

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA 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 5% y Curado en Agua”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Andrés Gabriel Céleri Montoya

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## AGRADECIMIENTO

A todos mis amigos que con su ayuda invaluable me ayudaron a culminar esta tesis y al resto de personas que de uno u otro modo colaboraron en este trabajo.

## DEDICATORIA

A DIOS

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI FAMILIA

A MIS AMIGOS

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

Andrés Gabriel Céleri Montoya

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

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

---

Ing. Juan Pindo M.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
VOCAL

---

Ing. Javier Bermúdez R.  
VOCAL

## RESUMEN

El objetivo del presente estudio es conocer si existen cambios en la resistencia uniaxial a la compresión del cemento Portland Tipo I al añadir Zeolita 2 al 5%.

Para llevar a cabo el objetivo se sigue un protocolo experimental basado en la norma ASTM C 109 y que consiste en la molienda de la roca zeolítica para la obtención de un agregado fino, la preparación de las probetas para los ensayos de compresión y los ensayos destructivos.

Para analizar la resistencia a la compresión se realizaron ensayos destructivos en las máquinas de ensayo de compresión sobre los morteros de pasta de cemento Portland Tipo I con adición de zeolita 2 al 5 % a los 7, 14, 21 y 28 días.

Para ver si existe incremento en la resistencia a la compresión los datos obtenidos se compararon con valores de resistencia a la compresión de probetas testigo de cemento Tipo I y Tipo IV sin ningún aditivo, también se compararon los datos entre los integrantes del grupo con el fin de observar cual es el porcentaje de adición de zeolita 2 que 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 5% en Matlab para verificar que el material cumple con la condición de ser del tipo elastoplástico.

Los datos también se ingresaron al programa Statistica para comprobar mediante análisis de varianza que existen diferencias significativas en el módulo de elasticidad dependiendo de los días de curado, también se analizó si existen dichas diferencias dependiendo del porcentaje de curado y de la combinación de ambos casos.

Al finalizar la tesis se observó un aumento en la resistencia a la compresión uniaxial del cemento Portland Tipo I al añadir 5% de zeolita 2

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 Planteamiento y Justificación del problema.....	3
1.2 Objetivos de la Tesis.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4

1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Metodología usada para el desarrollo de la Tesis.....	5
1.4 Estructura de la Tesis.....	7
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Cemento Portland Normal Tipo I.....	9
2.2 Zeolita .....	10
2.3 Métodos de Curado del Cemento.....	11
2.4 Diseño Factorial.....	13
2.4.1 Planteamiento del Problema.....	14
2.4.2 Factores y Dominio Experimental.....	14
2.4.3 Plan de Experimentación y Realización de los Experimentos....	15
2.4.4 Interpretación de los Resultados y Conclusiones.....	15
2.5 Método de Ponderación.....	15
2.6 El Estado del Arte de la Simulación del Cemento Portland Tipo I.....	17

2.6.1 Modelo de Predicción de la Resistencia a la Compresión desarrollado en un Concreto con Cenizas Volantes como Aditivo.....	17
2.6.2. Simulación Computarizada de Procesos de Fractura de Concreto utilizando Modelos de Mesonivel .....	24
2.6.3. Algoritmo para Modelar el Esfuerzo de Compresión de Materiales Heterogéneos.....	28
CAPÍTULO 3	
3. EXPERIMENTACIÓN.....	33
3.1 Protocolo Experimental.....	33
3.1.1 Molienda.....	34
3.1.2 Preparación de Probetas.....	37
3.1.3 Ensayos de Compresión.....	39
3.2 Diseño del Experimento.....	40
3.2.1 Consideraciones.....	40
3.2.2 Equipos.....	41
3.2.3 Materiales.....	42

3.2.4. Temperatura y Humedad.....	42
3.2.5 Preparación de los Moldes.....	43
3.2.6 Procedimiento.....	44
3.2.7 Cálculo.....	45

#### CAPÍTULO 4

4. COMPARACIÓN DE CAMBIOS DE PROPIEDADES.....	46
4.1 Tabulación de Datos y Resultados.....	46
4.2 Análisis de Datos y Resultados.....	53
4.3 Identificación de Cambio de Propiedades.....	54

#### CAPÍTULO 5

5. SIMULACIÓN DEL COMPORAMIENTO DEL MATERIAL .....	62
5.1 Simulación por Matlab.....	62
5.2 Análisis Estadístico.....	73

#### CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
--	----

6.1 Conclusiones.....81

6.2 Recomendaciones.....83

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Contenido de Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Calcio
cm	Centímetros
FA	Contenido de Cenizas Volantes (Kg/m <sup>3</sup> )
g	Gramos
in	Pulgadas
Kg	Kilogramos
min	Minutos
ml	Mililitros
MPa	Mega Pascales
N	Newton
TG-DSC	Termo Gravimetría – Escaneo Diferencial Calorimétrico
µm	Micrómetros
α	Contribución de las Cenizas Volantes a la Resistencia
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit

## SIMBOLOGÍA

F	Fuerza de Compresión
R	Resistencia a la Compresión
t	Tiempo (días)
$d_e$	Variación de la deformación
$d_{ef}$	Deformación Final
$\sigma_{y0}$	Esfuerzo Inicial
$\sigma_y$	Esfuerzo de Fluencia
$\sigma_{rup}$	Esfuerzo de Ruptura
E	Módulo de Elasticidad
W	Valor estadístico que contrasta si una muestra aleatoria procede de una distribución específicamente normal
$W_{calculado}$	Valor estadístico W calculado
$W_{tabulado}$	Valor estadístico W tabulado
$F_{crítico}$	Valor estadístico crítico de contraste en el Anova y otras pruebas de comparación de varianzas
$F_{calculado}$	Valor estadístico calculado de contraste en el Anova y otras pruebas de comparación de varianzas

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Metodología para desarrollar la presente Tesis.....	5
Figura 2.1 Desarrollo del Esfuerzo de Compresión a través del Tiempo.....	19
Figura 2.2 Contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a Los 28 Días y 6 Meses.....	21
Figura 2.3 Relación entre $\text{FA/C}$ y $\alpha$ .....	23
Figura 3.1 Protocolo Experimental.....	33
Figura 3.2. Reducción Inicial de Tamaño del Material.....	34
Figura 3.3. Molienda del Material.....	35
Figura 3.4 Tamizado del Material.....	35
Figura 3.5 Preparación de Probetas.....	37
Figura 3.6 Morteros Terminados.....	38
Figura 3.7 Máquinas utilizadas para realizar los Ensayos de Compresión....	39
Figura 3.8 Morteros utilizados conforme a la Norma ASTM C109.....	40
Figura 4.1 Esfuerzo Vs. Deformación del Mortero 1 a los 28 Días de Curado.....	49
Figura 4.2 Linealización de Curva Esfuerzo Vs. Deformación (Mortero 1)....	49
Figura 4.3 Esfuerzo Vs. Deformación del Mortero 2 a Los 28 Días de Curado.....	50
Figura 4.4 Linealización de Curva Esfuerzo Vs. Deformación (Mortero 2)....	51
Figura 4.5 Esfuerzo Vs. Deformación del Mortero 3 a los 28 Días de Curado.....	52
Figura 4.6 Linealización de Curva Esfuerzo Vs. Deformación (Mortero 3)....	52
Figura 4.7 Esfuerzo Vs. Deformación de las 3 Probetas a los 28 Días de Curado.....	53
Figura 4.8 Esfuerzos Promedio Vs. Deformación del Cemento Tipo I, Tipo IV y Tipo I con adición de Zeolita 2 al 5 % a los 28 Días de Curado.....	56
Figura 4.9. Esfuerzos de Compresión en Función del Porcentaje de Zeolita 2 añadido al Cemento Tipo I y los Días de Inmersión.....	58
Figura 5.1. Esquema del Algoritmo Return Mapping.....	66
Figura 5.2. Representación Gráfica de Valores introducidos en el Algoritmo.....	68

Figura 5.3. Modelo Experimental y Simulación En Matlab de Esfuerzo Vs. Deformación para Pasta De Cemento Tipo I con adición de Zeolita 2 al 5 % y 28 Días de Curado.....	69
Figura 5.4. Histograma De Eprom para Pasta de Cemento con una Concentración de 5% de Zeolita 2.....	72
Figura 5.5. Módulo de Elasticidad Promedio para los Diferentes Días de Curado.....	74
Figura 5.6. Esfuerzo de Ruptura Vs. Porcentaje de Zeolita 2 añadido al Cemento Portland Tipo I.....	79
Figura 5.7. Esfuerzo de Ruptura Vs. Días de Inmersión.....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tiempos de Molienda.....	36
Tabla 2 Granulometría de los Tamizados.....	36
Tabla 3 Esfuerzos en Mortero 1 a los 28 Días de Curado.....	48
Tabla 4 Esfuerzos en Mortero 2 a los 28 Días de Curado.....	50
Tabla 5 Esfuerzos en Mortero 3 a los 28 Días de Curado.....	51
Tabla 6 Esfuerzos Promedio del Cemento Tipo I y Tipo IV sin ningún Aditivo y Tipo I con 5 % de Zeolita 2 a los 28 Días de Curado.....	55
Tabla 7 Esfuerzos Máximos Promedio en Función del Porcentaje de Zeolita 2 adicionado y los Días de Inmersión.....	57
Tabla 8 Valores Ingresados al Algoritmo para Simulación del Comportamiento en Matlab.....	68
Tabla 9 Valores ingresados en el Software Statistica.....	71
Tabla 10 Análisis de Varianza Simple para los diferentes Días de Curado.....	73
Tabla 11 Intervalos de Confianza para los diferentes Días de Curado.....	74
Tabla 12 Datos Ingresados en el Software Statistica.....	76
Tabla 13 Análisis de Varianza Factorial para los diferentes Porcentajes de Zeolita 2, Días de Curado y Combinación de Ambos.....	77
Tabla 14 Intervalos de Confianza para los diferentes Porcentajes de Zeolita 2 añadido al Cemento Portland Tipo I.....	78
Tabla 15 Intervalos de Confianza para los diferentes Días de Curado.....	79

## INTRODUCCIÓN

A medida que la estructura del cemento es más porosa, menor se hace su resistencia a la compresión, por lo que se recomienda la elaboración de un material más fino como base, pero dicha decisión trae como consecuencia mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, lo que produce mayores cambios volumétricos del concreto y posibles agrietamientos en las estructuras.

Por lo expuesto anteriormente se busca la elaboración de un material más resistente a los esfuerzos de compresión, para ello se adicionará zeolita 2 (material puzolánico) al cemento Potland Tipo I, sin los inconvenientes que traería el uso de materiales más finos.

Se conoce como puzolanas a materiales silíceos o alumino-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

La zeolita 2 se encuentra fácilmente en el Ecuador por lo que los resultados obtenidos tienen una aplicación directa en nuestro país. Si se logra cumplir con el objetivo, dicho material podría ser una alternativa para los diferentes procesos de construcción que utilizan cemento y que están sometidos a sobrecargas.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 Planteamiento y Justificación del Problema

A medida que la estructura del cemento es más porosa, menor se hace su resistencia a la compresión, por lo que se recomienda la elaboración de un material más fino como base, pero dicha decisión trae como consecuencia mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, que produce mayores cambios volumétricos del concreto y posibles agrietamientos en las estructuras.

Para solucionar este problema se adicionan materiales puzolánicos como la zeolita 2 a la que se hace referencia en nuestra investigación, capaces de aumentar la resistencia a la compresión debido a las reacciones químicas que los mismos producen a través del tiempo.

## **1.2. Objetivos de la Tesis**

### **1.2.1 Objetivo General**

Analizar el efecto que se obtiene en el esfuerzo de compresión del cemento Portland Tipo I al adicionar 5 % de zeolita 2 y curado en agua.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Identificar las propiedades del cemento Portland Tipo I antes de comenzar los experimentos para poder comparar con los resultados finales.
- Elaborar un diseño de experimento de acuerdo a los conocimientos previos.
- Realizar la experimentación paso a paso según las normas.
- Análisis de datos y resultados de los experimentos, comprobando la congruencia de los mismos con análisis de varianza en el software Statistica y con el modelo en Matlab.
- Identificar cambios en las propiedades del cemento al final de la experimentación, tomando como referencia las pruebas realizadas en las probetas testigo.

