

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la**  
**Producción**

“Simulación del Comportamiento del Cemento Portland Tipo I con la  
Adición de Zeolita 2 al 25% y Curado en Agua”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Samuel Isaac Ochoa Vera

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2008

## AGRADECIMIENTO

A todos los profesores que  
hicieron posible este  
proyecto y en especial al  
Ing. Juan Carlos Pindo, por  
su invaluable ayuda y a mi  
familia que siempre  
estuvieron conmigo en  
todo este camino.

## DEDICATORIA

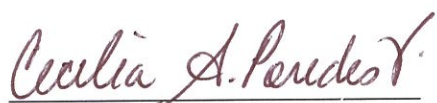
MIS PADRES

A MIS HERMANOS

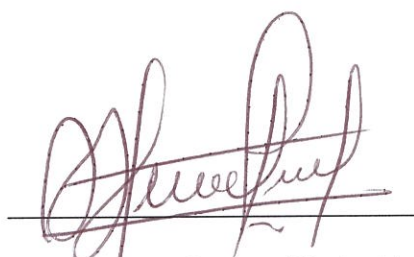
A MI SOBRINA

A MIS AMIGOS

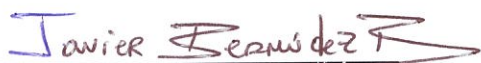
## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



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



Ing. Juan Carlos Pindo M.  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Javier Bermudez R.  
VOCAL



Ing. Mauricio Cornejo M.  
VOCAL

## DECLARACION EXPRESA

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



Samuel Ochoa Vera

## RESUMEN

El objetivo del presente estudio, es observar los cambios en la resistencia uniaxial a la compresión del cemento Portland Tipo I al adicionar Zeolita 2 al 25% con curado en agua.

En este estudio, se siguió el protocolo experimental basado en la norma ASTM C 109, que consiste en la molienda de la roca zeolita para obtener un agregado fino, con lo que se prepara las probetas de pasta de cemento (Cemento Portland Tipo I + Zeolita 2 (25%) + Agua) y luego se realiza los ensayos de compresión.

Se realizó los ensayos destructivos (compresión) a las probetas de pasta de cemento a los 7, 14, 21 y 28 días de curado en agua (inmersión) para analizar el comportamiento del esfuerzo de compresión.

Se comparó gráficamente, los datos obtenidos experimentalmente de la resistencia a la compresión de las probetas testigos de cemento Tipo I y Tipo IV sin aditivo.

Posteriormente, se comparó los datos entre los integrantes del grupo, con el fin de notar que porcentaje de zeolita 2 adicionada, proporciona una mayor resistencia a la compresión.

Con los datos experimentales, se realizó la simulación del comportamiento de la pasta de cemento con adición de zeolita 2 al 25% en MATLAB, basado en un modelo matemático para materiales elasto-plástico.

Luego se comparó el gráfico que se obtuvo experimentalmente con el teórico y se determinó el porcentaje de error en la simulación del comportamiento de las probetas de pasta de cemento.

Para finalizar, se analizó los datos estadísticamente con el programa STATISTICA y se efectuó un análisis de varianza para observar el efecto del % de zeolita 2 adicionado, del tiempo de curado en agua y de la interacción entre ambos, en las probetas de pasta de cemento.

Al terminar este estudio no se observó un aumento en la resistencia uniaxial a la compresión del cemento Portland Tipo I al añadir 25% de zeolita 2 y curado en agua.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	2
1.1. Planteamiento del problema .....	2
1.1.1. Justificación.....	3
1.2. Planteamiento de hipótesis de investigación.....	3
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4



1.4. Metodología .....	4
1.5. Estructura de la tesis.....	7

## CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Cemento Portland Tipo I.....	9
2.2. Zeolita 2. ....	13
2.3. Curado en agua.....	20
2.4. El Estado del Arte de la Simulación del Comportamiento de Cemento Portland Tipo I .....	21

## CAPÍTULO 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1. Materiales.....	25
3.2. Equipos y herramientas experimentales .....	26
3.3. Diseño del modelo del experimento.....	27
3.4. Métodos y Herramientas para el análisis.....	42

3.4.1. Modelo Matemático en MATLAB.....43

3.4.2. Procesamiento Estadístico de los datos en STATISTICA.....51

## CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....53

4.1. Tabulación de datos y resultados.....53

4.2. Identificación de cambios de propiedades.....57

4.3. Análisis de resultados.....62

4.4. Interpretación de la simulación del modelo en MATLAB.....71

4.5. Determinación de errores.....74

## CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....75

5.1. Conclusiones.....75

5.2. Recomendaciones.....76

## APÉNDICE

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

CaO	Oxido de calcio (Cal)
SiO <sub>2</sub>	Oxido de silicio (Sílice)
SiO <sub>4</sub>	Tetra oxido de silicio
°C	Grados centígrados
Ft	Pies
a/c	Relación agua con cemento
mm <sup>2</sup>	Milímetros cuadrados
in	Pulgadas
µm	Micrómetro
gr	Gramos
Mpa	Mega pascales
Fig.	Figura
F	Valor estadístico de contraste en el ANOVA y otras pruebas de comparación de varianzas
F <sub>cal</sub>	Estadístico F calculado
F <sub>crit</sub>	Estadístico F crítico
W	Valor estadístico que contrasta si una muestra aleatoria procede de una distribución específicamente normal
W <sub>cal</sub>	Valor estadístico W calculado
W <sub>tab</sub>	Valor estadístico W tabulado
ASTM	American Steel Testing Manufacture
E	Módulo de elasticidad
σ <sub>y0</sub>	Esfuerzo de fluencia inicial
σ <sub>yc</sub>	Esfuerzo de compresión
ε <sup>p</sup>	Deformación en la región plástica
ε <sup>e</sup>	Deformación en la región elástica
$\dot{\epsilon}$	Tasa de deformación
$\frac{d\epsilon}{dt}$	Sentido de la tasa de deformación
H'	Módulo de plasticidad
t	Tiempo
Δε	Delta de deformación
a	Constante
m	Constante
E <sub>prom</sub>	Módulo de elasticidad promedio
σ <sub>n+1</sub> <sup>tr</sup>	Esfuerzo de compresión predictor
de	Delta de deformación
def	Deformación máxima
E <sub>t</sub>	Módulo de elasticidad teórico
E <sub>e</sub>	Módulo de elasticidad experimental

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1.	Metodología.....	5
Figura 2.1.	Comparación de resistencias muestra / patrón.....	23
Figura 3.1.	Representación del protocolo experimental.....	29
Figura 3.2.	Representación del proceso de molienda.....	30
Figura 3.3.	Reducción manual del tamaño de la zeolita 2.....	31
Figura 3.4.	Alimentación de zeolita 2 a la trituradora de mandíbula.....	32
Figura 3.5.	Ingreso de zeolita 2 a la trituradora de rodillo.....	33
Figura 3.6.	Tamaño de la zeolita después de la trituradora de rodillos.....	33
Figura 3.7.	Resultado del primer tamizado.....	34
Figura 3.8.	Tamaño de zeolita 2 obtenido en el molino de disco.....	35
Figura 3.9.	Alimentación de zeolita 2 a la trituradora de bolas.....	37
Figura 3.10.	Proceso del tercer tamizado.....	38
Figura 3.11.	Representación del proceso de preparación de las probetas.....	38
Figura 3.12.	Probetas cubiertas de plásticos.....	40
Figura 3.13.	Representación del proceso de preparación de ensayos destructivos.....	41
Figura 3.14.	Maquinas para ensayos de compresión.....	42
Figura 3.15.	Representación del proceso de análisis de los datos.....	43
Figura 3.16.	Diagrama del algoritmo return mapping.....	51
Figura 4.1.	Gráfico esfuerzo vs deformación.....	55
Figura 4.2.	Gráfico del módulo de elasticidad.....	56
Figura 4.3.	Gráfico esfuerzo vs deformación a los 7 días de curado en agua.....	59
Figura 4.4.	Gráfico esfuerzo vs días de curado según el % de Zeolita 2 en las probetas.....	61
Figura 4.5.	Histograma de $E_{prom}$ para pastas de cemento con una concentración de 25% de zeolita 2.....	64
Figura 4.6.	Módulo de elasticidad vs. Días de curado.....	66
Figura 4.7.	Gráfica esfuerzo último vs. % zeolita 2.....	69
Figura 4.8.	Esfuerzo último vs. Días de curado.....	70
Figura 4.9.	Representación de los datos necesarios para la simulación.....	72
Figura 4.10.	Gráfico esfuerzo vs deformación 7 días de inmersión.....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Clasificación de las Zeolitas.....	18
Tabla 2.	Resistencias a la compresión simple.....	22
Tabla 3.	Variaciones permisibles en los modelos de las probeta.....	27
Tabla 4.	Proceso del primer tamizado.....	34
Tabla 5.	Proceso del segundo tamizado .....	36
Tabla 6.	Datos de las probetas /séptimo día de curado en agua .....	54
Tabla 7.	Datos de esfuerzos promedios a los 7 días de inmersión.....	58
Tabla 8.	Datos de esfuerzos promedios según días de inmersión y % de zeolita 2.....	60
Tabla 9.	Datos ingresados en el software statistica.....	63
Tabla 10.	Análisis de varianza.....	65
Tabla 11.	Intervalos de confianza para cada tratamiento.....	65
Tabla 12.	Datos ingresados en el software statistica.....	67
Tabla 13.	Análisis de varianza factorial.....	68
Tabla 14.	Intervalos de confianza para cada % de zeolita 2.....	68
Tabla 15.	Intervalos de confianza para cada tratamiento.....	70
Tabla 16.	Datos para implementar el algoritmo según sus días de curado en agua.....	71

## INTRODUCCIÓN

El presente estudio trata de la “Simulación del Comportamiento del Cemento Portland Tipo I con la Adición de Zeolita 2 al 25% y Curado en Agua”, con el cual se desea encontrar diferencias significativas en el esfuerzo de compresión de la pasta de cemento (cemento Portland tipo I + Zeolita 2 al 25 %) curada en agua, con el fin de mejorar el esfuerzo de compresión en este tipo de pasta de cemento y brindar otra opción al mercado local de la construcción.

Para realizar este estudio se utilizó varias herramientas con las cuales se podrá recolectar datos, analizarlos y simularlos.

Además se compara los resultados que se obtuvo en el laboratorio experimentalmente con los datos que se obtendrá con el modelo matemático, el cual será simulado en MATLAB.

Finalmente se analizará si la adición de Zeolita 2 al 25% y curado en agua aumenta el esfuerzo de compresión del cemento Portland tipo I.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

En este capítulo se detallan el planteamiento del problema, justificación, el objetivo general, los objetivos específicos, la hipótesis de investigación, la metodología y estructura de este estudio.

### 1.1 Planteamiento del problema

En la actualidad, el mercado mundial del cemento se ha vuelto muy competitivo por eso se hace necesario la innovación constante de este material, debido a las nuevas expectativas que necesita el mercado mundial.

En nuestro país, el desarrollo del cemento no se encuentra en un nivel aceptable, ya que no se realizan investigaciones para las mejoras de las propiedades mecánicas.

Por esto, se hace necesario el presente estudio para encontrar mejores mezclas de cemento y tratamientos eficaces, para optimizar sus propiedades mecánicas

Al lograr estos adelantos se obtendría un producto nuevo para el mercado local.

### **1.1.1 Justificación**

Las necesidades actuales del mercado de mejorar las propiedades mecánicas del cemento, nos obliga a buscar nuevas alternativas como variar su composición, al mezclar componentes tradicionales como cemento y agregados junto con materia orgánica e inorgánica. Además se hace necesario variar los tratamientos que se le aplica al cemento durante su curado.

Entonces, con todos estos cambios, se trata de observar que efecto tiene en la pasta de cemento el tiempo de curado, el medio del curado y el tipo de aditivo que se le añade. Para obtener una relación entre estos parámetros con respecto al esfuerzo de compresión el cual se busca aumentar con la manipulación de estos parámetros.

### **1.2 Planteamiento de la hipótesis de investigación**

Aumentar la resistencia a la compresión en el cemento portland tipo I con la adición de Zeolita 2 al 25% y curado en agua.



### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

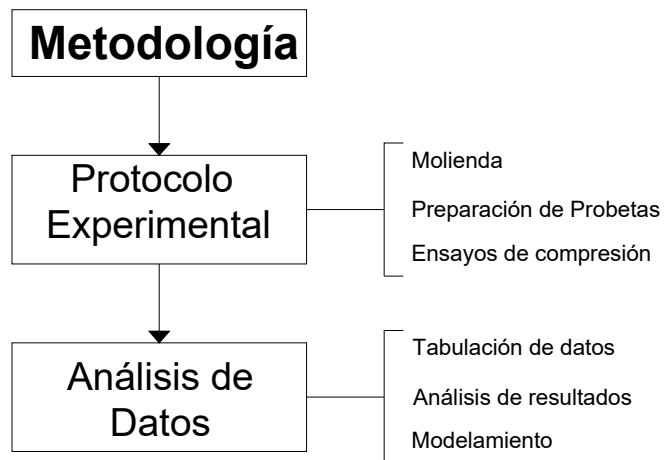
Analizar el efecto que se obtiene en el esfuerzo de compresión del cemento Portland tipo I al adicionar 25 % de zeolita 2 y curado en agua.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar el modelo de experimento.
- Realizar los ensayos con las probetas.
- Recolectar los datos de la fuerza de compresión.
- Analizar e interpretar los datos recolectados.
- Diseñar la modelación del comportamiento de la pasta de cemento.

### **1.4 Metodología**

En este estudio se utilizó la siguiente metodología, la cual está representada en la Fig. 1.1, la misma que se detalla a continuación:



**FIGURA 1.1 METODOLOGÍA**

### **Protocolo Experimental**

En este estudio se utilizó 3 replicas de pasta de cemento por cada tratamiento aplicado.

En este estudio se utilizó probetas en forma de cubos de  $50 \text{ mm}^3$  de pasta de cemento (cemento tipo I + zeolita 2 al 25% + agua).

Para realizar el estudio se aplicó a las probetas un tratamiento de curado en agua, variando su tiempo de inmersión de 7, 14, 21 y 28 días.

### **Análisis de datos**

Los resultados obtenidos en los ensayos se los analizó de dos puntos de vistas, el primero de manera matemática y el segundo de manera estadística.

Se utilizó el software STATISTICA y se trabajó con un error tipo 1 de 5%.

Se comprobó que los datos que se obtuvo en el experimento estén normalmente distribuidos.

Luego se analizó de manera individual, con el método anova one-way, para encontrar diferencias significativas en el efecto del tratamiento aplicado.

Además, se analizó de manera grupal con el método anova factorial, para encontrar diferencias significativas en el efecto del % de Zeolita tipo 2, el tratamiento aplicado y de la combinación de ambos.

Luego, se realizó una comparación gráfica con las muestras patrón que será el control para observar el aumento en el esfuerzo de compresión en este estudio.

