

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

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

**“DETERMINACION DE LA VARIACION EN LA  
RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LA PASTA DE  
CEMENTO TIPO I MEDIANTE LA ADICION DE 5% DE  
ZEOLITA I Y CURADO EN AIRE”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

Mónica Pilar Acurio Quispe

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, A mis padres que gracias a sus consejos y apoyo hoy llegue a cumplir mi meta. A mis hermanos Gloria, Rosa y Luis, a mi cuñada y sobrinitos que de una u otra manera han ayudado para la realización de esta tesis. Y en especial al Ing. Mauricio Cornejo por su invaluable ayuda.

## DEDICATORIA

ESTE TRABAJO  
REALIZADO CON  
ESFUERZO DEDICO A  
MIS PADRES Sr. LUIS  
ACURIO Y Sra.  
ESTHER QUISPE, A  
MIS HERMANOS Y  
CUÑADA. Y A MIS  
SOBRINITOS LUIS Y  
GIAN LUIGI.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Dra. Cecilia Paredes V.  
DELEGADA DEL  
DECANATO DE LA  
FIMCP

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Rodrigo Perugachi B.  
VOCAL

## DECLARACION EXPRESA

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

---

Mónica Pilar Acurio  
Quispe.

## **RESUMEN.**

La presente tesis consistió en el estudio de las diferentes etapas que experimenta la pasta de cemento con el propósito de aumentar su resistencia a la compresión, a través de la adición de cierta cantidad de Zeolita tipo I que en nuestro caso es también conocida como Modernita.

El objetivo del estudio es determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo I curado al ambiente cuando se le adiciona 5% de Zeolita Tipo 1, a través de la simulación matemática de la relación esfuerzo deformación y datos experimentales con la validación de 7.5% de Zeolita, esta misma determinación se realizará para los porcentajes de 10, 15, 20 y 25% conjuntamente con 5%.

Para obtener un óptimo desarrollo de la experimentación se la divido en tres procesos consistiendo estos en:

- Proceso de Molienda.
- Proceso de mezclado y elaboración de probetas.
- Proceso de ruptura.

Cada uno de estos procesos nos ha permitido conocer las fases que acontece para la selección de un determinado cemento para cada aplicación. Es importante recalcar que el proceso de molienda fue llevado a cabo en el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la ESPOL. Para lograr la determinación del mejor porcentaje de Zeolita I; se utilizó una herramienta estadística que analizará las medias aritméticas del promedio de la muestras utilizada en cada día de curado. Este proceso trata de las comparaciones múltiples a través de un control; escogiendo a este control al 5% de Zeolita, quien no representa gran cantidad en peso con respecto a los demás porcentajes.

Finalmente al realizar esta comparación múltiple se escoge como el porcentaje más óptimo al 20% de Zeolita con curado de 28 días. Es importante recalcar que este porcentaje en comparación con los 7 días de curado aumento esfuerzo de compresión en un 63.3% de su esfuerzo inicial. Mientras que los otros valores demostraron solo un aumento de 23.9%; 3.72%; 17.4% y 20.8% con 5, 10, 15 y 20% de adición de Zeolita respectivamente; especificando así que la reacción de adición de Zeolita I aun no ha reaccionado en este día de curado.

# INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	XI
SIMBOLOGÍA.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIX
INTRODUCCIÒN.....	1
CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.1.1. Justificación.....	5
1.2. Hipótesis.....	7
1.3. Objetivos.....	7



1.4. Metodología.....	8
1.5. Estructura de la Tesis .....	10

## CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO.....	13
2.1. Cemento Tipo 1.....	13
2.2. Zeolita Tipo 1.....	21
2.2.1. Ubicación de Toma de Muestras Zeolita1.....	26
2.3. Curado al Ambiente.....	32
2.4. Análisis Estadístico de Regresión.....	40
2.5. Estado del Arte.....	52

## CAPITULO 3

3. METODOLOGIA Y ANALISIS ESTADISTICO.....	60
3.1. Recolección de Datos.....	60
3.2. Diseño del Experimento.....	62
3.3. Modelamiento.....	64
3.4. Experimentación.....	71
3.5. Validar.....	90

## CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANALISIS.....	91
4.1. Tabulación de datos y resultados.....	91
4.2. Análisis de Resultados.....	99
4.3. Identificación de Cambios de Propiedad.....	139

## CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	141
5.1. Conclusiones.....	141
5.2. Recomendaciones.....	146

## ANEXOS

## BIBLIOGRAFÍA

## SIMBOLOGIA

$\varepsilon$	Deformación
gr	Gramos
Kg	Kilogramos
Lb.	Libra
MPa.	MegaPascales
mm	milímetros
min	Minutos.
N	Newton
P	Probabilidad.
Ho	hipótesis Nula.
Ha	Hipótesis Alterna.
$\mu$	Media Aritmética.

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1 Metodología de la tesis.....	9
Figura 2.1 Complejo Habitacional y Comercial Cemento Tipo I.....	20
Figura 2.2 Características generales de la Zeolita.....	21
Figura 2.3 Analisis de un Material Solido en Polvo.....	22
Figura 2.4 Estructura de Zeolita Faujasita.....	24
Figura 2.5 Zeolita Faujasita Observada al Microscopio Electrónico.....	25
Figura 2.6 Muestra Tomada de la Ubicación Casas Viejas.....	26
Figura 2.7 Formacion de Zeolita en la Naturaleza.....	30
Figura 2.8 Esquema de un diseno factorial del 2x2.....	44
Figura 2.9 Ausencia de interacción entre dos variables.....	48
Figura 2.10 Interacción entre dos variables.....	49
Figura 2.11 Valores de Módulo de Elasticidad y Resistencia según experimento de Nassif, Najm y Suksawang.....	55
Figura 3.1 Cuadro de datos Experimentales.....	61
Figura 3.2 Trituradora de Mandíbula.....	73
Figura 3.3 Trituradora de Rodillos y Producto Obtenido.....	74
Figura 3.4 Cuarteo de la Muestra.....	75
Figura 3.5 Molino de Discos.....	75
Figura 3.6 Molino de Bolas.....	76
Figura 3.7 Tamizador Electrónico.....	77
Figura 3.8 Mezclador Mecánico.....	82
Figura 3.9 Variaciones Permisibles de los Moldes.....	83
Figura 3.10 Preparación de Moldes.....	83
Figura 3.11 Preparación de Mezcla en Mezclador Electrónico.....	84
Figura 3.12 Primera Capa de Mezcla.....	85
Figura 3.13 Orden del Apisonamiento de Especímenes.....	85

Figura 3.14	Aplicación de la Segunda Capa de Mezcla.....	86
Figura 3.15	Tolerancia Permisible en los Ensayos.....	88
Figura 3.16.	Probeta Después de Aplicación del Ensayo de Ruptura.....	89
Figura 4.1	Curvas Esfuerzo-Deformación 7.5% con 4 Días de curado...	101
Figura 4.2	Curvas Esfuerzo-Deformación 7.5% con 11 Días de Curado.....	102
Figura 4.3	Curvas Esfuerzo-Deformación 7.5% con 18 Días de curado.....	102
Figura 4.4	Curvas Esfuerzo-Deformación 7.5% con 25 Días de Curado.....	103
Figura4.5	Curvas Esfuerzo-Deformación 7.5% a Diferentes Días de Curado.....	103
Figura 4.6	Curvas Esfuerzo-Deformación 5% con 7 Días de curado.....	104
Figura 4.7	Curvas Esfuerzo-Deformación 5% con 14 Días de curado...	104
Figura 4.8	Curvas Esfuerzo-Deformación 5% con 21 Días de curado...	105
Figura 4.9	Curvas Esfuerzo-Deformación 5% con 28 Días de curado...	105
Figura 4.10	Curvas Esfuerzo-Deformación 5%Zeolita a diferentes días de Curado.....	106
Figura 4.11	Cuadro de Datos Ingresados para 5 y 7.5% de Adición de Zeolita.....	111
Figura 4.12	Cuadro de Media Aritmética de las Muestras para los diferente Días de Curado.....	111
Figura 4.13	Demostración de la Manera de Escoger el Análisis Dunnett.....	112
Figura 4.14	Cuadro de Análisis Dunnett.....	112
Figura 4.15	Grafico de Intervalo de Confianza para los Diferentes Días de	

Curado.....	114
Figura 4.16 Cuadro Demostrativo del Nivel de Confiabilidad del Exper.....	114
Figura 4.17. Curva Esfuerzo-Deformación de los Diferentes Porcentajes De Adición de Zeolita I a los 7 Días de Curado.....	116
Figura 4.18. Curva Esfuerzo-Deformación de los Diferentes Porcentajes De Adición de Zeolita I a los 14 Días de Curado.....	116
Figura 4.19. Curva Esfuerzo-Deformación de los Diferentes Porcentajes De Adición de Zeolita I a los 21 Días de Curado.....	117
Figura 4.20. Curva Esfuerzo-Deformación de los Diferentes Porcentajes De Adición de Zeolita I a los 28 Días de Curado.....	117
Figura 4.21. Cuadro de Datos Ingresados con los Diferentes Porcentajes Al programa STADISTICA 7.....	120
Figura 4.22. Valores de las Medias Aritméticas Calculadas para 7 Días de Curado.....	121
Figura 4.23. Valores de las Medias Aritméticas Calculadas para 14 Días de Curado.....	121
Figura 4.24. Valores de las Medias Aritméticas Calculadas para 21 Días de Curado.....	122
Figura 4.25. Valores de las Medias Aritméticas Calculadas para 28 Días de Curado.....	122
Figura 4.26. Valores de Significancia entre Medias Aritméticas para 7 Días de Curado.....	123

Figura 4.27. Gráfica Demostrativa del Rango de Confianza para 7 Días de Curado.....	124
Figura 4.28. Cuadro con Porcentaje de Probabilidad de Error (p) para 7 Días Curado.....	124
Figura 4.29. Valores de Significancia entre Medias Aritméticas para 14 Días de Curado.....	125
Figura 4.30. Gráfica Demostrativa del Rango de Confianza para 14 Días de Curado.....	125
Figura 4.31. Cuadro con Porcentaje de Probabilidad de Error (p) para 14Días Curado.....	126
Figura 4.32. Valores de Significancia entre Medias Aritméticas para 21 Días de curado.....	127
Figura 4.33. Gráfica Demostrativa del Rango de Confianza para 21 Días de Curado.....	127
Figura 4.34. Cuadro con Porcentaje de Probabilidad de Error (p) para 21Días Curado.....	128
Figura 4.35. Valores de Significancia entre Medias Aritméticas para 28 Días De Curado.....	129
Figura 4.36. Gráfica Demostrativa del Rango de Confianza para 28 Días de Curado.....	129
Figura 4.37. Cuadro con Porcentaje de Probabilidad de Error (p) para 28Días Curado.....	130

Figura 4.38. Gráfica Demostrativa del Rango de Confianza para Todos Los Días de Curado.....	131
Figura 4.39. Gráficas Demostrativo del Rango de Confianza para los Diferentes Porcentajes de Zeolita.....	131
Figura 4.40. Diagrama de Cajas de los Esfuerzos de Compresión.....	133
Figura 4.41. Datos Estadísticos de significancia con el Análisis Dunnett...	133
Figura 4.42. Gráficos de Intervalos de Confianza para los Diferentes Porcentajes de Zeolita I.....	135
Figura 4.43. Gráficos de Medias Aritméticas de Todas las Muestras Analizadas.....	135
Figura 4.44. Gráficos de Intervalos de Confianza Para los Diferentes Días de Curado con todos los Porcentajes Zeolita I.....	136
Figura 4.45. Datos Estadísticos de Significancia con el Análisis Dunnett...	136
Figura 4.46. Gráficos de Medias Aritméticas de Todas Las Muestras analizadas.....	138
Figura 4.47. Gráficos de Intervalos de Confianza para los Diferentes Días de Curado con todos los Porcentajes Zeolita I.....	138
Figura 4.48. Datos Estadísticos de Significancia con el Análisis Dunnett...	139
Figura 4.49. Curvas de Superficie del Comportamiento de la Pasta de Cemento para los Diferentes Días de Curado.....	140



## ÍNDICE DE TABLAS

Pag.		
Tabla 1	Tamaño de los Tamices Usados.....	77
Tabla 2	Porcentajes de Mezcla por Unidad de Especímenes.....	79
Tabla 3	Porcentaje de Mezcla para Doce Especímenes con distinto Porcentaje de Zeolita I.....	80
Tabla 4.	Datos de Ruptura al 5% Zeolita a 7 Dias de Curado.....	92
Tabla 5.	Continuación Datos de Ruptura al 5% Zeolita a 7 Dias De Curado.....	92
Tabla 6.	Datos de Ruptura al 5% Zeolita a 14 Dias de Curado.....	93
Tabla 7.	Datos de Ruptura al 5% Zeolita a 21 Dias de Curado.....	93
Tabla 8.	Datos de Ruptura al 5% Zeolita a 28 Dias de Curado.....	94
Tabla 9.	Datos de Ruptura al 7.5% Zeolita a 4 Dias de Curado.....	94
Tabla 10.	Datos de Ruptura al 7.5% Zeolita a 11 Dias de Curado.....	95
Tabla 11.	Datos de Ruptura al 7.5% Zeolita a 18 Dias de Curado.....	95
Tabla 12.	Datos de Ruptura al 7.5% Zeolita a 25 Dias de Curado.....	96
Tabla 13.	Valores de Esfuerzos de Compresión Promedios con 5% de Zeolita en (7,14,21 y 28) días de curado.....	97
Tabla 14.	Valores de Esfuerzo de Compresión Promedios con 7.5% de Zeolita en (4,11,18 y25) días de curado .....	98
Tabla 15.	Valores de Respuesta del Material bajo la Adición de 7.5% de Zeolita.....	107
Tabla 16.	Valores de Respuesta del Material bajo la Adición de 5% de Zeolita.....	107
Tabla 17.	Error Relativo entre los Porcentajes de Zeolita (5 y 7.5%).....	108
Tabla 18.	Valores Ingresados para Generar Curvas Esfuerzo-Deformación del Algoritmo para 7 Días de Curado al Ambiente.....	118
Tabla 19.	Valores Ingresados para Generar Curvas Esfuerzo-Deformación del Algoritmo para 14 Días de Curado al Ambiente.....	118

Tabla 20. Valores Ingresados para Generar Curvas Esfuerzo-Deformación del Algoritmo para 21 Días de Curado al Ambiente.....	119
Tabla 21. Valores Ingresados para Generar Curvas Esfuerzo-Deformación del Algoritmo para 28 Días de Curado al Ambiente.....	119

## **INTRODUCCIÓN.**

En la actualidad el uso del cemento se va incrementando, lo que ha originado realizar muchos estudios a fin de mejorar la durabilidad y sobre todo la resistencia a la compresión, así definir y especificar el concreto potencialmente idóneo para cada aplicación en particular, es de trascendental importancia la definición del cemento apropiado, ya que de este dependerá significativamente las características y propiedades del concreto a utilizar.

Para poder proceder de manera realista a nuestro estudio es necesario tomar en cuenta las clases y tipos de cemento que se produce a nivel nacional. Uno de los más comercializados es el Cemento Portland, el mismo que nos ayudara para el enfoque y planteamiento del problema de esta tesis; cuyo fin es adicionar un aditivo específico al cemento y analizar los efectos que este causara.

El objetivo fundamental de la adición de este aditivo es modificar convenientemente el comportamiento del concreto esperando obtener una mejora específicamente en su propiedad mecánica como es la resistencia a

la comprensión. Esta propiedad es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras en la actualidad en nuestro país se está realizando.

Con nuestro estudio se prevé dar al a ciudadanía un material mejorado, no solo para modificar sus propiedades en los estados frescos y endurecidos; sino también por economía para ahorrar energía y porque hay casos en donde el uso de un aditivo puede ser el único medio factible para obtener el resultado requerido, citando como ejemplos la defensa contra la congelación y el deshielo, el retardo o la aceleración en el tiempo de fraguado y la obtención de una alta resistencia.

# CAPITULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. Planteamiento del Problema

Es de conocimiento general que el cemento usado en la actualidad fue descubierto hace 2000 años aproximadamente cuyos inventores fueron los romanos; es importante mencionar que en 1824 Joseph Aspdin un constructor de Inglaterra; daba el nombre y patentaba dicha mezcla como Cemento Portland. Que dicha mezcla amasado con agua y arena se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las piedras calizas Probablemente, el material patentado por Aspdin era una caliza hidráulica.

Actualmente, el cemento Portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo. Este producto adquirió la propiedad de soportar grandes fuerzas de compresión gracia a los materiales puzolánicos usados en su elaboración. Por ello se puede decir que el cemento es el alma del hormigón, es así tanta la importancia que prácticamente este producto va mejorando en toda su producción por el bien de las obras en construcción civil.

Nuestro análisis tomará una base de control con el cual se efectuarán las comparaciones y se estimará las propiedades del cemento Portland tipo 1 sin aditivos, obteniendo los resultados de las propiedades mecánicas como fuerza de compresión del Clinker-Agua mediante pruebas de laboratorio. Cuantificando así los datos iniciales de control necesarios para realizar las comparaciones con las propiedades de la nueva mezcla Cemento tipo 1 con un 5% de Zeolita tipo 1.

Al demostrarse que la nueva mezcla (Cemento Portland + 5% de zeolita 1), logró alcanzar los mismas o mayores valores en la fuerza de compresión con referencia al cemento base, entonces se podría

competir con este innovador producto a nivel nacional que en primera instancia tendrá un costo menor al Cemento Portland usado por años.

Es indudable que nuestro estudio, aportará evidencia real y confiable de la Zeolita tipo 1 de esta zona y notando así el efecto a la resistencia a la compresión en la estructura del cemento, a lo largo del periodo de investigación

Como primicia para el desarrollo de nuestra experimentación se tomaran valores que se mantendrán constantes a lo largo del análisis; estos datos fueron la relación agua-cemento y la granulometría del material; reduciendo así las variables que perturben a nuestros resultados.

### **1.1.1 JUSTIFICACION**

El estudio de este proyecto propuesto se justifica a cabalidad, considerando que los resultados encontrados a través de la experimentación, produzcan un aumento de la resistencia a la compresión del cemento optimizando nuestro estudio.

La extracción de la Zeolita tipo 1 se realizara en las cercanías de la ESPOL, la adición de este material conlleva dos ventajas de mucha ayuda a nuestro medio a nivel social, económico y educativo:

- En primera instancia estaremos usando recursos propios de la provincia, ayudando a un avance tecnológico a nuestro país.
- En segundo plano se disminuiría el costo de transportar este material por cuanto no se traería de lugares más lejanos y obtener óptimos resultados con la aplicación de este nuevo avance.

Después de haber terminado esta investigación, se podría constatar si evidentemente la Zeolita Tipo 1 posee una influencia directa en la dureza de la mezcla de cemento y constatar si en realidad la puzolana agregada no absorbe agua, lo que implica mayor disponibilidad de agua para lubricar la mezcla, para una misma relación agua / cemento como lo dan a conocer algunos estudios realizados.

## **1.2. HIPOTESIS**



- La adición de 5% de Puzolana incrementa la Resistencia a la Compresión en la Pasta de Cemento.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **Objetivo General**

- Determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo I curado al ambiente cuando se le adiciona 5% de Zeolita Tipo 1, a través de la simulación matemática de la relación esfuerzo deformación y datos experimentales.

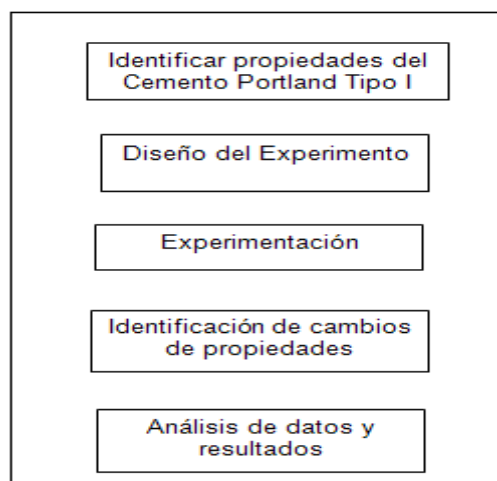
#### **Objetivos Específicos**

- Identificar la resistencia a la compresión del Cemento Tipo I para establecer como variará esta propiedad con la adición del 5% de Zeolita Tipo I y un curado al ambiente en la pasta de cemento.
- Implementar la metodología experimental establecida en la Norma ASTM C109.

- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente en los ensayos de compresión con el control (pasta de cemento sin adición de Zeolita), haciendo uso del software “STADISTICA” para determinar la variación de la resistencia a la compresión.
- Implementar un algoritmo en MATLAB mediante el ingreso del las variables Modulo de Young y del esfuerzo de Fluencia obtenidos experimentalmente.
- Aproximar el resultado de la grafica Esfuerzo vs Deformación para determinar el error entre los resultados teóricos y los experimentales de la resistencia a la compresión.

#### 1.4. METODOLOGÍA

La metodología de esta tesis se encuentra graficada en la Figura 1.1 y se detalla a continuación:



## FIGURA 1.1 METODOLOGÍA DE LA TESIS

El diseño del experimento se efectuara de la siguiente forma, la relación agua-cemento se mantendrá constante a lo largo de la investigación, otro valor que mantendremos constante es la granulometría del material. El aditivo a utilizar ocupara un 5 y 7.5% de la mezcla y un curado al aire.

La experimentación se la desarrollara de la siguiente forma; se procederá a realizar un curado al aire a las 3 probetas de 50x50x50 mm<sup>3</sup>, efectuado esto, los días de curado para los ensayos se llevo a cabo los días 4,11, 18 y 25 para 7.5% y 7, 14, 21 y 28 días para 5% de Zeolita; obteniendo así tres resultados para comparar y calcular un promedio.

Para resultados y análisis de datos se efectuará un análisis estadístico a través del método de comparaciones múltiples a fin de encontrar el mejor método aplicado para los diferentes porcentajes

de zeolita (5, 10, 15, 20 y 25%) y así también establecer si los valores encontrados guardan una relación confiable entre ellos.

Para los de Cambios de Propiedades en la pasta de cemento, se tomaron nuestros resultados y se compararon con el cemento Portland Tipo 1, el cual es nuestra referencia. En base se hace notorio que la adición de zeolita tipo 1 afecta a la resistencia a la compresión del material.

## **1.5. ESTRUCTURA DE LA TESIS**

El Capítulo 1 se llama Generalidades, aquí se explicará varios puntos de importancia, primero el planteamiento del problema y las justificaciones, esta sección hace referencia que problema vamos a solucionar, que en nuestro caso es ver la influencia en la resistencia a la compresión del cemento de la Zeolita y observar cómo se comporta ante el Cemento Tipo 1. Y en las justificaciones se explicaran las causas y razones de este estudio.

En este capítulo también constaran los objetivos, tanto General como específico, los cuales comprobaremos al final de esta investigación. También se incluye la metodología a usar para esta Tesis.

El Capítulo 2 se llama Marco Teórico, aquí se van a explicar los diferentes temas concernientes a esta investigación. Esta sección procura ampliar el horizonte técnico para realizar conclusiones con una buena referencia. Cada sección de esta parte ayudara a interpretar los resultados de una manera más clara. Aquí se incluye

hasta el principio de funcionamiento del software a utilizar en esta investigación.

El capítulo 3 se refiere a la Metodología a utilizarse en la experimentación, aquí se va a explicar de forma detallada, como se realiza la recolección de datos y por qué se la hizo así. En esta sección se explicara el diseño del experimento y la experimentación, sustentando cada punto, de modo que podamos saber que datos se obtuvieron, la secuencia de los mismos y sus procedimientos para cada día de recolección de datos para realizar la respectiva validación.

El capítulo 4 se llama Resultados y Análisis; aquí se detalla las tabulaciones de los datos con su correspondiente resultado, los mismo que son ponderados y de esta manera se identificara el tipo de cambio de la propiedad de la mezcla.

Finalmente el capítulo 5 se encuentra las conclusiones y recomendaciones obtenidas a través del desarrollo de la

experimentación y conjuntamente con los resultados obtenidos en el capítulo 4.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Cemento Tipo I

Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuada. Para la fabricación del concreto estructural se utiliza los llamados cementos hidráulicos [1].

Cemento Hidráulico, es decir, que fraguan y se endurecen al reaccionar químicamente con el agua [1]. De los diferentes cementos hidráulicos desarrollados, el cemento Portland es el más utilizado en la actualidad, por su tal uso en la construcción de carreteras, edificaciones de tipo residencial, industrial y otras aplicaciones.