### 1.3. Metodología usada para el desarrollo de la Tesis

La metodología de la presente tesis se haya generalizada en la figura 1.1 y se detalla a continuación:



**FIGURA 1.1. METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR LA PRESENTE TESIS**

- **Identificar Propiedades del Cemento Portland Tipo I.**

Por medio de referencias bibliográficas se darán a conocer las principales propiedades y los valores estándares de las mismas para poder realizar un análisis entre los valores iniciales y los obtenidos al final de los experimentos.

- **Diseño del Experimento.**

Las diferentes mezclas y las pruebas a realizarse se harán bajo la norma ASTM C109 y será mencionada y adjuntada conforme se desarrolle la tesis.

- **Experimentación.**

Por medio de la misma se recolectarán los datos de interés para analizar los cambios en las diferentes propiedades del cemento Portland Tipo I.

- **Análisis de Datos y Resultados.**

Una vez obtenidos y seleccionados los datos útiles de la experimentación se procede a la interpretación de los mismos.

- **Identificar Cambios de Propiedades.**

Con los resultados obtenidos se puede identificar claramente el cambio de propiedades y analizar si los mismos son beneficiosos o no para la base de cemento Portland utilizada.

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

El capítulo 1 se llama “Generalidades” y presenta el problema al cual trata de darse solución, los objetivos que se persiguen con el desarrollo de la tesis y los pasos a seguir con el fin de cumplir los mismos.

El capítulo 2 se llama “Marco Teórico” y contiene toda la bibliografía necesaria para el buen entendimiento del problema y familiarizarse con todo lo concerniente al cemento y sus propiedades.

El capítulo 3 se llama “Experimentación” y en el se encuentra todo lo concerniente a los experimentos realizados, el protocolo con todos sus pasos y el diseño experimental a seguir.

El capítulo 4 se denomina “Comparación de Cambio de Propiedades” y en el mismo se analizan los cambios obtenidos durante los experimentos en función del cemento Portland Tipo I y Tipo IV sin ningún aditivo y en función de los otros porcentajes de zeolita 2 utilizados por los compañeros.

En el capítulo 5 llamado “Simulación del Comportamiento del Material” se realiza una simulación del comportamiento del cemento Portland Tipo I con adición de zeolita 2 al 5% en Matlab y se analizan los datos experimentales por medio del software Statistica para encontrar diferencias significativas que indiquen que la adición de zeolita 2 afecta el comportamiento de la resistencia a la compresión.

El capítulo 6 se llama “Conclusiones y Recomendaciones” y es donde se da a conocer si los objetivos iniciales fueron alcanzados y se dan recomendaciones acerca de la parte experimental para obtener mejores resultados.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Cemento Portland Normal Tipo I

El cemento Portland Tipo I se utiliza para el concreto, concreto reforzado y, con o sin cal y para morteros. Se fabrica a partir de una mezcla de alrededor de 80 % de carbonato de calcio (caliza, creta o marga) y alrededor de 20 % de arcilla (esquisto arcilloso o escoria). Después de mezclados, los materiales se muelen a un grano muy fino, por un proceso húmedo o seco y luego se calcinan en hornos rotatorios hasta que se produzca el clínquer. Cuando se ha enfriado, se muele hasta formar un polvo fino. Durante la molienda se suele agregar un poco de yeso para regular el fraguado del cemento [1].

Este tipo de cemento es uno de los cinco que se incluyen en la especificación ASTM C150 y se utiliza para aplicaciones en las cuales no se requiere otro tipo que tenga propiedades especiales tales como estructuras, edificios de concreto reforzado, puentes, pavimentos de carreteras, pisos, tanques, reservorios, y productos de concreto premoldeado [2].

Al cemento Portland Tipo I y a todos los tipos de cemento se le pueden agregar materiales puzolánicos con el fin de mejorar su plasticidad, dureza y resistencia. Entre los materiales más utilizados para este propósito se encuentran las cenizas volantes, limonita y diferentes tipos de zeolita; para el siguiente estudio se utilizará zeolita tipo 2 que se encuentra dentro de nuestro país.

## **2.2. Zeolita**

Las zeolitas son aluminosilicatos (contienen aluminio, silicio, hidrógeno, oxígeno, y un número variable de moléculas de agua) con cavidades de dimensiones moleculares de 3 a 10 angstrom considerados como tamices moleculares porque pueden absorber selectivamente moléculas en base a su tamaño. Contienen iones grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento, para así poder permitir el intercambio iónico. Existen varios tipos de zeolita, nueve principales, y que surgen en las rocas sedimentarias: chabazita, clinoptilolita, heroinita, mordenita, estilbita, ferrierita, filipsita, huelandita y laumantita [3].

Entre las propiedades más importantes de la zeolita para nuestro estudio se encuentran [4]:

- Alto grado de hidratación

- Baja densidad y un gran volumen de vacíos cuando es deshidratada.
- Gran habilidad para absorber gases y vapores.

Las zeolitas naturales pueden utilizarse en la preparación de hormigón ligero para la construcción. Su estructura de silicato poroso hace que sean mucho más ligeros que la arena y dan más volumen por tonelada de producto con una dureza y resistencia similares.

La zeolita no contiene barro que disminuye la resistencia del hormigón y su estructura porosa retiene la humedad lo que facilita que el hormigón cure más rápidamente [5].

### **2.3. Métodos de Curado del Cemento**

Al mezclar el cemento con el agua ocurre una reacción química llamada hidratación que influye en la resistencia y durabilidad del concreto, un curado adecuado del cemento es necesario para asegurar la hidratación deseada [1].

El cemento debe mantenerse húmedo al menos por 7 días y no se debe dejar que la temperatura descienda a menos de 50° F cuando menos durante 3 días por lo que deben tomarse precauciones especiales durante tiempo muy frío y en tiempo muy caluroso.

El curado influye notablemente la durabilidad, dureza, impermeabilidad del agua, estabilidad de volumen, resistencia a la compresión, abrasión, congelamiento y descongelamiento del cemento [2].

El método más efectivo para el curado depende de los materiales utilizados, método de construcción y uso del hormigón. Para la mayoría de los trabajos el curado involucra aplicación de compuestos o cubrir el concreto fresco con capas impermeables o con un tejido húmedo. Cuando el clima es muy adverso se deben tomar otras precauciones.

El cemento se puede mantener húmedo mediante tres métodos:

- Métodos que mantienen la presencia de agua durante los primeros días del endurecimiento. Se incluye la inmersión, rociado y cubiertas húmedas saturadas.
- Métodos que reducen la pérdida de agua de la superficie de la mezcla. Estos se pueden realizar con papel o láminas de plástico impermeables o la aplicación de compuestos de curado formadores de membrana sobre el hormigón recién colocado.
- Métodos que aceleran el aumento de la resistencia con calor y humedad adicional. Generalmente se utiliza vapor o electricidad.

Para nuestro estudio se utilizará el primer método, conocido como método de curado en agua por el permanente contacto de la mezcla con la misma.

El método de curado o combinación de los mismos depende de factores como disponibilidad de los materiales de curado, tamaño, forma, estética y factor económico y el tiempo empleado para cada método se haya regulado por la norma ACI 308 1997 dependiendo del grado de endurecimiento requerido.

#### **2.4. Diseño Factorial**

Para un mejor análisis es necesario conocer las variables que influyen significativamente en el sistema y cómo afectan. Para ello 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 [6].

El diseño factorial 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.

El desarrollo de este diseño se lo hace mediante los siguientes pasos:

#### **2.4.1. Planteamiento del Problema**

Se pretende determinar en que grado puede afectar el porcentaje de zeolita 2 y el tipo de curado a la resistencia a la compresión del cemento.

#### **2.4.2. Factores y Dominio Experimental**

Se seleccionan los factores que interesa estudiar y que valores pueden tomar (dominio experimental), en este caso serán el tiempo de curado y la resistencia a la compresión.

### **2.4.3. Plan de Experimentación y Realización de los Experimentos**

Se escoge la estrategia experimental óptima y se obtiene el plan de experimentación, que comprende, de forma estructurada y fácilmente comprensible, la lista de experimentos a realizar, tomando en cuenta que todos sean factibles.

### **2.4.4. Interpretación de los Resultados y Conclusiones**

Con la combinación de los resultados podemos obtener el valor promedio y los efectos principales de las diferentes variables.

## **2.5. Método de Ponderación**

El método de ponderación a utilizar será mediante regresión lineal que es un modelo matemático que relaciona una variable dependiente con las variables independientes y un término aleatorio. Para este estudio todos los cálculos se realizarán en el programa Statistica[7].

El modelo lineal relaciona la variable dependiente  $Y$  con  $K$  variables explicativas  $X_k$  ( $k = 1, \dots, K$ ).

$$Y = \sum \beta_k X_k + \varepsilon$$

$\varepsilon$  es la perturbación aleatoria que recoge todos aquellos factores de la realidad no controlables u observables. En el caso más sencillo de dos variables explicativas se obtiene una recta:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Para elegir los valores de los parámetros desconocidos  $\beta_k$ , se necesita un conjunto de observaciones. En una observación cualquiera  $i$ -ésima ( $i= 1, \dots, n$ ) se registra el comportamiento simultáneo de la variable dependiente y las variables explicativas.

$$Y_i = \sum \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

Los valores escogidos como estimadores de los parámetros,  $\hat{\beta}_k$ , son los coeficientes de regresión, sin que se pueda garantizar que coinciden con parámetros reales del proceso generador. Por tanto, en

$$Y_i = \sum \hat{\beta}_k X_{ki} + \hat{\varepsilon}_i$$

Los valores  $\hat{\varepsilon}_i$  son estimaciones de la perturbación aleatoria.

Las rectas de regresión son las rectas que mejor se ajustan a la nube de puntos (o también llamado diagrama de dispersión) generada por una distribución binomial. Las mismas se obtendrán fácilmente mediante el uso del programa Statistica.

## **2.6. El Estado del Arte de la Simulación del Cemento Portland Tipo I**

### **2.6.1. Modelo de Predicción de la Resistencia a la Compresión desarrollado en un Concreto con Cenizas Volantes como Aditivo**

Basado en resultados experimentales con respecto a la resistencia a la compresión desarrollada en concreto que contiene ceniza volante, los autores del estudio determinaron una ecuación de estimación de resistencia a la compresión [8].

El aditivo ceniza volante induce reacciones puzolánicas a medida que la edad del concreto aumenta, actuando como cubierta dura. La resistencia a la compresión depende del método de adición y cantidad adicionada.

Para esto es necesario una ecuación modelo cuando se proporcione concreto que tenga contenido de ceniza

volante, estimando la resistencia a la compresión tomando en cuenta sus propiedades.

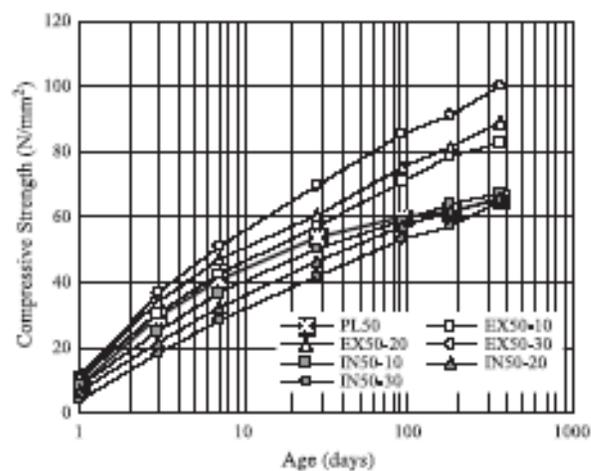
El procedimiento para las pruebas se llevó a cabo bajo la norma ASTM C-39. El concreto se mezcló a una temperatura de 20 y una humedad relativa de 60% o más. La caída, el contenido de aire, la masa, y la compresión se midieron de acuerdo a normas. Los especímenes de compresión de 10 cm de diámetro y 20 cm de largo se moldearon a una edad de un día y se les realizó un curado estándar.