## **1.5 Estructura de la tesis**

En el capítulo 1, denominado Generalidades, contiene el planteamiento del problema de esta tesis con su respectiva justificación, además de los objetivos tanto el general como los objetivos específicos de la tesis y por último la metodología que va a ser utilizada durante la tesis, para la obtención de los objetivos planteados.

En el capítulo 2, denominado Marco Teórico, contiene las bases teóricas del estudio que se va a realizar en la tesis, como también estudios previos servirán de guía para la realización del análisis de los resultados.

En el capítulo 3, denominado Materiales y Métodos, contiene los materiales, maquinarias y herramientas necesarias para realizar este estudio. Además contiene el protocolo experimental y la manera como se analiza y modela el comportamiento de las probetas.

En el capítulo 4, denominado Análisis de Resultados, contiene todos los datos obtenidos experimentales y también todos los resultados estadísticos los cuales serán analizados para poder inferir sobre los mismos.

En el capítulo 5, denominado Conclusiones y Recomendaciones, contiene las inferencias sobre los datos que se obtuvo durante el estudio para esta tesis. Además incluirá algunas recomendaciones necesarias para obtener mejores resultados.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detallan los fundamentos teóricos que se utilizó en este estudio y detallo investigaciones previas que se utilizó como directrices para este estudio.

### 2.1 Cemento Portland Tipo I

El cemento es un conglomerante que se presenta en forma de polvo que se obtiene al pulverizar rocas calizas y arcillas para luego quemarlas en hornos rotatorios y luego añadirle yeso para luego moldearlas.

El cemento Portland es un cemento artificial llamado así por el nombre de la isla inglesa donde se obtiene su principal componente.

El cemento Portland tipo I es de uso general y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. [1].

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

### **Elaboración**

#### 1) Materias primas

Las materias primas fundamentales son las rocas calcáreas y las arcillas. Estas que se extraen de yacimientos a cielo abierto. La otra materia prima que se utiliza es el yeso, que se incorpora en el proceso de la molienda, para regular el tiempo de fraguado [2].

#### 2) Proceso de elaboración

El proceso consiste en tomar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas intensivamente, de manera que el compuesto de la caliza ( $\text{CaO}$ ) se vincule íntima y homogéneamente con los compuestos de la arcilla. El producto resultante denominado polvo crudo ingresa al horno y egresa como clinker. El proceso se completa con la molienda conjunta del clinker y yeso, obteniendo el cemento portland.

*Trituración primaria:* Los bloques de rocas calcáreas y las arcillas provenientes de las canteras, ingresan a la trituradora primaria quedando reducidas a tamaños inferiores a los 10 cm.

*Trituración secundaria:* Ingresa el material proveniente de la trituradora primaria y sale con tamaños máximos inferiores a 2,5 cm

*Molienda:* El material resultante de la trituradora secundaria ingresa a un molino, resultando un producto impalpable, denominado polvo crudo.

*Homogeneización:* Con el fin de alcanzar la unión íntima de los compuestos, se somete al polvo crudo a un mezclado intensivo, por medio de ciclones de aire.

*Calcinación:* El polvo crudo ingresa al horno, elevándose la temperatura hasta alcanzar los 1450 °C, en donde se produce una fusión incipiente del producto resultante, denominado clínker.

*Molienda:* Finalmente, el clínker conjuntamente con el yeso se muele hasta obtener el Cemento Portland

### **Propiedades Químicas**

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

El cemento Portland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman



el 90% o más de el peso del cemento Portland y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico. Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los tipos de cemento Portland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes. Cuando el clinker (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Portland) se examina al microscopio, la mayoría de los compuestos individuales del cemento se pueden identificar y determinar sus cantidades. Sin embargo, los granos más pequeños evaden la detección visual. El diámetro promedio de una partícula de cemento típica es de aproximadamente 10 micras o una centésima de milímetro. Si todas 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.

Los dos silicatos de calcio, los cuales 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 importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del

concreto, fraguado, endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional principalmente, dependen del gel del hidrato de silicato de calcio. Es la medula del concreto.

La relación mínima Agua – Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque la velocidad determina el tiempo de fraguado y de endurecimiento.

Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

## **2.2 ZEOLITA 2**

Las zeolitas son una familia de 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 ángstrom [3].

También se dice, que una zeolita es un mineral aluminosilicato cuya estructura forma cavidades ocupadas por iones grandes y

moléculas de agua con gran libertad de movimiento que permiten el cambio iónico y la deshidratación reversible.

Las zeolitas están compuestas por aluminio, silicio, sodio, hidrógeno, y oxígeno. La estructura cristalina está basada en las tres direcciones de la red con  $\text{SiO}_4$  en forma tetraédrica con sus cuatro oxígenos compartidos con los tetraedros adyacentes.

Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas.

### **Características.**

#### **Propiedades físicas.**

Las propiedades físicas de una zeolita deben de considerarse de dos formas:

(a) primero una descripción mineralógica de la zeolita desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, hábitos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión.

(b) el segundo desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en

cuenta las características de brillantes, color, viscosidad de Brookfield, viscosidad de Hércules, área superficial, tamaño de partícula, dureza y resistencia al desgaste.

La caracterización de cualquier zeolita siempre incluye la descripción básica de sus características mineralógicas y una evaluación al cambio con el efecto con la humedad las cuales son consideradas para las aplicaciones comerciales específicas.

### **Propiedades químicas**

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

Estas propiedades están en función de la estructura del cristal de cada especie, su estructura y composición catiónica. Mumpton describe las propiedades de la siguiente manera:

*Propiedades de adsorción:* Las zeolitas cristalinas son los únicos minerales adsorbentes. Los grandes canales centrales de entrada y las cavidades de las zeolitas se llenan de moléculas de agua que forman las esferas de hidratación alrededor de dos cationes 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.

*Propiedad de intercambio de cationes:* Por procedimientos clásicos de intercambio catiónico de una zeolita se puede describir como la sustitución de los iones sodio de las zeolitas faujasitas por cationes de otros tamaños y carga.

- Esta es una de las características esenciales de las zeolitas. En efecto, así se consigue modificar considerablemente las propiedades y ajustar la zeolita a los usos más diversos.

Deshidratación – Rehidratación basado en el comportamiento de deshidratación. Las zeolitas pueden ser clasificadas como:

- a) Aquellas que muestran cambios estructurales no mayores durante la deshidratación y exhiben continúa pérdida de peso como una función de la temperatura.

b) Aquellos que sufren mayores cambios estructurales, incluyendo colapsos (derrumbes) durante la deshidratación y exhiben discontinuidades en la pérdida de peso.

Un ejemplo típico del primer tipo son las zeolitas naturales como: la clinoptilolita, la mordenita, la erionita, la chabazita y zeolitos sintéticos como lo son los zeolitos A y X los cuales son termalmente estables de 700 a 800°C la deshidratación zeolitas.

El comportamiento en la deshidratación de las zeolitas en el segundo tipo es semejante a aquel que exhibe pérdida reversible de agua a bajas temperaturas, pero un mayor cambio estructural a una elevada temperatura y los materiales pierden su carácter zeolítico.

En la siguiente tabla encontramos la clasificación de algunas zeolitas existentes, además esta tabla divide las zeolitas por grupos y nos da la formulación de cada tipo de zeolita y también el volumen de poro de cada zeolita [4]:

TABLA 1.  
CLASIFICACIÓN DE LAS ZEOLITAS

		Volumen de poro *
<i>Grupo de las analcimas</i>		
Analcimas	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Wairakita	$\text{Ca}_8 (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Leucita	$\text{K}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})$	0
<i>Grupo de las natrolitas</i>		
Natrolita	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.21
Edingtonita	$\text{Ba}_2 (\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}) 6\text{H}_2\text{O}$	0.35
Thomsonita	$\text{Na}_4\text{Ca}_8 (\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.32
<i>Grupo de las filipsitas</i>		
Filipsita	$(\text{K},\text{Na})_5 (\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{52}) 10\text{H}_2\text{O}$	0.30
Garronita	$\text{NaCa}_{2.5} (\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{52}) 14\text{H}_2\text{O}$	0.41
Gismondina	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.47
<i>Grupo de las heulanditas</i>		
Heulandita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{20}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.35
Clinoptilolita	$\text{Na}_6 (\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.34
Estilbita	$\text{Na}_2\text{Ca}_4 (\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}) 32\text{H}_2\text{O}$	0.38
<i>Grupo de las mordenitas</i>		
Mordenita	$\text{Na}_8 (\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.26
Ferrierita	$\text{Na}_{1.5}\text{Mg}_2 (\text{Al}_{5.5}\text{Si}_{30.5}\text{O}_{72}) 18\text{H}_2\text{O}$	0.24
Epistilbita	$\text{Ca}_3 (\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.34
<i>Grupo de las chabasitas</i>		
Chabasita	$\text{Ca}_2 (\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}) 13\text{H}_2\text{O}$	0.48
Erionita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Na},\text{K})_{4.5} (\text{Al},\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 27\text{H}_2\text{O}$	0.36
Zeolita L	$\text{K}_6\text{Na}_3 (\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 21\text{H}_2\text{O}$	0.28
<i>Grupo de las faujasitas</i>		
Faujasitas (X, Y)	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11} (\text{Al}_{59}\text{Si}_{133}\text{O}_{384}) 26\text{H}_2\text{O}$	0.53
Zeolita A	$\text{Na}_{12} (\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}) 27\text{H}_2\text{O}$	0.47
Zeolita ZK-5	$\text{Na}_{30} (\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}) 98\text{H}_2\text{O}$	0.45
<i>Grupo de las laumontitas</i>		
Laumontita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.35
Yugawaralita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{20}\text{O}_{56}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.30
<i>Grupo de las pentasil</i>		
Zeolita ZSM-5	$\text{Na}_n (\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.32
Zeolita ZSM-11		

\*  $\text{cm}^3$  de agua/ $\text{cm}^3$  de cristal.

Fuente:----- .Enero 2008

La zeolita tiene varios usos:

- La agricultura
- La acuicultura
- La alimentación de ganado
- Como intercambiador iónico
- Como catalizador en la industria química

Agricultura: se utiliza como fertilizante; permiten que las plantas crezcan más rápido, pues les facilita la fotosíntesis y las hace más frondosas [5].

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

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

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



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

### **2.3 Curado en 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 [6].

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.

## **2.4 Estado del Arte de a Simulación del Cemento Portland Tipo I**

Se han realizado algunas pruebas con este tipo de cemento añadiendo 20% de zeolita al valor de la masa del patrón y luego de realizar las prácticas se obtuvo en la Tabla 2., que la resistencia aumenta a medida que el tiempo aumenta, pero después del día 28 la resistencia disminuye, se escogieron estos valores y se obtuvo una gráfica donde nos muestra el acercamiento del modelo mediante una regresión en Excel (Fig 2.1.)

TABLA 2.  
RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN SIMPLE

Tiempo (días)	Resistencia (Mpa)	
	Muestra	Patrón
1	9,26	12,66
3	21,14	23,99
7	30,87	33,6
14	35,84	36,84
28	40,06	37,61
90	40,48	37,27

Al finalizar ésta investigación se ha podido comprobar la eficiencia de la zeolita al ser utilizada como material puzolánico y reemplazar parcialmente al cemento Portland [7].

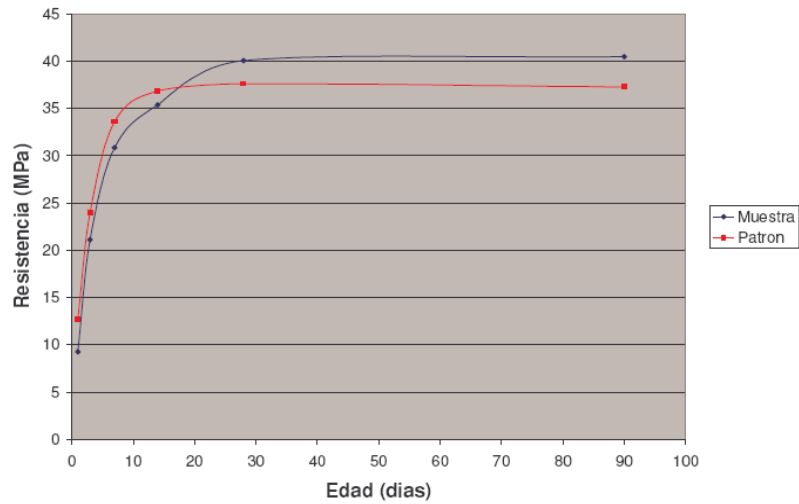


FIG. 2.1. COMPARACIÓN DE RESISTENCIAS  
MUESTRA / PATRÓN

El principal logro fue la comprobación del índice de actividad puzolánica, ya que el reemplazo del 20% de este material por cemento Portland cumple con el requerimiento que establece la especificación ASTM C618-03 a los 7 y 28 días de edad.

Las muestras estudiadas superaron el índice de 75% que dicha especificación requiere para el uso de puzolanas naturales en hormigón.

Los valores encontrados al usar esta puzolana fueron de 91,9 % a los 7 días y 106,5% a los 28 días [7].

De la misma manera los resultados obtenidos superan los requerimientos especificados para el uso de puzolanas en la

elaboración de cementos compuestos según la especificación ASTM C 595-03.

Se pudo comprobar también que el índice de actividad puzolánica se incrementa como es común en la reacción de los materiales puzolánicos, de tal forma que las probetas de reemplazo que permanecieron curadas permanentemente mostraron un incremento del 8% a los 90 días de edad [7].

# CAPÍTULO 3

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detallan los materiales, equipos, herramientas que se utilizó en la etapa experimental, además de como se realizó el proceso experimental, los métodos que se usó para el análisis y simulación de los datos que se obtuvo en la experimentación.

Lo primero que se describen son los materiales que se utilizó en la parte experimental.

### 3.1 Materiales

Los materiales que se utilizó para la realización de este proyecto son los siguientes:

- Cemento Portland tipo I
- Zeolita 2
- Agua
- Aceite

Después que se detalló los materiales que se utilizó, se detallan los equipos y herramientas experimentales que se utilizó en la prueba.

### **3.2 Equipos y Herramientas Experimentales**

Los equipos y herramientas que se utilizó para realizar las pruebas experimentales se detallan a continuación:

#### **Equipos**

- *Trituradoras (de mandíbula y de rodillos)* con lo que se trituró la zeolita 2 para obtener la granulometría necesaria.
- *Mallas (14, 18, 40,50)* con las cuales se realizó el tamizado de la zeolita 2 en la molienda.
- *Molinos (de discos y de bolas)* con lo que se trituró la zeolita 2 para obtener la granulometría necesaria para realizar la pasta de cemento.
- *Balanza* es un dispositivo de precisión de acuerdo a lo indicado por la norma ASTM C 1005.
- *Mezcladora* es el dispositivo que realizó la mezcla homogénea entre el cemento portland tipo I, zeolita 2 al 25% y agua.
- *Maquina de pruebas* con la que se realizó los ensayos de compresión a las probetas.