El Cemento Portland es un material grisáceo finamente pulverizado, conformado fundamentalmente por silicatos de calcio y aluminio. Las materias primas usuales a partir de las cuales se fabrica son calizas que proporcionan el CaO y arcillas que proveen el SiO<sub>2</sub> y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [1]

## **TIPOS DE CEMENTO PORTLAND**

**Tipo I:** Conocido como Cemento normal libera más calor de hidratación que otros tipos de cemento, tiene mayor uso en obras de concreto en general, cuando en las mismas no se especifica la utilización de otro tipo (Edificios, estructuras industriales, conjuntos habitacionales).

**Tipo II:** Corresponde a los cementos de moderada resistencia a los sulfatos, es un cemento Portland destinado a obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiera moderado calor de hidratación, cuando así sea especificado.(Puentes, tuberías de concreto).

**Tipo III:** cemento de Alta resistencia temprana, usados esencialmente cuando la estructura de concreto va recibir grandes cargas a la brevedad posible o cuando es necesario desencofrar a los pocos días del vaciado. Libera aproximadamente el mismo porcentaje de su calor de hidratación en menos de tres días.

**Tipo IV:** Cemento que requiere bajo calor de hidratación, sin producir dilataciones durante el fraguado.

**Tipo V:** Cemento con elevada resistencia a la acción concentrada de los sulfatos (canales, alcantarillas, obras portuarias) [2].

#### **TIPOS DE CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO:**

- **Portland Puzolánico tipo IP:** Donde la adición de puzolana es del 15 –40 % del total.
- **Portland Puzolánico tipo I (PM):** Donde la adición de puzolana es menos del 15 %.
- **Portland Puzolánico tipo P:** Donde la adición de puzolana es más del 40% [2].

#### **PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND**

La propiedad de aglutinante de la pasta de cemento Portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación [1].

El cemento Portland no es un compuesto químico simple, sino más bien es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% ó más del peso del cemento Portland y son:

- silicato tricálcico
- silicato dicálcico
- aluminato tricálcico
- y aluminio ferrito tetra cálcico.

Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. [2].

Cuando el Clinker (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Portland) se examina al microscopio, el diámetro promedio de una partícula de cemento típica es de aproximadamente 10 micras, o una centésima de milímetro.

Las partículas de cemento fueran las promedio, el cemento Portland contendría aproximadamente 298,000 millones de granos por

kilogramo, pero de hecho existen unos 15 billones de partículas debido al alto rango de tamaños de partícula. Las partículas en un kilogramo de cemento Portland tienen un área superficial aproximada de 400 metros cuadrados [2].

Los dos silicatos de calcio, constituyen cerca del 75% del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio.

Este último es el componente cementante más influyente en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, fraguado, endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional principalmente dependen del gel del hidrato de silicato de calcio. Son la medula del concreto [2].

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal ( $\text{CaO}$ ) y sílice ( $\text{SiO}_2$ ), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. Estas partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los

granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia [2].

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado. 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 [2].

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, al mezclar el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua de necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. Aunque, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa hidratación del cemento. La relación mínima Agua – Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25 [2].

La cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrató puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudara a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación.

Es primordial conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque la velocidad determina el tiempo de fraguado y de endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. Sin embargo, una vez que el concreto ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido. El yeso, que es adicionado al cemento durante la molienda del Clinker, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento Portland [3].

La figura mostrada abajo muestra una de las aplicaciones del Cemento para construcciones que requieren soportan grandes cargas.



FIGURA 2.1 COMPLEJO HABITACIONAL Y COMERCIAL,  
CEMENTO TIPO 1

## 2.2. Zeolita Tipo I

Las zeolitas son minerales aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos, que al deshidratarse desarrollan, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimos de 3 a 10 angstroms. Las zeolitas se encuentran constituidas por aluminio, silicio, hidrógeno, oxígeno, y un número variable de moléculas de agua [4].

Algunas características de las zeolitas se muestran en la figura 2.2 [6]. Para determinar que una muestra posee Zeolita, se deben seguir los siguientes procedimientos:

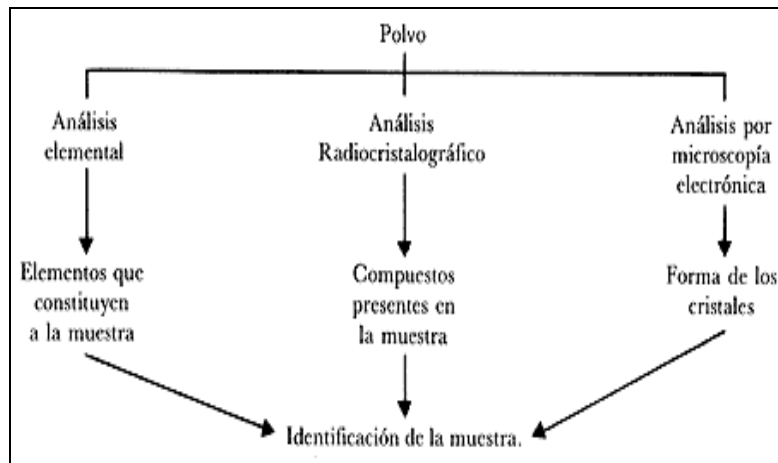
Propiedad	Valor
Diámetro de Poro	2 a 12 Å
Diámetro de cavidades	6 a 12 Å
Superficie Interna	500-1000 m <sup>2</sup> /g
Capacidad de intercambio catiónico	0 a 650 meq/100g
Capacidad de adsorción	<0,35 cm <sup>3</sup> /g
Estabilidad Térmica	Desde 200 hasta 100 °C

**FIGURA 2.2 CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZEOLITA.**

FUENTE: María T. Olgún Gutiérrez, Zeolitas Características y Propiedades.

- 1) Un análisis elemental para determinar qué átomos componen la muestra.
- 2) Un estudio radiocristalográfico para saber cómo se distribuyen los átomos en el espacio es decir qué clase de compuesto se trata, y
- 3) Un estudio por microscopía electrónica para conocer la homogeneidad del polvo.

El esquema de este análisis se lo observa en la siguiente Figura 2.3



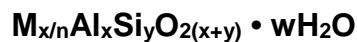
**FIGURA 2.3 ANÁLISIS DE UN MATERIAL SÓLIDO**

Propiedad	V
Diámetro de Poro	2.
Diámetro de cavidades	6.
Superficie Interna	500-1
Capacidad de intercambio catiónico	0. a 650
Capacidad de adsorción	<0,3
Estabilidad Térmica	Desde .1



Debido al estudio realizado por J.V. Smith, en su artículo "Definición de una zeolita" publicado en la revista *Zeolites*, se entenderá mejor el concepto y propuso la siguiente:

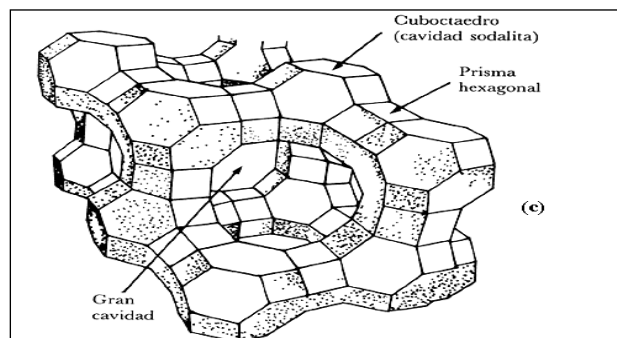
Fórmula [6]



El número de moléculas de agua es variable y es (**wH<sub>2</sub>O**), si de este análisis obtenemos la fórmula química ya explicada, podemos concluir que la muestra se trata de una zeolita.

Con esta forma establecida para identificar a una zeolita, puedo explicar de una manera más detallada; donde la zeolita está formada por una red de tetraedros arreglados periódicamente, en la cual cada oxígeno es compartido por dos átomos de silicio.

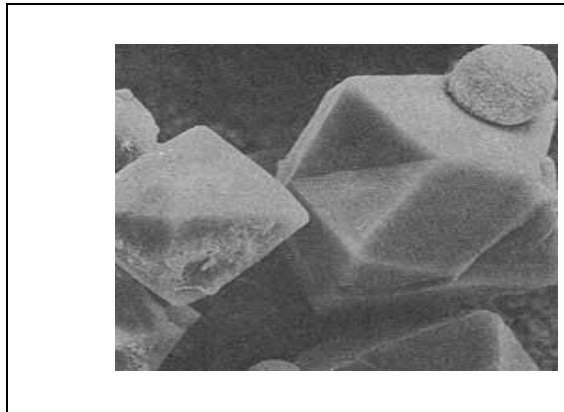
Este arreglo otorga a la zeolita la propiedad de absorber selectivamente moléculas en base a su tamaño, por esta razón son consideradas como tamices moleculares. La estructura de un tipo de Zeolita podemos observarla en la Figura 2.4.



**FIGURA 2.4 ESTRUCTURA DE UNA ZEOLITA FAUJASITA.[7]**

La estructura cristalina de la Zeolita es apreciada en el microscopio electrónico de barrido (Figura 2.5). Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas.

A continuación se menciona algunas propiedades expuestas según BRECK (1974):



**FIGURA 2.5. ZEOLITA FAUJASITA. OBSERVADA EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO. LOS CRISTALES SON DE 50 A° APROXIMADAMENTE. [7]**

- Elevado grado de Hidratación.
- Baja densidad y un gran volumen de vacios al deshidratar.
- Contiene canales moleculares uniformes clasificados en los cristales deshidratados.
- Por su habilidad de absorber gases y vapores.
- Por su propiedad catalíticas.
- Estabilidad de su estructura cristalina cuando se deshidrata.
- La propiedad de intercambio de catión.

### 2.2.1. Ubicación de Toma de Muestra Zeolita I

Esta clase de Zeolita I para nuestro análisis fue extraída de un lugar perteneciente a la provincia del Guayas, exactamente denominada “Casas Viejas” vía a la costa



**FIGURA 2.6** MUESTRA TOMADAS DE LA UBICACIÓN “CASAS VIEJAS”

## **PROPIEDAD FISICA**

Al realizar estudios con zeolitas se considero dos formas en sus propiedades físicas

1. Desde el punto de vista de sus propiedades naturales que incluye la morfología, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal, el grado de cristalización, resistencia ante la corrosión y abrasión.
2. Desde el punto de vista del desempeño físico; aquí se incluyó de la Zeolita las características de brillantes, viscosidad de Broockfield, viscosidad de Hércules, área superficial, tamaño de la partícula, dureza y resistencia al desgaste.

## **PROPIEDADES QUIMICAS**

Al realizar aplicaciones con zeolita natural dependerá básicamente de sus propiedades químicas que incluyen el intercambio de iones, adsorción o deshidratación y rehidratación.

Estas propiedades de acuerdo a Mumpton fueron descritas de la siguiente manera:

### **Adsorción o Deshidratación.-**

Las zeolitas 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 cambiables. 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 grande no pasan dentro de las cavidades centrales y se excluyen dando origen a la propiedad de tamiz molecular una propiedad de las zeolitas.

### **Intercambio de cationes.**

El intercambio de cationes se efecto de varios modos:

1. Intercambio en contacto con una solución salina acuosa (intercambio hidrotérmico) o con un solvente no acuoso.
2. Intercambio en contacto con una sal fundida. Por ejemplo, una zeolita A, originalmente con Ca, se pone en contacto con nitratos de litio, potasio o rubidio fundidos hacia 350°C.
3. Intercambio en contacto con un compuesto gaseoso. Por ejemplo, una zeolita faujasita Y, originalmente en su forma Na, se pone en contacto con HCl anhidro o NH<sub>3</sub>, hacia 250°C.

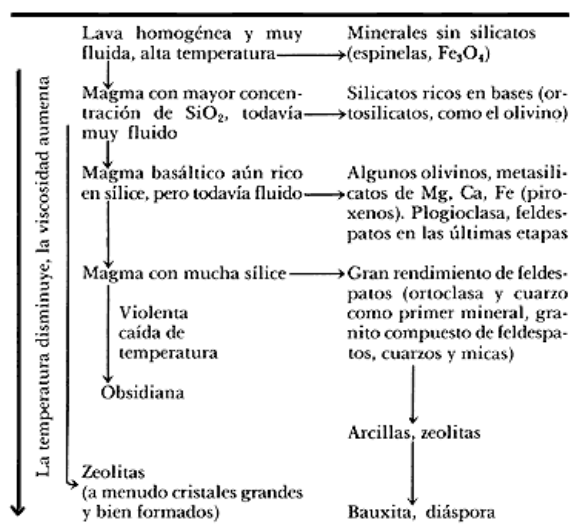
Un punto importante de conocer es el intercambio de iones en zeolitas que depende de:

- 1) La naturaleza de las especies cationicas, o sea, del catión, de su carga, etc.
- 2) La temperatura.
- 3) La concentración de las especies cationicas en solución.
- 4) Las especies aniónicas asociadas al catión en solución.
- 5) El solvente (la mayor parte de los intercambios se lleva a cabo en solución acuosa, aunque también algo se hace con solventes orgánicos) y,
- 6) Las características estructurales de la zeolita en particular [6].

## FORMACION DE ZEOLITAS

Cuando el enfriamiento fuese tal, que la lava cristalizase suficientemente como para dar un magma basáltico rico en álcalis, sería probable que se formasen zeolitas por medios acuosos salinos y alcalinos (Figura 2.7). La "zeolitización" también se provoca mediante una caída súbita de la temperatura en una lava basáltica.

Como un breve recordatorio se menciona que a altas temperaturas se pueden generar enormes presiones que, a su vez pueden acelerar los procesos.



**FIGURA 2.7.** FORMACION DE ZEOLITAS EN LA NATURALEZA [7]

Como se mencionó al principio basándonos en el marco geológico de las zeolitas, mineralogía y génesis

1. Sistema cerrados.- Depósitos formados por materiales volcánicos en sistemas hidrológicamente cerrados, sistemas salinos-alcalinos.
2. Sistemas abiertos.- Son depósitos formados en sistemas hidrológicamente abiertos. Logos de agua dulce.
3. Metamórficos boriales.- Depósitos formados por bajo grado de metamorfismo burial.
4. Hidrotermales.- Depósitos formados por sistemas hidrotermales o por la actividad de brotes calientes.
5. Marítimas profundos.- Depósitos formados por un medio marítimo profundo.
6. Zonas erosionadas por la intemperie.- Depósitos formados en tierras, más comúnmente de materiales volcánicos.

### **2.3. Curado al ambiente**



Existen distintos métodos de curado que optimizan el uso del concreto; por ello se entiende por curado al proceso por el cual se mantienen condiciones controladas en el concreto por un período definido, a fin de asegurar una adecuada hidratación del cemento y un apropiado endurecimiento del concreto. El costo, la facilidad de aplicación y el tiempo son factores a ser considerados en la elección del procedimiento de curado para un caso determinado. El curado se iniciará tan pronto como el concreto haya endurecido lo suficiente como para que su superficie no resulte afectada por el procedimiento empleado [5].

Para el buen uso de curado es importante tener las siguientes consideraciones:

- 1) Mantenimiento de la temperatura del concreto por encima de 13 grados centígrados y uniformemente distribuidos en el conjunto de la mezcla.
- 2) Mantenimiento en el concreto de un contenido de humedad adecuado
- 3) Protección del elemento estructural contra cualquier tipo de alteración mecánica.

- 4) Mantenimiento del curado durante el tiempo necesario para obtener la hidratación del cemento y el endurecimiento del concreto en el rango de valores requeridos por la seguridad de la estructura.

Para un buen mantenimiento del contenido de humedad en el concreto se lo puede conseguir con los siguientes requisitos:

- 1) Tomando el agua necesaria de la pasta no endurecida.
- 2) Manteniendo la superficie del concreto húmeda.
- 3) Controlando o limitando la pérdida de humedad.

El control de la temperatura es necesario en la medida que la velocidad de hidratación del cemento se hace más lenta con temperaturas que se acercan al punto de congelación y tiende a aumentar conforme la temperatura se acerca al punto de ebullición del agua.

En relación con el control de la temperatura el Contratista debe tener presente lo siguiente:

- a) Los métodos empleados para mantener la temperatura del concreto de la escala de valores aceptables dependen de las condiciones atmosféricas imperantes; la duración del tiempo del

curado; la importancia y magnitud del trabajo; y el volumen de concreto a curarse.

- b) La temperatura ideal de curado debe ser unos pocos grados menos que la temperatura promedio a la cual el concreto estará expuesto durante su vida.
- c) El contratista debe tomar precauciones a fin de lograr que, hacia la finalización del período del curado, la totalidad de las masas de concreto se aproxime gradualmente a la temperatura a la cual va a estar inmediatamente expuesto.
- d) Si la temperatura ambiente está cerca o sobre el promedio anual, el problema del curado solo implica la prevención de pérdidas de humedad en el concreto y la protección de éste contra la acción de temperaturas que estén muy por encima del promedio anual.

Durante cualquier tipo de curado de evitarse cargas o esfuerzos prematuros en el concreto.

En breve análisis es importante considerar condiciones aceptables para la hidratación de cemento. En este proceso la velocidad de hidratación tiende a disminuir con el tiempo, dependiendo del

necesario para que el concreto alcance su determinada resistencia de la temperatura del curado.

En efecto con el tiempo de curado sin considerar casos específicos se debe considerar lo siguiente:

- La hidratación del cemento puede cesar debido a falta de humedad o condiciones desfavorables de temperatura en el concreto, pero ella puede reanudarse si desaparecen dichas condiciones.
- Los concretos preparados con cemento Tipo I, II o V, que han sido curados bajo condiciones atmosféricas normales, deberán mantenerse sobre los 10 grados centígrados, en condición humedad por lo menos siete días después de colocados.
- Si la mínima dimensión lineal de la sección excede de 75 cm; o si el tiempo es caluroso y seco; o si las estructuras o parte de ellas van a estar en contacto con ambientes, líquidos o suelos agresivos para el concreto, el período de curado se incrementará el 50%.
- Los concretos preparados con aditivos acelerantes, o cementos Tipo III, tendrán un período de curado mínimo de tres días.

- Las estructuras hidráulicas tendrán un período de curado no menor de 14 días.
- Las estructuras en las que se emplea la mezcla que combinan cemento y puzolana, tendrán un período de curado no menor de 21 días.

Durante el período de curado los encofrados no impermeables se mantendrán constantemente humedecidos y si fuesen retirados antes de finalizar el período de curado seleccionado, el método elegido para retener la humedad del concreto se aplicará inmediatamente después de desencofrar.

Para la experimentación se han utilizado dos métodos de curado que se utilizaron en la experimentación fueron dos:

### **METODO DE CURADO CON AGUA.**

El agua es el método más efectivo de curado, aunque en función de las circunstancias de la obra (disponibilidad de agua, mano de obra y materiales) puede no resultar económica ni del todo efectiva. El método elegido de curado con agua debe proporcionar una cubierta completa y continua de agua. Si el hormigón va a quedar visto, el

agua empleada deberá estar limpia y libre de componentes que puedan dañar la pasta de cemento. Se deben evitar los choques térmicos o fuertes gradientes de temperatura por el empleo de agua fría sobre el hormigón.

Los métodos de curado con agua más comunes de aplicación en obra son:

**Inundación o inmersión.-** Es el método más eficiente de curado con agua, aunque hoy día es poco frecuente por el engorro que supone la aplicación práctica. La inundación se puede emplear en forjados, pavimentos, techos planos, o cualquier superficie donde sea posible retener el agua o exista una corriente continua de agua. Es importante evitar la pérdida prematura o súbita del agua, así como los choques térmicos que se producirían si el agua de curado está muy fría, ya que puede generar agrietamiento. La diferencia de temperatura entre el hormigón y el agua no debe superar 10° C.

**Nebulización.-** Suelen emplearse los aspersores de riego de jardines. El rociado con agua debe ser continuo y constante. En general, es un buen método de curado cuando la temperatura ambiente es superior a unos 10°C. Es un método útil en superficies verticales. Un inconveniente puede ser el gasto de agua, que puede escasear en la época estival.

**Cubiertas de material absorbente.-** Sacos, arpilleras, mantas de algodón, arena, aserrín y otras cubiertas absorbentes también resultan útiles en la retención del agua superficial del hormigón. Se disponen sobre la superficie de hormigón y se empapan con agua. Es preciso vigilar el estado de humedad y remojarlos con frecuencia, lo que puede resultar engorroso. Los materiales empleados deben estar libres de sustancias que dañen y decoloren el hormigón.

## **CURADO POR CONTROL DE LA EVAPORACION.**

Los procedimientos de curado que puede aplicar el contratista para reducir la pérdida de agua por interposición de un medio impermeable que controle la evaporación se pueden agrupar en:

- a. Aquellos que utilizan el encofrado como medio de cobertura.
- b. Aquellos que controlan la evaporación por protección con papel impermeable.
- c. Aquellos que incrementan la velocidad de endurecimiento por utilización de aditivos acelerantes.
- d. Aquellos que utilizan compuestos químicos como sellantes.
- e. Aquellos que actúan por sellado de la superficie del concreto por aplicación de una membrana impermeable.

La utilización de los encofrados puede proporcionar protección satisfactoria contra las pérdidas de humedad siempre que la superficie expuesta del concreto reciba la cantidad de agua necesaria para que ella encuentre su camino entre el encofrado y el concreto.

La cobertura del concreto con papel impermeable es un procedimiento de curado rápido y efectivo ya que retarda la



evaporación del agua y protege al concreto de daños. Su principal inconveniente es que si las pérdidas han ocurrido antes de la aplicación del mismo, ellas no son recuperables por curado posterior.

La utilización de aditivos acelerantes puede ser considerada como un método indirecto de curado en la medida que permite reducir el tiempo durante el cual el agua puede evaporarse antes de obtener el concreto de resistencia dada.

#### **2.4. Análisis Estadístico de Regresión.**

Para optimizar procesos de fabricación, condiciones de reacción y métodos de análisis entre otros, es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y cómo afectan. A menudo esta información no está disponible y se genera experimentando. Primero se recogen en una lista todas las variables que podrían influir en la respuesta.

A continuación, se realizan una serie de experimentos en los cuales se fijan las variables que no interesa modificar, se anota el valor de las que no se pueden controlar, y se varían las restantes. Finalmente, se obtiene la información comparando la variación de la respuesta entre experimentos.

El elevado coste de la experimentación y las limitaciones de tiempo obligan a ejecutar sólo los experimentos imprescindibles. Y el método tradicional de variar un factor cada vez no suele ser la mejor opción. Puede implicar más experimentos de los necesarios y, a pesar de ello, proporcionar sólo información parcial. Por ejemplo, no mostrará si existe interacción entre factores [9]. Las interacciones suelen ser muy corrientes y a veces son los efectos más importantes, por lo que conocerlas es imprescindible para comprender el comportamiento de muchos sistemas.

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son óptimas para generar la información que se busca. Hoy introduciremos una de estas estrategias: el diseño factorial.

## **DISEÑO FACTORIAL**

Éste describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente qué efecto tienen  $k$  factores sobre una respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes.

Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información el mínimo número de experimentos (y por tanto, con el menor coste) y con la menor incertidumbre posible.

A continuación se muestra un ejemplo para aclarar los conocimientos. Queremos ver la influencia que sobre el aprendizaje de una determinada tarea (variable dependiente) ejercen dos variables independientes:

A) el refuerzo, con dos valores, sin él (A1) y con él (A2); y

B) dos métodos distintos de enseñanza de esa tarea B1 y B2.

Ambos factores pueden combinarse entre si, ofreciéndonos cuatro combinaciones posibles o condiciones experimentales:

- a. que los sujetos no sean reforzados y estudien por el método B1;
- b. que los sujetos no sean reforzados y aprendan por el método B2;
- c. que los sujetos sean reforzados y aprendan por el método B1;
- d. y que los sujetos sean reforzados y aprendan por el método B2.

Los sujetos que van a formar parte del estudio deben ser distribuidos aleatoriamente en cada situación experimental.

Tendremos un esquema como el que se presenta en el Cuadro 1, en el que observamos un cuadro de doble entrada en el que todos los niveles o valores del factor de las filas se combinan con todos los niveles o valores del factor de las columnas, y las casillas o celdillas constituyen los tratamientos o condiciones experimentales a que son sometidos los sujetos.

		Métodos de Aprendizaje	
		B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>
Refuerzo	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub>
	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub>

## **FIGURA 2.8 ESQUEMA DE UN DISEÑO FACTORIAL 2X2**

FUENTE: Anton, A . El experimento Factorial

Este tipo de diseño ofrece la ventaja de que podemos estudiar la influencia de cada factor por separado, como si se tratase de un diseño con una sola variable independiente y, además, permitirá al investigador obtener Información sobre el efecto cruzado de las variables independientes lo cual, en ocasiones, es más importante que el efecto aislado de cada una de ellas.