El volumen de poros y contenido de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se midieron para investigar el efecto de llenado el espacios de las cenizas volantes y el efecto de reacción puzolánico en la estructura de poros y contenido de hidratos. El volumen de poros se mide por la penetración de mercurio, mientras que el contenido  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se midió por el método TG-DSC.

En la Fig. 2.1 se muestra el desarrollo de la resistencia a la compresión sobre el tiempo. Sin cenizas volantes, PL, la tasa de desarrollo de resistencia disminuye significativamente después de 28 días.

Cuando se añaden cenizas volantes en lugar de una parte de cemento, IN, gana fuerza continuamente con el tiempo.

Por otra parte, las cenizas volantes en lugar del agregado fino, EX, aumenta la resistencia de una edad temprana durante un largo período.



**FIGURA 2.1. DESARROLLO DEL ESFUERZO DE COMPRESIÓN A TRAVÉS DEL TIEMPO**

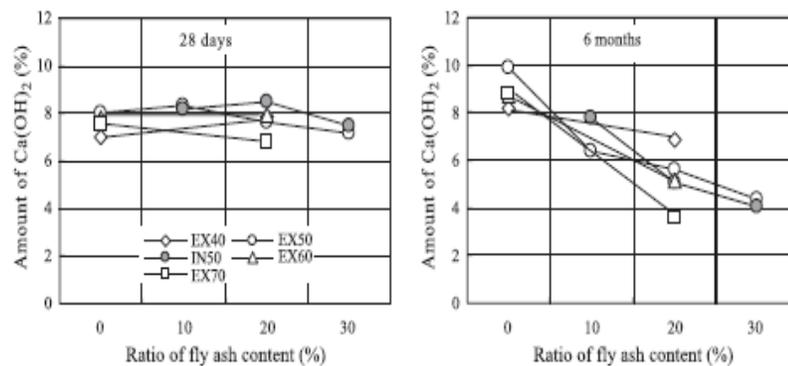
Fuente: K. Hwang et al. / Cement and Concrete Research 34 (2004)

A los 28 días, las cenizas volantes en los especímenes EX dan lugar a un menor volumen total de poros, mientras que las cenizas volantes en los especímenes IN dan lugar a un mayor volumen total de poros que los especímenes sin cenizas volantes.

Al aumentar el contenido de cenizas volantes, el volumen de poros de las muestras EX disminuyó mientras que en IN aumenta.

A los 6 meses, el total de volúmenes de poros en NO, IN, y EX fueron inferiores que a los a los 28 días, pero las diferencias entre los métodos y la adición de contenido de cenizas volantes son más pequeñas que a los 28 días.

Cuando las cenizas volantes se mezclan con el agua, junto con el cemento, se induce a una reacción puzolánica. Esto reduce el contenido de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que es una debilidad en la resistencia del concreto, mientras que el aumento de gel C-S-H, se encarga de la formación de la estructura del cemento endurecido, lo que garantiza la resistencia por largo tiempo.



**D**

**FIGURA 2.2. CONTENIDO DE  $\text{Ca(OH)}_2$  A LOS 28 DÍAS Y 6 MESES**

Fuente: K. Hwang et al. / Cement and Concrete Research 34 (2004)

Este artículo propone una ecuación de estimación de desarrollo de resistencia puntuándose en el hecho de que la resistencia a la compresión del concreto con cenizas volantes comienza gradualmente a reaccionar puzolánicamente a medida que aumenta el tiempo, tomando la forma de una cubierta dura.

La resistencia a la compresión es una función lineal de la relación agua-cemento, y su relación se puede expresar como Eq. (2). Los valores de  $A(t)$  figuran en tablas. Los valores de  $B(t)$  pueden ser juzgados como constantes, independientemente de la edad.

$$f_c(t) = A(t)(C/W) + B(t) \quad (2)$$

Donde:

$f_c(t)$  = Resistencia a compresión a t días (N/mm<sup>2</sup>).

C = Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>).

W = Unidad de contenido de agua (kg / M<sup>3</sup>).

A (t) = Función de la edad (t días).

B (t) = Constante.

Como las cenizas volantes contenidas en el concreto desempeña un papel de una cubierta dura, Eq. (2) se puede modificar como Eq. (3).

$$f_c(t) = A(t) \left( \frac{\alpha FA + C}{W} \right) + B \quad (3)$$

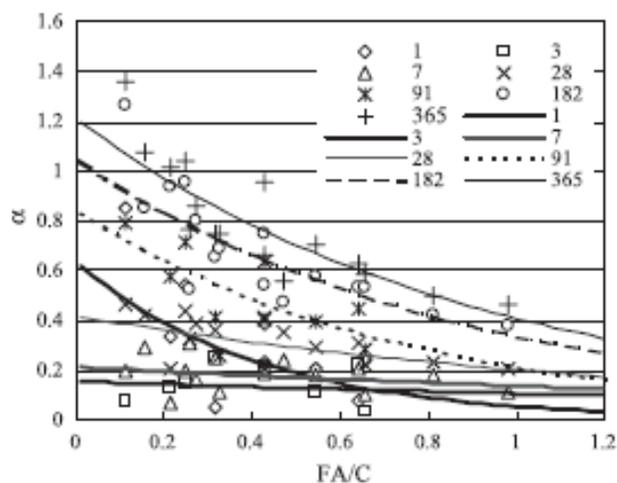
$$A(t) = \frac{t}{a + bt} \quad (4)$$

$\alpha$  = Contribución de las cenizas volantes a la resistencia.

FA = Contenido de cenizas volantes (kg/m<sup>3</sup>).

a,b = Constantes experimentales

Las cenizas volantes contribuyen a la resistencia por un mecanismo diferente al primer día. En el primer día, la adición de cenizas volantes incrementa la ubicación de los depósitos de hidratos, mientras que la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$  en la fase líquida disminuye. Por otra parte, el mecanismo de la contribución de cenizas volantes a la resistencia a los 2 días se rige por una reacción puzolánica (Fig. 2.3). Por lo anterior se utilizan  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  en la ecuación de predicción.



**FIGURA 2.3. RELACIÓN ENTRE FA/C Y  $\alpha$**

Fuente: K. Hwang et al. / Cement and Concrete Research 34 (2004)

$$f_c(t) = \left( \frac{t}{a + bt} \right) \left( \frac{\alpha_1 \alpha_2 FA + C}{W} \right) + B$$

La ecuación obtenida es capaz de explicar el temprano aumento de la resistencia debido a las cenizas volantes en lugar de una parte de agregado fino, la disminución de la resistencia temprana debido a las cenizas volantes en lugar de una parte de cemento, los aumentos a largo plazo de la resistencia debido a una reacción puzolánica, la relación entre la razón de sustitución de cenizas volantes y la razón de la resistencia en aumento o disminución, y el efecto de las cenizas volantes sobre la marca de superficie específica en la resistencia.

#### **2.6.2. Simulación Computarizada de Procesos de Fractura de Concreto utilizando Modelos de Mesonivel**

Las simulaciones de mesonivel fueron usadas para describir procesos de fractura en concreto. Para el análisis 2-D, fueron idealizadas rodajas del modelo 3-D como marcos planos, mientras que para análisis 3-D los especímenes fueron idealizados como estructuras espaciales [9].

Los resultados de estas simulaciones concuerdan con las observaciones experimentales.

Para obtener un mayor entendimiento de los procesos físicos son necesarios modelos considerando la naturaleza heterogénea del concreto.

Deben considerarse 3 modelos mecánicos para el concreto: A nivel macroscópico, el material es considerado homogéneo. A nivel microscópico, el modelado es medio poroso.

A nivel intermedio (mesoscópico), el concreto se considera como pequeños agregados rodeados por pasta dura de cemento; este modelo ha demostrado ser adecuado para describir el comportamiento de fractura.

El mecanismo generado debe cumplir los siguientes requerimientos:

- La ubicación de las partículas agregadas no debe tener correlaciones.
- La forma y medida de las partículas debe ser aleatoria dentro de límites dados.
- La distribución espacial del agregado debe ser relativamente uniforme.

- La medida de distribución dada y el contenido de los agregados deben coincidir exactamente.
- El máximo contenido de agregado debe ser tan alto como en el concreto real.

En el nuevo modelo las partículas agregadas son asumidas como elipsoides y controlando el radio entre ejes se pueden obtener una variedad de formas, es utilizable para idealización 2-D y 3-D.

La manera más trivial de ubicar partículas agregadas en el área de estudio es haciéndolo puramente aleatorio, pero la eficiencia es muy pobre, por lo que se propone que se genere la estructura del agregado matriz en 2 pasos:

Generación de Partículas, determinación de la medida y forma de todas las partículas agregadas para coincidir el tamaño de distribución y el contenido de agregado.

Por lo tanto la longitud de los ejes es seleccionada aleatoriamente dentro de los límites de 2 medidas y el eje más pequeño es calculado directamente dependiendo de la redondez de la partícula.

Localización de la Partícula, el punto central coordina y las direcciones de los ejes se determinan partícula por partícula empezando por las más grandes, si la partícula está sobrepuesta en una anterior se emplea un algoritmo para mover la partícula al lugar adecuado.

En el proceso real de ubicación y compactado del concreto, las partículas más pequeñas son ajustadas por la solución de las más largas, por ello el mecanismo propuesto es más real que un procedimiento aleatorio.

Los modelos de mesonivel son herramientas para describir efectos cualitativos y cuantitativos de diferentes materiales dentro de las propiedades mecánicas de un compuesto.

En pruebas experimentales es difícil investigar la influencia de cambios en propiedades de componentes independientes.

La mayoría de estos modelos se han desarrollado para simulaciones bajo tensión, debido a que este tipo de falla es más clara y fácil de implementar, sin embargo las idealizaciones y asunciones son válidas sólo para

situaciones de carga en particular y no describen el comportamiento real del material.

Las comparaciones entre simulaciones del mismo espécimen bajo diferentes condiciones de carga son útiles para detectar inconsistencias en modelos.

Las idealizaciones de modelos 3-D requieren mayor esfuerzo computacional y el análisis 2-D tiene grandes limitaciones, pero sirve para el desarrollo de modelos.

Hay una gran mejora en simulaciones de concreto bajo compresión y un mejor entendimiento de la conducta del mismo debido a la obtención de una estructura de concreto más real.

### **2.6.3. Algoritmo para Modelar el Esfuerzo de Compresión de Materiales Heterogéneos**

Un algoritmo basado en la discretización de un elemento finito es aplicado a imágenes digitales, que permiten la determinación de esfuerzos de compresión de materiales altamente heterogéneos siguiendo el criterio de Mohr-Coulomb [10].

Este algoritmo se resuelve analíticamente para un material compuesto laminado, y luego aplicado a capas 2D de modelos micro estructurales de pasta de cemento 3D, dando buenos resultados.

El modelado de los comportamientos de esfuerzos es difícil debido a la naturaleza no lineal de los principios mecánicos. El primer grupo de métodos comprende sobre-dimensionamiento de esfuerzo basado en teorías de análisis de límites.

El segundo grupo deriva lo anterior basado en un análisis asintótico de un material elástico equivalente, esta aproximación ha sido bien aplicada para materiales puramente cohesivos, y para el efecto de propiedades de interfase de compuestos muy "lentos".

Ambos procedimientos requieren un alto nivel de idealización de la micro estructura compleja de materiales reales en 2 o 3 fases, típicamente una fase matriz y una de inclusión y la interfase consecuente.

Lo que se quiere demostrar en este estudio es que el algoritmo puede ocuparse de los materiales heterogéneos complejos. Para lo cual se seleccionó una goma del cemento, que es un material altamente heterogéneo.