### **Herramientas**

- *Envases de vidrio graduados* los cuales sirven para medir de manera exacta las proporciones que se usaran en la preparación de las probetas.
- *Molde* este sirve para darle la forma exacta con el volumen necesario a las probetas.

**TABLA 3.  
VARIACIONES PERMISIBLES EN LOS MODELOS DE LAS  
PROBETAS**

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. ± 0.005	2 in. ± 0.02	[50 mm ± 0.13 mm]	[50 mm ± 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 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°

Fuente. Norma ASTM C 109. Enero 2008

Luego que se detalló las maquinas y herramientas que se utilizó en la parte de experimentación, prosigo con el modelo del experimento que se utilizó en este estudio.

### **3.3 Diseño del Modelo del Experimento**

El diseño del modelo del experimento de este estudio es de acuerdo a las normas ASTM C1005 y ASTM C109.



El modelo del experimento tuvo dos etapas, la etapa del protocolo experimental y la etapa de análisis de los datos.

El protocolo experimental, es el procedimiento de laboratorio que se siguió en este estudio, con el que se obtuvo los datos experimentales.

El análisis de los datos se dividió en individual y grupal, de manera individualmente se analizó el efecto del tiempo de curado y de manera grupal se analizó el efecto de la variación de porcentaje de zeolita 2 adicionado y también la variación en el tiempo de curado en agua (inmersión).

Lo primero que se detalla es el protocolo experimental que se realizó en este estudio.

### **Protocolo Experimental**

El protocolo experimental que se siguió en este estudio esta basado en la norma ASTM C109.

El protocolo experimental se lo llevó a cabo con la siguiente metodología:

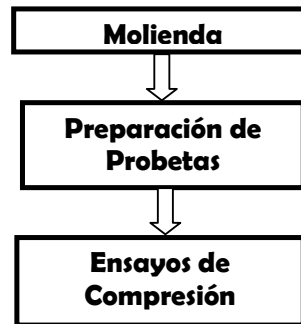


FIGURA.3.1. REPRESENTACIÓN DEL PROTOCOLO  
EXPERIMENTAL

### **Molienda**

El proceso de la molienda se realizó en varias etapas, en las cuales se utilizaron varios equipos que se detallan a continuación con sus respectivos tiempos de trituración en cada uno de los equipos.

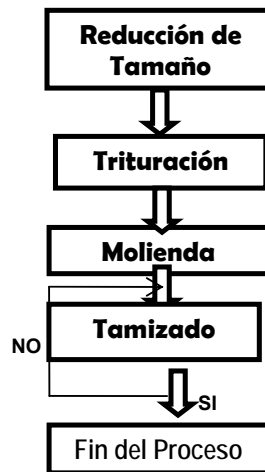


FIGURA 3.2. REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE  
MOLIENDA

Las etapas y equipos fueron las siguientes:

- *Trituración preliminar*, la zeolita 2 en estado natural se consiguió en un tamaño poco manejable para los equipos de trituración por lo que se la trituró manualmente.



FIGURA 3.3 REDUCCIÓN MANUAL DEL TAMAÑO DE LA  
ZEOLITA 2

Este proceso se realizó aproximadamente en cinco minutos.

- *Trituradora de Mandíbulas*, en esta etapa se obtuvo la zeolita 2 con granulometría entre 6-10mm.



FIGURA 3.4 ALIMENTACIÓN DE ZEOLITA 2 A LA TRITURADORA DE MANDÍBULA

Esta etapa se realizó aproximadamente en diez minutos.

- *Trituradora de Rodillos*, en esta etapa se obtuvo la zeolita 2 con granulometría entre 3 - 4mm.



FIGURA 3.5 INGRESO DE ZEOLITA 2 A LA  
TRITURADORA DE RODILLO

Esta etapa se realizó aproximadamente en diez minutos.



FIGURA 3.6 TAMAÑO DE LA ZEOLITA DESPUÉS DE LA  
TRITURADORA DE RODILLOS

- *Primer tamizado*, luego del primer proceso de la molienda se realizó el primer tamizado y se obtuvo la siguiente tabla:

TABLA 4.  
PROCESO DEL PRIMER TAMIZADO

Número de Malla	Primer Tamizado
14 (1.4 mm)	58
18 (1 mm)	10
40 (425 $\mu$ m)	14
50 (300 $\mu$ m)	3
Fondo	14
Peso Final	99 gr.

Este proceso del primer tamizado se realizó aproximadamente en quince minutos.



FIGURA 3.7 RESULTADO DEL PRIMER TAMIZADO

- *Molino de Disco*, luego del primer tamizado la zeolita 2 no obtuvo la granulometría necesaria, para realizar la pasta de cemento por lo que se ingresa la zeolita 2 en el molino de disco.

Esta etapa se realizó aproximadamente en diez minutos y se obtuvo la zeolita 2 con granulometría entre 1.5 -1.7mm.



FIGURA 3.8 TAMAÑO DE ZEOLITA 2 OBTENIDO EN EL  
MOLINO DE DISCO

- *Segundo tamizado*, luego del segundo proceso de molienda se realizó el segundo tamizado y se obtuvo la siguiente tabla:



TABLA 5.  
PROCESO DEL SEGUNDO TAMIZADO

Número de Malla	Segundo Tamizado
14 (1.4 mm)	19.5
18 (1 mm)	15.5
40 (425 $\mu$ m)	27.5
50 (300 $\mu$ m)	7
Fondo	30
Peso Final	99.5 gr.

El proceso del segundo tamizado se realizó aproximadamente en quince minutos.

- *Molino de bolas*, en esta etapa dado a que la zeolita 2 no obtuvo la granulometría necesaria para realizar la pasta de cemento, se realizó una última trituración a la zeolita 2 en el molino de bolas.



FIGURA 3.9 ALIMENTACIÓN DE ZEOLITA 2 A LA TRITURADORA DE BOLAS

Esta etapa tomó aproximadamente cincuenta y cinco minutos y se obtuvo zeolita 2 con granulometría de 45  $\mu\text{m}$ .

- *Tercer tamizado*, luego del último proceso de molienda se realizó el tercer tamizado.

Para el tercer tamizado se utilizó mallas adicionales de numeración 100 (150  $\mu\text{m}$ ), 200 (75  $\mu\text{m}$ ), 325 (45  $\mu\text{m}$ ) y el 75% del material quedó en el fondo.

Este proceso del tercer tamizado se realizó en 15 minutos aproximadamente.



FIGURA 3.10 PROCESO DEL TERCER TAMIZADO

### Preparación de probetas

Este punto se explica los pasos seguidos en el laboratorio en el momento de realizar las probetas de  $50\text{mm}^3$ .

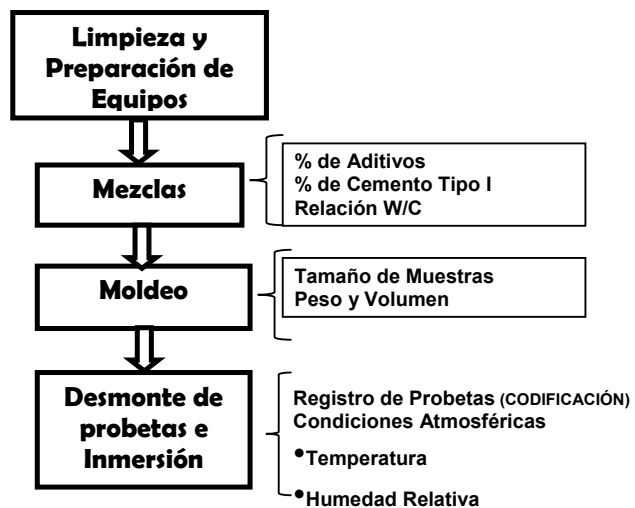


FIGURA 3.11 REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Los pasos a seguir en el laboratorio son los siguientes:

1. Limpiar los moldes.
2. Secar los moldes.
3. Engrasar los moldes.
4. Calcular las proporciones de la pasta de cemento.

#### Apéndice 1

5. Pesar las proporciones de la pasta de cemento.
6. Homogenizar la mezcla.
7. Agregar agua.
8. Verter pasta de cemento hasta la mitad de la capacidad del molde.
9. Compactar la pasta vertida en los moldes.
10. Manualmente se retira las burbujas de aire en el interior del molde.
11. Verter pasta de cemento hasta el tope de la capacidad del molde.
12. Manualmente se retira las burbujas de aire en el interior del molde.
13. Retirar el exceso de pasta de cemento en los moldes.
14. Compactar la pasta de cemento vertida en los moldes.
15. Cubrir los moldes con plásticos.



FIGURA3.12 PROBETAS CUBIERTAS DE PLÁSTICOS

### **Desmoldé e inmersión**

En este punto se retiró las probetas de sus moldes respectivos, luego se procedió a codificar las probetas de la siguiente manera:

- Grupo = G
- # Grupo = 1, 2, 3, 4, 5,6.
- Porcentaje de Zeolita 2 = 5, 10, 15, 20,25.
- Días de curado en agua = 7, 14, 21, 28.

Finalmente se sumergió las 12 probetas en un recipiente con agua, el cual va a contener todas las probetas hasta que se cumpla su tiempo de curado.

## Ensayos destructivos

En este punto se realizó los ensayos destructivos, la prueba de compresión, que se realiza a todas las probetas después que termino su tiempo de curado.

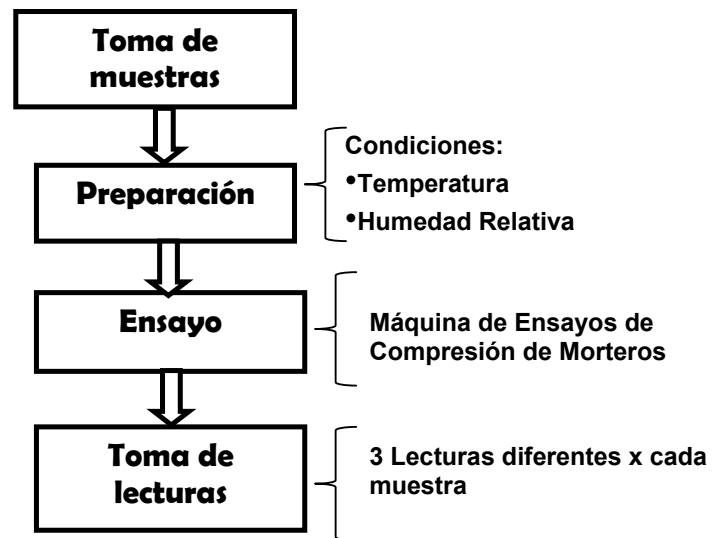


FIGURA 3.13 REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Con este proceso se obtuvo datos de la fuerza de compresión y la deformación de cada probeta de pasta de cemento de este estudio.

Para el ensayo de compresión se utilizó dos máquinas diferentes, las que se observan en la Fig 3.14.



FIGURA 3.14 MAQUINAS PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Finalmente se tabuló los datos que se obtuvo de cada probeta, en el ensayo de compresión.

### 3.4 Métodos y Herramientas para el Análisis

En esta parte se detalla cómo se analizó los datos que se obtuvo en este estudio, además se explica brevemente cuáles son los fundamentos de este estudio y su validación estadística.

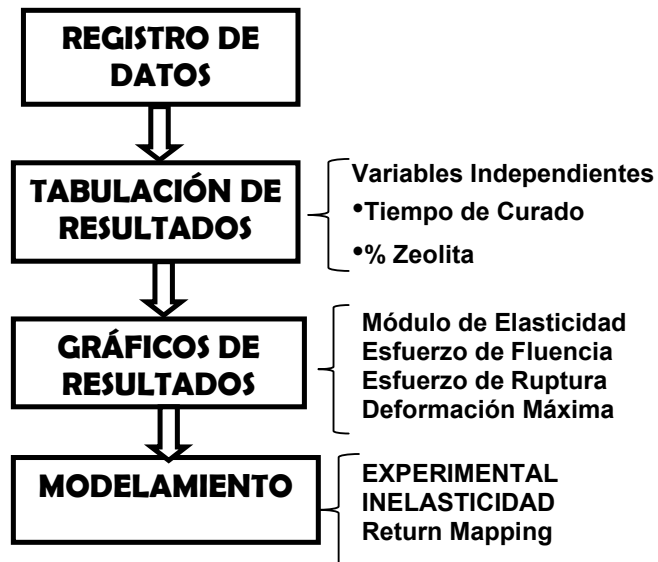


FIGURA 3.15 REPRESENTACIÓN DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE LOS DATOS

### 3.4.1 Modelo Matemático en MATLAB

Este modelo matemático está basado en la teoría de la inelasticidad para un material elasto-plástico.

Se consideró la probeta como una barra elasto-plástica sometida a una fuerza uniaxial en los extremos y se asumió que la curva esfuerzo – deformación está dada por una relación bilineal, donde  $E$  es el módulo de Young y  $\sigma_{y0}$  es el esfuerzo de fluencia [8 ,9 y 10].



Para la barra sometida a compresión el rango elástico en compresión está dado por  $-\sigma_{YC} < 0$ , puesto que la barra se soporta lateralmente para prevenir el pandeo y se definió la zona elástica con la ecuación 3.1

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid -\sigma_{T0} < \sigma < \sigma_{T0}\} \quad \text{EC. (3.1)}$$

En cualquier punto más allá del esfuerzo de fluencia, la deformación axial total de la barra puede descomponerse aditivamente en una parte elástica y una plástica como se observa en la ecuación 3.2

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad \text{EC. (3.2)}$$

Donde:

$\varepsilon$  : Deformación axial total

$\varepsilon^e$  : Deformación en la región elástica

$\varepsilon^p$  : Deformación en la región plástica

La ecuación constitutiva para la barra está regida por la ecuación 3.3

$$\sigma = E\varepsilon^e = E(\varepsilon - \varepsilon^p) \quad \text{EC. (3.3)}$$

y para cualquier aplicación de carga adicional que produce deformación plástica adicional, la derivada con respecto al tiempo del esfuerzo axial está regida por la ecuación 3.4

$$\dot{\sigma} = E(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}^p) \quad \text{EC. (3.4)}$$

La región elástica puede ser definida en términos de la función fluencia y se la definió con la ecuación 3.5

$$f(\sigma, \sigma_{T0}) = |\sigma| - \sigma_{T0} = 0 \quad \text{EC. (3.5)}$$

por lo tanto, la región elástica inicial esta regida por la ecuación 3.6

$$\mathbb{E}_0 = \{v \in \mathbb{R} / f(v, \sigma_{T0}) < 0\} \quad \text{EC. (3.6)}$$

Se asumió que la barra está sujeta a carga diferencial, lo que produce una deformación axial plástica diferencial. Esto es posible si la barra está fluyendo en compresión y se comprime aún más. Denotando la magnitud de la tasa de deformación plástica por  $\dot{\lambda} \geq 0$ , tenemos:

$$dP \begin{cases} +\lambda, & \text{if } \sigma > 0 \\ -\lambda, & \text{if } \sigma < 0 \end{cases}$$

Alternativamente se puede escribir como la ecuación 3.7

$$dP = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \quad \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \text{sign}(\sigma) \quad \text{EC. (3.7)}$$

La ecuación 3.7 denominada regla de flujo para la tasa de deformación plástica. La regla de flujo contiene la magnitud de la tasa de deformación,  $\dot{\lambda}$  y como el sentido,  $\frac{\partial f}{\partial \sigma}$  describiendo tensión o compresión.