En el ejemplo que estamos comentando podemos plantearnos tres preguntas relacionadas con las hipótesis que queremos probar:

- a. ¿Aprenden de forma distinta los sujetos la tarea en cuestión cuando lo hacen por el método B1 que cuando lo hacen por el método B2?
- b. ¿Aprenden de forma distinta los sujetos la tarea en cuestión en función de que reciban o no refuerzo en su aprendizaje?
- c. ¿Existen diferencias en el aprendizaje de la tarea en función de la combinación de los dos factores?

La contestación a la primera pregunta supone el estudio de la influencia del factor que en Cuadro 1 hemos colocado en las columnas, sin considerar la otra variable independiente. Se trataría de comparar la media de la columna B1 y la media de la columna B2, como si de dos tratamientos únicos se tratase y probar la hipótesis nula de que esas dos medias son iguales.

La contestación a la segunda pregunta supone que nos olvidemos de las columnas y trabajemos con las filas del Cuadro 1. Se trata de probar si la variable independiente refuerzo, con dos modalidades: ausencia y presencia, influye en el aprendizaje de una determinada tarea (variable dependiente), esto es, si hay diferencia significativa entre la media de la fila A1 y la media de la fila A2.

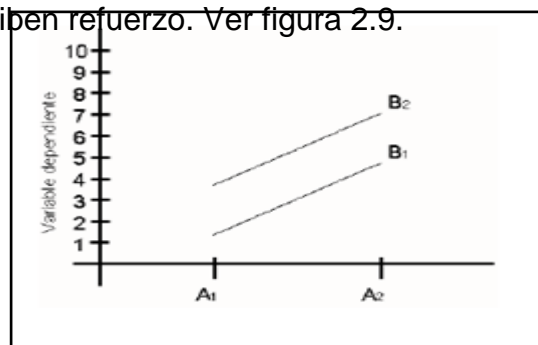
Ambas informaciones, las correspondientes a las preguntas primera y segunda reciben el nombre *efecto principal*. Tendríamos el efecto principal del factor A (el refuerzo) y el efecto principal del factor B (el tipo de aprendizaje).

Respecto a la tercera pregunta, supone que comparemos las medias de cada tratamiento, lo que en el Cuadro 1 eran las celdillas, y es lo que se conoce como *efecto de interacción*. Trata de probar si el valor que toma la variable dependiente en un nivel de una de las variables independientes, está condicionado por el nivel de la otra (u otras) variable independiente.

En nuestro ejemplo, se trataría de probar si alguna de nuestras cuatro combinaciones produce resultados mejores que las otras, dado que podría suceder que, al margen de que los factores principales sean o no significativos, esto es, que encontremos diferencias entre A1 y A2, y entre B1 y B2, que la combinación A2B1 sea la que mejores resultados produce.

Las figuras nos muestran dos posibles resultados en nuestro ejemplo. En la primera de ellas, un resultado suponiendo que no existe interacción entre nuestras dos variables independientes. En la ordenada hemos representado la variable dependiente, puntuada de cero a diez. En la abscisa representamos una de las variables independientes, en este caso el refuerzo.

Observamos que la media, en la variable dependiente, de los sujetos que han aprendido por el método B1 y que no han recibido refuerzo (A1), es de 2 puntos, mientras que cuando reciben refuerzo aumentan a 4 puntos; con el método B2 obtienen 3 puntos los sujetos que no son reforzados, mientras que aumentan a 6 puntos los que reciben refuerzo. Ver figura 2.9.



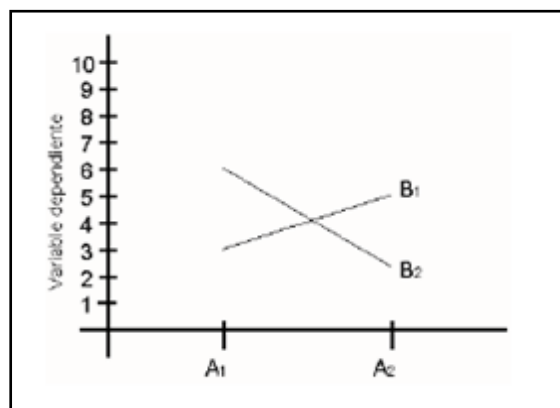
**FIGURA 2.9** AUSENCIA DE INTERACCION ENTRE DOS VARIABLES

Parece desprenderse de la figura que el método B2 proporciona mejores resultados que el método B1, pero esto sucede al margen de los valores que toma la otra variable independiente, dado que las rectas son paralelas. En estos casos afirmamos que no existe interacción entre las dos variables.

La figura 2,9 nos muestra otro resultado posible del experimento, en el que, como podemos observar, el método B1 nos proporciona una media de 4 puntos cuando se combina con no refuerzo, y



aumenta a 6 puntos si se proporciona refuerzo a los sujetos; mientras que el método B2 produce una media de 7 puntos cuando se combina con no refuerzo y disminuye a 4 puntos cuando se combina con refuerzo.



**FIGURA 2.10** INTERACCION ENTRE DOS VARIABLES

Es decir, se produce un cruzamiento en el que no podemos afirmar que el método B1 o el B2, sin más, produzcan mejores resultados, sino que “depende” de en qué nivel del factor refuerzo nos encontremos. Existe una interacción entre las dos variables.

Evidentemente, ambas representaciones suponen un ejemplo de modelos sin interacción y con interacción, respectivamente, pero esto

no quiere decir que en un experimento concreto debamos encontrar figuras de este tipo para afirmar que hay o no interacción. En general, podemos afirmar que, siempre que nos encontremos con una representación de líneas paralelas. No existe interacción entre nuestras variables, mientras que si las líneas basadas en las medias de nuestra muestra no son paralelas, existe interacción.

## **TIPOS DE DISEÑOS FACTORIALES**

McGuigan (1971) clasifica los diseños factoriales en función del número de variables independientes que participan en él, así:

### **Diseños factoriales con dos variables independientes**

Se trata de un diseño del tipo que hemos visto en el ejemplo y, en función del número de niveles de cada uno de los factores, tenemos los diseños  $2 \times 2$ , cuando cada factor tiene dos niveles o valores;  $2 \times 3$  cuando uno tiene dos valores y el otro tres;  $3 \times 3$  cuando ambas toman tres valores; y, en general, diseños  $K \times L$  donde  $K$  es el número de valores que toma la primera variable independiente y  $L$  el número de

valores que toma la segunda. En todos ellos habrá tantas condiciones experimentales como -el producto de ambos números.

Las hipótesis que podemos probar en este tipo de diseños son las que veíamos en nuestro ejemplo, es decir, el efecto principal del factor A, el efecto del factor principal B, y la interacción entre ambos AxB.

### **Diseños factoriales con más de dos variables independientes**

El número de variables independientes que podemos estudiar es ilimitado en función de éstas y de sus niveles, tenemos, por ejemplo el diseño  $2 \times 2 \times 2$  en el que hay tres variables independientes y cada una de ellas toma dos valores; el diseño  $2 \times 2 \times 3$ , en el que tenemos tres variables independientes, dos con dos valores y una con tres; etc.

Si nos fijamos en el diseño de tres factores, por ejemplo A, B y C, las hipótesis que aquí probamos son:

- a. El efecto principal del factor A;

- b. el efecto principal del factor B;
- c. El efecto principal del factor C;
- d. la interacción de los factores AxB;
- e. la interacción de los factores A x C;
- f. la interacción de los factores BxC;
- g. y la interacción AxBxC.

A medida que aumenta el número de factores aumenta el número de interacciones, dado que estas surgen de la comparación de los valores de cada factor con todos los demás. [9].

## **2.5. Estado del Arte.**

Es importante conocer los avances educativos y tecnológicos que se han realizado en relación a esta experimentación entre ellos tenemos los siguientes autores:

### **AUTOR:**

Hani H. Nassif, Husam Najm, Nakin Suksawang

### **TOPICO:**

El estudio realizado por estos autores trata de *“Efectos de materiales puzolánicos y de métodos de curado sobre los módulos de elasticidad del concreto de alto rendimiento”*[12].

## **EXPERIMENTACION**

En este estudio se comprobó que la adición de emanaciones de Sílice reflejaron un aumento en las propiedades del cemento como la dureza y el módulo de elasticidad a edades tempranas, siendo notorio ningún cambio en las edades de 28 y 56 días en cuanto al modulo de elasticidad. Un efecto adverso se obtuvo con las propiedades antes mencionadas; con la adición del 20% de ceniza volátil con varios porcentajes de emanaciones de sílice a la edad de 90 días. Otra manera de reducir el modulo de elasticidad ocurre con los diferentes métodos de curado; siendo el curado en seco y el curado compuesto que comparado con el curado húmedo con yute dan menores valores de elasticidad.

En consecuencia se mostró que el módulo de elasticidad del concreto de alto rendimiento es proporcional a su dureza de compresión, pero resulto no ser tan exacto los valores del modulo de elasticidad que se obtuvieron con las ecuaciones de ACI-318 y ACI-363 para concretos de alto rendimiento con puzolanas.

En este estudio la experimentación se basó con ensayos de compresión que fueron realizados basándose en la norma ASTM C-39. A tres cilindros de 100 mm x 200 mm se les realizó pruebas de resistencia a los 1, 3, 7, 14 y 28 días y a tres cilindros más se sometió a pruebas de módulo de elasticidad a los 3,7,14 y 28 días. Las pruebas de resistencia y de módulo de elasticidad fueron llevadas a cabo el mismo día usando una prensa hidráulica TINIUS-OLSEN de 1780 KN equipada con una platina de cabeza giratoria. La prueba de módulo de elasticidad fue cargada a un máximo esfuerzo lo que es igual a un 40% de la máxima resistencia a la compresión según norma ASTM C469 [12].

Las muestras probadas para módulo de elasticidad fueron sometidas a las mismas cargas iniciales sin importar su resistencia a la compresión. Tuvo un periodo de repetición de dos veces antes de ser sometido a la carga. Todas las medidas fueron comparadas con un control y así se obtuvieron los resultados.

El cemento usado fue un Allentown Portland según especificaciones norma ASTM Tipo I.

## APORTACION

El aporte de este documental es darnos una guía para los datos obtenidos por ellos al experimentar con una zeolita con alto porcentaje de sílice, esta tabla se muestra continuación:

Mix	Control	S <sup>0</sup> F <sup>10</sup>	S0F20	S0F30	SSF0	S10F0	S15F0	S5F10	S5F 20	S10F20	S15F20
<i>Compressive strength (MPa)</i>											
1 Day	19.8	21.4	19.4	15.0	29.0	30.5	25.1	27.6	22.3	13.9	14.0
3 Days	36.6	32.3	29.3	26.8	39.6	39.6	39.2	36.5	29.3	21.5	24.9
7 Days	40.0	40.1	36.0	30.8	45.9	43.5	40.7	43.9	32.9	29.4	28.7
14 Days	43.8	41.6	39.0	35.5	44.2	46.9	46.6	50.8	41.1	32.9	36.8
28 Days	46.6	49.4	44.2	42.7	52.4	53.4	50.1	54.9	46.0	38.1	39.8
56 Days	52.2	53.1	51.0	48.7	57.6	58.8	56.7	57.8	49.6	42.5	47.5
90 Days	54.6	57.1	56.1	52.1	54.5	57.3	52.1	64.5	53.6	42.1	46.8
<i>Elastic modulus (GPa)</i>											
3 Days	24.0	26.2	26.1	24.3	28.6	28.5	25.8	27.0	24.0	22.0	22.6
7 Days	27.3	30.8	29.6	27.7	31.2	30.3	26.7	29.4	25.2	22.4	24.5
14 Days	27.7	31.9	29.0	29.2	31.8	31.5	30.4	30.0	26.7	22.6	26.8
28 Days	31.8	37.1	31.6	30.7	32.0	31.9	34.3	30.8	27.7	26.2	27.1
56 Days	36.0	38.3	38.3	37.5	34.2	35.6	34.9	33.4	30.3	30.1	30.6
<i>E/E (control)</i>											
3 Days	1.00	1.09	1.09	1.01	1.19	1.19	1.07	1.12	1.00	0.91	0.94
7 Days	1.00	1.13	1.08	1.01	1.14	1.11	0.98	1.08	0.92	0.82	0.90
14 Days	1.00	1.15	1.05	1.05	1.15	1.14	1.10	1.09	0.97	0.82	0.97
28 Days	1.00	1.17	1.00	0.96	1.01	1.00	1.08	0.97	0.87	0.82	0.85
56 Days	1.00	1.06	1.06	1.04	0.95	0.99	0.97	0.93	0.84	0.84	0.85
Average	1.00	1.12	1.06	1.02	1.09	1.09	1.04	1.04	0.92	0.84	0.90
<i>E/(E<sub>c</sub>)<sup>1/2</sup></i>											
3 Days	3967	4613	4821	4697	4553	4538	4116	4471	4437	4731	4528
7 Days	4318	4858	4924	4988	4604	4588	4190	4440	4388	4126	4566
14 Days	4180	4942	4648	4897	4793	4603	4444	4218	4169	3946	4410
28 Days	4654	5275	4760	4691	4427	4370	4837	4155	4086	4243	4281
56 Days	4872	5068	5116	5293	4633	4648	4642	4155	4133	4648	4447
Average	4398	4951	4854	4913	4602	4549	4446	4288	4243	4339	4446

**FIGURA 2.11 VALORES DE MODULO DE ELASTICIDAD Y RESISTENCIA OBTENIDOS SEGÚN EXPERIMENTO DE NASSIF, NAJM Y SUKSAWANG[12]**

Los datos encerrados en el recuadro rojo muestran el porcentaje de sílice que afecta la fuerza de compresión de la mezcla a lo largo de los 90 días de experimentación.

De este aporte podemos captar que al añadir un 10% de sílice la fuerza de compresión llega a su pico máximo y al añadir 15% de sílice su valor empieza a disminuir, durante los 90 días de experimentación [12].

**AUTOR:**

Violeta Peotkova, Yachko Ivanov.

**TOPICO:**

El estudio realizado por estos autores trata de "*Uso del Modelo Matemático en la composición de un material compuesto*"[11].

**EXPERIMENTACION:**

La experimentación que relata el documento explica que se realizaron pruebas con un material o para mayor entendimiento desperdicios de construcción llegando a establecer el análisis de un modelo polinomio de tres parámetros para determinar la cantidad de componentes de este material compuesto, aditivos activos y escoria de alto horno presentes. Con este análisis se encontró que; el valor máximo de resistencia a la compresión se encontró el día 28 de



experimentación en un porcentaje de  $X_1=23.2\%$ ,  $X_2=12.1\%$  and  $X_3=64.7\%$ .

Este resultado se obtuvo tomando en cuenta lo siguiente:

Mediante pruebas experimentales, usando normas estándar de Bulgaria y cemento estándar del mismo país. Establecieron parámetros que evaluaron por un año ( los días 1 , 7 , 28 ,180 y 365). Usando tres materiales diferentes para los ensayos en varios porcentajes y obteniendo valores de resistencia como variable de respuesta. De esta forma encontraron con qué material y en qué porcentaje se encontraría la mayor fuerza de compresión.

$X_1$ —Cemento Portland, porcentaje del total de masa seca.

$X_2$ —Aditivo activo , porcentaje del total de masa seca.

$X_3$ —Escoria granulada, porcentaje de la masa total de arena artificial (mezcla granulométrica de escoria y material estéril)

La proporción de dichos materiales fue variada en base a estudios posteriores y su porcentaje se muestra a continuación:

$X_1$ —varió desde 20% al 25%.

$X_2$ —varió desde 5% to 15%.

$X_3$ — varió desde 55% to 75%.

La fuerza de compresión ( $R_c$ ) como variable de respuesta es una función de  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$ .

$$R_c = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum b_{ij} X_i X_j$$

Donde cada valor de  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{ij}$  son los coeficientes de regresión y son obtenidos usando el Método de Regresión Lineal con distribución uniforme alrededor del punto cero, y los valores de "i" y "j" van del uno al tres.

#### **APORTACION:**

Este ensayo para nuestra experimentación nos aparta de una manera matemática a través de las sumatorias de EINSTEN la misma que estará siendo usada.

Se hizo uso de tres materiales diferentes en varias proporciones en comparación al nuestro en el que solo se hará uso de un solo material y su proporción se mantendrá constante durante todo el proceso de experimentación.

El sistema de modelación matemático usado es más complejo que el que se usará, sin embargo, es una guía perfecta ya que se hará uso de la misma herramienta de regresión lineal [11].



# CAPITULO 3

## 3. METODOLOGIA Y ANALISIS ESTADISTICO

### 3.1. Recolección de Datos

Para la recolección de todos los datos de la experimentación con pasta de cemento y la adición de zeolita tipo I; con relación al 5% en porcentaje de masa de acuerdo a lo establecido por el Standard Test “Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in(C 109/C 109M-02)” [8].

Este proceso de recolección es muy importante una vez realizado todo el proceso de molienda, mezclado y ruptura. Por cuanto una vez terminado esta experimentación se mantendrá un control de los datos que se deberán ingresar en el modelamiento del material; el mismo que incluyen deformación, fuerza, área de la probeta, esfuerzo de ruptura, esfuerzo de fluencia y módulos de Young.



estos datos obtenidos se hará con 7.5% de adición de zeolita con días de curado 4, 11, 18 y 25 días.

El diseño del experimento se llevo a cabo con datos experimentales obtenidos en el proceso de ruptura de los cuales se obtendrán graficas que nos muestran el comportamiento de la pasta de cemento en cada uno de los días de curado.

En cuanto a la parte teórica se la realizo con la implementación de programa en MatLab; cuya evaluación de los datos en el programa necesitara los datos del esfuerzo de ruptura, fluencia, deformación y modulo de Young.

En la parte de validación se realizará con el uso del programa STATISTICA para analizar el error obtenido de los datos y cuan confiable son estos. Considerando la influencia del tipo de curado y del porcentaje de la adición de zeolita tipo I a la pasta de cemento, a fin de escoger el mejor porcentaje que nos ayudara a cumplir con el objetivo de toda la experimentación a realizar.

Una vez realizada esta validación de datos individual se procede a realizar una comparación múltiple con los datos de cada uno de los integrantes del grupo (5, 10, 15, 20 y 25%) en este método se realizara las comparaciones de todos los tratamientos con un control, en esta parte se llama tratamiento a cada uno de los diferentes porcentajes de zeolita adicionados a la pasta de cemento, donde el control fue la pasta de cemento sin adición se zeolita.

Con esta comparación de los tratamiento se puede predecir qué porcentaje de zeolita tiene el óptimo aumento de la resistencia a la compresión del cemento y con qué probabilidad estos datos fueron exactos y así dar excelentes conclusiones y análisis.

### **3.3. Modelamiento**

El modelamiento usado para esta parte esta compuesta de varios factores, que de una u otra manera han aportado para implementar un algoritmo, a fin de modelar el comportamiento de la pasta de cemento al ser aplicado una fuerza de compresión que progresivamente va aumentando hasta que el espécimen (cubo 50x50x50 mm) no soporta y llega a la ruptura.

Para este algoritmo fue muy importante los conocimientos de aplicación de teoría de inelasticidad donde nos genera la relación:

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

que fue analizada a través de bases que se fundamentan en mecánica del continuo. El vector residual que se creó, es integrado a una cadena de procesos del material que viene basado en un código de elementos finitos. La expresión que se muestra abajo es un componente unidireccional con cierto orden que es muy utilizado en mecánica del continuo.

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

En el cual el cubo deberá estar en equilibrio. Las definiciones tensoriales conjuntamente con las condiciones de borde que establece la teoría de mecánica del continuo nos ha concedido que las relaciones unidimensionales puedan ser llevadas a relaciones en tres dimensiones.

Para nuestro análisis el ensayo es no lineal por lo que se hace necesario desarrollar una ecuación meritória que enfrasque la



iteración computacional de tal manera que conservemos una herramienta que nos dé una solución óptima a este problema no lineal.

Entonces para realizar el análisis que hemos mencionado debemos definir a la deformación como el gradiente proporcional del desplazamiento, y basándonos en notación tensorial donde indica que todo elemento tensor tiene una parte simétrica y antisimétrica

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

Para estas relaciones usaremos la siguiente definición:

$$\sigma_{ij} = \mathcal{C}_{ijkl}^{ex} : \epsilon_{kl}$$

En este proyecto es importante analizar la parte no lineal que presenta la relación mostrada arriba; para ello se ha desarrollado un esquema iterativo basado en el Método de Newton Raphson, que permite ampliar un diseño no lineal en tres dimensiones definiendo un residual establecido por la siguiente expresión:

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

Lo importante de esta expresión es encontrar la solución  $(\mu^*)$  es la solución que va a depender netamente del material. Se hizo una expansión de la Serie de Taylor donde:

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

Asegurándonos así que estamos convergiendo a la respuesta, cumpliendo con lo fundamental del método de Newton Raphson.

Como se menciona con anterioridad la no linealidad viene de la respuesta del material que en nuestro caso el material que influye es el aditivo aplicado a la pasta de cemento (Zeolita tipo 1 al 5%).

Es importante recalcar que esta no linealidad no equivale a inelasticidad, por ello existen dos formatos específicos para este tipo de análisis tales como:

*Deformation Driven* y *Load Force Driven*. Como en nuestro caso no tenemos una relación 1-1 entre  $F$  vs  $\delta$ , lo más enfocado que se ha utilizado es el método de *Deformation Driven*, debido a las condiciones que presentan los materiales como el cemento, a través de estos conocimientos obtenidos con inelasticidad se implementa el programa en MatLab como se menciona al principio que es el siguiente:

```
%c$NEWTON RAPHSON NON-LINEAR HARDENING%
```

```
    clc;
    clear all;
    E= ingresar valor promedio experimental
    m=valores característicos del material;
    a=valores característicos del material;
    de= delta de deformación
```

```

        epsilon= rango de deformaciones
ntotal= ultimo valor de deformación/de
        sigma=zeros(ntotal,1);
        sigma(1,1)=0;
        sigmay=zeros(ntotal,1);
sigmay(1,1)= Esfuerzo de Fluencia experimental
        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=1:20

                    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)
                        break
                    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

                                a=size(sigma)
                                b=size(epsilon)
                                plot(epsilon',sigma,'b')

```

las expresiones de color naranja son aquellas que varían de acuerdo a los datos obtenidos con las fuerzas aplicadas al realizar el proceso de ruptura.

### 3.4. Experimentación

Para cumplir con cada uno de los objetivos de la experimentación esta parte se lo dividió en tres subprocesos:

- Proceso de Molienda.
- Proceso de Mezclado y Elaboración de Probetas.
- Proceso de Ruptura.

## **Proceso de Molienda.**

El término molienda en nuestro primer proceso se ha convertido en un término de uso común, el cual se refiere a la pulverización y a la desintegración del material sólido (Zeolita tipo I). El objetivo principal en esta parte, es la reducción del tamaño de material a utilizar en el proceso de mezclado. Todo este proceso se llevo a cabo en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la ESPOL.

En este proceso el objetivo establecido fue, de obtener un tamaño de partícula de 45 micras del material entregado para la experimentación, que en nuestro caso fueron 25 Kg de zeolita tipo I. Para reducir el tamaño esperado de la muestra se realizo los siguientes niveles de molienda como:

1. Primero los 25 kg de la muestra que tenían un tamaño de diámetro aproximadamente de 10 cm, antes de ingresar a la trituradora de mandíbula se redujo el tamaño a 5 cm con la ayuda de un martillo metálico.

2. Introducir la muestra de aproximadamente 5 cm de diámetro en la trituradora de mandíbula durante 2 minutos.



**FIGURA 3.2 TRITURADORA DE MANDIBULA**

3. Después de la trituradora de mandíbula pasamos a la trituradora de rodillos durante 5 minutos toda la muestra (25 Kg), donde el tamaño del material se redujo a 1cm de diámetro aproximadamente como se muestran en la figura 3.3.



**FIGURA 3.3. TRITURADORA DE RODILLOS  
Y PRODUCTO OBTENIDO**

4. Se realizo el proceso de cuarteo (dividir en partes iguales la cantidad de material). Como observamos en la figura 3.3.



FIGURA 3.4. CUARTEO DE MUESTRA

5. Pasar la cantidad cuarteada por el molino de discos, el tiempo que se llevo a cabo esta parte fue de 5 minutos.



FIGURA 3.5. MOLINO DE DISCOS



6. Introducir el material en la máquina de molino de bolas para reducir en su totalidad la granulometría de la zeolita a utilizar. Este proceso abarco 40 minutos por la gran cantidad de material.