Se compone de diversas fases sólidas: Portlandite (CH), Calcio-Silicato-Hidrato (C-S-H), y fases residuales de la escoria del cemento (C3S); y porosidad.

Estas cuatro fases se consideran en el modelo y aunque la goma del cemento tiene muchas otras fases, estas son las principales. Las fracciones del volumen de fases de menor importancia se han incorporado en estas cuatro fases. Asumimos que las diversas fases (excepto la porosidad) siguen un criterio de la producción de Drucker- Prager. C3S y CH que son materiales cristalinos, casi se comportan probablemente como material sin fricción; por lo tanto asignamos un coeficiente muy bajo de la fricción a esas fases.

La fuerza macroscópica disminuye cuando la porosidad aumenta, y aumenta mientras que la fase de alta resistencia (la fase de la escoria de C3S) aumenta.

Lo mencionado anteriormente es constante, con la evidencia física que la porosidad tensiona concentraciones alrededor de los poros y disminuye la capacidad total de la fuerza.

Los valores obtenidos están en el mismo orden de la magnitud que el valor experimental resuelto. La diferencia entre los valores experimentales y teóricos es debido a varias limitaciones del modelo.

El algoritmo converge hacia los límites más bajos. Lo bueno es la característica de la convergencia, lo malo es que el radio de convergencia requiere archivos de gran tamaño de imagen digital para representar adecuadamente la microestructura, que a menudo no alcanzan en una sola computadora.

El método propuesto puede utilizar fácilmente otros criterios que son necesarios para describir exactamente el comportamiento del esfuerzo de las fases individuales presentes en materiales altamente heterogéneos.

El algoritmo fue diseñado para trabajar con imágenes digitales de un archivo de entrada, al cual se realizan particiones o mallas.

El reciente desarrollo de técnicas que proveen una malla inicial reducen la necesidad de refinar dicha malla varias veces.

El modelo hace cumplir continuidad de la tensión en los interfaces entre los elementos, pero no hace cumplir un criterio específico del esfuerzo del interfaz. Este acercamiento es apropiado para modelar las fases a granel presentes en la microestructura.

Una predicción exacta de las propiedades de esfuerzos de materiales heterogéneos depende la representación de la microestructura por imágenes digitales, y las propiedades de esfuerzo de las fases individuales y sus eventuales interfaces.

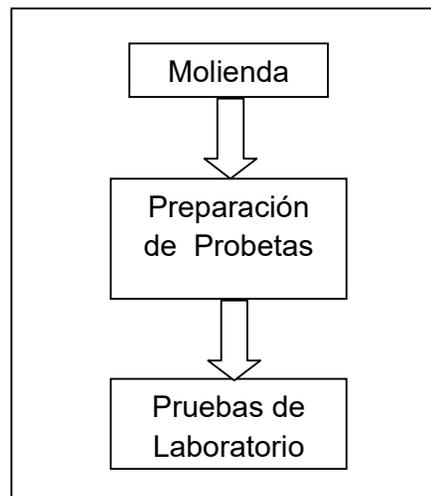
# CAPÍTULO 3

## 3. EXPERIMENTACIÓN

Para realizar la experimentación se siguieron los pasos del protocolo experimental desarrollado a continuación, teniendo en consideración la Norma ASTM C109: Método de Prueba Estándar de Esfuerzo de Compresión para Morteros de Cemento Hidráulico.

### 3.1. Protocolo Experimental

El protocolo para la experimentación comprende los siguientes pasos:



**FIGURA 3.1. PROTOCOLO EXPERIMENTAL**

### 3.1.1. Molienda

El proceso de molienda empieza por reducción manual de tamaño utilizando un combo, posteriormente se llevan los pedazos obtenidos a la trituradora de mandíbulas.



**FIGURA 3.2. REDUCCIÓN INICIAL DE TAMAÑO DEL MATERIAL**

De la trituradora de mandíbulas se lleva a la trituradora de rodillos y se realiza el primer tamizado para observar el tamaño de grano obtenido hasta el momento.

Luego se lleva el material al molino de discos y al molino de bolas realizando un tamizado al final de cada proceso, si la granulometría del 75 % del material es la deseada ( $45\ \mu\text{m}$ ) se da fin al proceso, caso contrario se lleva nuevamente el material al molino de bolas.



**FIGURA 3.3. MOLIENDA DEL MATERIAL**



**FIGURA 3.4. TAMIZADO DEL MATERIAL**

A continuación se halla tabulado el tiempo de molienda por cada paso y el resultado de los 2 primeros tamizados, conociendo que en el tamizado final se llegó a una granulometría de 45  $\mu\text{m}$  en el 75 % del material como se deseaba.

**TABLA 1**

**TIEMPOS DE MOLIENDA**

Trituradora de Mandíbulas	10 min
Trituradora de Rodillos	10 min
Tamizado	15 min
Molino de Discos	10 min
Tamizado	15 min
Molino de Bolas	55 min
Tamizado	15 min

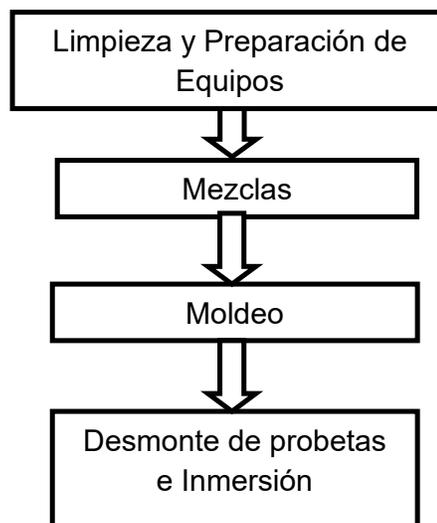
**TABLA 2**

**GRANULOMETRÍA DE LOS TAMIZADOS**

<b>Número de Malla</b>	<b>Primer Tamizado</b>	<b>Segundo Tamizado</b>
14 (14 mm)	58	19.5
18 (1 mm)	10	15.5
40 (425 $\mu\text{m}$ )	14	27.5
50 (300 $\mu\text{m}$ )	3	7
Fondo	14	30
Peso Final	99 gr.	99.5 gr.

### 3.1.2. Preparación de Probetas

La preparación de las probetas para la experimentación se realizó siguiendo los siguientes pasos:



**FIGURA 3.5. PREPARACIÓN DE PROBETAS**

Primero se procede a limpiar los moldes y a aplicar aceite en los mismos para evitar que se adhiera la mezcla al momento del desmolde.

Se pesa el material de acuerdo al porcentaje de zeolita 2 en la mezcla y la relación agua/mezcla que se utilizará es 0.3. Posteriormente se procede al llenado del molde en 2 capas, al finalizar la primera se petaquea.

Luego se coloca la segunda capa, se petaquea nuevamente y se golpea ligeramente con ayuda de una leva vibratoria para liberar las burbujas de aire en el interior del mortero.

Se tapan los moldes con plástico y se los deja durante 24 horas antes de desmoldarlos, al momento de realizar el desmolde se los codifica de acuerdo al porcentaje y día en que se practicará el ensayo destructivo y se sumergen en agua.



**FIGURA 3.6. MORTEROS TERMINADOS**

### 3.1.3. Ensayos de Compresión

Antes de proceder a los ensayos de compresión se toman en cuenta las condiciones ambientales: temperatura y humedad relativa.



**FIGURA 3.7. MÁQUINAS UTILIZADAS PARA REALIZAR  
LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN**

Se quita el exceso de agua en los morteros y se los ubica uno por uno en la máquina de ensayos de compresión; por cada muestra se tomarán 3 lecturas diferentes.

### 3.2. Diseño del experimento

Las pruebas a realizarse se llevarán a cabo siguiendo los estándares de la Norma ASTM C109: Método de Prueba Estándar de Esfuerzo de Compresión para morteros de Cemento Hidráulico y la recolección de datos experimentales se realizará a los 7, 14, 21 y 28 días.

#### 3.2.1. Consideraciones

Esta norma toma las siguientes consideraciones:

- Se deben usar morteros cúbicos de 2 in (50 mm).



**FIGURA 3.8. MORTEROS UTILIZADOS CONFORME LA  
NORMA ASTM C109**

- El método puede utilizar Sistema Métrico o Sistema Inglés, pero los valores deben ser tomados independientemente para cada uno.

### **3.2.2. Equipos**

- Los pesos y balanzas deben cumplir con la especificación C1005. La balanza debe ser evaluada con una carga de 2000 g.
- Los vasos graduados deben ser lo suficientemente largos para medir la mezcla de agua en una sola operación. Las divisiones en los mismos deben ser cada 5, 10 y 25 ml. si el vaso es de 62, 250 o 500 ml. respectivamente. La forma y largo de las divisiones varían de acuerdo al tipo que represente la misma (principal, última o intermedia).
- Los moldes no deben tener más de tres compartimentos cúbicos, deben ser de una metal duro no atacable por los morteros. Para moldes nuevos la dureza del metal debe ser mayor a 55 Rockwell B
- Los lados deben ser rígidos para prevenir derramamiento o ladeo del molde y las caras interiores deben ser planas.
- El mezclador debe ser del tipo paleta y tazón mezclador conforme a norma C 305.

- La máquina de pruebas debe tener espacio suficiente para permitir el uso de aparatos verificadores. La carga aplicada debe ser indicada con una certeza mínima del 61 %. La escala debe presentar al menos 0.1 % de la carga total y el puntero debe ser lo suficientemente largo para alcanzar las marcas y el ancho no debería tapar dos escalas consecutivas. El equipo debe poseer un calibrador inicial.
- Si la máquina de pruebas es digital, el display debe ser legible fácilmente y con incrementos del 0.10 % de la carga total.

### **3.2.3. Materiales**

Se debe utilizar arena de grado estándar conforme la especificación C778 y se hacen 2 o 3 probetas de una misma carga para cada período de prueba.

### **3.2.4. Temperatura y Humedad**

- La temperatura del aire en las cercanías de la losa de mezclado, materiales secos, moldes, platos base y tazón de mezcla debe mantenerse entre  $23 \pm 3^{\circ} \text{C}$  y la del agua de mezcla y del tanque de depósito, cabina o cuarto húmedo debe estar a  $23 \pm 2^{\circ} \text{C}$ .

- La humedad relativa del laboratorio no debe ser menos del 50% y la del cuarto húmedo debe ser conforme a la especificación C 511.

### **3.2.5. Preparación de los Moldes**

- Aplicar una capa fina de agente antiadherente a las caras interiores del molde, aplicar aceites y grasas utilizando tela, limpiar las caras del molde para quitar el exceso de los materiales anteriores. Si se usa spray debe hacerse a una distancia de 150 a 200 mm. y también se remueve el exceso.
- Sellar las superficies donde se unen los moldes aplicando una capa fina de grasa como petrolato y remover el exceso.
- Después de poner el molde en el plato base remover de la superficie de ambos cualquier exceso de aceite o grasa con una tela para poder aplicar el sellador de parafina o cera micro-cristalina que se debe licuar calentándolo a 110 – 120° C.

### 3.2.6. Procedimiento

La preparación de los morteros debe tener una proporción de cemento a 2.75 partes de arena de acuerdo al peso, una proporción de agua – cemento de 0.485.

- La preparación de los morteros y la determinación del flujo se hace de acuerdo a los procedimientos C 305 y C 1437 respectivamente.
- Una vez colocados los especímenes en el molde, se los pone en los platos base del cuarto húmedo de 20 a 72 horas con la cara superior expuesta al aire húmedo.
- Probar los especímenes inmediatamente después de removerlos en el caso de que sean los de 24 horas y guardar el resto en agua. Todas las pruebas se realizan con la tolerancia siguiente:

24 horas  $\pm$  ½ hora

3 días  $\pm$  1 hora

7 días  $\pm$  3 horas

28 días  $\pm$  12 horas

- Limpiar las superficies que estarán en contacto con la máquina de pruebas, si existe una curvatura en alguna superficie pulir las caras o descartar el espécimen. Debe hacerse un chequeo periódico del área seccional.

