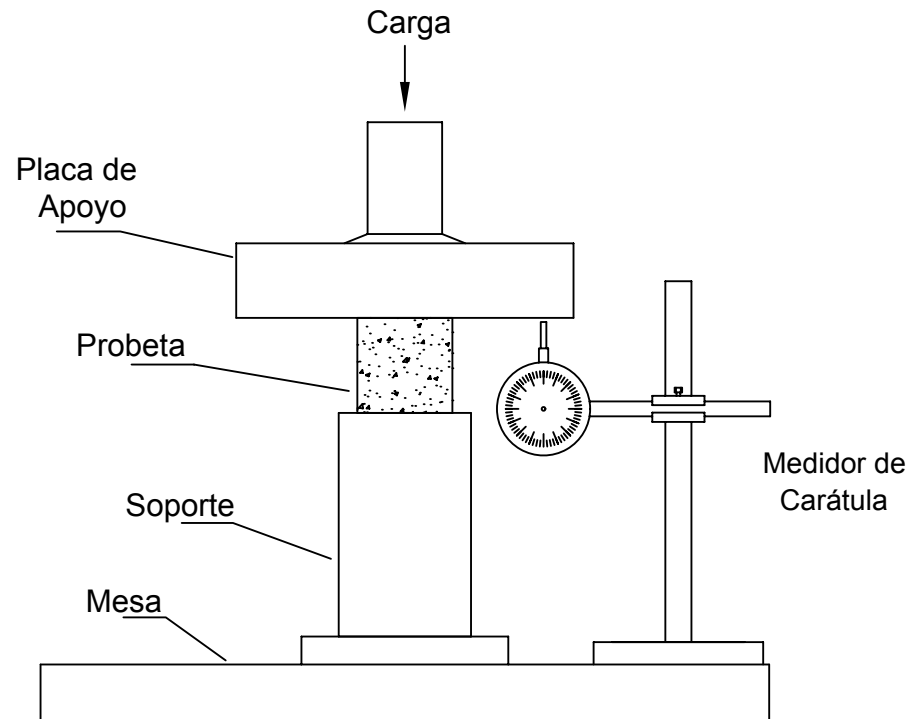
## APÉNDICE F

### VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN JI CUADRADA

Grados libertad	Probabilidad de un valor superior - Alfa ( $\alpha$ )				
	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005
1	2,71	3,84	5,02	6,63	7,88
2	4,61	5,99	7,38	9,21	10,60
3	6,25	7,81	9,35	11,34	12,84
4	7,78	9,49	11,14	13,28	14,86
5	9,24	11,07	12,83	15,09	16,75
6	10,64	12,59	14,45	16,81	18,55
7	12,02	14,07	16,01	18,48	20,28
8	13,36	15,51	17,53	20,09	21,95
9	14,68	16,92	19,02	21,67	23,59
10	15,99	18,31	20,48	23,21	25,19
11	17,28	19,68	21,92	24,73	26,76
12	18,55	21,03	23,34	26,22	28,30
13	19,81	22,36	24,74	27,69	29,82
14	21,06	23,68	26,12	29,14	31,32
15	22,31	25,00	27,49	30,58	32,80
16	23,54	26,30	28,85	32,00	34,27
17	24,77	27,59	30,19	33,41	35,72
18	25,99	28,87	31,53	34,81	37,16
19	27,20	30,14	32,85	36,19	38,58
20	28,41	31,41	34,17	37,57	40,00
21	29,62	32,67	35,48	38,93	41,40
22	30,81	33,92	36,78	40,29	42,80
23	32,01	35,17	38,08	41,64	44,18
24	33,20	36,42	39,36	42,98	45,56
25	34,38	37,65	40,65	44,31	46,93
26	35,56	38,89	41,92	45,64	48,29
27	36,74	40,11	43,19	46,96	49,65
28	37,92	41,34	44,46	48,28	50,99
29	39,09	42,56	45,72	49,59	52,34
30	40,26	43,77	46,98	50,89	53,67
40	51,81	55,76	59,34	63,69	66,77
50	63,17	67,50	71,42	76,15	79,49
60	74,40	79,08	83,30	88,38	91,95
70	85,53	90,53	95,02	100,43	104,21
80	96,58	101,88	106,63	112,33	116,32
90	107,57	113,15	118,14	124,12	128,30
100	118,50	124,34	129,56	135,81	140,17



FIMCP - ESPOL		ESCALA	NÚMERO
PROYECTO	ESQUEMA DE ENSAYO DE COMPRESIÓN	1	1
ESCALA	CONTENIDO	1	1
1 : 4	Probeta y Prensa de Compresión		
INTERVENIENES	(1) Pasta de Cemento (2) Acero Estructural A-36		



<b>FIMCP - ESPOL</b>		FECHA:	NOMBRE:
		Dibujó: 14/11/08 C. Gualpa	
PROYECTO:		Revisó: 14/11/08 Ing. Cornejo	PLANO No:
ESQUEMA DE ENSAYO DE COMPRESIÓN			1
	ESCALA:	CONTIENE:	
	1 : 4	<b>Probeta y Prensa de Compresión</b>	
MATERIALES:		MASA (Kg)	
(1) Pasta de Cemento (2) Acero Estructural A-36			

## BIBLIOGRAFÍA

1. Montoya P. *Hormigón Armado*, Gustavo Gili S.A. Tomo I, 12ª Edición  
Pág. 11 - 20 Barcelona España 1987.
2. Reyes S. "Manufactura del cemento Pórtland", Monografías.com  
[www.monografias.com](http://www.monografias.com), marzo del 2008.
3. Basaldella E. *Empleo de zeolitas en materiales con cemento Pórtland*,  
*Ciencia y Tecnología del Hormigón*, Volumen 9, Pág. 30-32, Buenos Aires  
Argentina 2002.
4. Wikimedia Foundation Inc. "Modelo estadístico Lineal"  
[www.es.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_estadístico](http://www.es.wikipedia.org/wiki/Modelo_estadístico), marzo del 2008.
5. Freund J. *Estadística Elemental*, Prentice Hall Hispanoamericana S.A.  
8ª Edición, Pág. 385 - 390 México 1994.
6. Miller I. *Estadística Matemática con Aplicaciones*, Pearson Educación  
6ª Edición, Pág. 490-500 México 2000.

7. Biblioteca Virtual de la Universidad de la Coruña, "Diseño Factorial"  
[www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec5\\_5](http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec5_5), marzo del 2008.
8. Godoy L. y Flores F. "Modelado de problemas no lineales de estructuras y materiales mediante la mecánica computacional"  
[www.efn.uncor.edu/dep/estruct/gmnme/Proyecto\\_ACC2001.htm](http://www.efn.uncor.edu/dep/estruct/gmnme/Proyecto_ACC2001.htm), octubre del 2008.
9. Nassif H. "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC", Cement & Concrete Composites Pág. 661-670, New Jersey, United States, diciembre del 2005.
10. ASTM C-595-03, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements (C 595-03), Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01, United States, febrero del 2003.
11. ASTM C 109/C 109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01, United States, Agosto del 2002.
12. Andrade J. "Plasticity Modeling and Computation", Notas del módulo Teoría de Inelasticidad, Mayo del 2008.