FIGURA 3.6. MOLINO DE BOLAS

7. Una vez terminado este proceso se procedió a realizar nuevamente el proceso de cuarteo. De esta cantidad se tomo 100 gramos de la muestra para realizar el tamizado durante 15 minutos en cada uno de los tamices (14, 18, 20, 40, 50 y fondo). Este proceso se muestra en la figura 3.7



FIGURA 3.7. TAMIZADOR ELECTRICO

8. Después del tamizado, se pesaron las cantidades de material que se quedaron en cada uno de los tamices. El objetivo es obtener mayor cantidad en el fondo para poder llegar a las 45 micras en tamaño de la zeolita. La tabla 3.1 muestra los tamaños de los tamices usados.

**TABLA 1. TAMAÑOS DE LOS TAMICES  
USADOS**

<b>TAMIZ Nº</b>	<b>TAMAÑO DE PARTICULA</b>
<b>14</b>	1,4cm
<b>18</b>	40mm
<b>40</b>	425µm
<b>50</b>	300µm

<b>100</b>	150µm
<b>200</b>	75µm
<b>325</b>	45µm

9. Se realizo una segunda pasada del material por el molino de bolas y de allí nuevamente realizamos el tamizado con tamices de 50, 100, 200, 325 y fondo. Después de esto, se peso por segunda vez la muestra quedada en los tamices y allí obtuvimos 70 gramos del material en el fondo es decir que tenemos un 70% del material, cumpliendo con el objetivo de este primer proceso.

Una vez terminado todo este proceso, se paso al proceso de mezcla que describimos abajo:

## PROCESO DE MEZCLADO Y ELABORACION DE PROBETAS

### COMPOSICION DE LA MEZCLA

En esta parte se realizo dos mezclas de 250 gramos, cada una contenía diferentes porcentajes de Zeolita I 5% y 7.5% respectivamente.

La primera mezcla fue de 5% de zeolita en porcentaje de masa, lo que corresponde a (12.5gr.), la cantidad de cemento usado para esta mezcla fue de (237.5gr.) Se uso una proporción de agua-cemento de 0.3, como se muestra en la tabla 2.

**TABLA 2 PORCENTAJES DE MEZCLA POR UNIDAD DE ESPECÍMENES**

<b>Nº mezcla</b>	<b>Cant. de espes</b>	<b>% de zeolita</b>	<b>gr. Zeolita</b>	<b>% de cemento</b>	<b>gr Cemento</b>	<b>relacion agua cemento</b>	<b>Cant. de agua</b>
		(%)	(gr)	(%)	(gr)	(%)	(gr)
1	1	5%	12.5	95%	237.5	0%	75
2	1	7.5%	18.75	92.5%	231.25	0.30%	75

Caso similar se realizo con la segunda mezcla; se tomo 7.5% de zeolita en porcentaje de masa, lo que corresponde a (18.75 gr.), la cantidad de cemento para esta mezcla fue de (231.25 gr.) para este segundo mezclado se mantuvo constante la relación de agua-cemento de 0.3, como se muestra en la tabla 2.

**TABLA 3 PORCENTAJES DE MEZCLA PARA DOCE  
ESPECÍMENES CON DISTINTOS PORCENTAJES DE  
ZEOLITA I**

<b>Nº mezcla</b>	<b>Cant. de especímenes</b>	<b>% de zeolita</b>	<b>gr. Zeolita</b>	<b>% de cemento</b>	<b>gr Cemento</b>	<b>relación agua cemento</b>	<b>Can. de agua</b>
		(%)	(gr)	(%)	(gr)	(%)	(gr)
1	12	5%	150	95%	2850	0.30%	900
2	12	7.50%	225	92.50%	2775	0.30%	900

Los datos de la tabla 3 corresponden para uno de los cubitos, debido a que las pruebas de ruptura para el caso de la mezcla al 5% se harán en periodos de (7, 14, 21,28) días, utilizando tres cubitos por día, dando un total de 12 cubitos, la mezcla total al 5% fue de (150gr de Zeolita +2850gr de Cemento).

Con similitud tenemos para la mezcla de 7,5 % de zeolita los valores tomados se muestran en la tabla 3, (225 gr Zeolita +2775 gr de Cemento)

Al termino de toda la rutina de pesado de los componente; estos fueron agregados al tazón del mezclador mecánico; que funciona con electricidad, del tipo equipado con remo y tazón de mezclado especificado en **C305.[15]** como se muestra en la figura 3.4.6 este equipo tiene similitud con una batidora de uso domestico. Se realiza este proceso hasta obtener una mezcla homogénea.



FIGURA. 3.8. MEZCLADOR MECANICO

### **PREPARACION DE LOS MOLDES**

De acuerdo a la Norma C-109 los moldes utilizados deberán poseer no más de 3 compartimientos cúbicos. El material de los moldes está constituido por un metal duro que no es atacado por la pasta de

cemento, y con lados lo suficientemente rígidos para prevenir extensiones u ondula miento [8].

Parameter	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
	New	In Use	New	In Use
Planeness of sides	<0.001 in.	<0.002 in.	[<0.025 mm]	[<0.05 mm]
Distance between opposite sides	2 in. $\pm$ 0.005	2 in. $\pm$ 0.02	[50 mm $\pm$ 0.13 mm]	[50 mm $\pm$ 0.50 mm]
Height of each compartment	2 in. + 0.01 in. to - 0.005 in.	2 in. + 0.01 in. to - 0.015 in.	[50 mm + 0.25 mm to - 0.13 mm]	[50 mm + 0.25 mm to - 0.38 mm]
Angle between adjacent faces <sup>A</sup>	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°

<sup>A</sup> Measured at points slightly removed from the intersection. Measured separately for each compartment between all the interior faces and the adjacent face and between interior faces and top and bottom planes of the mold.

**FIGURA 3.9 VARIACIONES PERMISIBLES DE LOS MOLDES [8].**

Siguiendo lo establecido en la Norma los moldes serán preparados una vez colocado el molde sobre su placa base, luego se aplicó una fina capa de aceite usando una pequeña brocha, luego se removi6 cuidadosamente con un paño seco el exceso de aceite de la superficie del molde y de la placa base.



**FIGURA. 3.10 PREPARACION DE MOLDES**

## ELABORACION DE PROBETAS

Al término del proceso anterior se procedió a realizar lo siguiente:

1. Se mezcló el lote completo (150gr Zeolita+2850gr de cemento) y el lote de (225gr Zeolita +2775 gr de cemento) para la mezcla a 5% y la mezcla a 7.5% con los 900 gr de agua, respectivamente, durante 15 s a velocidad media. Hasta obtener completamente una pasta de cemento.



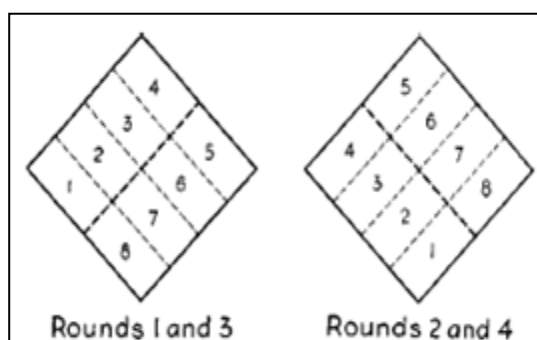
**FIGURA. 3.11** PREPARACION DE MEZCLA EN EL  
MEZCLADOR ELECTRONICO



2. El proceso de agregar la pasta de cemento a los moldes se llevo en un tiempo total no mayor a 2 min 30 s todo el lote completo. Una vez aplicada esta primera capa de procedió a apisonar la mezcla en cada compartimento cúbico 32 veces durante 10s en 4 rondas, cada ronda fue en ángulos rectos con respecto a la otra y consistió de ocho golpes contiguos sobre la superficie del espécimen, como se muestra en la Fig.3.12



**FIGURA. 3.12. PRIMERA CAPA DE MEZCLA**



**FIGURA 3.13. ORDEN DE APISONAMIENTO DE ESPECIMENES**

Con la presión de apisonado aplicada se aseguró el correcto llenado del molde. Luego se aplicó la segunda capa de la mezcla, llenando los compartimentos y volviendo a repetir el método de apisonado hasta lograr que la mezcla cubriera el borde superior del molde.



**FIGURA. 3.14.** APLICACION DE LA SEGUNDA CAPA DE MEZCLA

3. Rápidamente al término del paso anterior los moldes con la mezcla fueron sellados con una película plástica, y se tomó lectura de la humedad relativa y la temperatura del cuarto.
4. Después de 24 horas las probetas fueron desmoldadas para su posterior secado al aire, de igual manera que en el paso anterior se debe tomar lectura de la

temperatura y de la humedad relativa, además de registrar las lecturas de las dimensiones de las probetas.

## **PROCESO DE RUPTURA DE LAS PROBETAS**

En esta última parte de la experimentación y habiendo cumplido con los anteriores procesos de una manera óptima; también se tomo una medida de control que se baso en la identificación de los tres especímenes que se van a utilizar en cada día de ruptura, esta caracterización se llevo a cabo con la siguiente expresión:

**G2/X/Y**

Donde G2= es la numeración de cada grupo.

X= el porcentaje de Zeolita (5 o 7.5%)

Y= Dias de Curado para cada espécimen

7.5% → 4, 11, 18 y 25 dias

5% → 7, 14, 21 y 28 dias

Una vez identificado se proceso a realizar la ruptura de la siguiente manera:

1. Los especímenes ya desmoldados e identificados fueron rotos dentro de la tolerancia permisible prescrita en la norma ASTM C-109 como se muestra :

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	$\pm 1/2$ h
3 days	$\pm 1$ h
7 days	$\pm 3$ h
28 days	$\pm 12$ h

**FIGURA 3.15 TOLERANCIA PERMISIBLE**

**EN LOS ENSAYOS**

2. Antes de la ruptura se deberá limpiar con un trapo cada espécimen hasta tener la superficie del mismo limpia removiendo cualquier incrustación de las caras y aseverándose que no hubiesen curvaturas.
3. Cuidadosamente el espécimen es puesto en la maquina debajo del centro del disco que aplica la fuerza y asentándose sobre un soporte rectangular. Antes de probar un cubo, se deberá cerciorar de que el bloque esférico estuviese libre de inclinación, luego de esto se aplico la velocidad de variación de la carga a una

velocidad de movimiento relativo de carga de 200 a 400ls/s (900-1800 N/s), hasta alcanzar el límite de ruptura de cada probeta.



**FIGURA 3.16.** PROBETA DESPUES DE APLICACIÓN DEL ENSAYO DE RUPTURA

### **3.4 Validar**

En esta parte se realizara un proceso estadístico de comparaciones múltiples en base a los días de curado para los porcentajes de 5 y 7.5% de Zeolita. A fin de encontrar el mejor porcentaje que permita a la pasta de cemento obtener un mayor esfuerzo a la compresión sin rebasar el día máximo de curado (28 días); siendo este el día que se utilizan en las pruebas de laboratorio. El análisis se realiza a través de comparación múltiple con un control llamado Método de Dunnett.

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS Y ANALISIS

### 4.1 Tabulación de Datos y Resultados

Conforme a la realización de los diferentes procesos de experimentación antes explicado para cada una de las probetas con los distintos porcentajes de adición de Zeolita (5% y 7.5%), y sus respectivos días de curado; se obtuvieron los datos de la carga aplicada a cada uno de ellos para las distintas deformaciones que correspondían a amplitudes de cinco milésimas de pulgada, como se observan en las siguientes tablas.

**TABLA 4. DATOS DE RUPTURA DE 5% ZEOLITA A 7 DÍAS DE CURADO**

G2/5/7			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	Delta Longitud (mm)	$\epsilon$	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0.127	0,00249	18263.64	4900	4214
10	0.254	0,00498	36527.27	11270	10290
15	0.381	0,00747	56572.73	21070	20580
20	0.508	0,09961	77954.55	33320	36750
25	0.635	0,01245	103345.45	47530	53900

**TABLA 5 CONTINUACIÓN DE DATOS DE RUPTURA AL 5% ZEOLITA A 7 DÍAS DE CURADO**

G2/5/7			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	Delta Longitud(mm)	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
30	0.762	0,01494	149227.27	63700	71050
35	0.889	0,01743	162590.91	78400	88200
40	1.016	0,01992	171500	95550	102900
45	1.143	0,02241		110250	121520
50	1.27	0,02490		121520	137200
55	1.397	0,02739		127400	151900
60	1.524	0.02988		134750	167580
65	1.651	0.03237		144550	172970
70	1.778	0.03486		154350	
75	1.905	0.03735		164150	

**TABLA 6 DATOS DE RUPTURA AL 5% ZEOLITA A 14 DÍAS DE CURADO**

G2/5/14			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	<b>Delta Longitud (mm)</b>	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0.127	0,00249	4900.00	2672.73	3563.64
10	0.254	0,00498	14254.55	9800.00	12472.73
15	0.381	0,00747	67263.64	25390.91	36972.73
20	0.508	0,09961	94436.36	46772.73	67709.09
25	0.635	0,01245	122500.00	69936.36	92654.55
30	0.762	0,01494	140318.18	101563.64	111363.64
35	0.889	0,01743		129181.82	135863.64
40	1.016	0,01992		159472.727	151454.55
45	1.143	0,02241		167045.455	

**TABLA 7 DATOS DE RUPTURA 5% ZEOLITA 21 DÍAS DE CURADO**

G2/5/21			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	<b>Delta Longitud(mm)</b>	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0.127	0,00249	16481.82	5790.91	6236.36
10	0.254	0,00498	46772.73	18263.64	32072.73
15	0.381	0,00747	81518.18	44990.91	74390.91
20	0.508	0,09961	133636.36	89536.36	122500.00
25	0.635	0,01245	169272.73	129181.82	175954.55
30	0.762	0,01494	200454.55	162590.91	193772.73
35	0.889	0,01743		193772.73	



**TABLA 8 DATOS DE RUPTURA 5% ZEOLITA 28 DÍAS DE CURADO**

G2/5/28			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	Delta Longitud (mm)	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0.127	0,00249	8463.64	16036.36	13363.64
10	0.254	0,00498	49890.91	69490.91	74390.91
15	0.381	0,00747	93100.00	104681.82	124727.27
20	0.508	0,09961	138090.91	149227.27	171500.00
25	0.635	0,01245	171500.00	173727.27	207136.36
30	0.762	0,01494	202681.82	196000.00	224954.55
35	0.889	0,01743	209363.64		

**Datos de Ruptura obtenidos para 7.5% de Zeolita I**

**TABLA 9 DATOS DE RUPTURA 7.5% ZEOLITA 4 DÍA DE CURADO**

G2/7.5/4			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	Delta Longitud(mm)	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0.000	0
5	0.127	0.0024902	4454.55	6459.091	5345.45
10	0.254	0.00498039	14700.00	12829.091	10601.82
15	0.381	0.00747059	21381.82	18931.818	16392.73
20	0.508	0.00996078	33854.55	24945.455	24277.27
25	0.635	0.01245098	39645.45	33409.091	32295.45
30	0.762	0.01494118	45881.82	40536.364	40090.91
35	0.889	0.01743137	48109.09	46772.727	47886.36
40	1.016	0.01992157	50781.818	55681.818	55681.8181
45	1.143	0.02241176	52563.636	61027.273	59690.9090
50	1.27	0.02490196		66150.000	

**TABLA 10 DATOS DE RUPTURA 7.5% ZEOLITA 11 DÍAS DE CURADO**

G2/7.5/11			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	Delta Longitud(mm)	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0.127	0.0024902	3332	4900	6762
10	0.254	0.00498039	13230	13034	15876
15	0.381	0.00747059	23324	24206	26264
20	0.508	0.00996078	40670	36554	39396
25	0.635	0.01245098	54880	51450	54390
30	0.762	0.01494118	71050	66150	71050
35	0.889	0.01743137	88690	81340	87220
40	1.016	0.01992157	105350	95060	102410
45	1.143	0.02241176	120050	110740	117600
50	1.27	0.02490196	135730	124950	130830
55	1.397	0.02739216	150920	138670	143570
60	1.524	0.02988235	161210	151410	145040
65	1.651	0.03237255	169050	163170	
70	1.778	0.03486275	173950		

**TABLA 11 DATOS DE RUPTURA 7.5% ZEOLITA 18 DÍAS DE CURADO**

G2/7.5/18			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	Delta Longitud(mm)	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0.000	0
5	0.127	0.0024902	5345.4546	6236.364	4900.00
10	0.254	0.00498039	18709.091	20045.455	19600.00
15	0.381	0.00747059	61027.273	49445.455	57018.18
20	0.508	0.00996078	95772.727	80181.818	98890.91
25	0.635	0.01245098	149227.27	111363.64	112700.00
30	0.762	0.01494118	178181.82	175954.55	138090.91
35	0.889	0.01743137		189318.18	158136.36
40	1.016	0.01992157			175954.55

**TABLA 12 DATOS DE RUPTURA 7.5% ZEOLITA 25 DÍA DE CURADO**

G2/7.5/25			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	Delta Longitud(mm)	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0.127	0.0024902	13363.64	5790.91	6236.36
10	0.254	0.00498039	27172.73	18263.64	32072.73
15	0.381	0.00747059	60581.82	44990.91	74390.91
20	0.508	0.00996078	108690.91	89536.36	122500.00
25	0.635	0.01245098	153681.82	129181.82	175954.55
30	0.762	0.01494118	182636.36	162590.91	193772.73
35	0.889	0.01743137	198227.27	193772.73	

Cada uno de los valores de los esfuerzos a la compresión, se obtuvieron calculando la máxima carga indicada por el test y la fuerza de compresión aplicada, mediante la siguiente ecuación.

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

Donde:

$f_m$ =fuerza de compresión en[ Mpa.]

P=máxima fuerza aplicada [N].

A= Área del espécimen

En las tablas siguientes se muestran los valores de deformación promedios para cada día de ruptura, tanto para la adición de 5% y 7.5% Zeolita I respectivamente.

**TABLA 13 VALORES DE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN PROMEDIOS CON 5% DE ZEOLITA EN (7, 14, 21,28) DÍAS DE CURADO**

Porcentaje			Días de curado			
Zeolita 5%			7 días	14 días	21 días	28 días
Marca	Delta Longitud	Deformación	esfuerzo de Compresión (Mpa)	esfuerzo de Compresión (Mpa)	esfuerzo de Compresión (Mpa)	esfuerzo de Compresión (Mpa)
0	0	0	0	0	0	0
5	0.127	0.002490196	1.75201845	1.42719001	3.65360642	4.85244603
10	0.254	0.004980392	4.14455978	4.68118323	12.4450969	24.8331061
15	0.381	0.007470588	8.00653595	16.6124917	25.7465078	41.3314226
20	0.508	0.009960784	13.4698193	26.7740846	44.2999779	58.8002284
25	0.635	0.01245098	19.4982699	36.5360642	60.7982944	70.7886244
30	0.762	0.014941176	25.9034987	45.2704671	71.3595004	79.9226405
35	0.889	0.017431373	32.0261438	50.9506833	74.4993184	80.4935165
40	1.016	0.019921569	38.1487889	59.7707176		
45	1.143	0.022411765	44.5540177	64.2235504		
50	1.27	0.024901961	49.7347174			
55	1.397	0.027392157	53.6908881			
60	1.524	0.029882353	58.1180315			
65	1.651	0.032372549	61.0380623			
70	1.778	0.034862745	59.3425606			
75	1.905	0.037352941	63.1103422			

**TABLA 14 VALORES DE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN PROMEDIOS  
CON 7.5% DE ZEOLITA EN (4, 11, 18,25) DÍAS DE CURADO**

Porcentaje			días de curado			
Zeolita 7,5%			4 Días	11 Días	18 Días	25 Días
Marca	Delta Longitud	Deformación	esfuerzo de Compresión (Mpa)	esfuerzo de Compresión (Mpa)	esfuerzo de Compresión (Mpa)	esfuerzo de Compresión (Mpa)
0	0	0	0	0	0	0
5	0.127	0.0024902	2.083697412	1.92156863	2.112241213	3.253993219
10	0.254	0.00498039	4.886698589	5.40048699	7.478475645	9.933242459
15	0.381	0.00747059	7.267251523	9.45713187	21.46493773	23.06339054
20	0.508	0.00996078	10.64683746	14.9455338	35.22304941	41.10307224
25	0.635	0.01245098	13.50121748	20.5972062	47.83940909	58.80022835
30	0.762	0.01494118	16.2128785	26.6884532	63.08179838	69.07599641
35	0.889	0.01743137	18.29657591	32.9680892	66.7924924	75.35563245
40	1.016	0.01992157	20.77988652	38.8081507	67.6488064	
45	1.143	0.02241176	22.20707653	44.6482122		
50	1.27	0.02490196	25.43	50.1742919		
55	1.397	0.02739216		55.5119826		
60	1.524	0.02988235		58.6518006		
65	1.651	0.03237255		63.8638985		
70	1.778	0.03486275		66.8781238		

En las tablas 13 y 14 observamos los esfuerzos de compresión van aumentando conforme pasan los días de curado, obteniendo así una mayor resistencia y durabilidad del material para las condiciones físicas a las que será expuesto para su trabajo diario.

## 4.2. Análisis de Resultados.

Para este análisis los valores que se han obtenido en los diferentes procesos de ruptura nos ha permitido obtener un valor promedio para el modulo de Young que ingresará en el algoritmo y así graficar esta curva de esfuerzo–deformación tanto teórico como experimental y detallan notoriamente el comportamiento de el material en sus zonas más estudiadas como son zona elástica y en la zona inelástica.

Es importante especificar que en la zona elástica el material (pasta de cemento) tendrá una respuesta lineal; designando así:

- La pendiente bajo la curva (en la zona elástica) es el valor del Modulo de Young (E).
- El límite de ruptura es tomado como el máximo valor de deformación que experimenta la probeta ya que el cemento no se comporta como el acero quien tiene su máxima deformación en el esfuerzo ultimo que no es igual al de ruptura como lo hemos experimentado en el cemento.

$$\sigma_y = \sigma_{rup}$$

En nuestro análisis el esfuerzo antepenúltimo al de ruptura es considerado como el esfuerzo de Fluencia; estos valores entonces se enfrascan en la parte lineal de la curva graficada con datos experimentales.

El cálculo de la parte tensorial de las variables del material son desarrolladas con las correlaciones obtenida en teoría de inelasticidad, cuya variables con mayor prioridad son los valores del corrector plástico “*m*”; donde este tiene dos formas de hallarse; tratando de una manera experimental se realiza un trazando de una paralela a la curva de linealidad que corte con el eje x. Teóricamente hablando se la determina mediante la siguiente expresión:

$$m = \frac{((\varepsilon_{final} * E_{promedio}) - \sigma_{ultimo})}{E_{promedio}}$$

Otra variable que depende del material es “*a*” ó conocida como el valor del intervalo de deformación máxima con respecto al modulo de fluencia y es calculada de la siguiente expresión:

$$a = \left( \frac{\sigma_{ultimo}}{\sigma_{fluencia}} \right) - 1$$

Finalmente al ingresar todos estos datos al algoritmo para simular el comportamiento del material se observaron graficas teóricas que no se igualaban a la curva con datos experimentales; por cuanto se realizo la iteración de los valores de  $m$  y  $a$  que son propios del material; así se logro la similitud del comportamiento de las dos curvas experimental y teórica de esfuerzo-deformación. Este variación de los valores nos permite establecer la diferencia que existe en para cada uno de los porcentajes de adición de Zeolita a los diferentes días de curado, como se muestra a continuación. Es importante mencionar que la variable “ $Y$ ” en las graficas siguientes representa el esfuerzo de fluencia de la pasta de cemento.