### 3.2.7. Cálculo

Grabar la carga total máxima indicada por la máquina y calcular el esfuerzo de compresión de la siguiente forma:

$$f_m = P/A = \text{Esfuerzo de compresión [psi, Mpa]}$$

$$P = \text{Carga total máxima [lbf, N]}$$

$$A = \text{Area de carga [in}^2, \text{mm}^2\text{]}$$

# CAPÍTULO 4

## 4. COMPARACIÓN DE CAMBIO DE PROPIEDADES

En el presente capítulo se tabularán los datos obtenidos en la fase experimental y se obtendrán otros datos necesarios a través de calculos, los mismos se graficarán con la ayuda de Excel y se compararán con el cemento Portland Tipo I y con el cemento Portland Tipo IV sin ningún aditivo, y con las otras proporciones de Zeolita 2 que añadieron los compañeros para establecer si existe diferencias entre las resistencias a la compresión.

### 4.1. Tabulación de Datos y Resultados

Durante la experimentación se obtuvieron los datos de marca (mm) y masa con que se comprime la probeta (Kg), también se conoce por la Norma ASTM C109 que la probeta tiene sus lados cuadrados con una medida de 50 mm cada uno, por lo tanto el área de compresión es  $2500 \text{ mm}^2$

A continuación se detallan las ecuaciones necesarias para realizar los cálculos con el fin de encontrar la resistencia a la compresión en cada probeta:

$$Deformacion = \left| \frac{(50 - marca) - 50}{50} \right|$$

$$F = M \cdot g$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

El módulo de elasticidad (E) de la mezcla se lo obtiene tomando en cuenta lo siguiente:

Por teoría el módulo de elasticidad es igual al valor de la pendiente de la gráfica esfuerzo vs. Deformación unitaria en la zona elástica (segmento lineal), como experimentalmente no se obtiene una gráfica completamente lineal en la zona plástica, se toman los puntos que tengan la mayor tendencia lineal.

Se realiza esta selección de datos debido a que los valores iniciales representan al concreto sin endurecer completamente y los valores finales pertenecen a la zona plástica del concreto, por ende no hay una tendencia lineal en ninguno de los 2 casos.

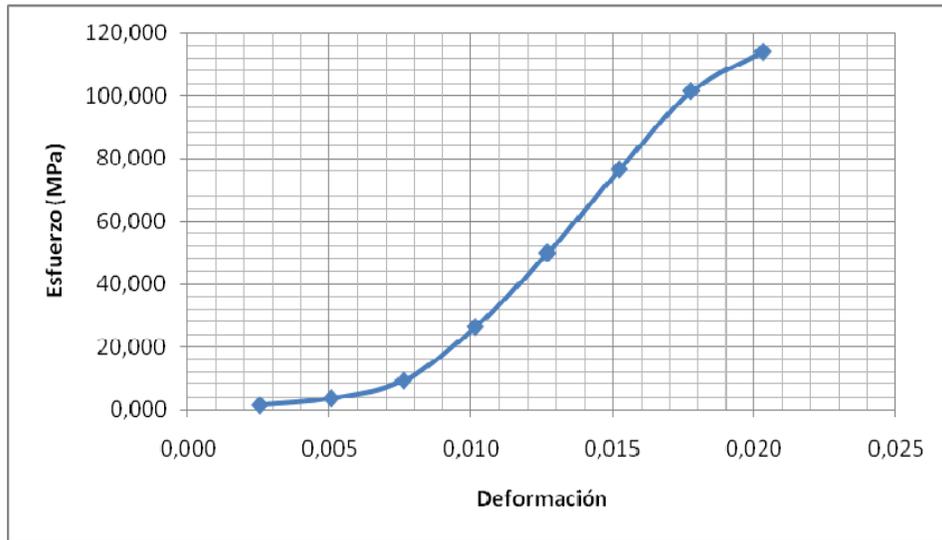
Los puntos a seleccionar tampoco se los coge al azar, deben encontrarse dentro del intervalo de la media de los módulos de elasticidad calculados por cada intervalo entre 2 puntos +/- la varianza respectiva.

Los datos y gráficas a continuación son representativos del último día de experimentación (28 días), en el anexo 1 se encontrarán los mismos para el resto de días de curado 7, 14 y 21.

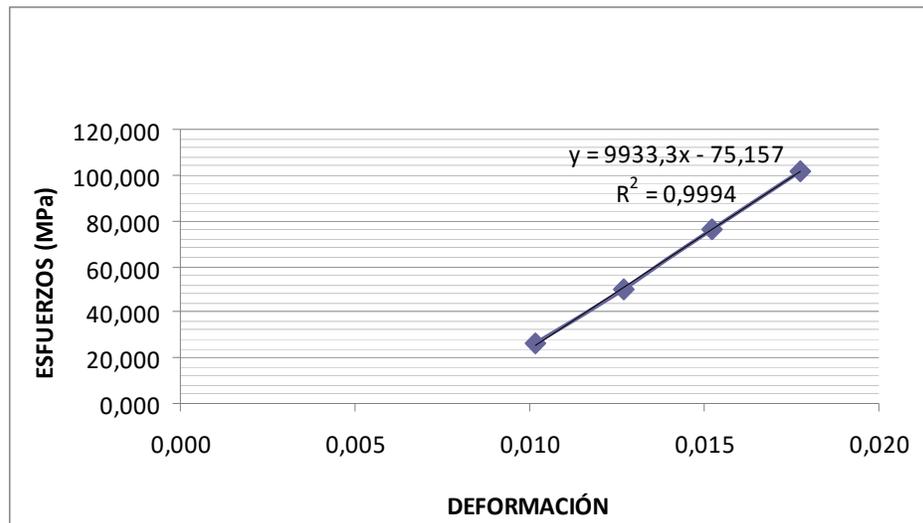
**TABLA 3**

**ESFUERZOS EN MORTERO 1 A LOS 28 DÍAS DE CURADO**

<b>MARCA (mm)</b>	<b>Deformación</b>	<b>Masa (Kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Area (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (Mpa)</b>
0,127	0,003	363,64	3564	2500	1,425
0,254	0,005	909,09	8909	2500	3,564
0,381	0,008	2363,64	23164	2500	9,265
0,508	0,010	6727,27	65927	2500	26,371
0,635	0,013	12727,27	124727	2500	49,891
0,762	0,015	19545,45	191545	2500	76,618
0,889	0,018	25909,09	253909	2500	101,564
1,016	0,020	29090,91	285091	2500	114,036



**FIGURA 4.1. ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DEL MORTERO 1 A LOS 28 DÍAS DE CURADO**

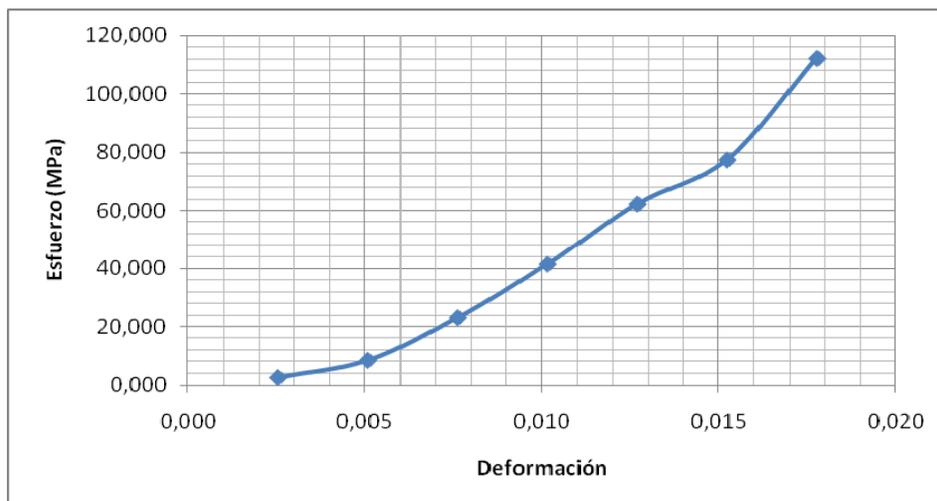


**FIGURA 4.2. LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN (MORTERO 1)**

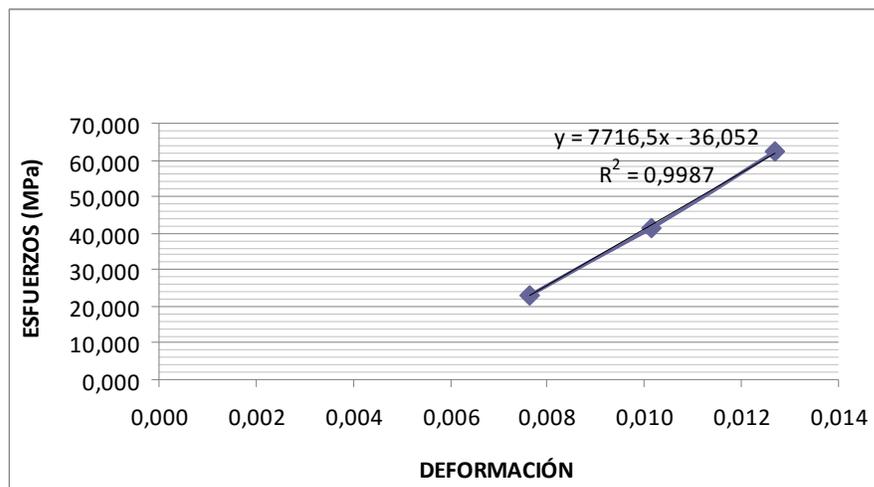
TABLA 4

## ESFUERZOS EN MORTERO 2 A LOS 28 DÍAS DE CURADO

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	681,82	6682	2500	2,673
0,254	0,005	2181,82	21382	2500	8,553
0,381	0,008	5909,09	57909	2500	23,164
0,508	0,010	10590,91	103791	2500	41,516
0,635	0,013	15909,09	155909	2500	62,364
0,762	0,015	19772,73	193773	2500	77,509
0,889	0,018	28636,36	280636	2500	112,255



**FIGURA 4.3. ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DEL MORTERO 2 A LOS 28 DÍAS DE CURADO**

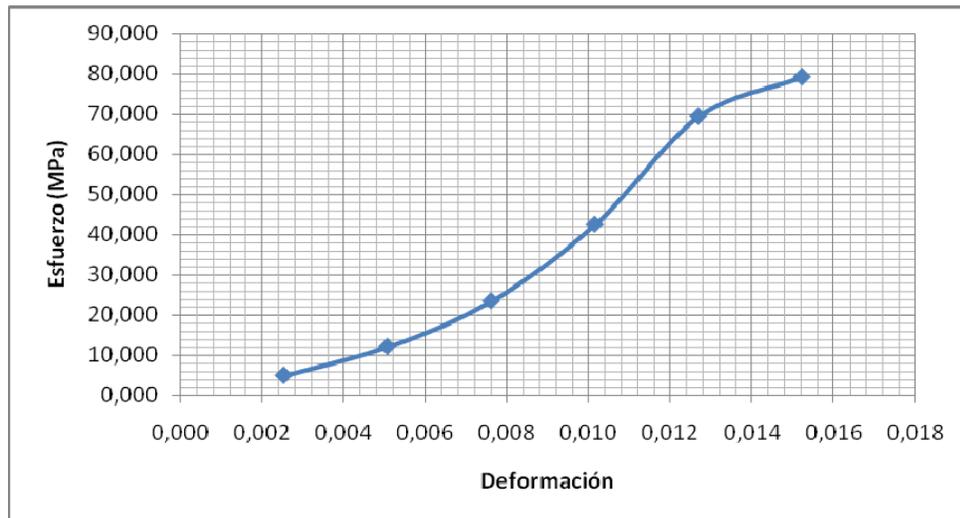


**FIGURA 4.4. LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN (MORTERO 2)**

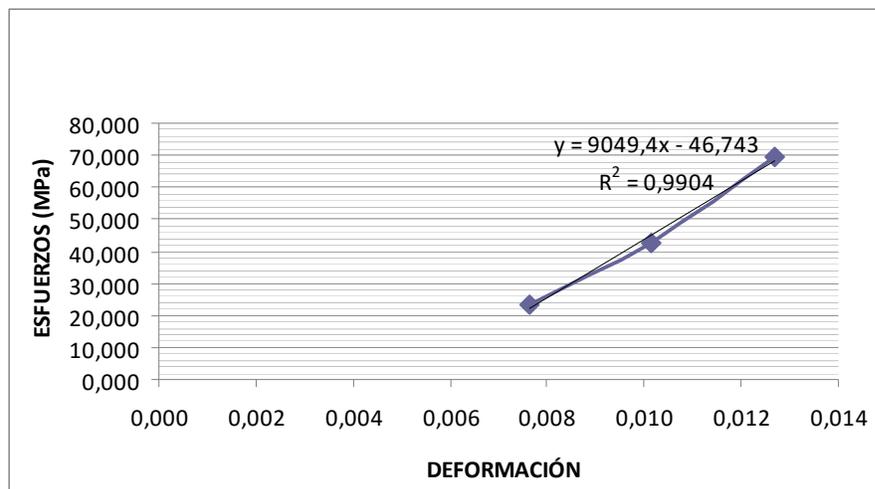
**TABLA 5**

**ESFUERZOS EN MORTERO 3 A LOS 28 DÍAS DE CURADO**

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	1272,73	12473	2500	4,989
0,254	0,005	3090,91	30291	2500	12,116
0,381	0,008	6000,00	58800	2500	23,520
0,508	0,010	10863,64	106464	2500	42,585
0,635	0,013	17727,27	173727	2500	69,491
0,762	0,015	20227,27	198227	2500	79,291