Además se asumió que la barra continúa a fluencia en compresión y que el esfuerzo de fluencia cambia del valor inicial  $\sigma_{y0}$  al valor actual  $\sigma_y$ , entonces la función fluencia actual se puede escribir como:

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

y la región elástica actual

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid f(\sigma, \sigma_y) < 0\}$$

Una simple ley que describe la evolución de  $\sigma_y$  con la continua deformación plástica, está dada por la ecuación 3.8.

$$\dot{\sigma}_y = H'|\dot{\epsilon}^p| = H'\dot{\lambda} \quad \text{EC. (3.8)}$$

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

El esfuerzo axial  $\sigma$  y el parámetro  $\dot{\lambda}$ , están restringidas por ciertas restricciones unilaterales

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

Existen dos posibilidades:

Si la barra está deformada elásticamente, entonces  $\dot{\lambda} = 0$

y  $f(\sigma, \sigma_y) \leq 0$

Si la barra está deformada plásticamente, entonces

$$\dot{\lambda} \geq 0 \text{ y } f(\sigma, \sigma_y) = 0$$

Lo que de una forma más compacta es la ecuación 3.9

$$\lambda f(\sigma, \sigma_Y) = 0 \quad \text{EC. (3.9)}$$

La ecuación 3.9 recibe el nombre de condición de Kuhn-Tucker y representa una condición que debe cumplirse para deformación elástica como para plástica.

Luego se realizó la implementación numérica de este modelo matemático bilineal, la que se realizó en MATLAB.

Para la implementación numérica se consideró un intervalo típico en el tiempo  $t \in [t_n, t_{n+1}]$

Además se asumió que los valores de  $\sigma_{Y,n}$  y  $\sigma_n$  son conocidos.

Luego se calculó los valores de  $\sigma_{Y,n+1}$  y  $\sigma_{n+1}$  que deben cumplir la condición de Kuhn-Tucker (ec 3.9) para un incremento  $\Delta\varepsilon$ . Además se definió  $\sigma_{n+1}^{tr}$  que es el predictor del esfuerzo elástico y también se definió el corrector del esfuerzo plástico,  $E^* \Delta\varepsilon^p$ .

Esta implementación numérica se rige por 4 pasos, descomposición aditiva del esfuerzo, la ley de hook, la regla de flujo y las restricciones.

En el primer paso se calculó un  $\sigma_{n+1}^{tr}$  con la siguiente expresión

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

Que representa el esfuerzo elástico predictor en el punto siguiente al inicial.

En el segundo paso se calculó la diferencia entre el esfuerzo de fluencia ( $\sigma_{Y,n}$ ) con el esfuerzo calculado en el paso 1 y a esta diferencia se la asigno como  $F_{n+1}^{tr}$ .

Por lo que si  $F_{n+1}^{tr}$  es menor a cero se continua al paso 3 y si es mayor a cero entonces  $\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n$  y  $\sigma_{n+1} = \sigma_{Y,n+1}$  y sale del algoritmo.

En el paso 3 se utilizó un método iterativo llamado Newton-Raphson hasta encontrar un  $\Delta\lambda$  que satisfaga la siguiente expresión:

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

En el paso 4 se calculan los esfuerzos  $\sigma_{n+1}$  y  $\sigma_{Y,n+1}$  con las siguientes expresiones:

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

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

Finalmente se obtuvo un valor de esfuerzo el cual se lo acumula y se forma un vector esfuerzo para realizar la gráfica Esfuerzo vs Deformación.

Esta implementación numérica se la llevó a cabo con un algoritmo que se detalla en el apéndice 2.

En la Fig 3.16 se observa un diagrama que representa al algoritmo que se utilizó en la implementación numérica, que dio como resultado el gráfico esfuerzo - deformación que simuló el comportamiento de las probetas de pasta de cemento de este estudio.

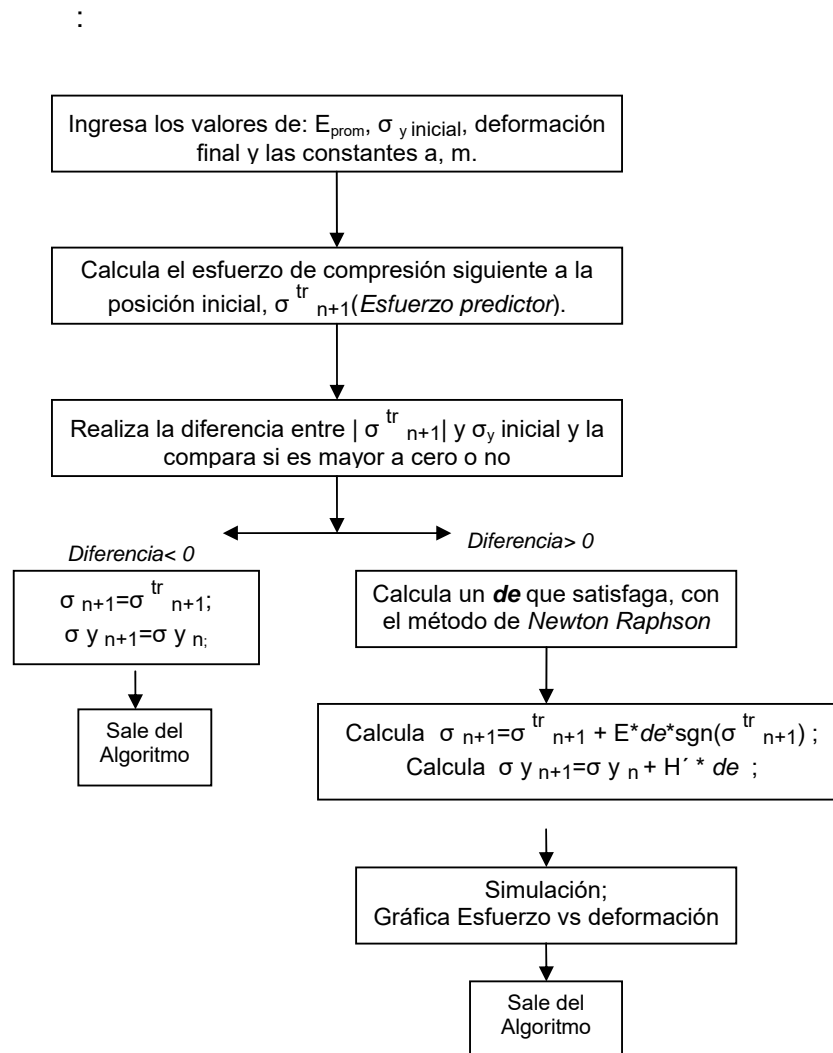


FIGURA 3.16 DIAGRAMA DEL ALGORITMO RETURN

MAPPING

### 3.4.2 Procesamiento Estadístico de Datos en STATISTICA



El procesamiento estadístico de los datos se lo realizó usando el software STATISTICA y la metodología se detalla a continuación:

#### Individual

- Prueba de Shapiro y Wilk, comprobar la distribución normal de los datos obtenidos.
- Análisis por Anova One-way, encontrar diferencias significativas entre los días de curado en agua.

#### Grupal

- Análisis por Anova factorial, encontrar diferencias significativas entre los % de Zeolita y el tiempo de curado en agua.

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizaron los resultados que se obtuvieron en los ensayos de laboratorio e identificaremos el cambio en el esfuerzo de compresión de las probetas de pasta de cemento compuestas de cemento Portland tipo I con zeolita 2 y curado en agua.

Además se graficó los datos que se obtuvieron en la experimentación con lo que se observó el comportamiento de la pasta de cemento experimentalmente, luego se simuló los datos en MATLAB y se realizó la comparación entre el gráfico experimental y la simulación.

Lo primero que se realizó fue la tabulación de los datos y se obtuvieron sus respectivos gráficos.

### 4.1 Tabulación de Datos y Resultados

Se recogieron los datos de los ensayos que se realizaron y se procedió a tabular los datos experimentales según su tiempo de curado en agua (inmersión).

Luego se graficó los datos tabulados de las tres probetas y se observó el comportamiento de las probetas de pasta de cemento.

### **7 Días de Inmersión**

Datos de las condiciones ambientales al momento que se realizó el ensayo de compresión.  $m=265,3$  gr;  $T=25,6$  c;  $H.R= 67,2$

TABLA 6.  
DATOS DE LAS PROBETAS / SEPTIMO DÍA DE CURADO EN AGUA

Deformación	Área (mm <sup>2</sup> )	Probeta #1	Probeta #2	Probeta #3
		Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0	0	0	0	0
0,003	2500	10,7	9,6	12,4
0,005	2500	29,3	24,0	26,8
0,008	2500	48,9	41,3	48,9
0,010	2500	66,7	64,9	68,5
0,013	2500	78,2	80,0	76,5

En esta gráfica se observa el comportamiento de las probetas durante el ensayo de compresión hasta llegar al punto de ruptura.

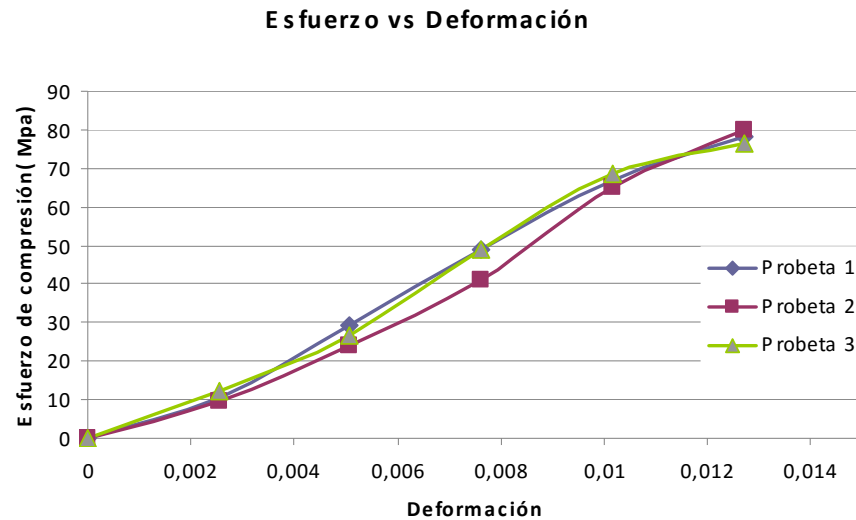


FIGURA 4.1. GRÁFICO ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

Para poder calcular el módulo de elasticidad, se seleccionó por etapas el gráfico esfuerzo - deformación, por lo que se descartó la etapa inicial del gráfico ya que se produjo un pequeño valle lo que denota un comportamiento normal en las pastas de cemento debido a que su compactación de los 7 días de curado no es la óptima o también pudo ser por falla en la metrología.

La etapa final del gráfico se descartó debido a que llegó a la zona plástica, por lo que no se tomó en cuenta para el cálculo del módulo de elasticidad.

La etapa central del gráfico se escogió debido a que llegó a la zona elástica, por lo que se tomó en cuenta para el cálculo del módulo de elasticidad.

En la fig.4.2 se representó la zona que se seleccionó para el cálculo del módulo de elasticidad.

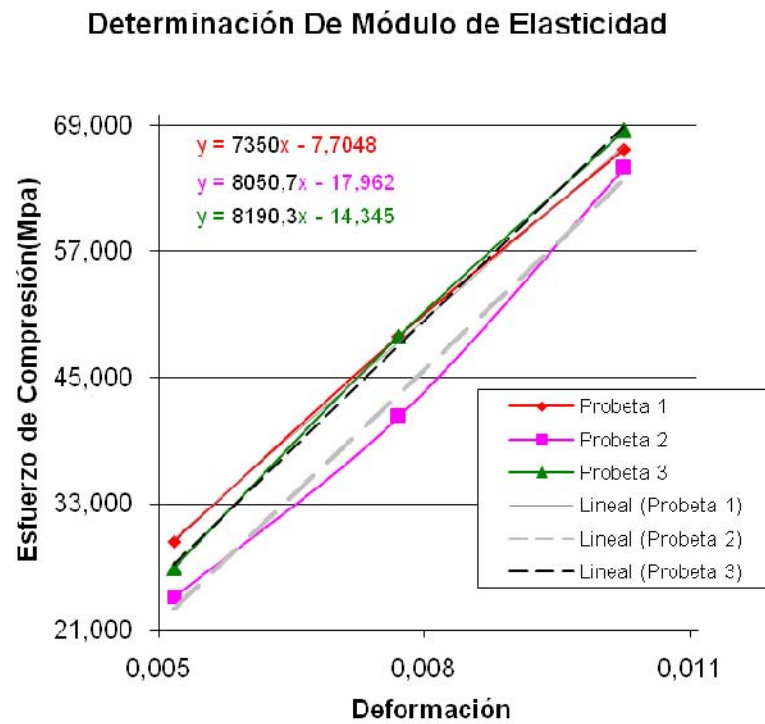


FIGURA 4.2. GRÁFICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

El valor del módulo de elasticidad que se escogió es el que se obtuvo de la ecuación de la recta (Pendiente) en la zona elástica, los valores que se obtuvieron a los 7 días de curado se detallan a continuación:

Probeta # 1 = 7350 Mpa.

Probeta # 3 = 8190,3 Mpa.

Probeta # 2 = 8050,7 Mpa.

Los demás datos y gráficos de 14, 21 y 28 días de curado en agua se encuentran en el apéndice 3.

#### **4.2 Identificación de Cambios de Propiedades**

Para poder identificar el aumento del esfuerzo de compresión en las probetas con respecto al tiempo de curado se realizó una comparación gráfica con los datos que se obtuvo de la pasta de cemento, cemento tipo I y el cemento tipo IV.

La identificación del cambio en el esfuerzo de compresión se realizó de forma individual con respecto al tiempo de curado y de forma grupal debido al efecto del % de zeolita 2 adicionado y el tratamiento aplicado.

##### **Análisis individual**

Se tabuló los datos promedios de los valores del esfuerzo de compresión que se obtuvo en las tres probetas a los 7 días de curado en agua y se comparó con los valores que se obtuvo con dos tipos de cemento (tipo I y tipo IV) curados en agua.

TABLA 7.  
DATOS DE ESFUERZOS PROMEDIOS A LOS 7 DÍAS DE  
INMERSIÓN

Deformación	Cemento IV $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I + Zeolia 2 25% $\sigma_{prom}$ (Mpa)
0	0	0	0
0,00254	0,32	5,12	10,90
0,00508	0,56	18,82	26,73
0,00762	0,97	34,16	46,35
0,01016	1,88	52,04	66,68
0,0127	3,68	71,44	78,23
0,01524	6,20	85,85	
0,01778	9,08	92,02	
0,02032	13,08		
0,02286	16,17		
0,0254	19,85		
0,02794	22,49		

En la Fig. 4.3 se observa el comportamiento del cemento tipo I, cemento tipo IV y de la pasta de cemento con curado en agua (inmersión) durante 7 días.