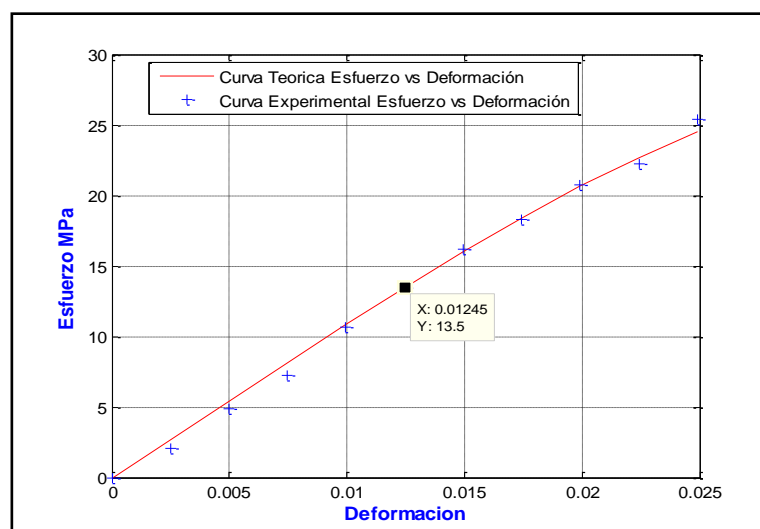


FIGURA 4.1 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 7.5% CON 4 DÍA DE CURADO



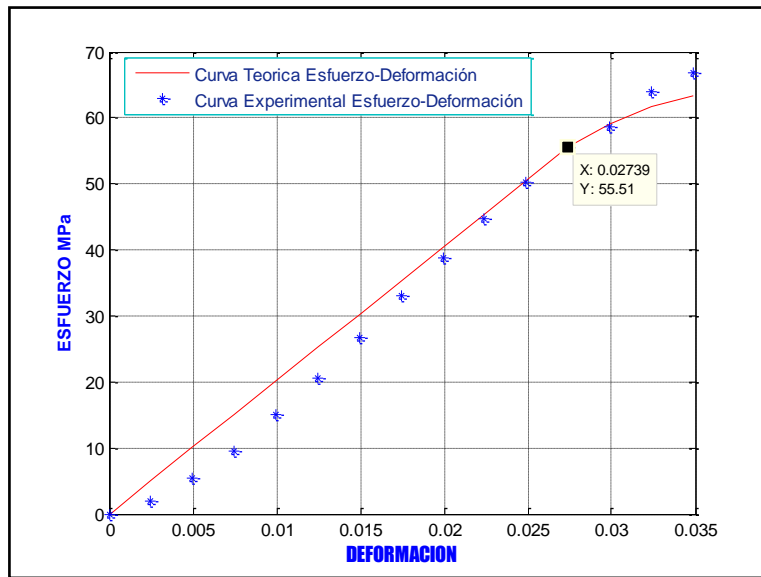


FIGURA 4.2 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 7.5% 11 DÍAS DE CURADO

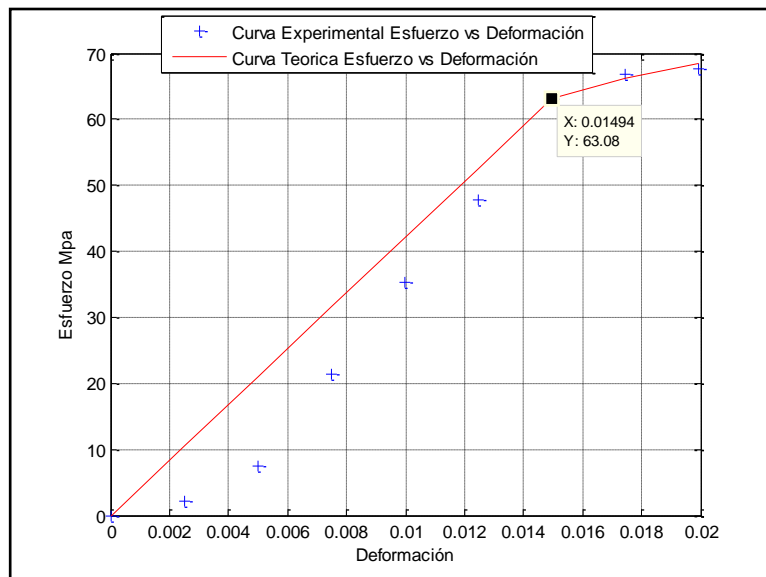


FIGURA 4.3 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 7.5% 18 DÍAS DE CURADO

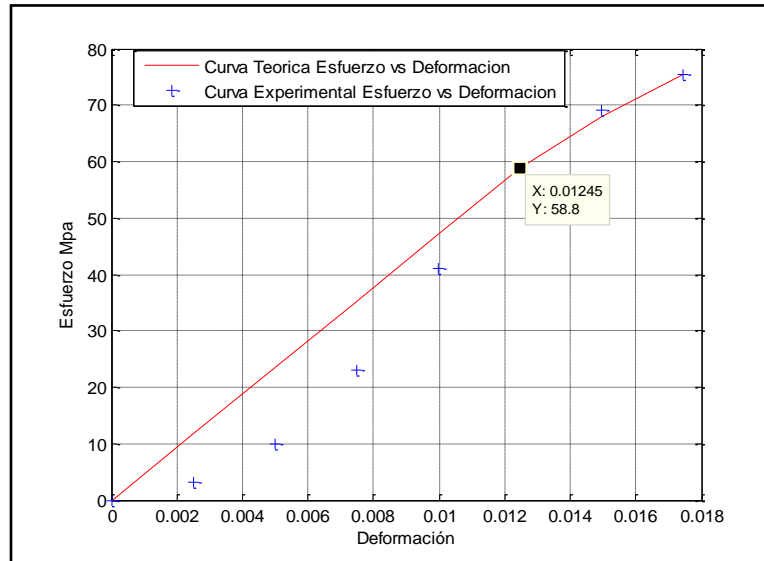


FIGURA 4.4 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 7.5% 25 DÍAS DE CURADO

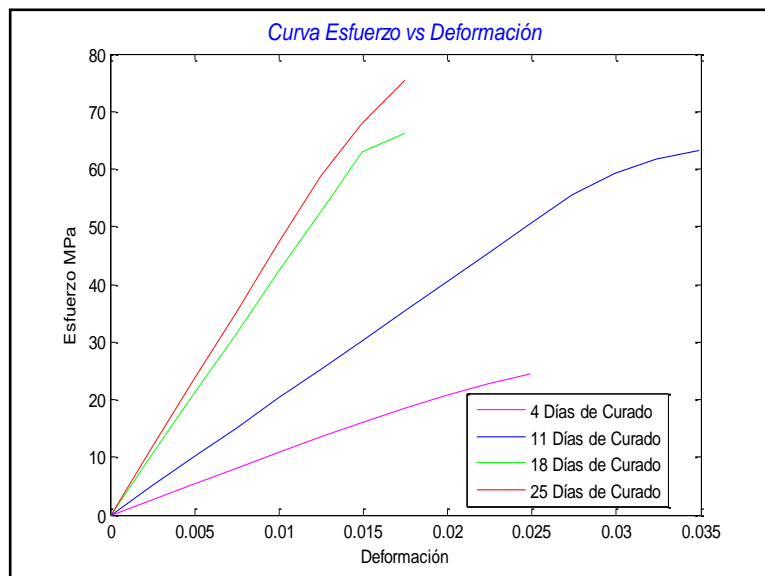


FIGURA 4.5 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 7.5% ZEOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO.

### Adición a la pasta de Cemento de 5% de Zeolita

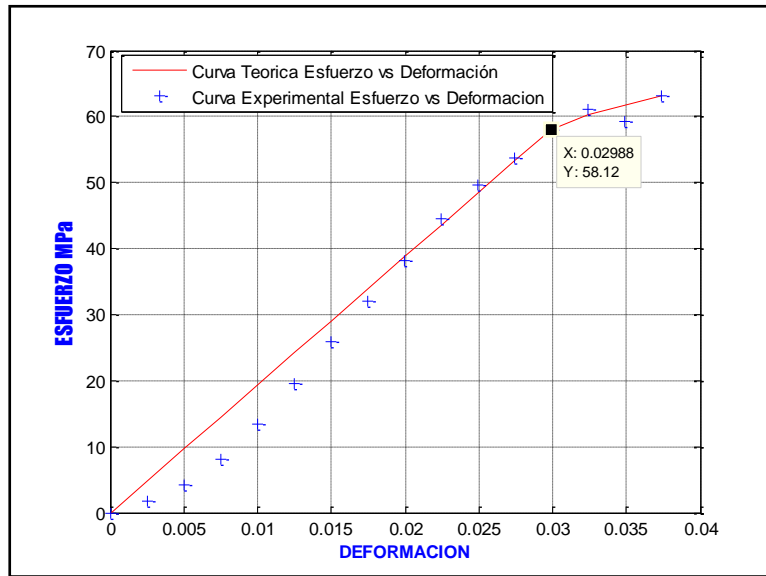


FIGURA 4.6 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 5% CON 7 DÍAS DE CURADO

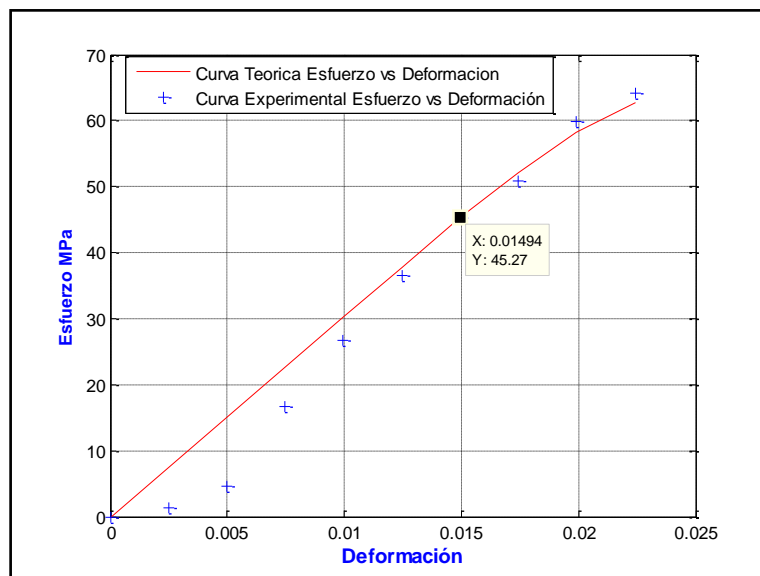


FIGURA 4.7 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 5% 14 DÍAS DE CURADO

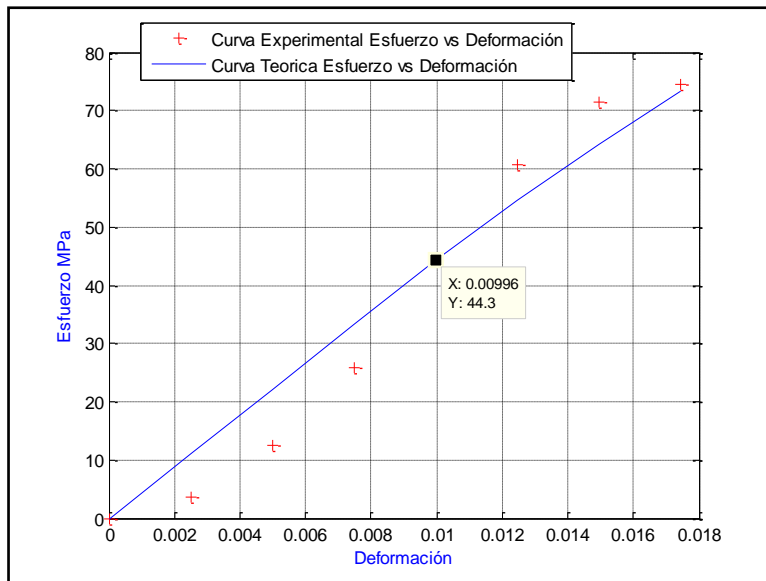


FIGURA 4.8 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 5% 21 DÍAS DE CURADO

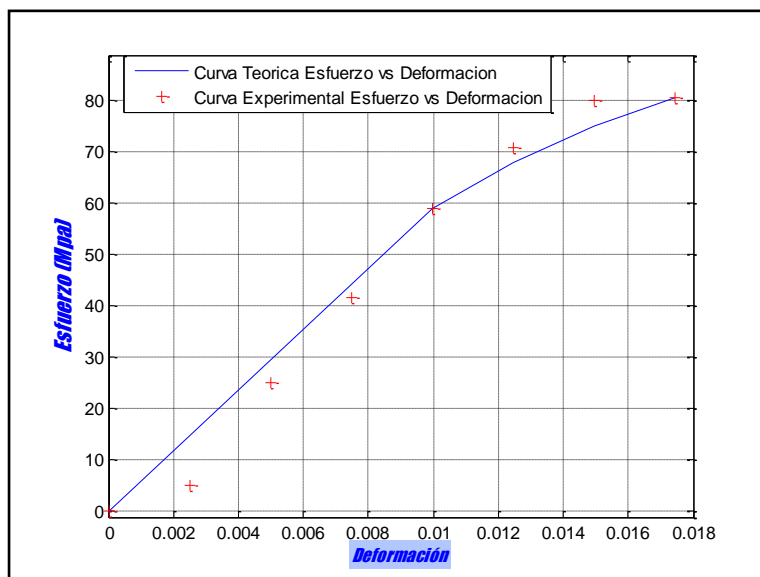


FIGURA 4.9 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 5% 28 DÍAS DE CURADO

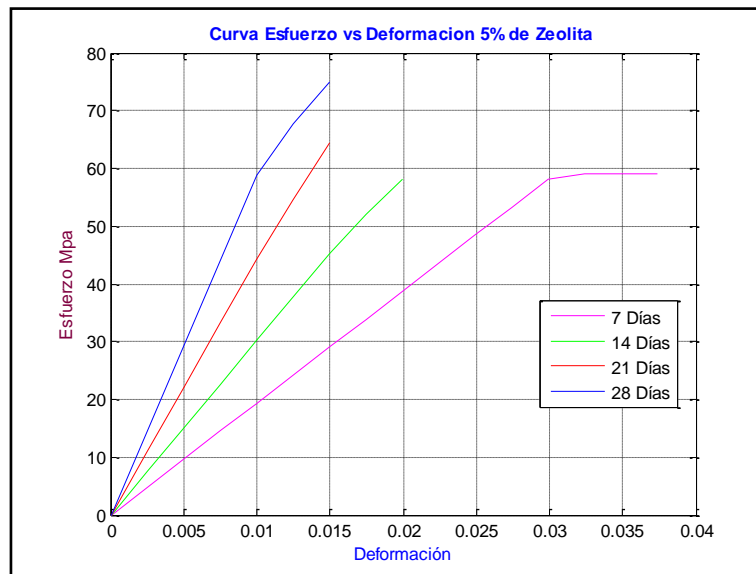


FIGURA 4.10 CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN 5% ZEOLITA A  
DIFERENTES DÍAS DE CURADO

Es primordial recalcar que la correlaciones mencionadas con anterioridad; son de forma experimental por ende influyen en los valores de  $m$  y  $a$ ; siendo estos unos factores importante para hacer que la curva teórica se acople a los valores experimentales de los ensayos de ruptura realizados.

Estas variaciones se muestran en la tabla siguiente:

**TABLA 15 VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN DE 7.5% 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	1084.3	22.21	13.5	0.01	1.5
11	2026.5	68.88	55.51	0.01	0.3
18	4222	67.65	63.08	0.099	0.4
25	4722.5	75.36	58.8	0.01	0.8

**TABLA 16 VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN DE 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>
7	1944.9	63.11	58.11	0.005	0.086
14	3029.9	64.22	45.27	0.005	0.8
21	4447.4	71.36	44.3	0.01	1.9
28	5903.2	80.49	58.8	0.035	1

Una vez obtenido todos los datos experimentales de esfuerzo, deformación,  $m$ ,  $a$  y modelo de Young que fueron ingresados al algoritmo; se procede a realizar un análisis que se basa en dos fases primero la parte individual (5 y 7.5%), para luego la parte grupal (5, 10, 15, 20 y 25% de Zeolita).

Es importante recalcar que el error relativo existente entre las curvas teóricas y experimentales que fueron arrojadas a través del ensayo de compresión nos dieron los siguientes valores que se muestran en la tabla a continuación:

**TABLA 17 ERROR RELATIVO ENTRE LOS PORCENTAJE DE ZEOLITA (5 Y 7.5%)**

% de Zeolita		Días de Curado							
		4		7		11		14	
		$\sigma_u$ Mpa	% de Error	$\sigma_u$ Mpa	% de Error	$\sigma_u$ Mpa	% de Error	$\sigma_u$ Mpa	% de Error
5	m1			65,9	11,9			53,9	24,5
	m2			63,1		64,2			
	m3			66,5		58,2			
7,5	m1	20,2	5,26			<b>66,9</b>	16,1		
	m2	25,4		<b>62,7</b>					
	m3	22,9		<b>55,8</b>					
% de		18		21		25		28	

Zeolita		$\sigma_u$ Mpa	% de Error	$\sigma_u$ Mpa	% de Error	$\sigma_u$ Mpa	% de Error	$\sigma_u$ Mpa	% de Error	
5	m1			77,1	22,4			80,5	14,3	
	m2			74,5				75,4		
	m3			74,5				86,5		
7,5	m1	68,6	25,5				25,6	<b>76,2</b>		
	m2	72,8						<b>74,5</b>		
	m3	67,6						<b>75</b>		
								% relativo General	5%	18,3
									7,5%	18,1
								% de Respuesta del algoritmo	5%	81,7
									7,5%	81,9

De acuerdo a la tabla mostrada arriba podemos definir que los errores existentes son muy bajos, donde el grado de respuesta del algoritmo que modela el comportamiento de la pasta de cemento es muy optimo y tienen gran semejanza entre la curvas Esfuerzo-deformación

### **FASE INDIVIDUAL.**

Acorde a los valores que se observan en las tablas y en las graficas tanto teóricas como experimentales del comportamiento de la pasta de cemento; nos podemos dar cuenta que la pasta de cemento conforme pasa los días de curado aumenta su resistencia a la



compresión y la adición de Zeolita I aumenta efectivamente a esta propiedad mecánica.

De acuerdo a esto se realizó un análisis estadístico donde vamos a validar los dos porcentajes de zeolita utilizados para esta fase del análisis y establecer el mejor porcentaje a través de un análisis Dunnett que establece como un control al valor de la media que corresponde al cuarto día de curado con 7.5% de Zeolita. También establecemos una hipótesis nula y una alterna:

***Ho= La media aritmética del cuarto día de curado es igual a las otras medias aritméticas.  $\mu_c = \mu_i$***

***Ha=Al menos una de las diferentes medias es mayor al control.***

$$\mu_i > \mu_c$$

Donde  $\mu_c$  , pertenece a la media aritmética del control (4 día de curado) y el segundo término  $\mu_i$  es la media aritmética de los

diferentes días de curado para 5% de zeolita I (7,14,21 y 28) y 7.5% de Zeolita I (11,18 y 25). A continuación ingresamos los datos a la herramienta matemática llama “STATISTICA 7”, en la cual se ingresa los valores de esfuerzo para los diferentes días de curado que pertenecen a los porcentajes de 5 y 7 de zeolita I, los datos de color turquesa y amarillo pertenecen a 5 y 7% de Zeolita respectivamente y representado en la figura 4.11.

	1 Días de Curado	2 Esfuerzo de Compresión	3 Var3
1	4	20.209	
2	4	25.43	
3	4	22.949	
4	7	65.936	
5	7	63.11	
6	7	66.501	
7	11	66.878	
8	11	62.733	
9	11	55.763	
10	14	53.948	
11	14	64.22	
12	14	58.23	
13	18	68.605	
14	18	72.79	
15	18	67.649	
16	21	77.068	
17	21	74.5	
18	21	74.5	
19	25	76.212	
20	25	74.5	
21	25	74.999	
22	28	80.493	
23	28	75.36	
24	28	86.49	
25			

FIGURA 4.11 CUADRO DE DATOS INGRESADOS PARA 5 Y 7.5% DE ADICIÓN DE ZEOLITA

Dias de Curado; Unweighted Means (Spreadsheet1)					
Current effect: F(7, 16)=71.649, p=.00000					
Effective hypothesis decomposition					
Dias de Curado	Esfuerzo de Compresión Mean	Esfuerzo de Compresión Std Err	Esfuerzo de Compresión -95.00%	Esfuerzo de Compresión +95.00%	N
Cell No.					
1	4	22.86267	2.138678	18.32887	27.39646
2	7	65.18233	2.138678	60.64854	69.71613
3	11	61.79133	2.138678	57.25754	66.32513
4	14	58.79933	2.138678	54.26554	63.33313
5	18	69.68133	2.138678	65.14754	74.21513
6	21	75.35600	2.138678	70.82220	79.88980
7	25	75.23700	2.138678	70.70320	79.77080
8	28	80.78100	2.138678	76.24720	85.31480

FIGURA 4.12 CUADRO DE MEDIA ARITMÉTICA DE LAS MUESTRAS PARA LOS DIFERENTE DÍAS DE CURADO.

En la figura 4.13 se observa que el análisis Dunnett será en baje a escoger la medias aritméticas que sean mayor al control.

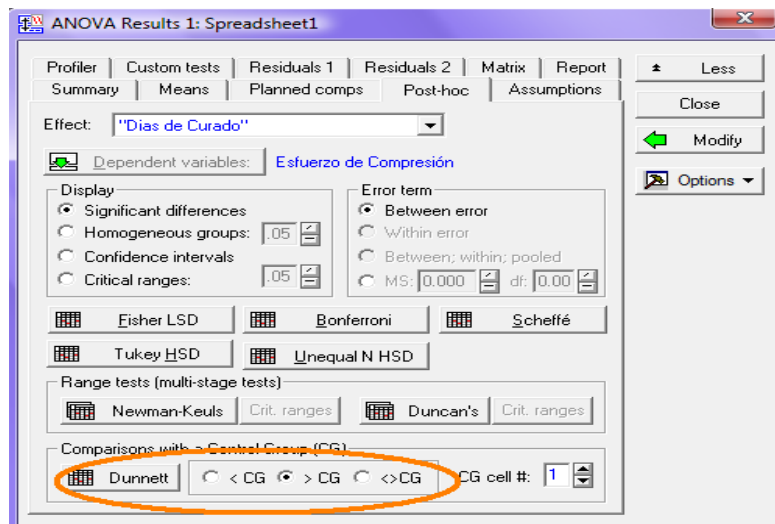


FIGURA 4.13. DEMOSTRACION DE LA MANERA DE ESCOGER EL ANALISIS DUNNETT.

Dunnnett test; variable Esfuerzo de Compresión (Spreadsheet1)			
Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control)			
Error: Between MS = 13.722, df = 16.000			
Cell No.	Días de Curado	{1}	
		22.863	
1	4		
2	7	0.000020	
3	11	0.000020	
4	14	0.000020	
5	18	0.000020	
6	21	0.000020	
7	25	0.000020	
8	28	0.000020	

FIGURA 4.14. CUADRO DE ANÁLISIS DUNNETT

De acuerdo a la figura 4.14 observamos que los valores de color rojo nos muestran que existen significancia de los diferentes valores de las medias aritméticas con respecto al control; por lo tanto el control (22.863 MPa) es muy pequeño comparado con los valores de las otras medias.

Por consiguiente en esta validación estadística rechazamos la hipótesis nula por cuanto los valores son significativos estableciendo como el mejor porcentaje a los demás días pero al observar los valores de las medias aritmética quien tiene un mejor valor y mayor a

los demás es a los 28 días de curado que corresponde al 5% de Zeolita I, en el cual la pasta de cemento presenta mayor Resistencia a la Compresión. Con un porcentaje de confiabilidad del 99.99%, teniendo un valor de  $p=0.0001$  cumpliendo con las normas estadísticas.

En la figura 4.15 se observa que la pasta de cemento experimenta mayor significancia debido al rango de confiabilidad que existen antes las medias aritméticas y cuanto alejadas están del control demostrando así de manera grafica un aumento en el esfuerzo de compresión a los 28 días de curado. Una vez más se afirma que a mayor día de curado con esta adición de puzolana se obtuvo mayor esfuerzo de compresión con un nivel de ajuste de los datos del 99.999%

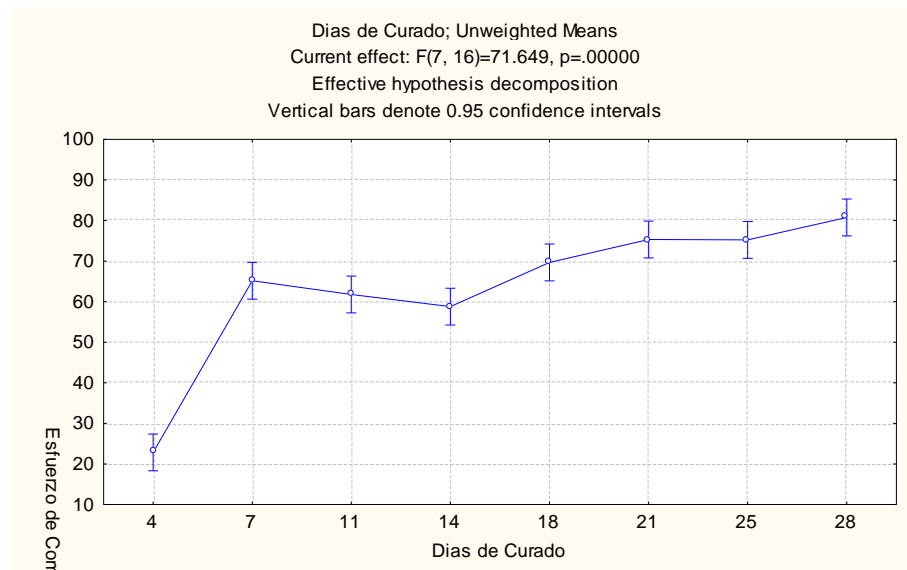


FIGURA 4.15. GRÁFICO DE INTERVALOS DE CONFIANZA PARA  
 LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO

En la figura 4.16 se observa que los datos tienen un ajuste de confiabilidad del 95.55% como lo demuestra el valor encerrado en el círculo de color azul.