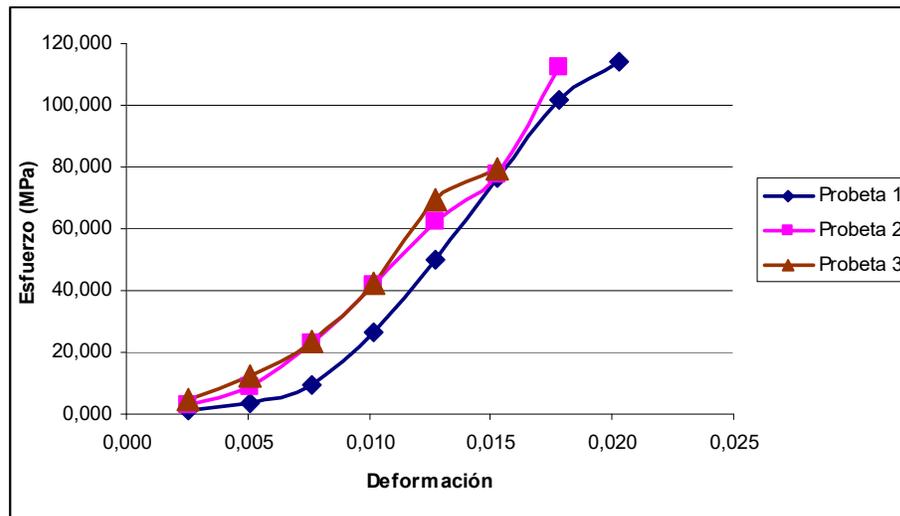
**FIGURA 4.5. ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DEL MORTERO 3 A LOS 28 DÍAS DE CURADO**



**FIGURA 4.6. LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN (MORTERO 3)**

## 4.2. Análisis de Datos y Resultados

Para poder analizar fácilmente los datos obtenidos experimentalmente se graficaron los datos de esfuerzo y deformación de las tres probetas en un mismo plano.



**FIGURA 4.7. ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE LAS 3 PROBETAS  
A LOS 28 DÍAS DE CURADO**

En la gráfica se observa que a medida que se aumenta la deformación producida por la aplicación de una fuerza ascendente, se produce un aumento en el esfuerzo, es decir que hay una relación directa entre ambos factores.

También se aprecia que los esfuerzos máximos (ruptura) son similares en los morteros 1 y 2, sin embargo en el tercero se produce un gran descenso del mismo, esto puede ser causado por alguna variación en la preparación de la probeta.

En la gráfica de Esfuerzo vs. Deformación se observa que el mortero llega a una deformación máxima, al llegar a la misma se produce el esfuerzo de ruptura (máximo)

Las curvas de Esfuerzo vs. Deformación tienen cierta similitud con las curvas típicas de la pasta de cemento Tipo I sin ningún aditivo por lo que se comprueba una buena recolección de datos.

#### **4.3. Identificación de Cambio de Propiedades**

A continuación se encuentra tabulado el esfuerzo promedio a los 28 días del cemento Tipo I con la adición de zeolita 2 al 5 % junto a los esfuerzos promedio del cemento Tipo I y Tipo IV sin ningún aditivo con el fin de observar si existen cambios significativos en los esfuerzos producidos.

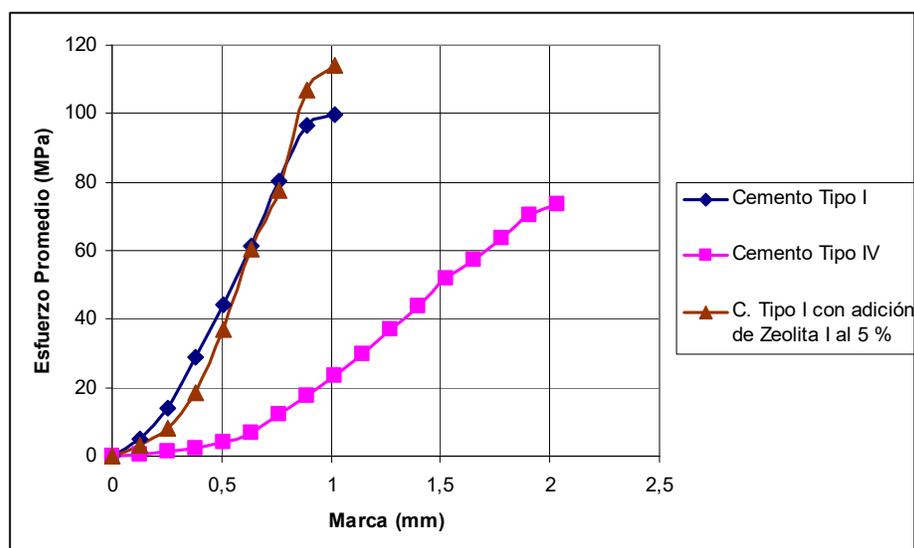
TABLA 6

**ESFUERZOS PROMEDIO DEL CEMENTO TIPO I Y TIPO IV SIN  
NINGÚN ADITIVO Y TIPO I CON 5 % DE ZEOLITA 2 A LOS 28  
DÍAS DE CURADO**

MARCA (mm)	Esfuerzos (Mpa)		
	Tipo I	Tipo IV	Tipo I + 5% Zeolita 2
0	0	0	0
0,127	4,81	0,59	3,03
0,254	13,78	1,18	8,08
0,381	28,93	2,20	18,65
0,508	44,07	4,12	36,82
0,635	61,18	6,99	60,58
0,762	80,18	12,15	77,81
0,889	96,52	17,71	106,91
1,016	99,78	23,52	114,04
1,143		29,99	
1,27		36,91	
1,397		43,97	
1,524		51,81	
1,651		57,36	
1,778		63,70	
1,905		70,36	
2,032		73,50	

Se observa mayores esfuerzos en los morteros de cemento tipo I con adición de zeolita 2 al 5%, por lo tanto se cumple con el objetivo planteado que era incrementar la resistencia a la compresión de la pasta de cemento.

En la gráfica siguiente se observa que el comportamiento del mortero de cemento Tipo I con adición de zeolita 2 al 5 % es similar al del cemento Tipo I, pero a medida que la fuerza deformante es mayor el esfuerzo del mortero con adición de zeolita 2 al 5 % sobrepasa al del cemento Tipo I sin ningún aditivo.



**FIGURA 4.8. ESFUERZO PROMEDIO VS. DEFORMACIÓN DEL CEMENTO TIPO I, TIPO IV Y TIPO I CON ADICIÓN DE ZEOLITA 2 AL 5% A LOS 28 DÍAS DE CURADO**

En el anexo 2 se tabula y se grafica los esfuerzos de la pasta de cemento Portland Tipo I, Tipo IV y Tipo I con adición de zeolita 2 para los días de curado anteriores (7, 14 y 21).

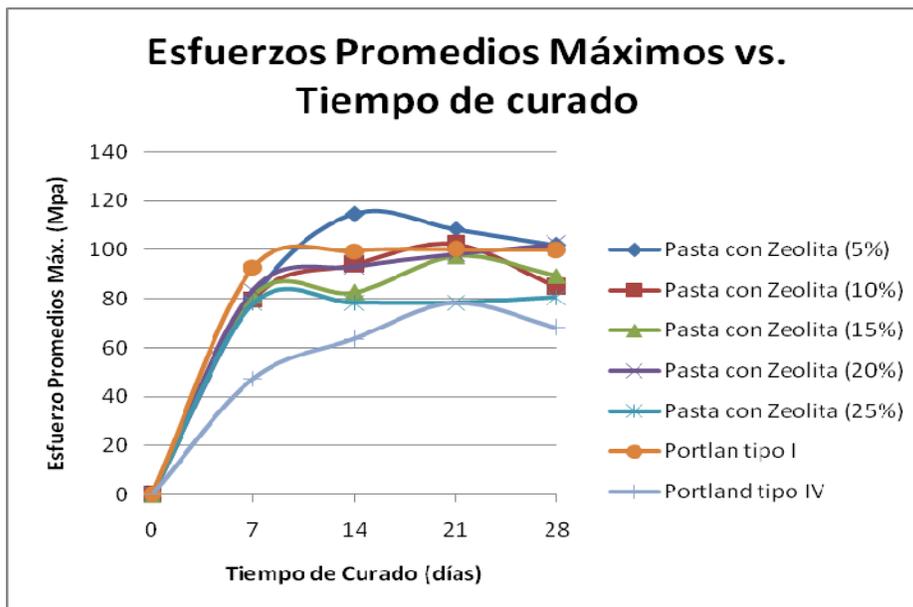
A continuación se tabulan los esfuerzos de compresión máximos promedio en función del porcentaje de zeolita 2 añadido y los días de inmersión con el fin de observar cual porcentaje nos produce un valor máximo de esfuerzo y en que día ocurre dicha reacción.

**TABLA 7**

**ESFUERZOS MÁXIMOS PROMEDIO EN FUNCIÓN DEL  
PORCENTAJE DE ZEOLITA 2 ADICIONADO Y LOS DÍAS DE  
INMERSIÓN**

Pasta / % Zeolita 2	Días			
	7	14	21	28
Zeolita 2 / 5%	80,61	114,63	108,39	101,86
Zeolita 2 /10%	79,88	94,03	102,34	84,84
Zeolita 2 /15%	81,37	82,55	97,41	89,39
Zeolita 2 /20%	83,8	93,11	98,45	102,3
Zeolita 2 /25%	78,23	78,53	78,53	80,59

En la gráfica siguiente se observa el comportamiento del esfuerzo de compresión para la pasta de cemento Portland Tipo I con los diferentes porcentajes de adición de zeolita 2 a medida que aumentan los días de inmersión, también se graficará el comportamiento del cemento Portland Tipo I y Tipo IV sin ningún aditivo para poder identificar con mayor facilidad el cambio en el esfuerzo de compresión.



**FIGURA 4.9. ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL  
PORCENTAJE DE ZEOLITA 2 AÑADIDO AL CEMENTO TIPO I Y  
LOS DÍAS DE INMERSIÓN**

En la gráfica anterior se observa el máximo esfuerzo de compresión promedio a los 14 días de curado, luego de este día el valor empieza a descender, dicho valor lo alcanza el cemento Portland Tipo I con 5 % de zeolita 2, y también observamos que a medida que se adiciona un porcentaje mayor de zeolita 2 el valor máximo del esfuerzo se desplaza a los días posteriores al 14.