En esta figura se observa como varía el esfuerzo compresión según se deforma la probeta, y se deduce que el cemento tipo I presenta una mayor resistencia a la compresión que la pasta de cemento y que el cemento tipo IV respectivamente.



FIGURA 4.3. GRÁFICO ESFUERZO VS DEFORMACIÓN A LOS 7 DÍAS DE CURADO EN AGUA

Las tablas de comparación con sus respectivos gráficos de los 14, 21 y 28 días de inmersión se detallan en el apéndice 4.

### **Análisis Grupal**

Se realizó el análisis grupal mediante la comparación de los esfuerzos de compresión máximo obtenidos según su respectivo % de Zeolita 2 y su tiempo de inmersión.



TABLA 8.  
DATOS DE ESFUERZOS PROMEDIOS SEGUN DÍAS DE  
INMERSIÓN Y % DE ZEOLITA 2

Cemento	Días				
	0	7	14	21	28
Zeolita 5%	0	80,61	114,63	108,39	101,86
Zeolita 10%	0	79,88	94,03	102,34	84,84
Zeolita 15%	0	81,37	82,55	97,41	81,67
Zeolita 20%	0	83,80	93,11	98,45	102,30
Zeolita 25%	0	78,23	78,53	78,53	80,59

En la Fig 4.4 se observa el comportamiento de las probetas de pasta de cemento compuesta por cemento tipo I y con un % de Zeolita 2 respectivo.

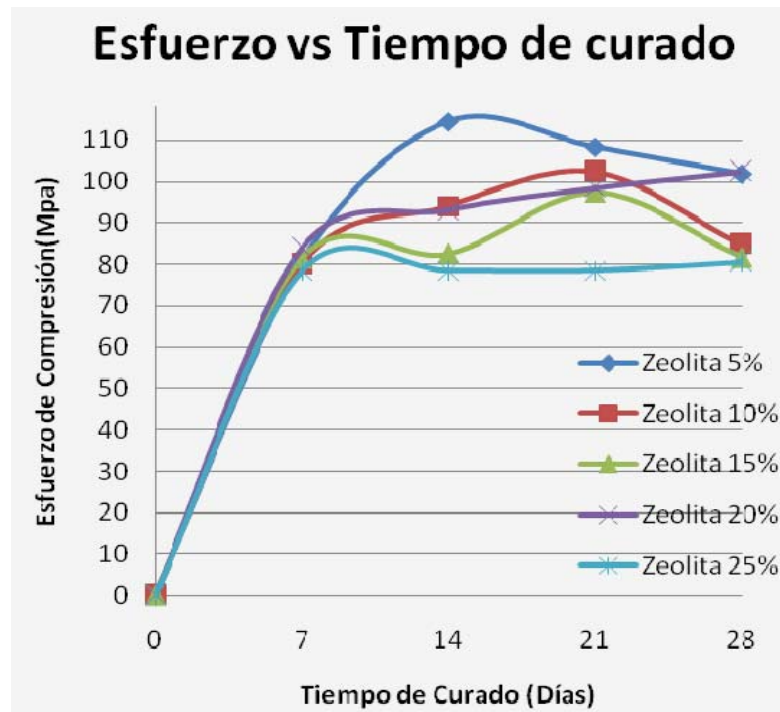


FIGURA 4.4. GRÁFICO ESFUERZO VS TIEMPO DE CURADO  
SEGÚN EL % DE ZEOLITA 2 EN LAS PROBETAS

Se realizó la comparación de manera gráfica, como se observa en la Fig 4.4 y se obtuvo un mayor esfuerzo de compresión en las probetas que contienen 5 % de Zeolita 2 a los 14 días de curado en agua (inmersión).

Luego se analizó estadísticamente los datos que se obtuvieron en la experimentación.

### 4.3 Análisis de Resultados

En este punto se realizó el análisis de los datos de la experimentación con el software STATISTICA 7.0, el que se utilizó para ponderar estadísticamente la distribución normal de los datos y las diferencias significativas en el módulo de elasticidad, aplicándole un tratamiento de curado en agua de 7, 14, 21 y 28 días en las probetas de pasta de cemento.

Luego de que se realizó el cálculo del módulo de elasticidad de cada una de las probetas con cada tratamiento aplicado, se obtuvo la Tabla.9 la cual incluye el módulo de elasticidad promedio de cada probeta.

Se analizó de manera individual para encontrar diferencias significativas en la pasta de cemento con el tratamiento aplicado variando el tiempo de inmersión de las probetas.

Finalmente se realizó la comparación grupal entre los datos obtenidos con los diferentes porcentajes de Zeolita 2 adicionados, con lo que se obtuvo la mejor combinación posible entre tiempo de curado y porcentaje de adición de Zeolita 2.

### Análisis individual

La comprobación de la normalidad de los datos que se obtuvo en la experimentación se la realizó con la prueba de Shapiro y Wilk en el software STATISTICA [11 y 12].

TABLA 9.  
DATOS INGRESADOS EN EL SOFTWARE STATISTICA

	1 días	2 Eprom
]	7	8190,3
]	7	8050,7
]	7	7350
]	14	9100,9
]	14	8715,1
]	14	8225,1
]	21	5565,9
]	21	6545,2
]	21	5880
]	28	5985,7
]	28	4627,1
]	28	6181,1

Como se obtuvo  $W_{cal}=0.94498$  que es mayor al  $W_{tab}=0$  y una probabilidad mayor a 0.05 se descarta que los datos obtenidos no tienen una distribución normal.

En la Fig 4.5 se observa el histograma de los datos del módulo de elasticidad de las probetas de pasta de cemento.

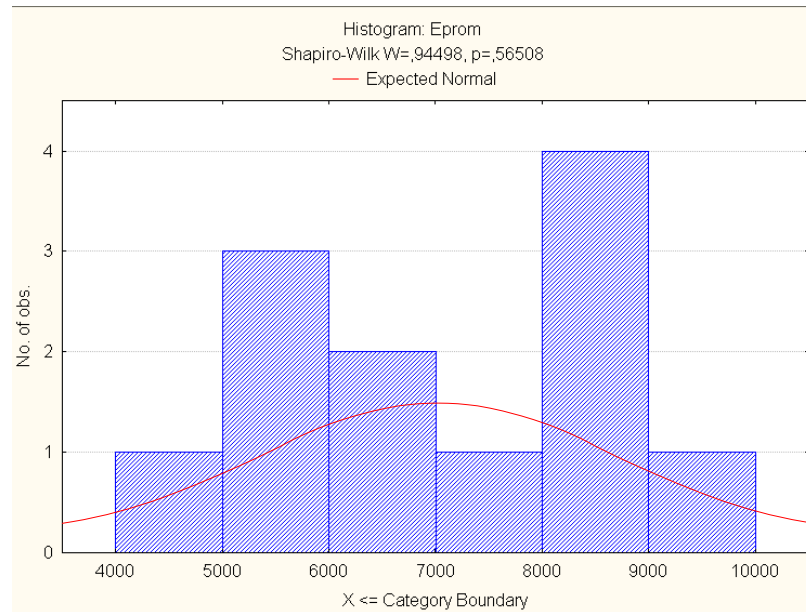


FIGURA 4.5. HISTOGRAMA DE  $E_{\text{PROM}}$  PARA PASTAS DE CEMENTO CON UNA CONCENTRACIÓN DE 25% DE ZEOLITA 2.

### **Análisis de varianza ( ANOVA-ONE WAY)**

Una vez que se comprobó la normalidad de los datos, se realizó un análisis de varianza simple (ANOVA-ONE WAY).

Este análisis sirvió para determinar si hay diferencias significativas entre las medias del módulo de elasticidad de los tratamientos, que son de 7, 14, 21 y 28 días de inmersión.

Para poder afirmar que existen diferencias significativas entre los tratamientos se calculó el estadístico  $F_{\text{crítico}}$  mediante tablas según los grados de libertad, lo que dio como resultado un valor de 4.06.

Se comparó el valor del estadístico  $F_{cal}$  que se obtuvo en el análisis con el  $F_{cr}$ , lo que dio como resultado que  $F_{cal}$  es mayor al  $F_{cr}$ .

**TABLA 10.**  
**ANÁLISIS DE VARIANZA**

Univariate Results for Each DV (Sheet1 in Imported from C:\Docum Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	Degr. of Freedom	Eprom SS	Eprom MS	Eprom F	Eprom p
Intercept	1	593853898	593853898	1744,148	0,000000
días	3	19609078	6536369	19,197	0,000517
Error	8	2723870	340484		
Total	11	22332948			

Por lo que se concluyó que existen diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95%, por lo que se deduce que al menos uno de los tratamientos incrementa el módulo de elasticidad, lo que es directamente proporcional al incremento del esfuerzo de compresión en la pasta de cemento.

**TABLA 11.**  
**INTERVALOS DE CONFIANZA PARA CADA TRATAMIENTO**

días; LS Means (Sheet1 in Imported from C:\Docume Current effect: F(3, 8)=19,197, p=,00052 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	días	Eprom Mean	Eprom Std.Err.	Eprom -95,00%	Eprom +95,00%	N
1	7	7863,667	336,8896	7086,798	8640,535	3
2	14	8680,367	336,8896	7903,498	9457,235	3
3	21	5997,033	336,8896	5220,165	6773,902	3
4	28	5597,967	336,8896	4821,098	6374,835	3

En la tabla anterior se obtuvo el intervalo de confianza para el módulo de elasticidad según el tiempo de curado en agua que se le aplicó a las probetas de pasta de cemento.

En la Fig 4.6 se observa el tratamiento que da una media del módulo de elasticidad mayor a los otros tratamientos, que en este estudio resultó a los 14 días de curado en agua.

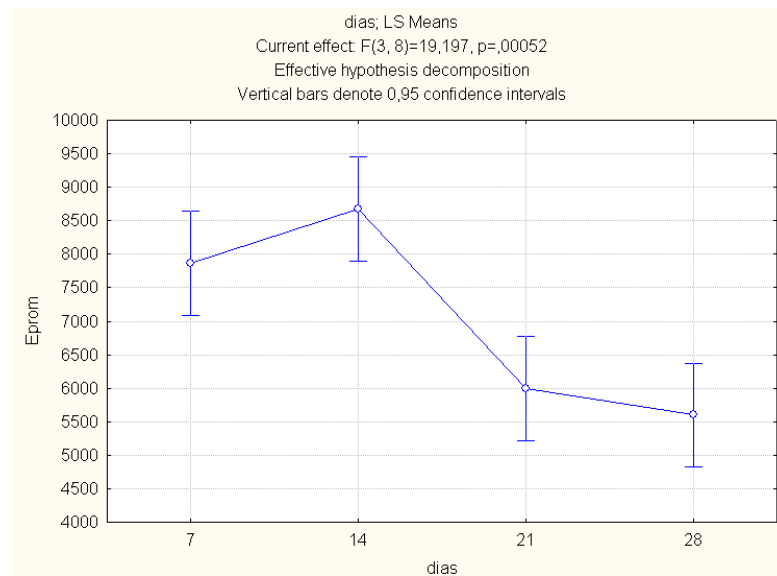


FIGURA 4.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD VS. DÍAS DE CURADO

Luego del análisis individual se procedió al análisis grupal para encontrar el efecto que se obtuvo en el esfuerzo de compresión con la variación del % de zeolita 2 que se añadió.

### **Análisis grupal**

La comprobación de la normalidad de los datos que se obtuvieron en la experimentación se la realizó con la prueba de Shapiro y Wilk en el software STATISTICA.

**TABLA 12.**  
**DATOS INGRESADOS EN EL SOFTWARE STATISTICA**

	1 % Zeolita 2	2 Dias/inmersion	3 Esfuerzo de ruptura
J	5	7	87,612
J	5	7	75,8163636
J	5	7	78,4
J	5	14	117,6
J	5	14	111,363636
J	5	14	114,927273
J	5	21	122,054545
J	5	21	106,018182
J	5	21	97,1090909
J	5	28	114,036364
J	5	28	112,254545
J	5	28	79,2909091
J	10	7	79,46
J	10	7	88,99
J	10	7	71,2
J	10	14	103,23
J	10	14	89,88
J	10	14	88,99
J	10	21	99,67
J	10	21	112,13
J	10	21	95,22
J	10	28	74,76
J	10	28	92,55
J	10	28	87,21
J	15	7	77,51
J	15	7	87,31
J	15	7	79,29
J	15	14	89,06
J	15	14	76,62

### **Análisis de varianza ( ANOVA-FACTORIAL)**

Luego que se comprobó la normalidad de los datos, se procedió a realizar un análisis de varianza factorial (ANOVA-FACTORIAL).

Este análisis sirvió para determinar si hay diferencias significativas entre las medias del esfuerzo de compresión debido al efecto del tratamiento de curado en agua, al efecto de la variación del % de Zeolita 2 y el efecto de la combinación de ambos.

Para poder afirmar que existen diferencias significativas entre los tratamientos y el % de Zeolita 2 adicionado se calculó el estadístico



$F_{\text{crítico}}$  mediante tablas según los grados de libertad, el que nos dio como resultado un valor de 4.06.

Se comparó el valor del estadístico  $F_{\text{cal}}$  que se obtuvo en el análisis con el  $F_{\text{cr}}$ , lo que dio como resultado que  $F_{\text{cal}}$  es mayor al  $F_{\text{cr}}$  con el efecto del tratamiento y con el efecto del % de Zeolita 2, mientras que en el efecto de la combinación de ambos el  $F_{\text{cal}}$  es menor al  $F_{\text{cr}}$ .

TABLA 13.  
ANÁLISIS DE VARIANZA FACTORIAL

		Univariate Tests of Significance for Esfuerzo de Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition			
Effect	Degr. of Freedom	MS	F	p	
<b>Intercept</b>	1	487691,2	6145,210	0,000000	
% Zeolita 2	4	865,5	10,906	0,000004	
Dias/inmersion	3	704,5	8,878	0,000124	
% Zeolita 2*Dias/inmersion	12	156,8	1,976	0,053393	
Error	40	79,4			

Por lo que se concluyó con un nivel de confianza del 95%, que existen diferencias significativas entre los tratamientos y los % de Zeolita 2 adicionados, mientras que en la combinación de ambos no se halló diferencias significativas en el esfuerzo de compresión.