Dependent Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (Spreadsheet1)										
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Esfuerzo de Compresión	0.984421	0.969085	0.955560	882.136	7	983.1622	219.5494	16	13.72184	71.64947	0.000000

FIGURA 4.16. CUADRO DEMOSTRATIVO DEL NIVEL DE  
 CONFIABILIDAD DEL EXPERIMENTO

## **FASE GRUPAL**

En esta parte del análisis se trabajo con los datos de los diferentes porcentajes de adición de Zeolita I (5, 10, 15, 20 y 25%) y con cada uno de sus días de curado como a 7, 14,21 y 28 días. Todos estos fueron ingresados de la manera similar al análisis individual que se realizo y obteniendo sus respectivos valores de modulo de Young,  $m$ ,  $a$ , deformación y esfuerzo. Trabajando efectivamente con los valores promedios.

Se procedió nuevamente a realizar las curvas de esfuerzo-deformación que fueron halladas de acuerdo a los análisis realizados para el porcentaje de igual manera como se realizo en la fase individual; donde se genero cada una de las graficas para cada día de curado.

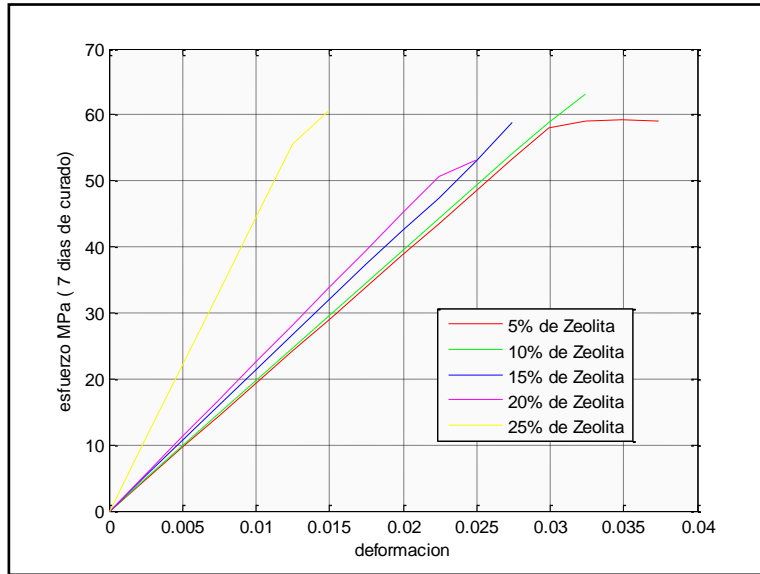


FIGURA 4.17. CURVA ESFUERZO DEFORMACION DE LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ADICION DE ZEOLITA I A LOS 7 DIAS DE CURADO.

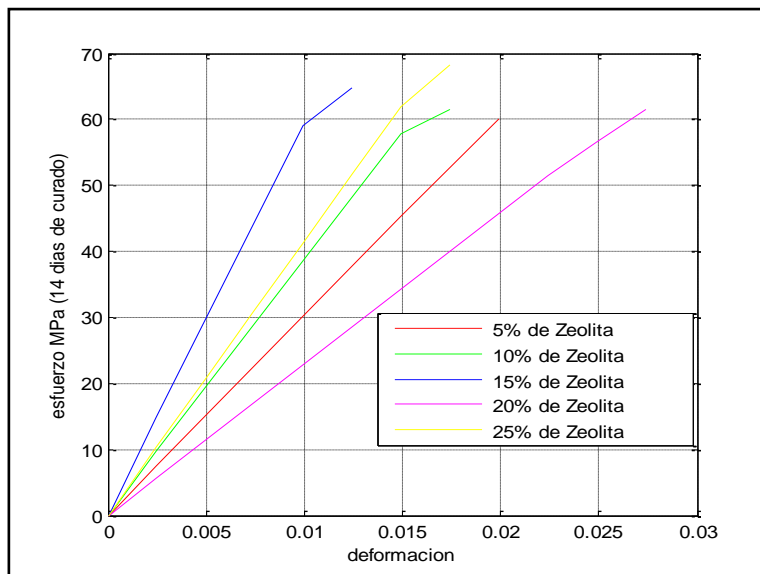


FIGURA 4.18. CURVA ESFUERZO DEFORMACION DE LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ADICION DE ZEOLITA I A LOS 14 DIAS DE CURADO.



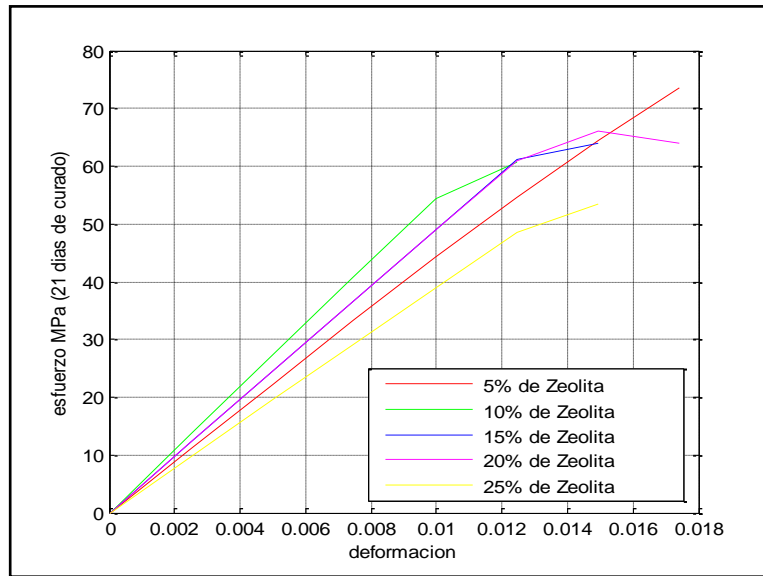


FIGURA 4.19. CURVA ESFUERZO DEFORMACION DE LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ADICION DE ZEOLITA I A LOS 21 DIAS DE CURADO.

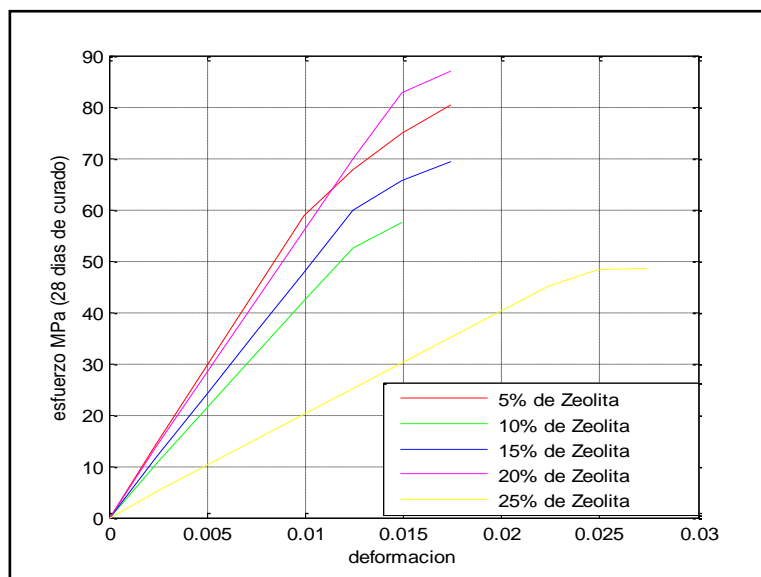


FIGURA 4.20. CURVA ESFUERZO DEFORMACION DE LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ADICION DE ZEOLITA I A LOS 28 DIAS DE CURADO.

En las siguientes tablas observamos cada uno de los valores ingresados al algoritmo, ayudando a generar el modelamiento adecuado de las graficas acorde a los datos experimentales de cada porcentaje de zeolita y en cada día de curado.

**TABLA 18. VALORES INGRESADOS PARA GENERAR CURVAS ESFUERZO-DEFORMACION DEL ALGORITMO PARA 7 DIAS DE CURADO AL AMBIENTE.**

7 días de Curado					
% de Zeolita	E	$\sigma_u$	$\sigma_y$	m	A
5	1944.89	63.11	58.11	0.005	0.086
10	1973.55	63.15	55.14	0.002	0.4
15	2147.91	56.55	34.81	0.00122	0.69
20	2263.96	52.881	51.49	0.0249	0.11
25	4463.8	60.71	56	0.013	0.355

**TABLA 19. VALORES INGRESADOS PARA GENERAR CURVAS ESFUERZO-DEFORMACION DEL ALGORITMO PARA 14 DIAS DE CURADO AL AMBIENTE.**

14 días de curado					
% de Zeolita	E	$\sigma_u$	$\sigma_y$	m	A
5	3029.91	64.22	45.27	0.005	0.8
10	3871.51	61.57	59	0.2	0.5
15	5923.11	65.41	60	0.09	0.65
20	2300	58.275	50	0.024	1.1
25	4149.04	68.4	62	0.009	0.46

**TABLA 20. VALORES INGRESADOS PARA GENERAR CURVA  
 AMBIENTE S ESFUERZO-DEFORMACION DEL ALGORTIMO  
 PARA 21 DIAS DE CURADO AL AMBIENTE**

<b>21 días de Curado</b>					
<b>% de Zeolita</b>	<b>E</b>	<b><math>\sigma_u</math></b>	<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>m</b>	<b>a</b>
5	4447.439	71.36	44.3	0.01	1.9
10	5470.58	61.99	60	0.002	0.11
15	4914.89	64.13	62.41	0.01524	0.1
20	4068.98	68.08	57	0.003	0.5879
25	3902.96	53.58	47	0.009	0.45

**TABLA 21. VALORES INGRESADOS PARA GENERAR CURVAS  
 ESFUERZO-DEFORMACION DEL ALGORTIMO PARA 28 DIAS DE  
 CURADO AL AMBIENTE.**

<b>28 días de Curado</b>					
<b>% de Zeolita</b>	<b>E</b>	<b><math>\sigma_u</math></b>	<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>m</b>	<b>a</b>
5	5903.17	80.49	58.8	0.035	1
10	4236.19	59	50	0.005	0.45
15	4802.89	68.41	60.99	0.00354	0.45
20	5616.51	82.23	81	0.03	0.2697
25	2017.39	51.81	48	0.017	0.25

Esta fase es más compleja debido a la necesidad de establecer afirmaciones con respecto a la pasta de cemento y su propiedad mecánica vamos a necesitar de la ayuda de otros valores para diferentes porcentajes es decir este análisis se lleva a cabo con los valores experimentales de la adición de Zeolita I al 5, 10,15, 20 y 25%.

Para esta parte, nuevamente se tuvo que establecer una hipótesis nula y una alterna.

***Ho= La media aritmética de los diferentes porcentajes es menor o igual al control (5%)***

$$\mu_i \leq \mu_c$$

***Ha= Existe al menos una media mayor al control; que cumpla con una resistencia mayor a la compresión de los demás porcentajes.***

$$\mu_i > \mu_c$$

Una vez definido estos parámetros procedemos al análisis estadístico. Ingresamos los datos.

	1 % de zeolita	2 Esfuerzo de Ruptura 7	3 Esfuerzo de Ruptura 14	4 Esfuerzo de Ruptura 21	5 Esfuerzo de Ruptura 28	6 Var6
1	5	65.936	53.948	77.068	80.493	
2	5	63.11	64.22	74.5	75.36	
3	5	66.501	58.23	74.5	86.49	
4	10	64.132	55.581	64.132	61.566	
5	10	63.153	62.422	64.732	55.581	
6	10	56.555	61.567	59.857	59.856	
7	15	58.144	61.564	64.129	65.842	
8	15	56.551	62.419	64.129	68.401	
9	15	54.299	68.404	65.839	64.132	
10	20	52.749	62.733	76.052	87.34	
11	20	54.633	58.4	62.379	88.2	
12	20	53.052	59.691	83.743	86.458	
13	25	59	68.27	47.03	53.87	
14	25	62.42	67.55	59	38.62	
15	25	60.71	73.23	54.72	51.81	
16						

FIGURA 4.21. CUADRO DE DATOS INGRESADOS CON LOS DIFERENTES PORCENTAJES AL PROGRAMA STADISTICA 7.

Obtenemos las medias de los diferentes porcentajes de adición Zeolita I para los diferentes días de curado.

% de zeolita; Unweighted Means ( analisis 1) Current effect: F(4, 10)=11.153, p=.00105 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	% de zeolita	Esfuerzo de Ruptura 7 Mean	Esfuerzo de Ruptura 7 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 7 -95.00%	Esfuerzo de Ruptura 7 +95.00%	N
1	5	65.18233	1.365389	62.14006	68.22461	3
2	10	61.28000	1.365389	58.23772	64.32228	3
3	15	56.33133	1.365389	53.28906	59.37361	3
4	20	53.47800	1.365389	50.43572	56.52028	3
5	25	60.71000	1.365389	57.66772	63.75228	3

FIGURA 4.22. VALORES DE LAS MEDIAS ARITMETICA CALCULADAS PARA 7 DIAS DE CURADO

% de zeolita; Unweighted Means (analysis 1)						
Current effect: F(4, 10)=4.3463, p=.02710						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	% de zeolita	Esfuerzo de Ruptura 14 Mean	Esfuerzo de Ruptura 14 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 14 -95.00%	Esfuerzo de Ruptura 14 +95.00%	N
1	5	58.79933	2.143483	54.02336	63.57531	3
2	10	59.85667	2.143483	55.08069	64.63264	3
3	15	64.12900	2.143483	59.35302	68.90498	3
4	20	60.27467	2.143483	55.49869	65.05064	3
5	25	69.68333	2.143483	64.90736	74.45931	3

FIGURA 4.23. VALORES DE LAS MEDIAS ARITMETICA CALCULADAS PARA 14 DIAS DE CURADO

% de zeolita; Unweighted Means (analysis 1)						
Current effect: F(4, 10)=7.2622, p=.00520						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	% de zeolita	Esfuerzo de Ruptura 21 Mean	Esfuerzo de Ruptura 21 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 21 -95.00%	Esfuerzo de Ruptura 21 +95.00%	N
1	5	75.35600	3.307730	67.98592	82.72608	3
2	10	62.90700	3.307730	55.53692	70.27708	3
3	15	64.69900	3.307730	57.32892	72.06908	3
4	20	74.05800	3.307730	66.68792	81.42808	3
5	25	53.58333	3.307730	46.21325	60.95342	3

FIGURA 4.24. VALORES DE LAS MEDIAS ARITMETICA CALCULADOS PARA 21 DIAS DE CURADO

% de zeolita; Unweighted Means (analysis 1)						
Current effect: F(4, 10)=33.353, p=.00001						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	% de zeolita	Esfuerzo de Ruptura 28 Mean	Esfuerzo de Ruptura 28 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 28 -95.00%	Esfuerzo de Ruptura 28 +95.00%	N
1	5	80.78100	2.761320	74.62840	86.93360	3
2	10	59.00100	2.761320	52.84840	65.15360	3
3	15	66.12500	2.761320	59.97240	72.27760	3
4	20	87.33267	2.761320	81.18006	93.48527	3
5	25	48.10000	2.761320	41.94740	54.25260	3

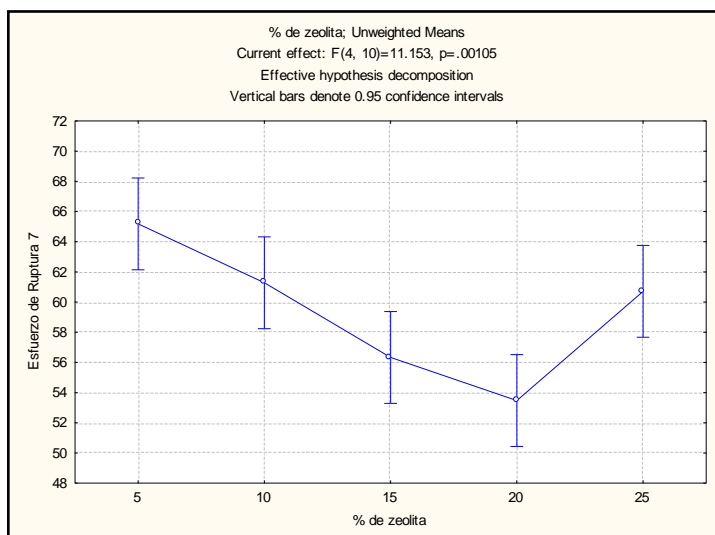
FIGURA 4.25. VALORES DE LAS MEDIAS ARITMETICA  
CALCULADOS PARA 28 DIAS DE CURADO

De similar forma el análisis aplicado es por el método de Dunnett como se menciona con anterioridad donde el control se tomo al valor del 5% de adición de Zeolita I a la pasta de cemento, se escogió este porcentaje por cuanto la adición es pequeña en relación al cemento. Para un mejor análisis se hizo por días de curado iniciando con 7 días de curado. De la misma manera el análisis será escogiendo un análisis mayor a la media aritmética del control (5%).

		Dunnett test; variable Esfuerzo de Ruptura 7 (análisis 1) Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 5.5929, df = 10.000		
Cell No.	% de zeolita	{1}		
1	5	65.182		
2	10	0.997739		
3	15	0.999974		
4	20	0.999981		
5	25	0.998859		

**FIGURA 4.26. VALORES DE SIGNIFICANCIA ENTRE MEDIAS ARITMETICAS PARA 7 DIAS DE CURADOS.**

Para este primer análisis se acepta la hipótesis nula por cuanto las medias aritméticas de los otros porcentajes son menores al control para los 7 días de curado.



**FIGURA 4.27. GRAFICA DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA 7 DIAS DE CURADO**

Dependnt Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analysis 1)										
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Esfuerzo de Ruptura 7	0.903823	0.816895	0.743654	249.5178	4	62.37946	55.92865	10	5.592865	11.15340	0.001047



FIGURA 4.28. CUADRO CON PORCENTAJE DE PROBABILIDAD DE ERROR (P) PARA 7 DIAS DE CURADO.

En la figura 4.25 observamos que existe la probabilidad 0.1% de error en la experimentación; es decir que los datos experimentales tomados en el laboratorio tienen un nivel de confiabilidad del 99.9% que es un rango aceptable para este proyecto.

**Día 14 de curado.**

		Dunnett test; variable Esfuerzo de Ruptura 14 (analysis 1) Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 13.784, df = 10.000		
Cell No.	% de zeolita	{1}		
		58.799		
1	5			
2	10	0.670505		
3	15	0.148431		
4	20	0.611808		
5	25	0.008011		

FIGURA 4.29. VALORES DE SIGNIFICANCIA ENTRE MEDIAS ARITMETICAS PARA 14 DIAS DE CURADOS.

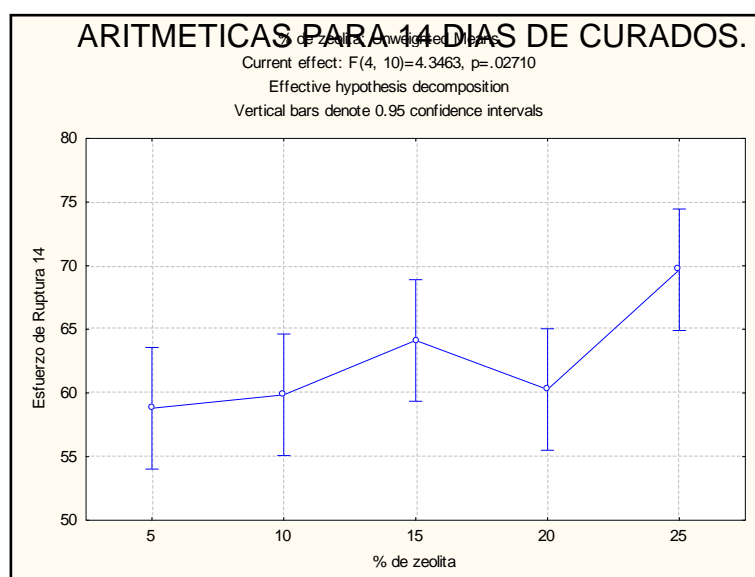


FIGURA 4.30. GRAFICAS DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA 14 DIAS DE CURADO

De acuerdo a la figura 26, el valor con rojo significa que existe significancia entre la medias aritméticas con respecto al control por tal razón; se rechaza la hipótesis nula para el porcentaje de 25 % de Zeolita debido que el material presenta mayor resistencia a la compresión a los 14 días de curado siendo este porcentaje (25%) el mas optimo y observando así un punto importante para el objetivo de nuestra experimentación.

Dependnt Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analysis 1)										
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Esfuerzo de Ruptura 14	0.796768	0.634838	0.488774	239.6291	4	59.90727	137.8356	10	13.78356	4.346286	0.027102

FIGURA 4.31. CUADRO CON PORCENTAJE DE PROBABILIDAD (P) PARA 14 DIAS DE CURADO.

La figura 4.28 denota que la probabilidad de no cumplirse este objetivo es del 2.7%; es decir; el nivel de confiabilidad de los datos experimentales es 97.3%

**Día 21 de Curado.**

		Dunnett test; variable Esfuerzo de Ruptura 21 ( analisis 1) Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 32.823, df = 10.000			
Cell No.	% de zeolita	{1}			
1	5	75.356			
2	10	0.999488			
3	15	0.998769			
4	20	0.876413			
5	25	0.999975			

FIGURA 4.32. VALORES DE SIGNIFICANCIA ENTRE MEDIAS ARITMETICAS PARA 21 DIAS DE CURADOS.

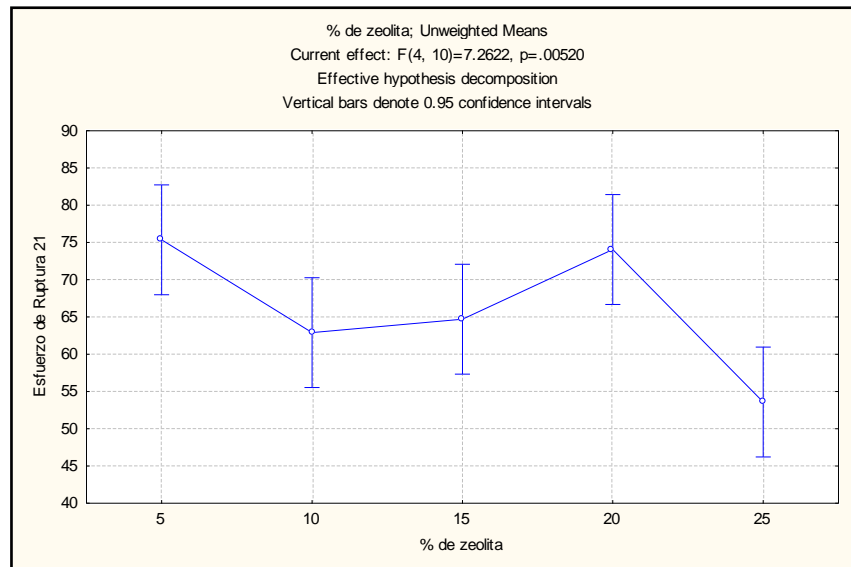


FIGURA 4.33. GRAFICAS DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA 21 DIAS DE CURADO

En la figura 4.29, se observa que los diferentes porcentajes de Zeolita I con respecto al control; aceptan la hipótesis nula y el control en este día de curado tiene mayor fuerza de compresión que los demás porcentajes de acuerdo a los datos experimentales obtenidos en el proceso de ruptura.

Dependnt Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analysis 1)										
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Esfuerzo de Ruptura 21	0.862503	0.743911	0.641475	953.4785	4	238.3696	328.2323	10	32.82323	7.262222	0.005198

FIGURA 4.34. CUADRO CON PORCENTAJE DE PROBABILIDAD (p) PARA 21 DIAS DE CURADO.