# CAPÍTULO 5

## 5. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL

Con los datos obtenidos experimentalmente se realizará una simulación del comportamiento del cemento Portland Tipo I con adición de zeolita 2 en el programa Matlab con el fin de apreciar si dicho modelo teórico es similar al obtenido con los datos experimentales.

Los datos experimentales también se ingresarán en el software Statistica con el fin de comprobar su distribución normal y ver como afectan el tiempo de curado y el porcentaje de zeolita 2 al módulo de elasticidad y resistencia a la compresión de la pasta de cemento Portland Tipo I.

### 5.1. Simulación por Matlab

Con los datos recolectados en los ensayos de compresión se realiza una simulación del comportamiento del material en Matlab, para ello se utilizó un algoritmo ideal para materiales elastoplásticos elaborado en el curso de inelasticidad, dicho algoritmo se encuentra en el anexo 3 para una revisión detallada del mismo.

Para poder desarrollar el algoritmo se debe conocer que la pasta de cemento sin aditivo es considerada un material elastoplástico y su comportamiento teórico es una función bilineal, en la que se encuentran 2 regiones: Una elástica que sigue un comportamiento lineal y una plástica que sigue un comportamiento no lineal.

Para realizar la simulación en Matlab se toman en cuenta todas las consideraciones y ecuaciones que se detallan a continuación:

Se considera la probeta como una barra elasto-plástica sometida a una fuerza uniaxial en los extremos y se asume 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 [12, 13].

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

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid -\sigma_{Y0} < \sigma < \sigma_{Y0}\} \quad \text{EC. (3.1)}$$

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

$$f(\sigma, \sigma_{Y0}) = |\sigma| - \sigma_{Y0} = 0 \quad \text{EC. (3.5)}$$

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

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid f(\sigma, \sigma_{Y0}) \leq 0\} \quad \text{EC. (3.6)}$$

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:

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

Alternativamente se puede escribir como la ecuación 3.7

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\sigma}{|\sigma|}, \quad \frac{\sigma}{|\sigma|} = \text{stgn}(\sigma) \quad \text{EC. (3.7)}$$

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

Asumiendo que la barra continua 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:

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

y la región elástica actual

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid f(\sigma, \sigma_Y) \leq 0\}$$

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  $\lambda \geq 0$  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 última ecuación 3.9 recibe el nombre de condición de Kuhn-Tucker y representa una condición que debe cumplirse para deformación elástica como para plástica.

Una vez conocidas las ecuaciones y fundamentos necesarios para la implementación numérica, se procede con la misma:

Primeramente se considera un intervalo  $t \in [t_n, t_{n+1}]$  en el tiempo y se asume que los valores de  $\sigma_{Y,n}$  y  $\sigma_n$  son conocidos.

Luego se calcula 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 define un  $\sigma_{n+1}^{tr}$  que es el predictor del esfuerzo elástico en el siguiente  $\Delta\varepsilon$  y también se define el corrector del esfuerzo plástico,  $E^* \Delta\varepsilon^p$ .

Esta implementación numérica se rige por 4 reglas: additive decomposition of strain, hooks law, flow rule y constrains.

En el primer paso se calcula un  $\sigma_{n+1}^{tr}$  con la siguiente expresión  $\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n + E\Delta\varepsilon$ , luego se calcula el esfuerzo elástico predictor en una posición siguiente a la 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  $\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n$  y  $\sigma_{n+1} = \sigma_{Y,n+1}$  y el algoritmo llega a su fín.

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

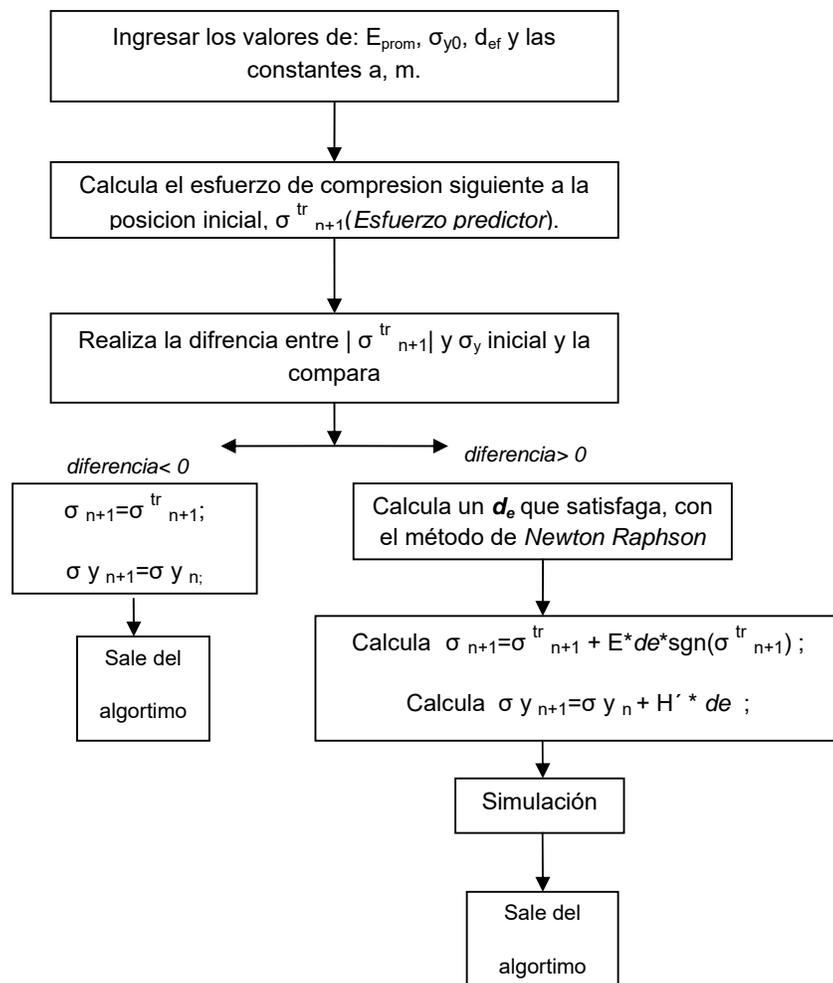
$$F_{n+1}(\Delta\lambda) = F_{n+1}^{tr} - \Delta\lambda(E + H'_{n+1}(\Delta\lambda)) = 0$$

Luego en el paso 4 o final se calcula los esfuerzos  $\sigma_{n+1}^{tr}$  y  $\sigma_{Y,n+1}$  con las siguientes expresiones:

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

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

Finalmente se obtendrá un valor de esfuerzo, el cual se irá almacenando y con estos datos se formará un vector para realizar la grafica Esfuerzo vs Deformación.



**FIGURA 5.1 ESQUEMA DEL ALGORITMO RETURN MAPPING**

Para iniciar el algoritmo es necesario ingresar los valores de  $E_{\text{promedio}}$ ,  $\sigma_{y0}$ ,  $d_{ef}$ , de y las constantes  $a$  y  $m$ , las ecuaciones para hallar dichos valores son las siguientes:

$$\sigma_y = 0.75\sigma_{rup}$$

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

Donde:

$\sigma_y$  = Esfuerzo de Fluencia

$\sigma_{rup}$  = Esfuerzo de Compresión de ruptura

$$m = \frac{(E_{\text{Prom}} d_{ef}) - \sigma_y}{E_{\text{Prom}}}$$

Los valores de  $E_{\text{promedio}}$  y  $d_{ef}$  se los obtiene de la experimentación.

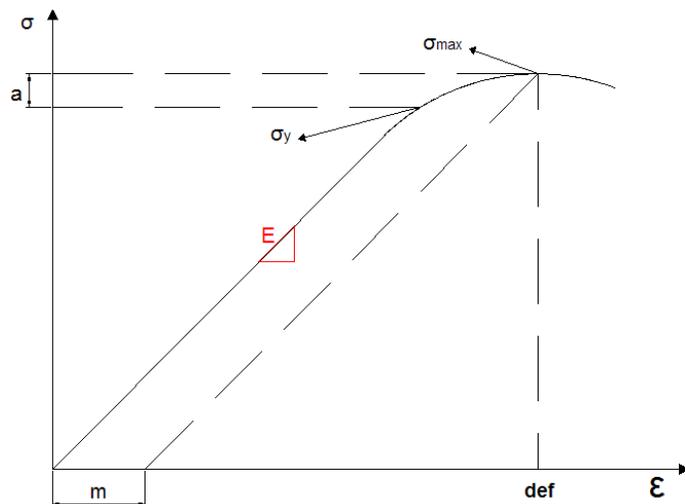
**TABLA 8**

**VALORES INGRESADOS AL ALGORITMO PARA SIMULACIÓN**

**DEL COMPORTAMIENTO EN MATLAB**

	7 días	14 días	21 días	28 días
<b>a</b>	0,33	0,33	0,33	0,33
<b>m</b>	0,00261847	0,00317310	0,00643962	0,00713100
<b>Eprom</b>	5240,67	9692,33	9376,33	9371,67
<b>G(y)</b>	60,46	85,97	81,30	76,40
<b>def</b>	0,018	0,015	0,018	0,018
<b>de</b>	0.00254	0.00254	0.00254	0.00254

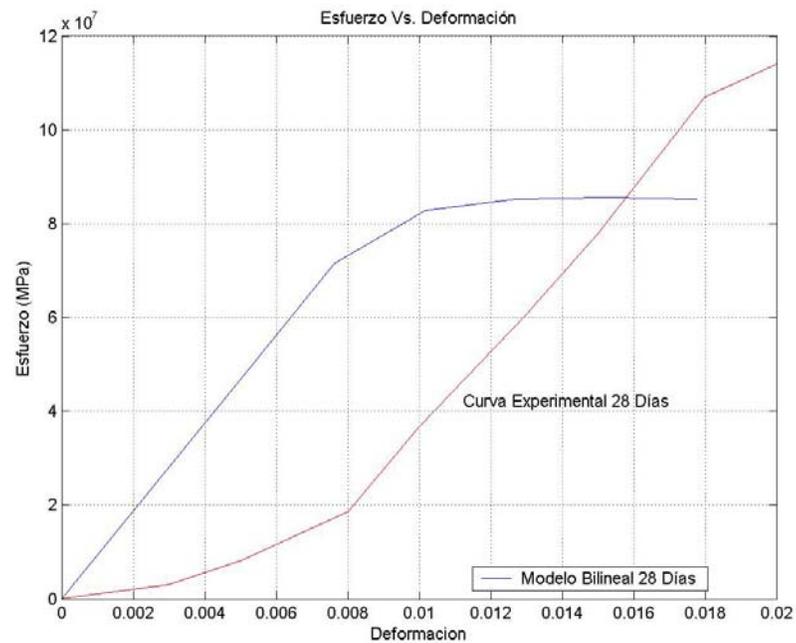
A continuación se representan gráficamente los valores introducidos en el algoritmo:



**FIGURA 5.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE VALORES**

**INTRODUCIDOS EN EL ALGORITMO**

En la gráfica se puede denotar fácilmente el valor de esfuerzo de ruptura que se encuentra al final de la curva sobre el eje vertical, el valor de  $m$  que gráficamente se denota como un valor en el eje horizontal a partir del cual se traza un comportamiento lineal hasta llegar al punto de ruptura y el valor de  $a$  que en la gráfica se encuentra sobre el eje vertical y representa la diferencia entre el esfuerzo de ruptura y el de fluencia.



**FIGURA 5.3. MODELO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN EN MATLAB DE ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA PASTA DE CEMENTO TIPO I CON ADICIÓN DE ZEOLITA 2 AL 5 % Y 28 DÍAS DE CURADO**

Se observa un comportamiento bilineal en la simulación realizada en Matlab para la pasta de cemento Portland Tipo I con adición de zeolita 2 al 5 %; es decir que existen 2 fases, una lineal y otra no lineal, de esta manera se comprueba que los datos tomados experimentalmente sí representan el comportamiento real de un material elastoplástico como la pasta de cemento.