TABLA 14.  
INTERVALOS DE CONFIANZA PARA CADA % DE ZEOLITA 2

% Zeolita 2; Weighted Means (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Se Current effect: F(4, 40)=10,906, p=,00000 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	% Zeolita 2	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std. Err.	Esfuerzo de ruptura -95,00%	Esfuerzo de ruptura +95,00%	N
1	5	101,3736	4,885806	90,61999	112,1272	12
2	10	90,2742	3,368476	82,86020	97,6881	12
3	15	85,7475	3,103729	78,91624	92,5788	12
4	20	94,4150	2,536422	88,83237	99,9976	12
5	25	78,9720	1,742315	75,13722	82,8068	12

En la tabla anterior se obtuvo el intervalo de confianza para el esfuerzo de compresión según el % de Zeolita 2 que se adicionó a las probetas de pasta de cemento.

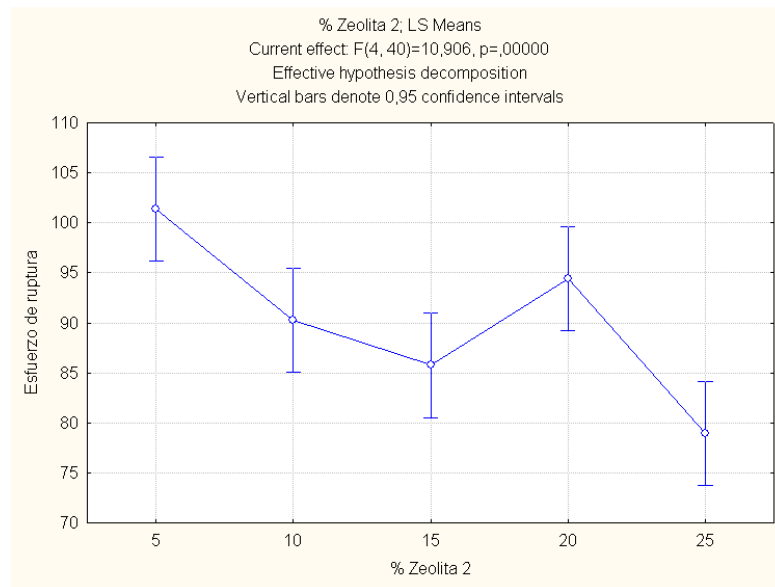


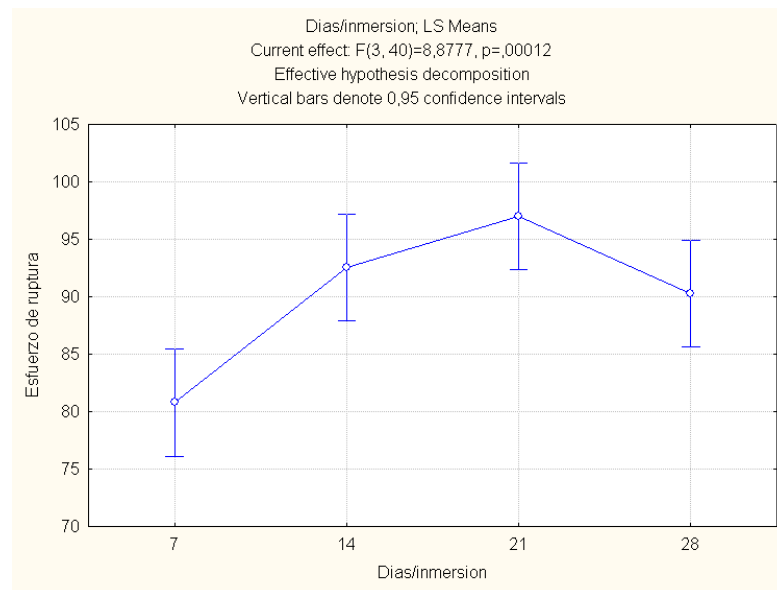
FIGURA 4.7. GRÁFICA ESFUERZO ÚLTIMO VS. % ZEOLITA 2

En la Fig 4.7 se observa que el % de zeolita 2 que da una media mayor del esfuerzo de compresión, es el de 5 % de Zeolita 2 adicionada.

**TABLA 15.**  
**INTERVALOS DE CONFIANZA PARA CADA TRATAMIENTO**

Dias/inmersion; Weighted Means (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\samr Current effect: F(3, 40)=8,8777, p=,00012 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Dias/inmersion	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95,00%	Esfuerzo de ruptura +95,00%	N
1	7	80,78003	1,338278	77,90971	83,6504	15
2	14	92,56993	3,664409	84,71056	100,4293	15
3	21	97,02359	3,301508	89,94256	104,1046	15
4	28	90,25226	3,800804	82,10035	98,4042	15

En la tabla anterior se obtuvo el intervalo de confianza para el esfuerzo de compresión según el tiempo de curado en agua que se le aplicó a las probetas de pasta de cemento.



**FIGURA 4.8. ESFUERZO ÚLTIMO VS. DÍAS DE CURADO**

En la Fig 4.8 se observa que el tratamiento que da una media mayor del esfuerzo de compresión a los otros tratamientos, es a los 21 días de curado en agua.

#### 4.4 Interpretación de la Simulación del Modelo en MATLAB

Se realizó la simulación de los datos que se obtuvo en los ensayos de compresión con la ayuda de un algoritmo que simula el comportamiento de los materiales elasto-plástico, en el software MATLAB. Apéndice 2.

En la simulación se necesitó los datos que se detallan a continuación:

TABLA 16.  
DATOS PARA IMPLEMENTAR EL ALGORITMO SEGÚN SUS DÍAS DE CURADO EN AGUA

	7 días	14 días	21 días	28 días
<i>a</i>	0,33	0,33	0,33	0,33
<i>m</i>	0,00305121	0,00595322	0,00490503	0,00560299
$E_{PROM}$ (MPa)	7863,7	8680,4	5997,1	5597,9
$\sigma_y$ (MPa)	58,7	58,9	58,9	60,5
<i>de</i>	0,00254	0,00254	0,00254	0,00254
<i>def</i>	0,013	0,015	0,018	0,02

En la Fig. 4.9 se observa la representación de los valores constantes de  $a$  y  $m$ , además del esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ), el esfuerzo de ruptura ( $\sigma_{max}$ ) y la deformación máxima (def).

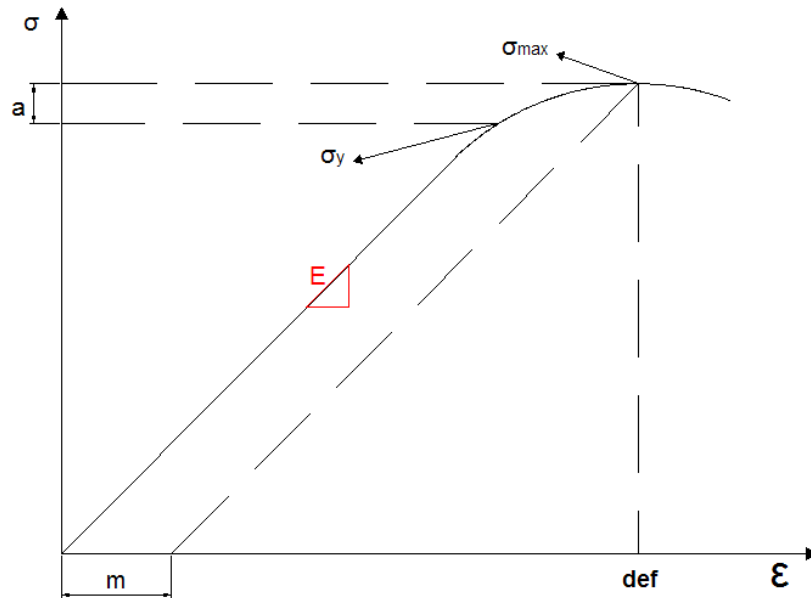


FIGURA 4.9. REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN

Los cálculos de las constantes que se utilizó en la simulación se encuentran detallados en el apéndice 5.

Luego de la simulación se obtuvo un gráfico esfuerzo - deformación que es el gráfico teórico o el idealizado para los materiales elasto - plástico con los parámetros de este estudio, el que se comparó con el

gráfico experimental que se obtuvo con los datos de los ensayos de compresión, como se observa en la Fig. 4.10.

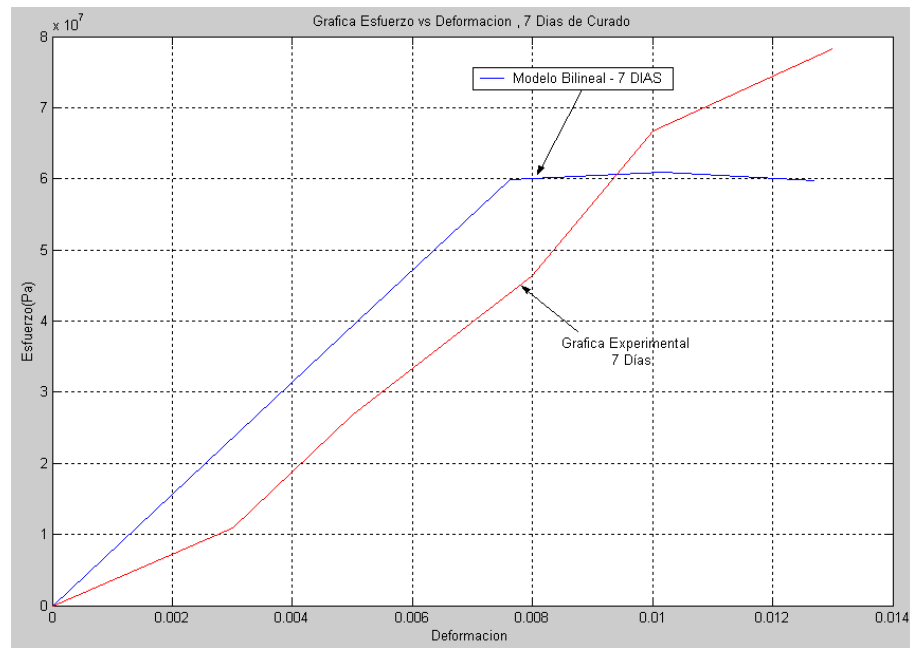


FIGURA 4.10. GRÁFICO ESFUERZO VS DEFORMACIÓN 7 DÍAS DE INMERSIÓN

Se deduce de la Fig 4.10 que se obtuvo una aproximación aceptable entre la simulación y la experimentación a los 7 días, dado que la curva experimental no resultó desproporcionada comparada con la teórica y los valores del esfuerzo de fluencia, de ruptura y deformación máxima son similares entre los teóricos y los experimentales.

Los demás gráficos que se obtuvo en la simulación de los datos de los 14, 21 y 28 días de inmersión se encuentran en el apéndice 6.

#### 4.5 Determinación de Errores

Se determinó el error que existe entre los valores que se obtuvieron experimentalmente con los valores teóricos del modelo matemático.

El error se lo calculó con la siguiente expresión:

$$\%error = \frac{E_t - E_e}{E_t} * 100;$$

$E_t$ : Módulo de elasticidad teórico

$E_e$ : Módulo de elasticidad experimental

Por ejemplo para un valor de deformación unitaria de 0.004, a los 7 días de inmersión se obtuvo un error del 25 %, lo que es aceptable dado a la poca exactitud de los equipos.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Del análisis individual de las curvas de los esfuerzos de ruptura, se observa que el esfuerzo de compresión, en función del tiempo, aumenta hasta llegar a un valor máximo de 80,59 MPa a los 28 días de curado, que en comparación con el cemento tipo IV tuvo en un 16% de aumento y con el cemento tipo I no se obtuvo incremento.

Del análisis grupal de las curvas de los esfuerzos de ruptura, se observa que para los porcentajes de estudio (5, 10, 15, 20 y 25%) y el tiempo de curado (7, 14, 21 y 28 días), el efecto del porcentaje de Zeolita 2 adicionado, tanto como el tiempo de curado en agua, por separado, son variables que afectan directamente a la resistencia a la compresión de las probetas de pasta de cemento.

Del análisis de las curvas esfuerzo de ruptura vs. tiempo de Curado, para los diferentes porcentajes del estudio, se encontró que el esfuerzo máximo se presenta a los 14 días con adición de 5% de Zeolita 2, cuyo valor en comparación con el Cemento Portland tipo IV



presenta un aumento aproximado del 44 % y en comparación con el Cemento Portland tipo I un incremento aproximado del 13%. Sin embargo, estos valores decrecen conforme aumenta el tiempo de curado, hasta los 28 días, con un valor máximo de 102,3 MPa para el 20% de Zeolita 2, lo cual representa un 2.5% por encima del valor de referencia del Cemento Portland tipo I y 33.3% sobre el Cemento Portland tipo IV.

Los valores de Esfuerzos de ruptura para las probetas formadas con el 25% de Zeolita 2, en función del tiempo, presentan las curvas menos favorables, lo que indica que el incremento de la proporción de este aditivo al Cemento Portland Tipo I, influye negativamente en la variable de estudio que es la resistencia a la compresión.

La creación de una superficie matemática que describa el comportamiento del experimento realizado no se ajusta a los datos experimentales, debido a que desde el análisis estadístico, se deduce que no existe una relación entre el tiempo de curado y porcentaje de zeolita en la resistencia a la compresión. Adicionalmente esto incide en que no se haya analizado las pruebas experimentales de validación en el modelo matemático.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Se debe ampliar el tiempo de análisis, ya que de las gráficas se observa una tendencia a decrecer los valores de los esfuerzos de ruptura con relación al tiempo, por lo que los valores obtenidos a los 28 días no se pueden considerar como los esfuerzos finales o de estado estable.

Incrementar la exactitud en las máquinas que se utilizaron en la experimentación (Metrología). Esto perfeccionará los intervalos de medición y por ende, se tendría curvas más continuas.

Continuar con el estudio para poder optimizar el recurso del cemento Portland tipo I y así explotar las reservas de zeolita en nuestro país.

La precisión en las mediciones de los ensayos debe aumentar, ya que esto afecta a los valores que se analizan y distorsionan las conclusiones.