Existe la probabilidad de 0.5% de no cumplir con el objetivo; es decir los datos experimentales no tienen un nivel de confiabilidad del 99.5% de acuerdo a la figura 4.31.

### Día 28 de curado

En este día el análisis es el más importante por cuanto todo trabajo a nivel de ingeniería civil se realiza con mayor detalle siendo este día el de mayor madurez de la pasta de cemento.

		Dunnett test; variable esfuerzo de Ruptura 28 (analisis 1) Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 22.875, df = 10.000		
Cell No.	% de zeolita	{1}		
		<b>80.781</b>		
1	5			
2	10	0.999980		
3	15	0.999934		
4	20	<b>0.166481</b>		
5	25	0.999981		

FIGURA 4.35. VALORES DE SIGNIFICANCIA ENTRE MEDIAS ARITMETICAS PARA 28 DIAS DE CURADOS.

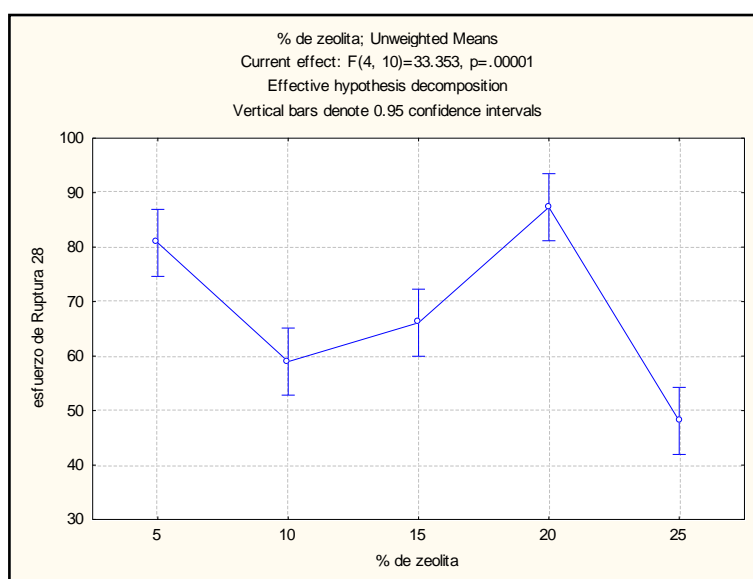


FIGURA 4.36. GRAFICAS DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA 28 DIAS DE CURADO

Aquí como observamos en la figura 4.32 los porcentajes de 10, 15 y 25% de Zeolita I aceptan la hipótesis nula; mientras que el 20% rechaza la hipótesis nula y acepta la hipótesis alterna que para nuestro objetivo es la más importante, debido que existe una resistencia a la compresión mayor a las demás, este porcentaje de acuerdo a su valor inicial a los 7 días de curado a aumentado su resistencia en un 63.31%.

Nuevamente queda definido que a mayor días de curado los diferentes porcentajes de Zeolita han aumentado su esfuerzo de compresión.

Dependnt Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analysis 1)										
	Multiple R	Multiple R <sup>2</sup>	Adjusted R <sup>2</sup>	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
esfuerzo de Ruptura 28	0.964506	0.930271	0.902379	3051.764	4	762.9410	228.7466	10	22.87466	33.35311	0.000009

FIGURA 4.37. CUADRO CON PORCENTAJE DE PROBABILIDAD (P) PARA 28 DIAS DE CURADO

En la figura 4.37 Observamos que los datos experimentales tienen un nivel de confiabilidad del 99.991% de cumplir con el objetivo que nos determine el porcentaje de Zeolita que aumente el esfuerzo de compresión.

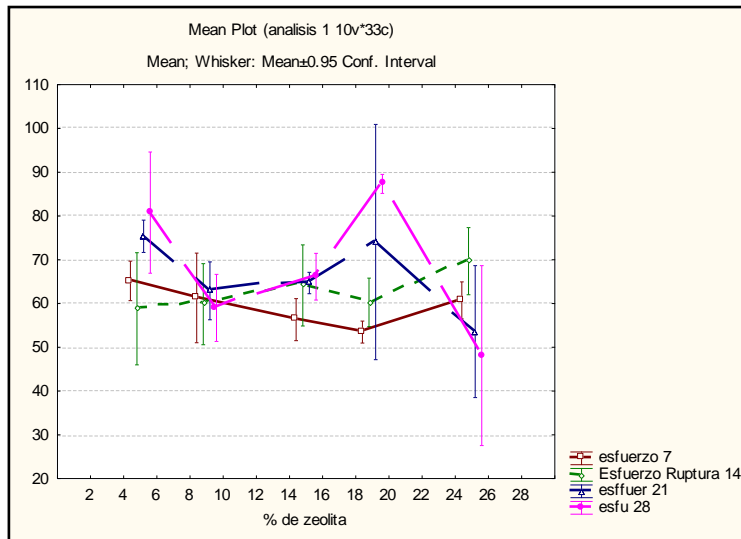


FIGURA 4.38. GRAFICAS DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA TODOS LOS DIAS DE CURADO

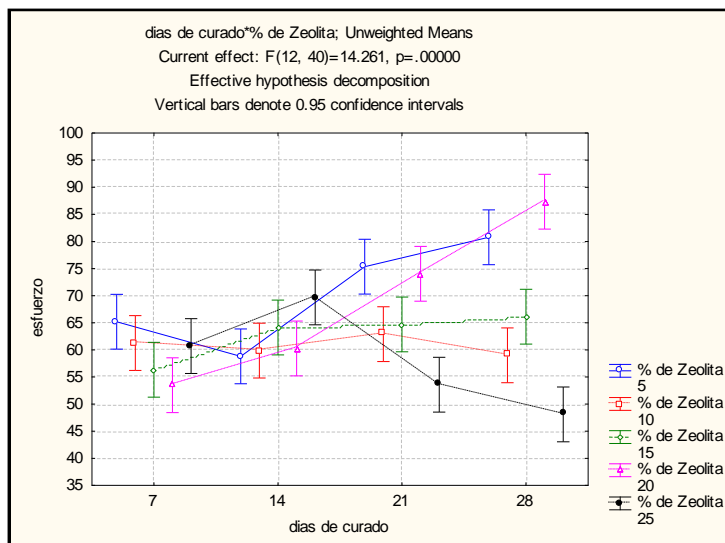


FIGURA 4.39. GRAFICAS DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES

PORCENTAJES DE ZEOLITA



De la figura 4.35 observamos que a los 28 días de curado los porcentajes de 10% y 25% disminuyendo su esfuerzo a la compresión; habiendo ocurrido esto por error experimental en la toma de datos, mal calibración de la maquina o no se elimino en su totalidad la porosidad del espécimen provocando el efecto antes mencionado.

Lo antes mencionado se puede confirmar con la figura 4.39, donde el mejor porcentaje con un alto valor de esfuerzo a la compresión que conforme aumenta sus días de curado aumenta el la resistencia a la compresión; este valor ha sido con la adición de 20% de Zeolita I, ocurriendo lo contrario con los otros porcentajes (5, 10, 15 y 25%), de los cuales cuyos valores de esfuerzo a la compresión aumentado y en otros casos ha disminuido. En la figura 4.40 tenemos un diagrama de cajas donde los mayores valores de esfuerzos son a los 28 días de curado

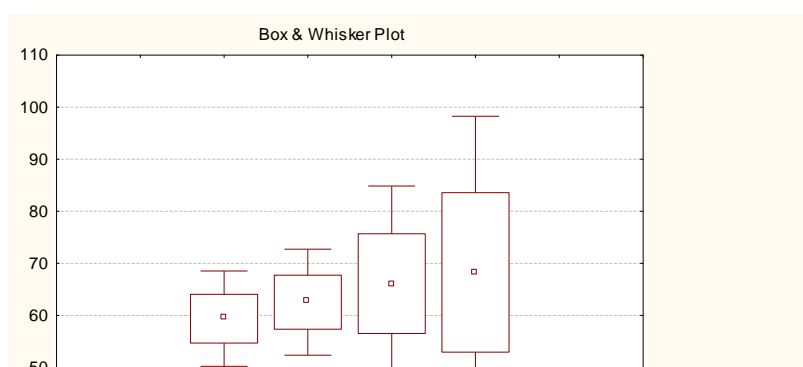


FIGURA 4.40 DIAGRAMA DE CAJAS DE LOS ESFUERZOS DE COMPRESION

Se realizo el mismo análisis con los datos de validación (7.5; 12.5; 17.5; 22.5 y 27.5%) aplicamos el mismo análisis Dunnett, como observamos en la siguiente figura obtenidas con el análisis

Dunnett test; variable ESFUERZO (Spreadsheet6) Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 47.419, df = 40.000			
Cell No.	DIAS DE CURADO	% DE zEOLITA	{1} 24.603
1	4	7	
2	4	12	0.010400
3	4	17	0.000176
4	4	22	0.000420
5	4	27	0.162795
6	11	7	0.000022
7	11	12	0.000735
8	11	17	0.000042
9	11	22	0.000022
10	11	27	0.000022
11	18	7	0.000022
12	18	12	0.000022
13	18	17	0.000024
14	18	22	0.000022
15	18	27	0.000025
16	21	7	0.000022
17	21	12	0.000022
18	21	17	0.000022
19	21	22	0.000022
20	21	27	0.000474

FIGURA 4.41 DATOS ESTADISTICOS DE SIGNIFICANCIA CON EL ANALISIS DUNNETT.

En la figura 4.41 observamos que para los diferentes porcentaje de zeolitas con respecto al control (7.5% con 4 días de Curado); son mayores al control a excepción del 27.5% con 4 días de curado que acepta la hipótesis nula que es la misma escogida para los datos de calibración (5, 19,15, 20 y 25%).

Con respecto a los 21 días de curado todas los porcentajes son mayores al control y rechazan la hipótesis nula, se observa que para una adición de zeolita al 22.5% el esfuerzo de compresión aumenta con respecto a los demás; es decir que en un rango de 20 a 22,5% de adición de Zeolita la pasta de cemento experimenta un aumento significativo del espécimen con respecto a las otras muestras siendo lo esperado de acuerdo al análisis con las muestras de calibración.

En la figura 4.41 observamos los diferentes intervalos de confianza para los esfuerzos de compresión para los distintos porcentajes de zeolita con sus respectivos días de curado.

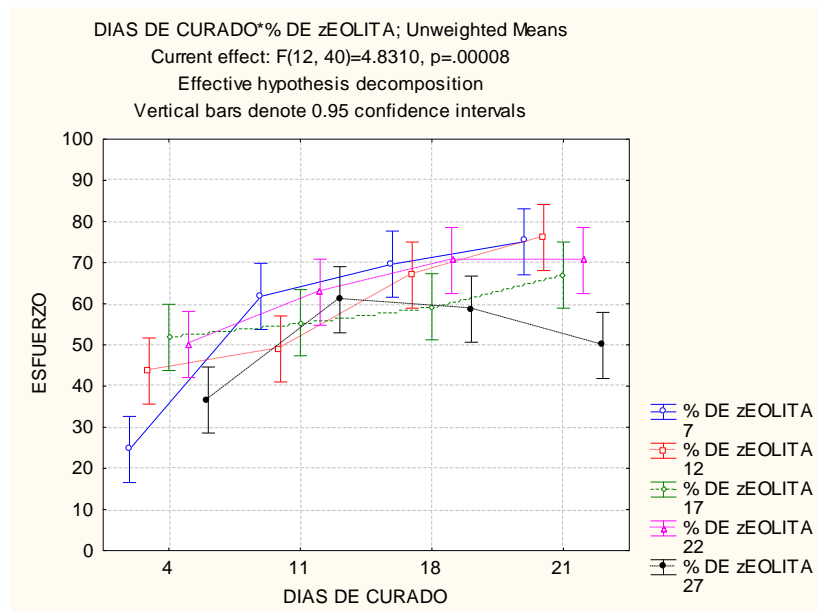


FIGURA 4.42 GRAFICOS DE INTERVALOS DE CONFIANZA

PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA I.

El análisis estadístico también se realizó en base a los datos con 0% de zeolita y especímenes conformadas con pasta de cemento tipo IV para lo cual se quiere corroborar si el porcentaje obtenido anterior es el mejor al ser comparado con estos especímenes utilizando como control a cada uno de las probetas mencionadas (0% de Zeolita y pasta de Cemento Tipo IV).

dias de curado*% de Zeolita; Unweighted Means (Spreadsheet13)						
Current effect: F(15, 48)=15.801, p=.00000						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	días de curado	% de Zeolita	esfuerzo Mean	esfuerzo Std.Err	esfuerzo -95.00%	esfuerzo +95.00%
1	7	0	77.81333	2.401349	72.98510	82.64157
2	7	5	65.18233	2.401349	60.35410	70.01057
3	7	10	61.28000	2.401349	56.45177	66.10823
4	7	15	56.33133	2.401349	51.50310	61.15957
5	7	20	53.47800	2.401349	48.64977	58.30623
6	7	25	60.71000	2.401349	55.88177	65.53823
7	14	0	84.36333	2.401349	79.53510	89.19157
8	14	5	58.79933	2.401349	53.97110	63.62757
9	14	10	59.85667	2.401349	55.02843	64.68490
10	14	15	64.12900	2.401349	59.30077	68.95723
11	14	20	60.27467	2.401349	55.44643	65.10290
12	14	25	69.68333	2.401349	64.85510	74.51157
13	21	0	64.59333	2.401349	59.76510	69.42157
14	21	5	75.35600	2.401349	70.52777	80.18423
15	21	10	62.90700	2.401349	58.07877	67.73523
16	21	15	64.69900	2.401349	59.87077	69.52723
17	21	20	74.05800	2.401349	69.22977	78.88623
18	21	25	53.58333	2.401349	48.75510	58.41157
19	28	0	74.12333	2.401349	69.29510	78.95157
20	28	5	80.78100	2.401349	75.95277	85.60923
21	28	10	59.00100	2.401349	54.17277	63.82923
22	28	15	66.12500	2.401349	61.29677	70.95323
23	28	20	87.33267	2.401349	82.50443	92.16090
24	28	25	48.10000	2.401349	43.27177	52.92823

FIGURA 4.43 GRAFICOS DE MEDIAS ARITMETICAS DE TODOS LAS MUESTRA ANALIZADAS.

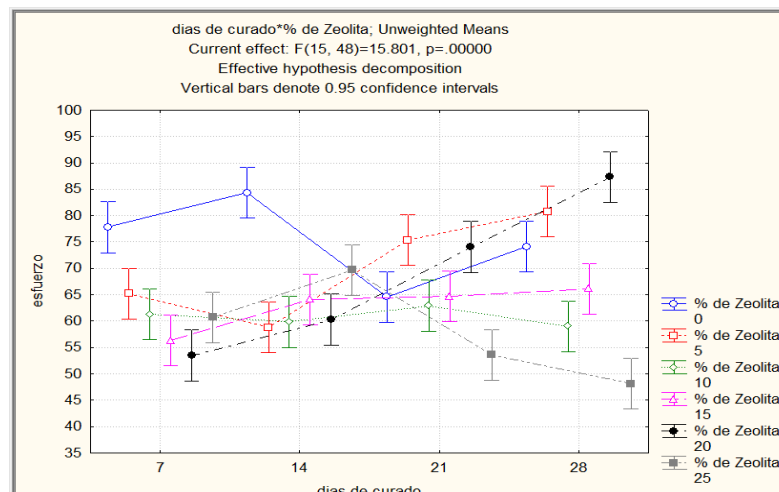


FIGURA 4.44 GRAFICOS DE INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES DIAS DE CURADO CON TODOS LOS PORCENTAJES ZEOLITA I.

Dunnnett test; variable esfuerzo (Spreadsheet13)			
Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control)			
Error: Between MS = 17.299, df = 48.000			
Cell No.	días de curado	% de Zeolita	{1} 77.813
1	7	0	
2	7	5	0.999970
3	7	10	0.999970
4	7	15	0.999970
5	7	20	0.999970
6	7	25	0.999970
7	14	0	0.247556
8	14	5	0.999970
9	14	10	0.999970
10	14	15	0.999970
11	14	20	0.999970
12	14	25	0.999970
13	21	0	0.999970
14	21	5	0.995983
15	21	10	0.999970
16	21	15	0.999970
17	21	20	0.999108
18	21	25	0.999970
19	28	0	0.999036
20	28	5	0.730598
21	28	10	0.999970
22	28	15	0.999970
23	28	20	0.046934
24	28	25	0.999970

FIGURA 4.45 DATOS ESTADISTICOS DE SIGNIFICANCIA CON EL ANALISIS DUNNETT

Como nos damos cuenta en las figuras mostradas arriba la pasta de cemento con 20% de Zeolita supera significativamente de acuerdo a su aumento progresivo de la resistencia a la compresión en comparación con la pasta sin adición de zeolita.

Con el análisis Dunnnett se observa que para 20% a los 28 días de curado; existe significancia entre la medias por tal motivo se rechaza

la hipótesis nula y se acepta la alterna; es decir el esfuerzo a la compresión de este porcentaje es mayor al control (0% de Zeolita).

### ANALISIS CON CEMENTO PUZOLANICO (TIPO IV).

El análisis se realizo de igual manera con todos los porcentajes en comparación con la pasta de cemento tipo IV; dando como resultados los valores que se muestran en las figuras siguientes:

DIAS DE CURADO*% DE ZEOLITA: LS Means (Spreadsheet3)							
Current effect: F(15, 48)=14.918, p= 00000							
Effective hypothesis decomposition							
Cell No.	DIAS DE CURADO	% DE ZEOLITA	ESFUERZO DE RUPTURA Mean	ESFUERZO DE RUPTURA Std. Err.	ESFUERZO DE RUPTURA -95.00%	ESFUERZO DE RUPTURA +95.00%	N
1	7	4	47.75667	2.324875	43.08219	52.43114	3
2	7	5	65.18233	2.324875	60.50786	69.85681	3
3	7	10	61.28000	2.324875	56.60552	65.95448	3
4	7	15	56.33133	2.324875	51.65686	61.00581	3
5	7	20	53.47800	2.324875	48.80352	58.15248	3
6	7	25	60.71000	2.324875	56.03552	65.38448	3
7	14	4	49.95000	2.324875	45.27552	54.62448	3
8	14	5	58.79933	2.324875	54.12486	63.47381	3
9	14	10	59.85667	2.324875	55.18219	64.53114	3
10	14	15	64.12900	2.324875	59.45452	68.80348	3
11	14	20	60.27467	2.324875	55.60019	64.94914	3
12	14	25	69.68333	2.324875	65.00886	74.35781	3
13	21	4	42.72667	2.324875	38.05219	47.40114	3
14	21	5	75.35600	2.324875	70.68152	80.03048	3
15	21	10	62.90700	2.324875	58.23252	67.58148	3
16	21	15	64.69900	2.324875	60.02452	69.37348	3
17	21	20	74.05800	2.324875	69.38352	78.73248	3
18	21	25	53.58333	2.324875	48.90886	58.25781	3
19	28	4	41.97333	2.324875	37.29886	46.64781	3
20	28	5	80.78100	2.324875	76.10652	85.45548	3
21	28	10	59.00100	2.324875	54.32652	63.67548	3
22	28	15	66.12500	2.324875	61.45052	70.79948	3
23	28	20	87.33267	2.324875	82.65819	92.00714	3
24	28	25	48.10000	2.324875	43.42552	52.77448	3

FIGURA 4.46 GRAFICOS DE MEDIAS ARITMETICAS DE TODOS LAS MUESTRAS ANALIZADAS

La figura 4.46 nos muestra las medias aritméticas de todas los especímenes a los cuales se aplico el ensayo a la compresión envase a los cuales se realizará la respectiva comparación múltiple con un control Dunnett.

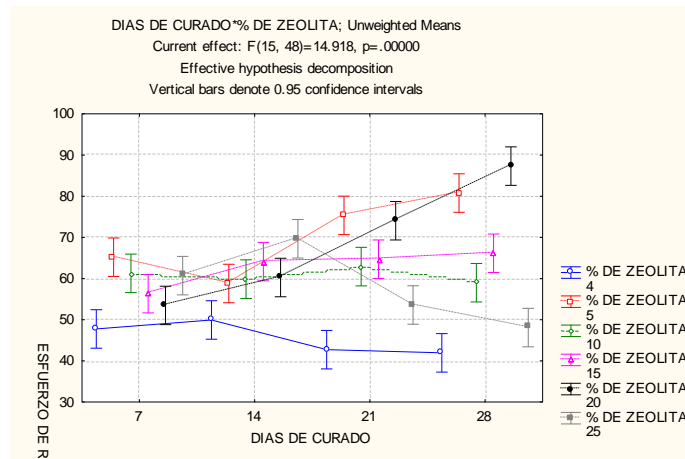


FIGURA 4.47 GRAFICOS DE INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES DIAS DE CURADO CON TODOS LOS PORCENTAJES ZEOLITA I.



Dunnnett test; variable esfuerzo (Spreadsheet13)			
Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control)			
Error: Between MS = 17.299, df = 48.000			
Cell No.	días de curado	% de Zeolita	{1}
			77.813
1	7	0	
2	7	5	0.999970
3	7	10	0.999970
4	7	15	0.999970
5	7	20	0.999970
6	7	25	0.999970
7	14	0	0.247556
8	14	5	0.999970
9	14	10	0.999970
10	14	15	0.999970
11	14	20	0.999970
12	14	25	0.999970
13	21	0	0.999970
14	21	5	0.995983
15	21	10	0.999970
16	21	15	0.999970
17	21	20	0.999108
18	21	25	0.999970
19	28	0	0.999036
20	28	5	0.730598
21	28	10	0.999970
22	28	15	0.999970
23	28	20	0.046934
24	28	25	0.999970

FIGURA 4.48 DATOS ESTADISTICOS DE SIGNIFICANCIA CON EL ANALISIS DUNNETT

Como observamos en la figura 4.48 el mejor porcentaje por reiterada vez es la pasta de cemento con 20% de adición de Zeolita. Superando significativamente a los demás porcentaje incluyendo al control (pasta de cemento Tipo IV).

### 4.3. Identificación de Cambios de Propiedad

En los diferentes días que se realizó el proceso de ruptura se observaron que los especímenes tenían cambios de la propiedad mecánica por cuanto a diferentes días de curado la fuerza de ruptura aumentaba presentando así un cambio en la propiedad mecánica de oponer resistencia a las fuerzas de compresión.

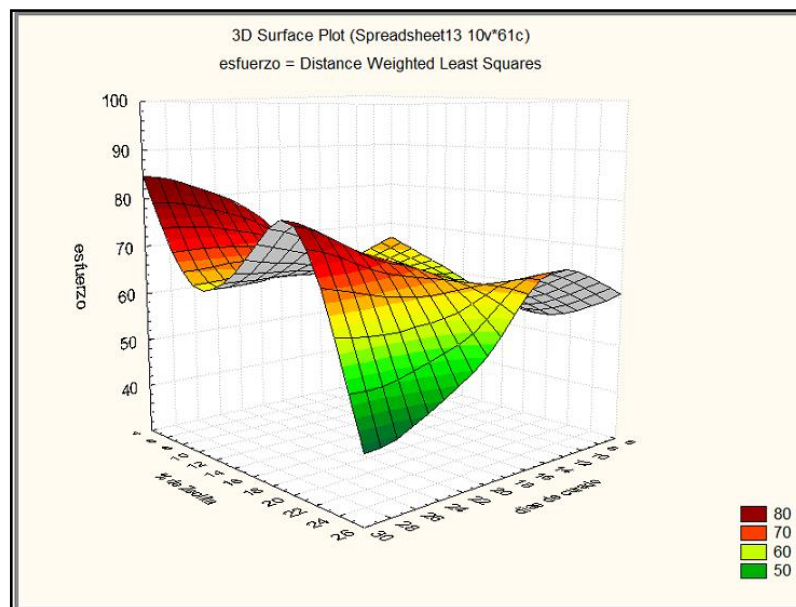


FIGURA 4.49. CURVA DE SUPERFICIE DEL COMPORTAMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO PARA LOS DIFERENTES

DIAS DE CURADO

Lo antes mencionado de acuerdo a la figura 4.39, observamos que al aumentar los días de curado el esfuerzo a la compresión aumenta, obteniendo un mayor valor a los 28 días; que por reiterada ocasión la adición del 20% de Zeolita a los 28 días de curado es mayor a la compresión como podemos ver en el pico de la superficie.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 5.1. Conclusiones

1. El principio de este análisis es determinar el mejor porcentaje de Zeolita I que aumente su resistencia a la Compresión a fin de diseñar una mezcla que tenga una amplia variedad de la propiedad mecánica; siendo esta una medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar los edificios y otras estructuras, y mejorar la durabilidad para los trabajos futuros que serán expuestos.
2. Para un óptimo proceso de mezclado; un aumento significativo de la relación agua-cemento produce una disminución en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento debido que

este factor generara mas porosidad en el espécimen, ocasionando así un espécimen muy frágil.

3. La implementación del algoritmo utilizado es una herramienta muy importante; el cual modela el comportamiento de la pasta de Cemento en base a los diferentes conocimientos obtenidos en teoría de la inelasticidad y mecánica del continuo, analizando principalmente al material en sus zonas elásticas y plásticas.
4. El comportamiento de la pasta de cemento al ser modelado en Matlab depende de las variables “**m**” y “**a**” que son constantes del material y van a variar por cuanto; la curva teórica deberá ser ajustada a la curva experimental a fin de ir acorde con el óptimo comportamiento del material en su zona elástica y plástica.
5. La valores de **m** y **a** fueron hallados en función de los valores promedios de los datos de las muestras para cada día de curado como de porcentaje; que incluyen a los datos de esfuerzo ultimo que en nuestro caso es tomado el de ruptura, la deformación y el modelo de Young del material.
6. De acuerdo a las curvas Esfuerzo-Deformación la parte lineal representa el comportamiento elástico que tiene el material antes de llegar a la ruptura, donde cuya pendiente de la recta representa al modulo de Young (E).

7. Las curvas Esfuerzo-Deformación entre la teórica y la experimental demostraron errores relativos generales de 18.3 y 18.1% para la pasta de cemento con 5 y 7.5% adición de zeolita respectivamente. Demostrando así que el algoritmo implementado para modelar el comportamiento de la pasta de cemento tiene un porcentaje de respuesta de 81.8 y 81.9% para las muestras con 5 y 7.5% de zeolita respectivamente.
8. A nivel de propiedad mecánica; en la figura 9, observamos que a los 28 días de curado los diferentes porcentajes de Zeolita I han aumentado su esfuerzo de compresión en relación a los primeros días de curado.
9. En el análisis individual el porcentaje que presentó un óptimo esfuerzo de compresión fue al 5% de zeolita I a los 28 días de curado, superando a los demás porcentajes como es notorio a los 21 y 25 días de curado presentan similitud en sus valores de esfuerzo de compresión; por ende el porcentaje de 7.5% de zeolita necesita más días de curado para aumentar su resistencia de compresión y obtener la madurez que presentó el 5% de Zeolita.
10. En base al análisis grupal; la pasta de Cemento conforme pasan los días de curado tiene mayor esfuerzo de compresión, el

análisis a nivel estadístico demostró que 20% de zeolita I es el mejor porcentaje en relación a los demás días, detallando que este porcentaje tiene un intervalo de confianza pequeño el cual permite tener mayor exactitud en sus datos utilizados.

11. Es importante recalcar que el 20% de zeolita a los 28 días de curado en comparación con los 7 días de curado aumento esfuerzo de compresión en un 63.3% de su esfuerzo inicial. Mientras que los otros valores demostraron solo un aumento de 23.9%; 3.72%; 17.4% y 20.8% con 5, 10, 15 y 20% de adición de Zeolita respectivamente; especificando así que la reacción de adición de Zeolita I aun no ha reaccionado en este día de curado.
12. Se corrobora el análisis antes mencionado al realizar la comparación múltiple con un control; donde cuyo segundo control fue la pasta de cemento tipo I sin adición de Zeolita y el tercer control fue en comparación con las muestras de la pasta de cemento tipo IV (cemento puzolánico). Efectivamente el 20% de adición de Zeolita es mejor que estos dos controles realizados y notando nuevamente un aumento progresivo de su resistencia a la compresión.
13. Con respecto a los datos de validación se corrobora que la adición de zeolita a la mezcla produce un aumento significativo

del esfuerzo de compresión en un rango de adición de 20 a 22.5% con curado al aire. Siendo este análisis muy aceptable por cuanto su nivel de confiabilidad es de 95%.

14. Con la grafica de superficie confirmamos el análisis estadístico grupal, debido al pico muy pronunciado que tiene la grafica; definiendo así el aumento del esfuerzo de compresión para 20% de Zeolita I.
15. Los niveles de error de la experimentación realizada son inferiores al 5%, concluyendo así que los datos tienen un nivel de confianza del 95% que permite cumplir a cabalidad el objetivo del proyecto; respetando todos los parámetros y objetivos mencionados como fue la implementación del algoritmo que basándose en los datos experimentales de ruptura, modeló de una manera aceptable el comportamiento de la pasta de cemento de acuerdo a Standard Test “Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in(C 109/C 109M-02)”
16. Finalmente la realización de este proyecto nos ha permitido conocer cada una de la fases que experimenta la pasta de cemento antes de ser aplicada a cualquier trabajo que vaya a necesitar un elevado esfuerzo de compresión y así obtener un



buen producto para trabajar, en condiciones donde se apliquen grandes cargas

## **5.2. Recomendaciones.**

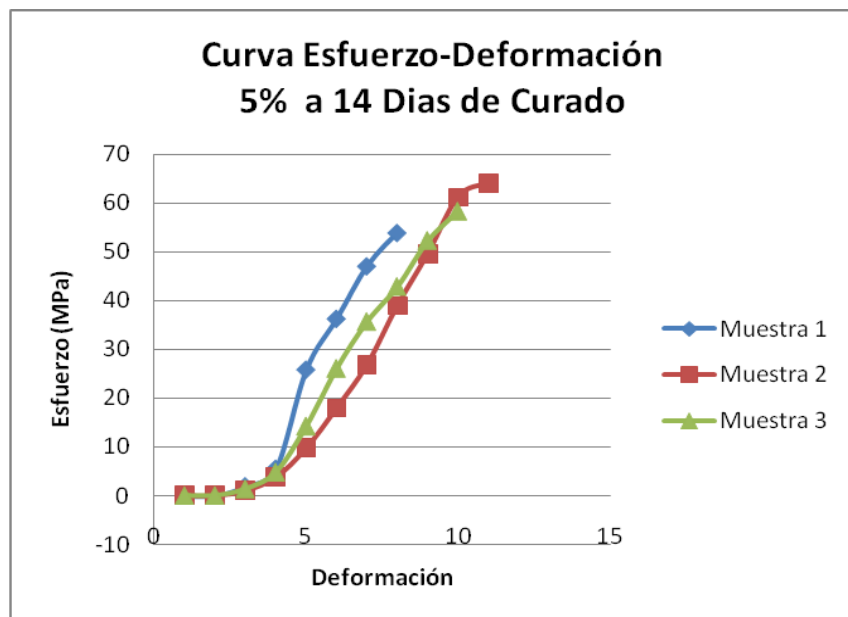
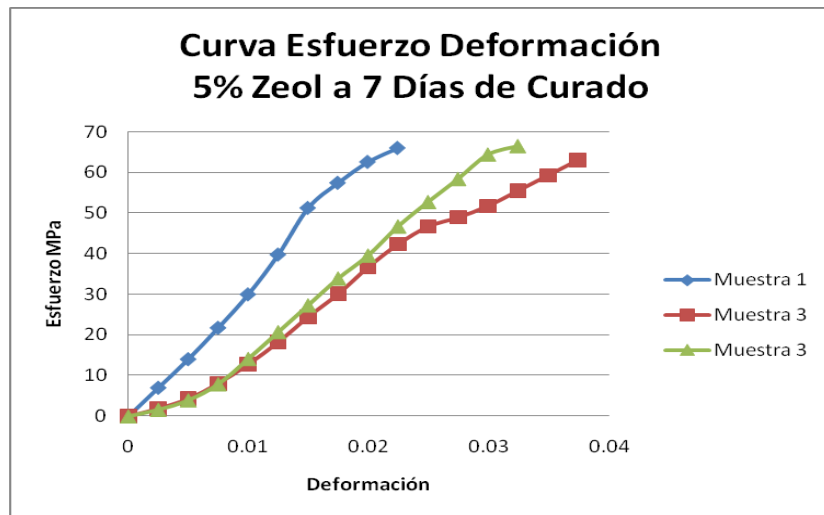
1. El investigador en el proceso de molienda deberá tener como objetivo obtener un 70% en peso del aditivo a utilizar en la mezcla, este aditivo deberá tener un tamaño de partícula igual a 45micras para mantener similitud entre el cemento y la puzolana.
2. Mantener constante la relación de agua-cemento, para conservar una mezcla homogénea y evitar con gran conglomerado de burbujas.
3. En el mezclado y preparación de probetas de debe eliminar todas la burbujas que se formen en el desarrollo de este proceso; a fin de disminuir la porosidad el espécimen.
4. Para la eliminación de burbujas en la mezcla se deberá utilizar un apisonador de acuerdo a lo establecido en la Norma ASTM C-109. Este proceso se realiza con movimientos perpendiculares al molde y en todas las caras del espécimen y evitar así un espécimen frágil.

5. La máquina de ensayos de ruptura debe ser bien calibrada al igual que el marcador de delta longitud, es importante *encerar* la máquina para no mantener una carga inicial que reduzca la fuerza de ruptura apropiada del espécimen.
6. Los discos que aplican la carga a los especímenes deben estar en ángulo recto con la cara de cubo.
7. Debe eliminarse las curvaturas o rebabas del espécimen a fin de obtener una buena aplicación de la fuerza de compresión.
8. Cubrir la muestra con una franela para disminuir el riesgo al operador de ser golpeado con los pedazos que se producen en la ruptura.
9. Analizar estadísticamente los datos con un nivel de confiabilidad dentro del 95%. Para el análisis mencionado arriba se debe establecer una hipótesis muy aceptable a fin de cumplir con el objetivo del proyecto.

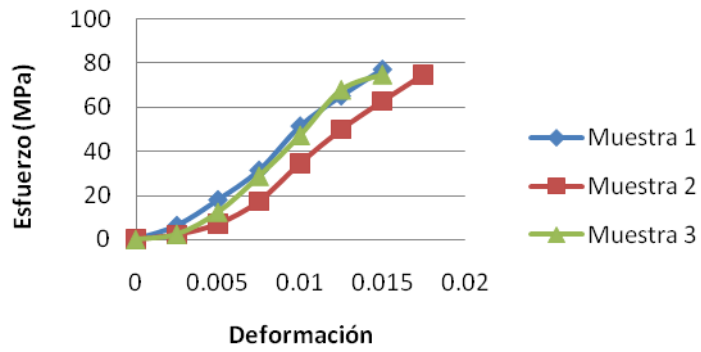
# APENDICE

## GRAFICAS DE ESFUERZO DEFORMACION DE CADA MUESTRA UTILIZADA EN LA EXPERIMENTACION

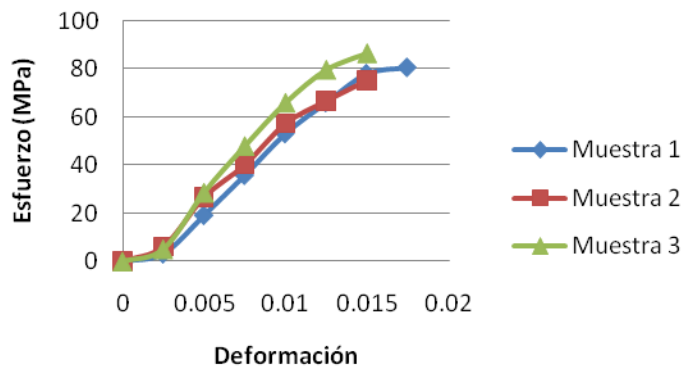
### Datos de Calibración(5%)



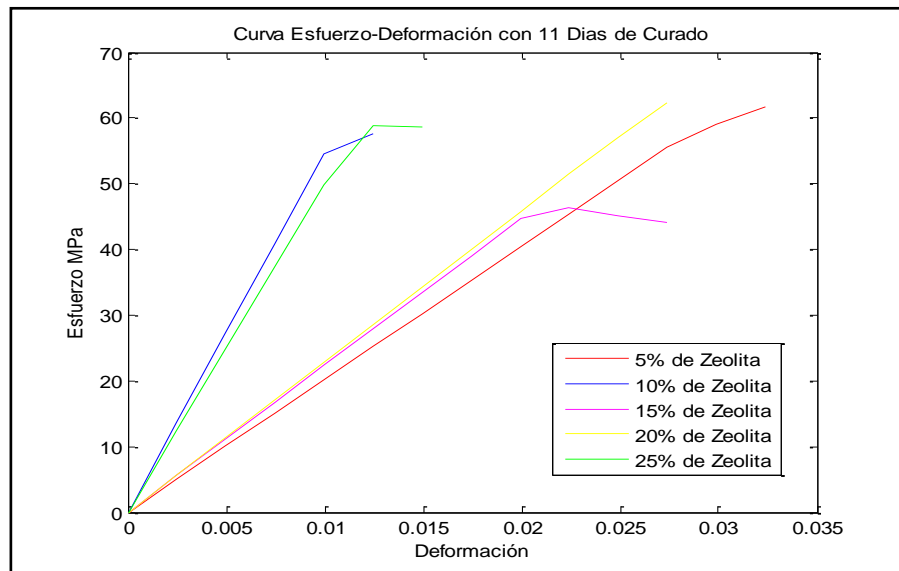
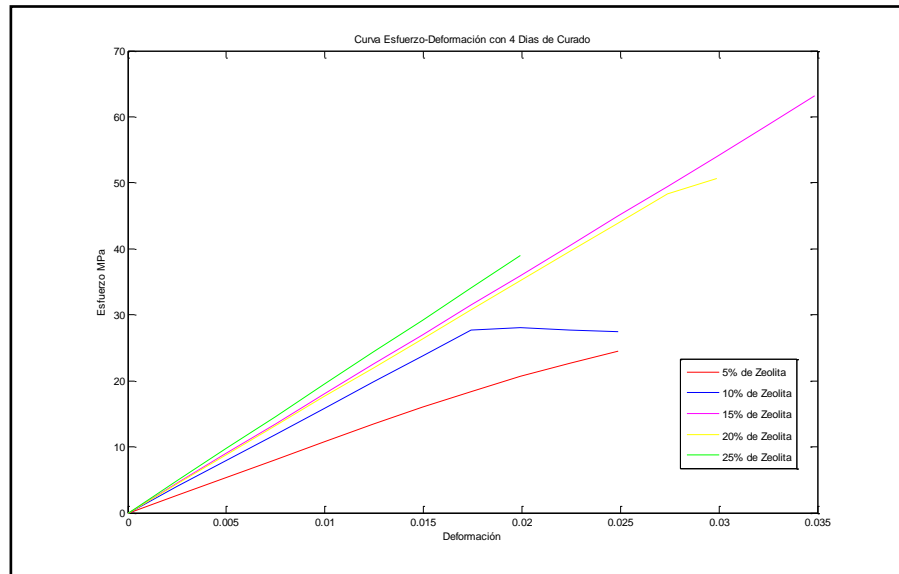
### Curva Esfuerzo-Deformación 5% a 21 Días de Curado

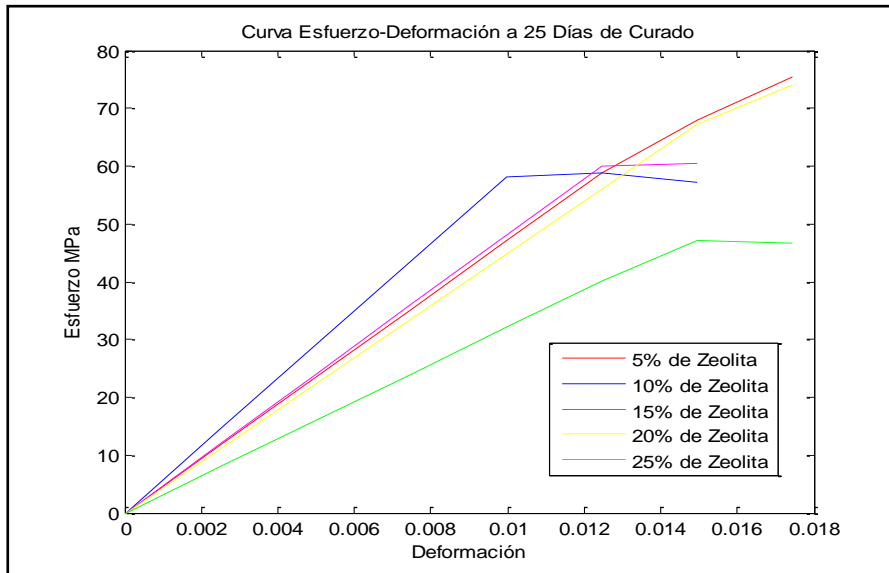
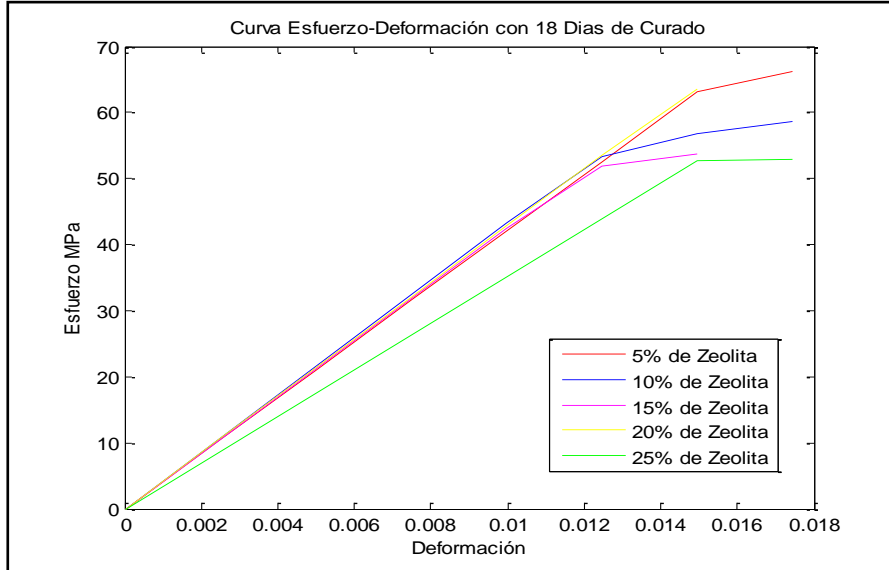


### Curva Esfuerzo-Deformación 5% a 28 Días de Curado.



## Curvas de Esfuerzo-Deformación para Datos de Validación.





**Tabla con Valores Experimentales del  
Porcentaje de Calibracion y Validación.**

DIAS DE CURADO	DIAS DE CURADO	E	$\sigma_Y$	m	a
5.0%	7	1944.89	58.11	0.005	0.086
	14	3029.91	45.27	0.005	1.9
	21	4447.439	44.13	0.01	1.9
	28	5903.17	58.80	0.035	1
7.5%	4	1084.3	13.50	0.01	1.5
	11	2026.5	55.51	0.01	0.3
	18	4222	63.08	0.099	0.4
	25	4722.5	58.80	0.01	0.8
10.0%	7	1973.55	55.14	0.002	0,4
	14	3871.51	59.00	0.2	0,5
	21	5470.58	60.00	0.002	0,11
	28	4236.19	50.00	0.005	0,45
12.5%	4	1590.41	28.28	0.0017	0.1
	11	5470.61	55.51	0.00975	0.154
	18	4331.58	51.01	0.1	0.321
	25	5835.29	59.27	0.0022	0.284
15.0%	7	2147.91	34.81	0.001224	0.69
	14	5923.11	60.00	0.09	0.65
	21	4914.88	62.41	0.01524	0.1
	28	4802.89	61.00	0.00354	0.45
17.5%	4	1805.88	45.86	0.00029	0.192
	11	2241.89	45.56	0.0023	0.262
	18	4265.38	50.45	0.0076	0.175
	25	4825.12	61.28	0.00136	0.093
20.0%	7	2263.96	51.49	0.0249	0.11
	14	2300	50.00	0.024	1.1
	21	4068.98	57.00	0.003	0.5879

	28	5616.51	81.00	0.03	0.2697
22.5%	4	1765	50.00	0.007	0,05
	11	2300	53.87	0.024	1,1
	18	4300	60.00	0.024	0,8
	25	4500	70.00	0.024	0.3235
25.0%	7	4463.8	56.00	0.01	0.355
	14	4149.04	62.00	0.01	0.46
	21	3902.96	47.00	0.01	0.45
	28	3902196	47.00	0.01	0.014942
27.5%	4	1956.15	38.00	0.00122	0.9
	11	5007.46	58.00	0.00265	0.06
	18	3529.07	54.00	0.00079	0.09
	25	3223.09	46.00	0.00191	0.09

**DATOS EXPERIMENTALES DEL CONTROL (PASTA DE CEMENTO TIPO I SIN ADICION DE ZEOLITA)**

<b>CEMENTO TIPO I: ESFUERZO ÚLTIMO</b>					
<b>CURADO AL AIRE</b>	<b>MODELO</b>	<b>DÍAS</b>	<b>PROBETA 1</b>	<b>PROBETA 2</b>	<b>PROBETA 3</b>
		7	76.96	76.96	79.52
		14	83.80	84.65	84.65
		21	61.27	60.89	71.64
		28	74.39	73.54	74.39
	<b>VALIDACIÓN</b>	<b>DÍAS</b>	<b>PROBETA 1</b>	<b>PROBETA 2</b>	<b>PROBETA 3</b>
		4	67.55	68.41	76.96
		11	82.94	82.94	84.65
		18	83.80	97.48	82.94
25		88.08	81.23	83.80	

**DATOS EXPERIMENTALES DEL CONTROL (PASTA DE CEMENTO TIPO IV SIN ADICION DE ZEOLITA)**



<b>CEMENTO TIPO IV: ESFUERZO ÚLTIMO</b>					
<b>CURADO AL AIRE</b>	<b>MODELO</b>	<b>DÍAS</b>	<b>PROBETA 1</b>	<b>PROBETA 2</b>	<b>PROBETA 3</b>
		7	49.96	45.24	48.07
		14	50.90	49.96	49.01
		21	45.24	40.53	42.42
		28			
	<b>VALIDACIÓN</b>	<b>DÍAS</b>	<b>PROBETA 1</b>	<b>PROBETA 2</b>	<b>PROBETA 3</b>
		4	45.24	39.59	38.65
		11	42.42	46.19	42.23
		18	40.53	44.30	36.76
		25	46.75	37.33	44.30

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Nilson, A. *“Diseño de Estructura de Concreto”*, Mc Graw Hill,  
Junio, 2006.
- [2] Servin, J. *“Metalurgia de Minerales No  
Metálicos”*, [www.monografias.com](http://www.monografias.com) Marzo, 2008.
- [3] Jiménez, H. *“Tecnología del Concreto”*. Universidad Nacional de  
Ingeniería del Perú”. [www.fic.uni.edu.pe](http://www.fic.uni.edu.pe). Febrero, 2008.
- [4] Gutiérrez, M. *“Zeolitas Características y Propiedades”*, Instituto  
Nacional de Investigaciones Nucleares , Marzo, 2008.
- [5] \_\_\_\_\_, *“Que es una Zeolita”*,  
[www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx](http://www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx),  
Febrero, 2008.
- [6] Gutiérrez, M. *“Zeolitas Características y Propiedades”*, Instituto  
Nacional de Investigaciones Nucleares , Marzo, 2008.
- [7] ... *“Qué es una Zeolita”*, [www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx](http://www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx),  
Febrero, 2008.

- [8] ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, Mayo 2008.
- [9] Galbiati, J. "Regresión Lineal Simple",  
[http://www.jorgegalbiati.cl/enero\\_07/Regresion.pdf](http://www.jorgegalbiati.cl/enero_07/Regresion.pdf),  
Mayo,2008
- [10] Robles, D. "Regresión Múltiple",  
<http://www.monografias.com/trabajos30/regresion-multiple/regresion-multiple.shtml>, Junio 2008.
- [11] Zelic,J.Rosic,D.Krstuloviç,R."A mathematical model for prediction of compressive strength in cement-silica fume blends",  
www.sciencedirect.com, Mayo 2008.
- [12] Nassif,H.Najm,H.Suksawang,N."Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC",  
www.sciencedirect.com, Mayo 2008.
- [13] Petkova,V.Ivanov,Y."The use of mathematical modelling in the composition of a composite material", www.sciencedirect.com,  
Mayo 2008.

[14] Golaratnam, V. Gerstle, W. Darwin, D."Finite Element Analysis of fracture in concrete structures",ACI COMMITTEE 446, Junio 2008

[15] ASTM Standarts (2002).C-305, Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual Book of ASTM Standart , Vol 04.01