## ANEXO 1

### Calculo de proporciones de las probetas

Zeolita 2 (g)	Cemento (g)	Agua (g)
150	2850	900
300	2700	900
450	2550	900
600	2400	900
750	2250	900

$$a/c = 0.3$$

## ANEXO 2

### Algoritmo

```
clear;

clc;

E=7863.667e6;

m=0.00305121;

a=0.33;

de=0.00254;

def=0.013;

e=[0:de:def]';

k=size(e);

iteracion=k(1,1);

G(1)=0;

Gy(1)=58.6755e6;

lampda(1)=0;

for i=1:iteracion

    Gtr(i+1)=G(i)+E*de;

    Ftr(i+1)=abs(Gtr(i+1))-Gy(i);

    if Ftr(i+1) > 0

        [deltalampdaf(i+1),H(i+1)]=MetodoN_R(Ftr(i+1),a,m,E,Gy(1),lampda (i));
```

```
lampda(i+1)=deltalampdaf(i+1)+lampda(i);  
G(i+1)=Gtr(i+1)-E*deltalampdaf(i+1)*sign(Gtr(i+1));  
Gy(i+1)=Gy(i)+H(i+1)*deltalampdaf(i+1);
```

```
else
```

```
lampda(i+1)=0;  
G(i+1)=Gtr(i+1);  
Gy(i+1)=Gy(i);
```

```
end
```

```
end
```

```
esfuerzo=G(1:iteracion);  
plot(e,esfuerzo,'b');  
title ('Grafica')  
xlabel('Deformacion');  
ylabel('Esfuerzo');  
legend('Modelo Bilineal');  
grid;
```

### **Funcion**

```
function [deltalampdaf,Hn1]=MetodoN_R(Ftr,a,m,E,Gy,ln)
```

```
TOL=1e-10;
```

```
deltalampda(1)=TOL;
```

```
for k=1:50,
```

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

```
    r(k)=Ftr-deltalampda(k)*(E+H(k));
```

```
    derivada_r(k)=-E-H(k)+(deltalampda(k)*Gy*a*sqrt(m)*((2*(m-  
deltalampda(k)-  
ln)/(m+deltalampda(k)+ln)^2)+(1/(2*(deltalampda(k)+ln)))))/(m+deltalampd  
a(k)+ln);
```

```
    deltalampda(k+1)=deltalampda(k)-r(k)/derivada_r(k);
```

```
    if norm(r(k))<TOL*norm(r(1))
```

```
        deltalampdaf=deltalampda(k+1);
```

```
        Hn1=a*Gy*sqrt(m/(deltalampda(k+1)+ln))*(m-deltalampda(k+1)-  
ln)/(m+deltalampda(k+1)+ln)^2;
```

```
        break
```

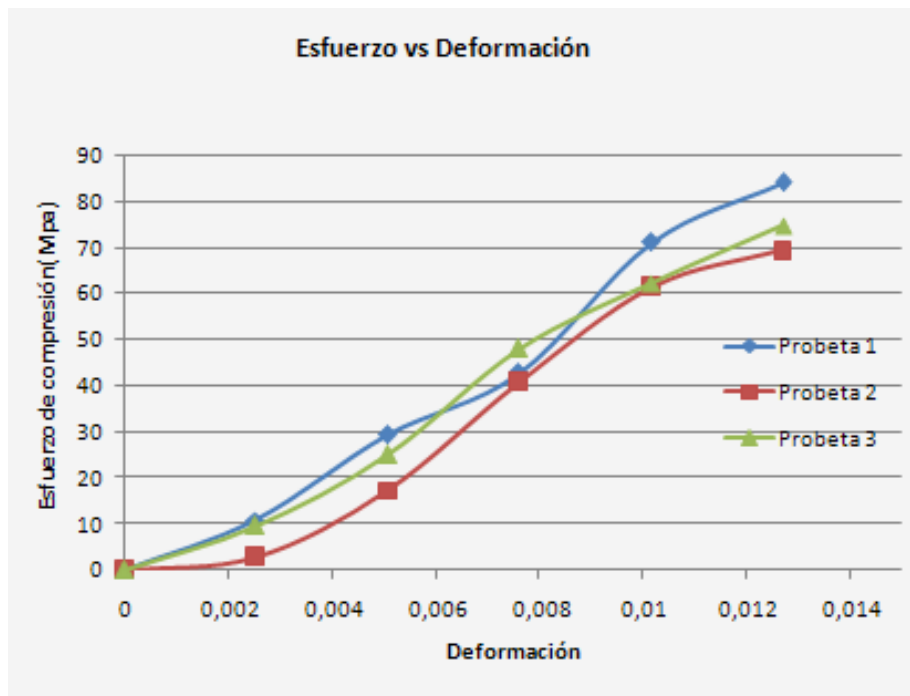
```
    end
```

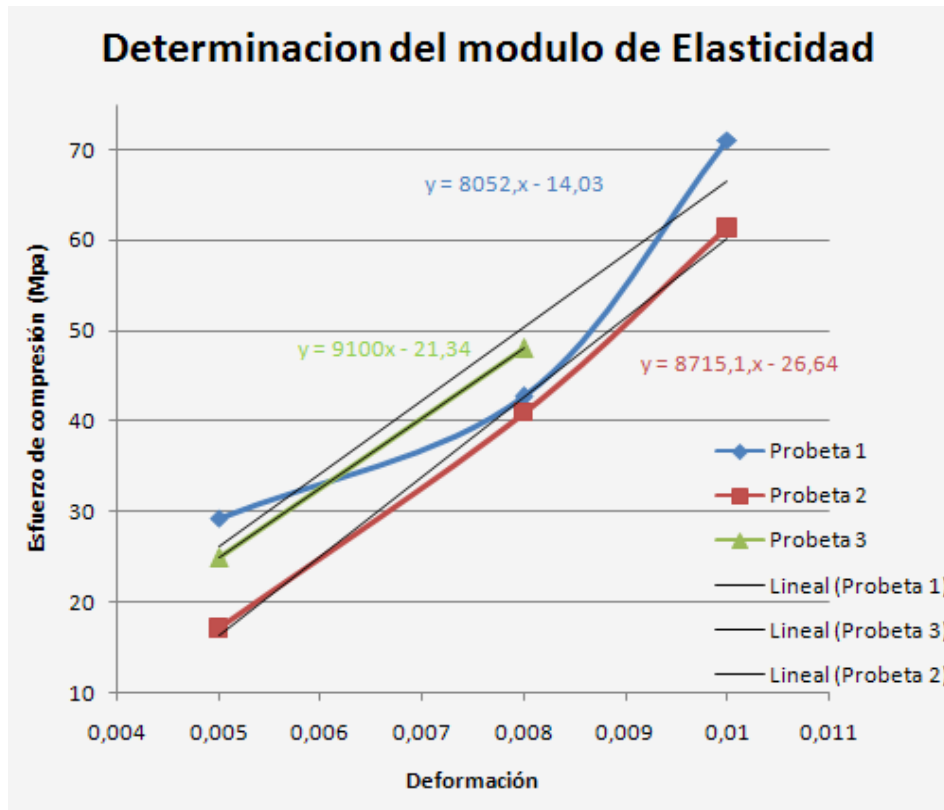
```
end
```

### ANEXO 3

14 días de inmersión

Deformación	Área (mm <sup>2</sup> )	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
		Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0	0	0	0	0
0,003	2500	10,8	2,8	9,6
0,005	2500	29,3	17,1	24,9
0,008	2500	42,7	40,9	48,0
0,010	2500	71,1	61,3	62,2
0,013	2500	84,1	69,3	74,7

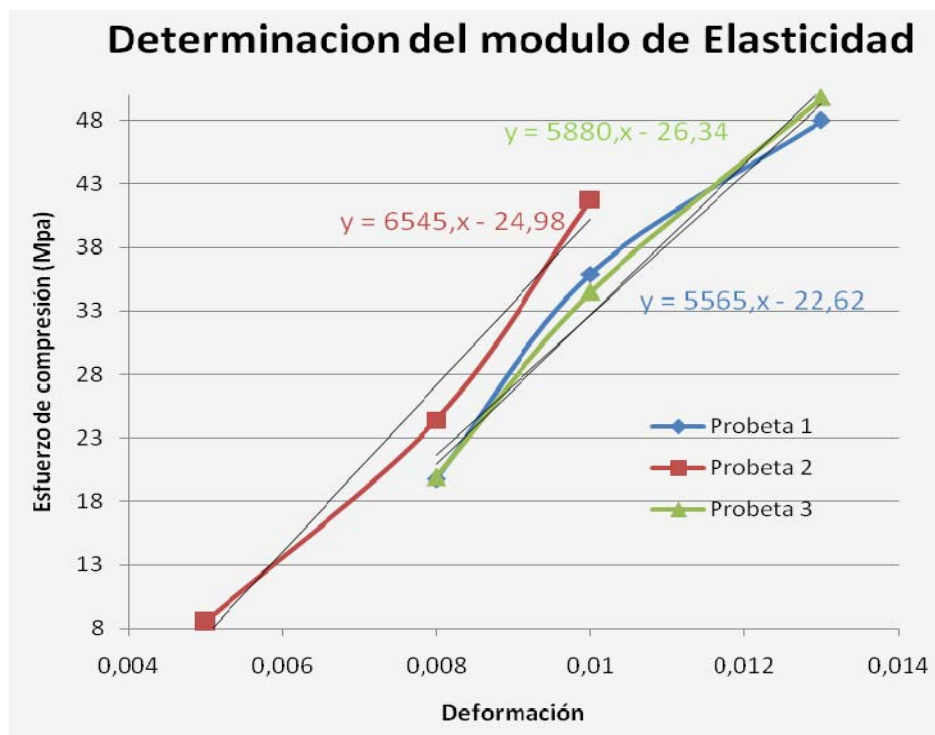
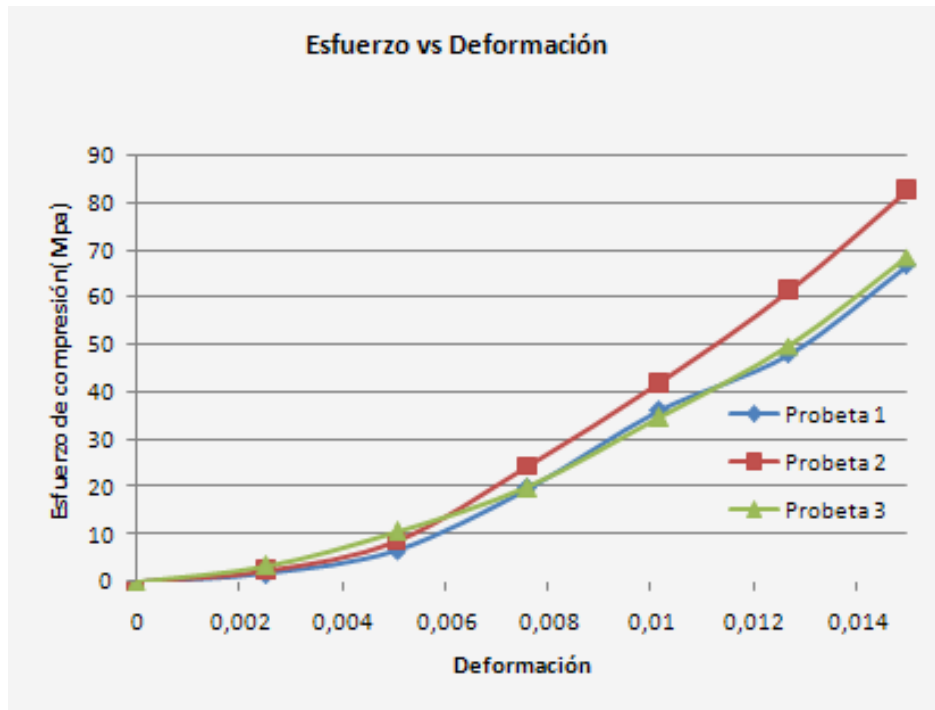




21 días de inmersión

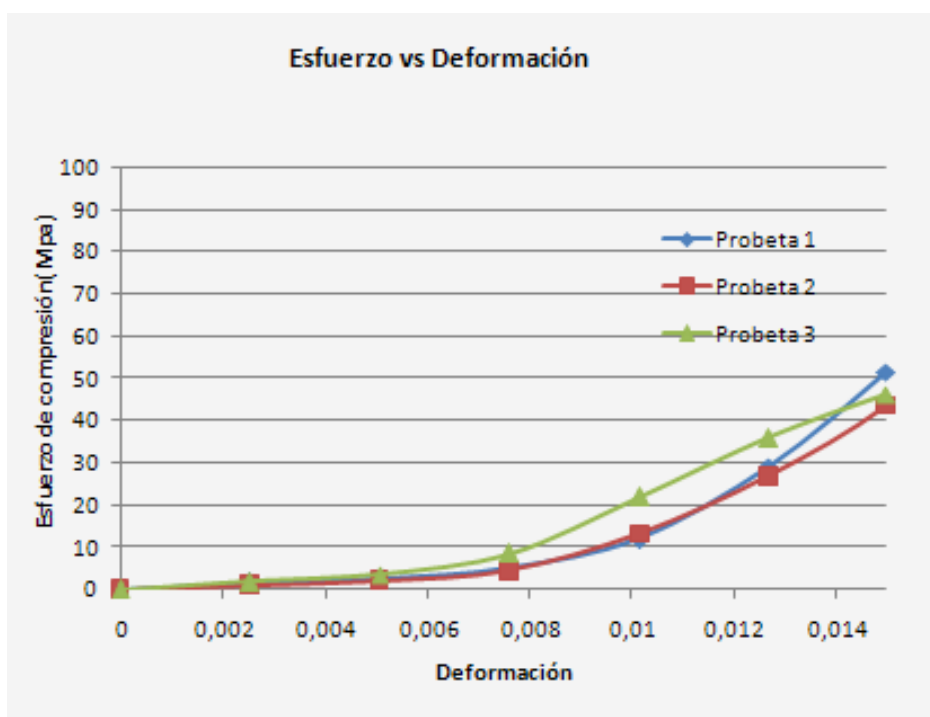
Deformación	Area (mm <sup>2</sup> )	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
		Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0	0	0	0	0
0,003	2500	1,6	2,3	3,4
0,005	2500	6,6	8,5	10,5
0,008	2500	19,7	24,4	19,9
0,010	2500	35,9	41,8	34,5
0,013	2500	48,0	61,3	49,8
0,015	2500	66,7	82,7	68,5



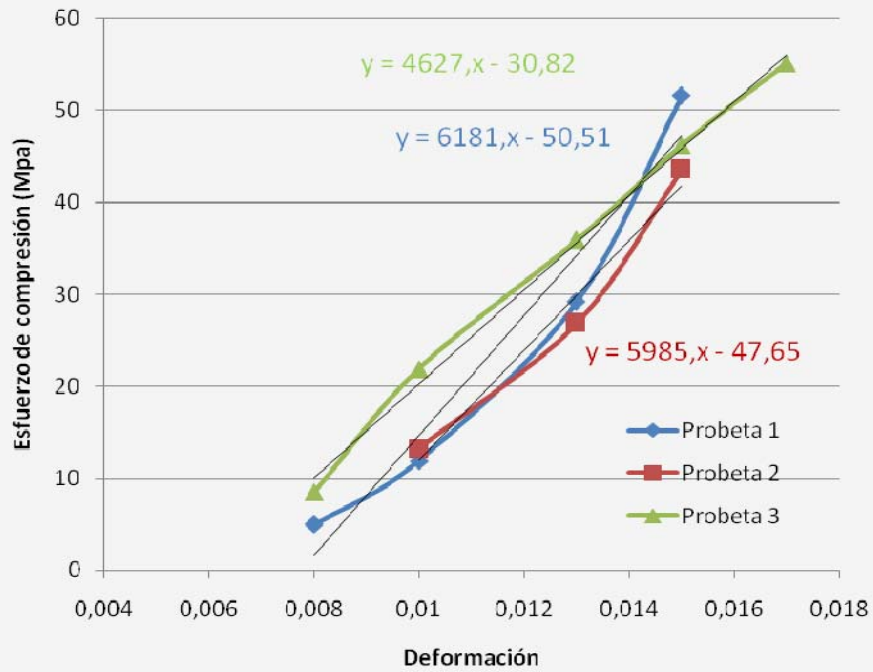


28 días de inmersión

Deformación	Area (mm <sup>2</sup> )	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
		Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0	0	0	0	0
0,003	2500	1,599	1,066	1,776
0,005	2500	2,666	2,132	3,555
0,008	2500	4,978	4,445	8,534
0,010	2500	11,913	13,156	21,87
0,013	2500	29,157	26,848	35,915
0,015	2500	51,564	43,563	46,229
0,017	2500	76,456	67,565	55,119
0,020	2500	85,346	87,091	64,01



## Determinación del modulo de Elasticidad

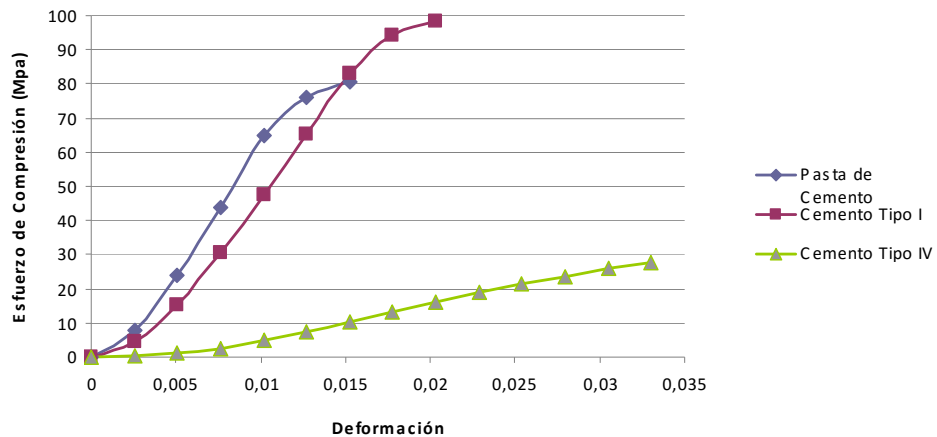


## ANEXO 4

### 14 días

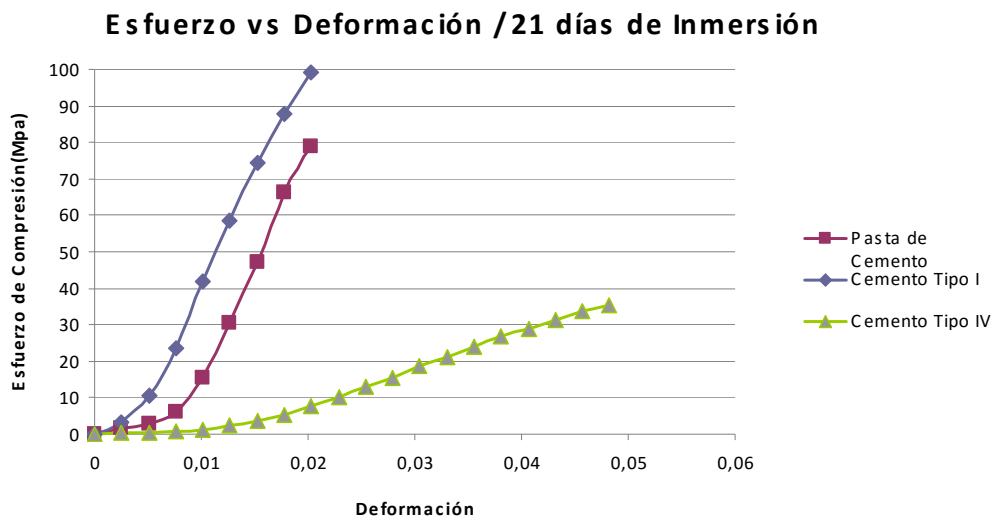
Deformación	Cemento IV $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I + Zeolita 2 25% $\sigma_{prom}$ (Mpa)
0	0	0	0
0,00254	0,41	4,53	7,76
0,00508	1,15	15,35	23,77
0,00762	2,59	30,63	43,86
0,01016	4,82	47,45	64,90
0,0127	7,29	65,27	76,04
0,01524	10,14	82,91	80,46
0,01778	13,23	94,37	
0,02032	16,02	98,49	
0,02286	18,82		
0,0254	21,55		
0,02794	23,52		
0,03048	26,02		
0,03302	27,55		

### Esfuerzo vs Deformación / 14 días de Inmersión



## 21 días

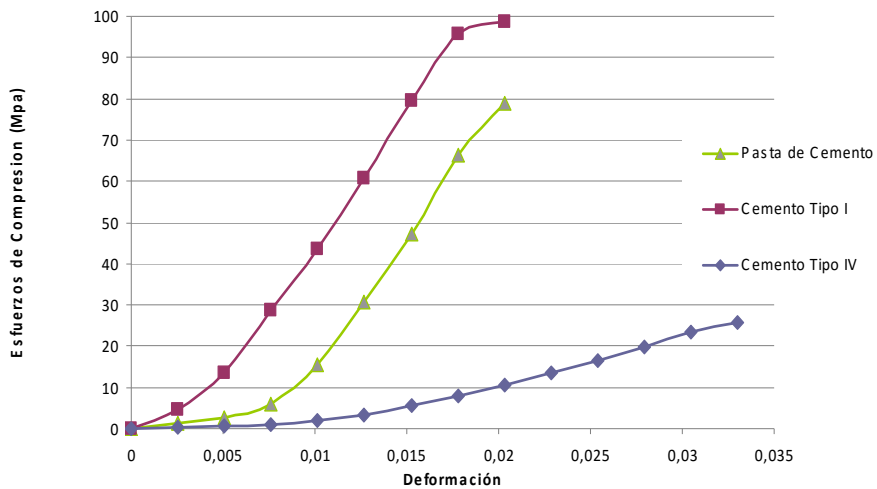
Deformación	Cemento IV $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I + Zeolita 2 25% $\sigma_{prom}$ (Mpa)
0	0	0	0
0,00254	0,21	3,18	1,48
0,00508	0,47	10,64	2,78
0,00762	0,79	23,58	5,99
0,01016	1,32	41,92	15,65
0,0127	2,50	58,51	30,64
0,01524	3,76	74,38	47,12
0,01778	5,47	87,61	66,38
0,02032	7,64	99,08	78,82
0,02286	10,14		
0,0254	12,94		
0,02794	15,58		
0,03048	18,52		
0,03302	21,32		
0,03556	24,05		
0,0381	26,75		
0,04064	28,96		
0,04318	31,31		
0,04572	33,66		
0,04826	35,28		



**28 días**

Deformación	Cemento IV $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I $\sigma_{prom}$ (Mpa)	Cemento I + Zeolita 2 25% $\sigma_{prom}$ (Mpa)
0	0	0	0
0,00254	0,26	4,76	1,48
0,00508	0,53	13,64	2,78
0,00762	0,99	28,64	5,99
0,01016	1,85	43,63	15,65
0,0127	3,15	60,56	30,64
0,01524	5,47	79,38	47,12
0,01778	7,97	95,55	66,38
0,02032	10,58	98,78	78,82
0,02286	13,49		
0,0254	16,61		
0,02794	19,79		
0,03048	23,31		
0,03302	25,81		

**Esfuerzo vs Deformación / 28 Días de inmersión**



## ANEXO 5

### Calculo de a

Se utilizo la relacion  $\sigma_y / \sigma_{crup} = 0.75$  con lo que se calculo el valor de **a**

$\sigma_{crup}$ .- Esfuerzo de compresion de ruptura

$\sigma_y$ .- Esfuerzo de fluencia

$$\sigma_{crup} = \sigma_y * (1+a)$$

### Calculo de m

$\sigma_{crup}$ .- Esfuerzo de compresion de ruptura ultimo

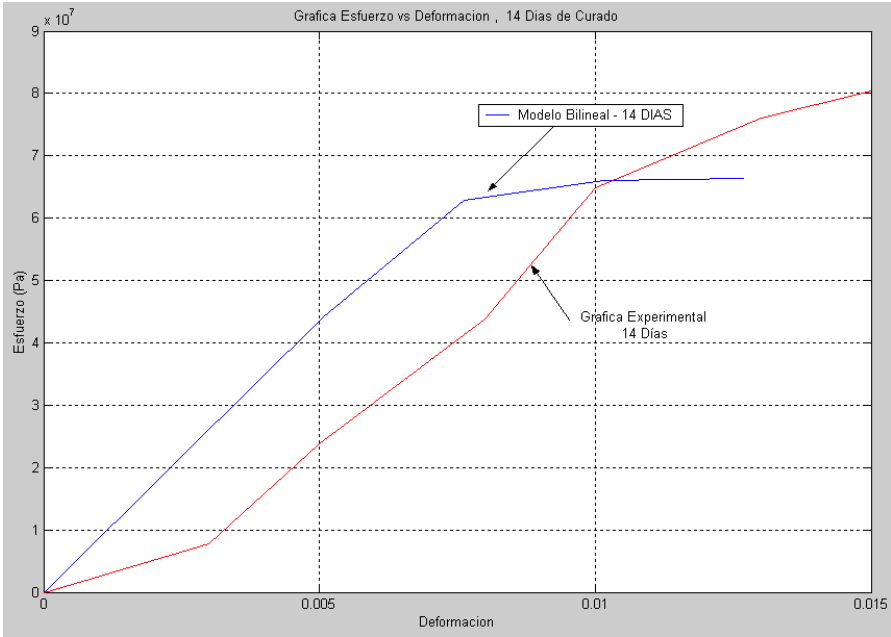
$\epsilon_u$ .- Ultima deformacion

$E_{prom}$ .- Modulo de rigidez promedio

$$m = \frac{E_{crup} - \sigma}{E}$$

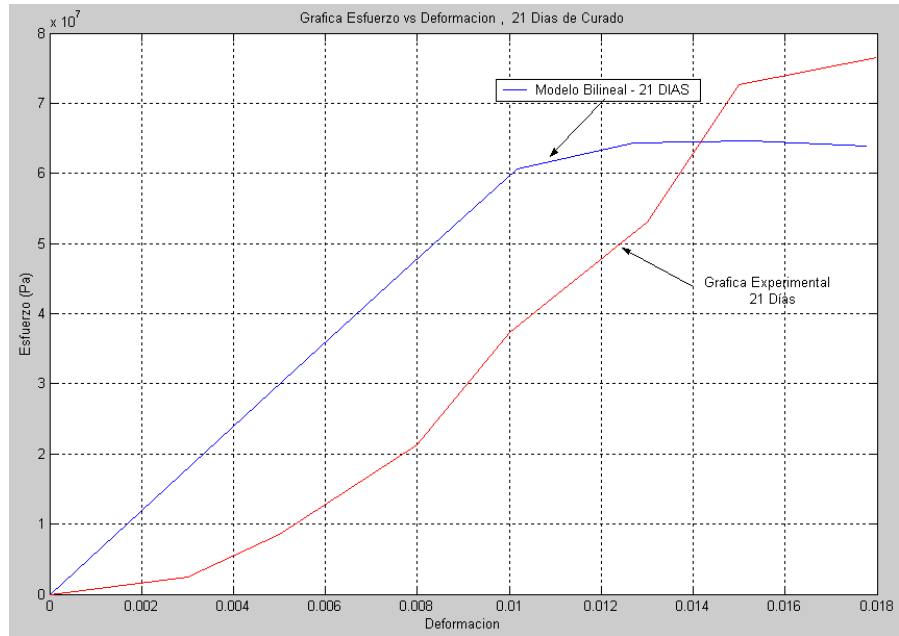
# ANEXO 6

## Simulacion 14 dias

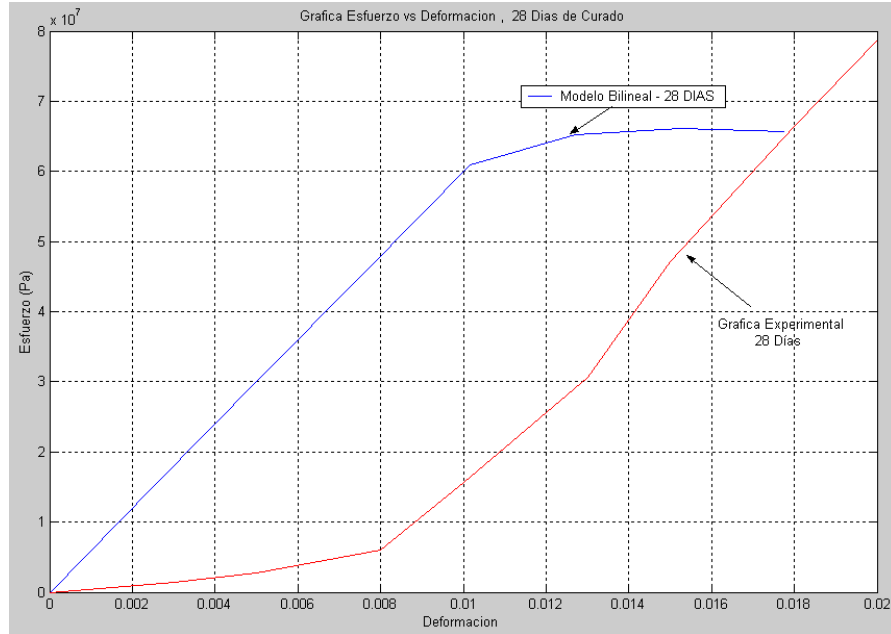




## Simulacion 21 dias



## Simulacion 28 dias



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Thomas Larson, "Concretos de Cemento Portland", Mayo 15,2008.
- [2] H.W.Taylor, "La química de los cementos", Mayo 02,2008.
- [3] Anónimo, "Las zeolitas son una familia de minerales aluminosilicatos hidratados", Link: <http://redmin.cl/?a=10440>,Marzo 10,2008.
- [4] Pedro Bosch, "La Zeolita una piedra que hierve", Marzo 15,2008.
- [5] Anónimo, "Zeolita", Link: <http://es.wikipedia.org/wiki/Zeolita>,.Febrero 15,2008.
- [6] Lana María, "Hormigonado con altas temperaturas: El curado del hormigón", Revista del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid, Mayo 29, 2008.
- [7] Robalino E. Paola, "*El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánico*", TESIS – Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL, 2004. Pág. 18-22.
- [8] Notas de la materia Teoría de Inelasticidad. Ph. D. José Andrade. Profesor de la universidad de Northwestern.
- [9] R.I. Borja, Plasticity Modeling and computation, Stanford University Lecture Notes, Chapter 2 and 3, 2006.

- [10] R. Hill, The mathematical theory of plasticity, Claredon Press, Oxford Cassic Series, 1998.
- [11] Irwin Miller, John E. Freud, Richard A. Johnson. Probabilidad y estadística para ingenieros. Prentice – Hall. Hispanoamericana S.A. México.
- [12] Walpole, Myers, Myers. Probabilidad y estadística para ingenieros. Pearson. México.