El modelo matemático no se ajusta con mayor exactitud debido a que sólo se utilizó el Módulo de Elasticidad E hallado con la parte lineal de los datos experimentales.

La simulación del cemento Portland Tipo I con adición de zeolita 2 al 5 % de los otros días de curado (7, 14 y 21) se encuentra tabulada en el anexo 5.

## **5.2. Análisis Estadístico**

### **Análisis Individual**

Se utiliza el programa Statistica para comprobar la distribución normal de los datos experimentales y encontrar diferencias significativas para los diferentes tiempos de curado, también se realizó la comparación entre los diferentes porcentajes de adición de zeolita 2 para obtener la mejor combinación entre porcentaje de adición de zeolita 2 y el tiempo de curado.

Para poder observar una distribución normal de los datos fue necesario descartar el valor de E promedio obtenido en la primera máquina para ensayos de compresión, ya que dicho valor difiere de gran manera con el resto de datos obtenidos a los 7 días de curado en agua.

**TABLA 9**

**VALORES INGRESADOS EN EL SOFTWARE STATISTICA**

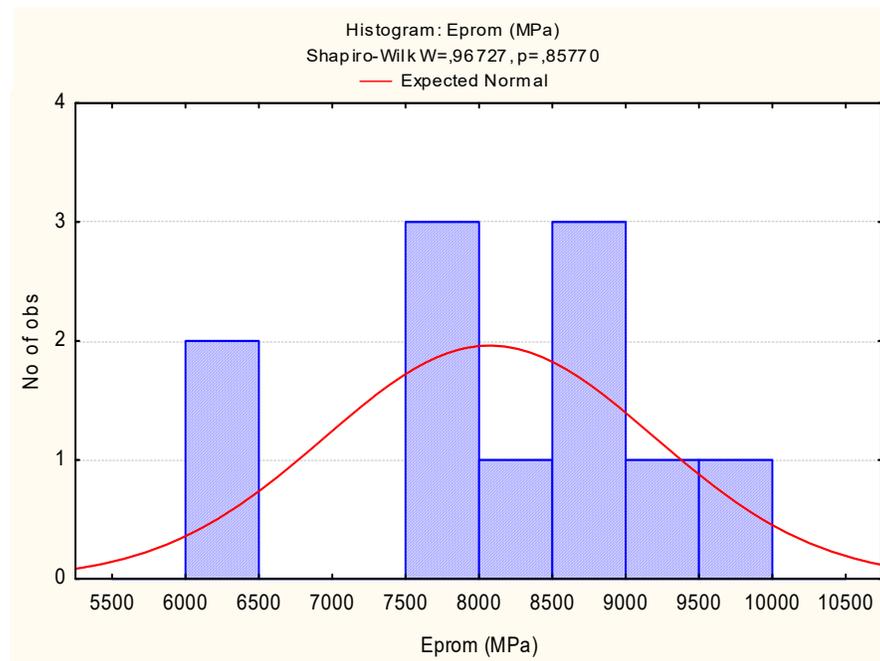
<b>Casos</b>	<b>Tiempo (días)</b>	<b>Eprom (MPa)</b>
1	7	6488,9
2	7	6032,9
3	14	7541,2
4	14	8593,4
5	14	8747,7
6	21	8067,3
7	21	8593,4
8	21	7891,9
9	28	9933,3
10	28	7716,5
11	28	9049,4

Una vez ingresados los datos al programa se utilizó la prueba de Shapiro y Wilk para comprobar la normalidad de los datos, para lo cual se debe plantear primeramente una hipótesis nula  $H_0$  que debe ser descartada para cumplir con nuestro objetivo.

Nuestra hipótesis nula es la siguiente:

$H_0$ : los datos no tienen una distribución normal.

A continuación se haya el histograma obtenido mediante el software Statistica, como se obtiene un valor estadístico  $W_{\text{calculado}} = 0.96727$  mayor al valor estadístico  $W_{\text{tabulado}} = 0.859$  y una probabilidad  $p=0.85770$  mayor a  $0.05$  se descarta la hipótesis nula concluyendo que los datos obtenidos tienen una distribución normal.



**FIGURA 5.4. HISTOGRAMA DE EPROM PARA PASTA DE CEMENTO CON UNA CONCENTRACIÓN DE 5% DE ZEOLITA 2**

Luego de comprobar la existencia de una distribución normal se realiza un análisis de varianza simple con la herramienta ANOVA – ONE WAY para encontrar diferencias significativas en los módulos de elasticidad promedio para los diferentes días de curado.

De acuerdo al grado de libertad y al nivel de confianza se seleccionó un valor de  $F_{crítico}$  de 4.06, dicho valor se compara con el  $F_{calculado}$  obtenido en el estadística.

El valor de  $F_{calculado}$  es 5.514, por lo tanto se cumple que  $F_{cal} > F_{crítico}$ , por ello se concluye que existen diferencias significativas entre los tratamientos con un nivel de confianza del 95%, lo que significa que al menos uno de los tratamientos incrementa el módulo de elasticidad en la pasta de cemento.

**TABLA 10**

**ANÁLISIS DE VARIANZA SIMPLE PARA LOS DIFERENTES  
DÍAS DE CURADO**

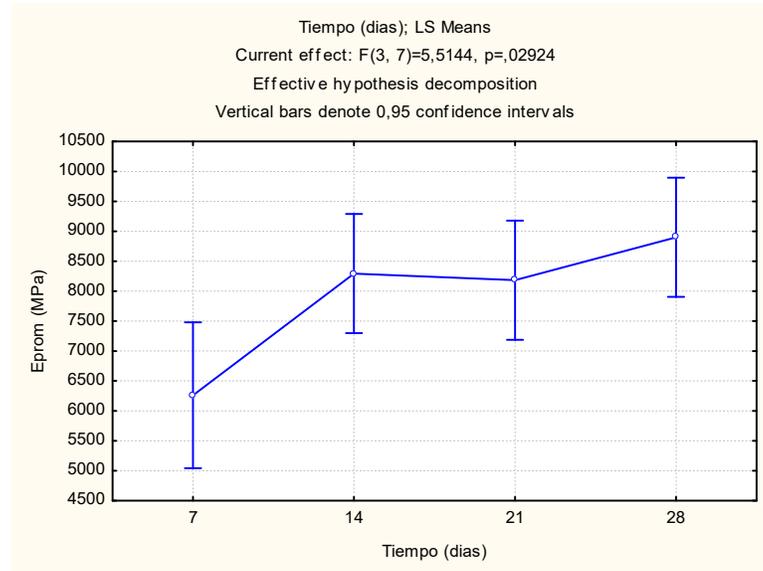
Effect	Degr. of Freedom	Eprom (MPa) SS	Eprom (MPa) MS	Eprom (MPa) F	Eprom (MPa) p
<b>Intercept</b>	1	667348068	667348068	1254,612	0,000000
Tiempo (días)	3	8799662	2933221	5,514	0,029240
Error	7	3723411	531916		
Total	10	12523072			

**TABLA 11**

**INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Cell No.	Tiempo (días)	Eprom (MPa) Mean	Eprom (MPa) Std.Err.	Eprom (MPa) -95,00%	Eprom (MPa) +95,00%	N
1	7	6260,900	515,7111	5041,437	7480,363	2
2	14	8294,100	421,0763	7298,413	9289,787	3
3	21	8184,200	421,0763	7188,513	9179,887	3
4	28	8899,733	421,0763	7904,046	9895,421	3

En la tabla anterior se muestra el intervalo de confianza para el módulo de elasticidad de acuerdo al tiempo de curado con un 95 % de confianza.



**FIGURA 5.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Se aprecia en la gráfica que la media del módulo de elasticidad toma un valor máximo a los 28 días de curado, aunque en el día 14 también toma un valor alto de módulo de elasticidad.

### **Análisis Grupal**

Después de haber realizado el análisis individual de los datos experimentales, procedemos a un análisis del esfuerzo de ruptura en función del porcentaje de zeolita 2 añadida y los días de inmersión.

Una vez ingresados todos los datos al programa Statistica de acuerdo al porcentaje de zeolita 2 añadido al cemento Portland Tipo I y al tiempo de curado, se utilizó la prueba de Shapiro y Wilk para comprobar la normalidad de los datos.

Luego de comprobar la existencia de una distribución normal se realiza un análisis de varianza factorial con la herramienta ANOVA-FACTORIAL con el fin de demostrar diferencias significativas entre las medias del esfuerzo de compresión debido al tratamiento de curado en agua, a la variación del porcentaje de zeolita 2 y al efecto de la combinación de ambos.

TABLA 12

## DATOS INGRESADOS EN EL SOFTWARE STATISTICA

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

Mediante tablas y de acuerdo al grado de libertad se seleccionó un valor de  $F_{\text{crítico}}$  de 4.06, dicho valor se compara con el  $F_{\text{cal}}$  obtenido en el estadística.

Como el valor de  $F_{\text{cal}}$  (10.96) del porcentaje de zeolita 2 adicionado es mayor al  $F_{\text{crítico}}$  se concluye que existen diferencias significativas entre los porcentajes de zeolita 2 adicionados con un nivel de confianza del 95%.

Se cumple la misma condición para los días de inmersión, por lo que se reconocen diferencias significativas de acuerdo al tiempo de inmersión de los morteros, pero dicha condición no se cumple para la combinación de ambos casos ( $F_{\text{cal}} < F_{\text{crítico}}$ ).

**TABLA 13**

**ANÁLISIS DE VARIANZA FACTORIAL PARA LOS DIFERENTES  
PORCENTAJES DE ZEOLITA 2, DÍAS DE CURADO Y  
COMBINACIÓN DE AMBOS**

Effect	Univariate Tests of Significance for Esfuerzo de i			
	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		

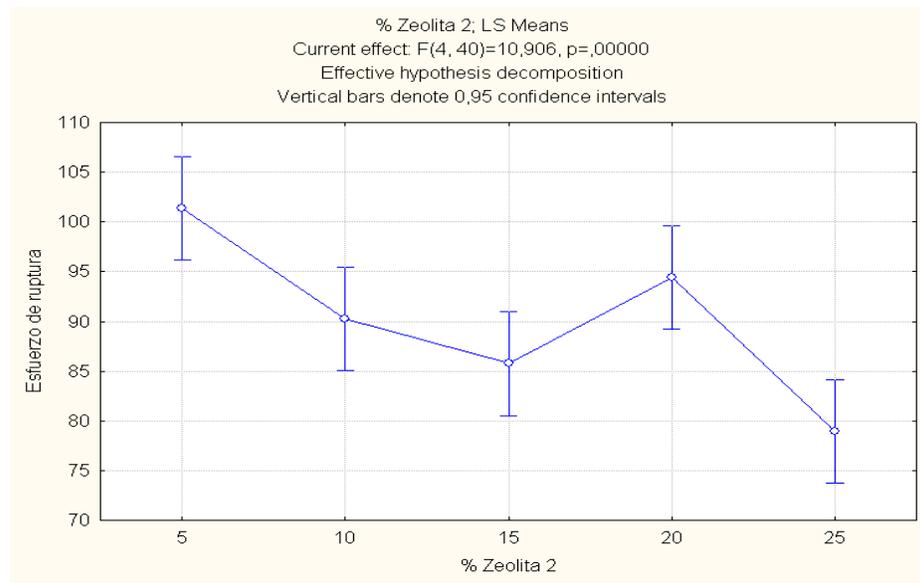
En la siguiente tabla se muestra el intervalo de confianza para el módulo de elasticidad de acuerdo al porcentaje de zeolita 2 adicionado al cemento Portland Tipo I.

**TABLA 14**

**INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES  
PORCENTAJES DE ZEOLITA 2 AÑADIDO AL CEMENTO  
PORTLAND TIPO I**

% Zeolita 2; Weighted Means (Sheet1 in Imported from C:\Documents an 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

Se observa claramente en la gráfica que hay un valor máximo del esfuerzo de ruptura y el mismo se produce cuando se adiciona un 5 % de zeolita 2 a la pasta de cemento Tipo I.

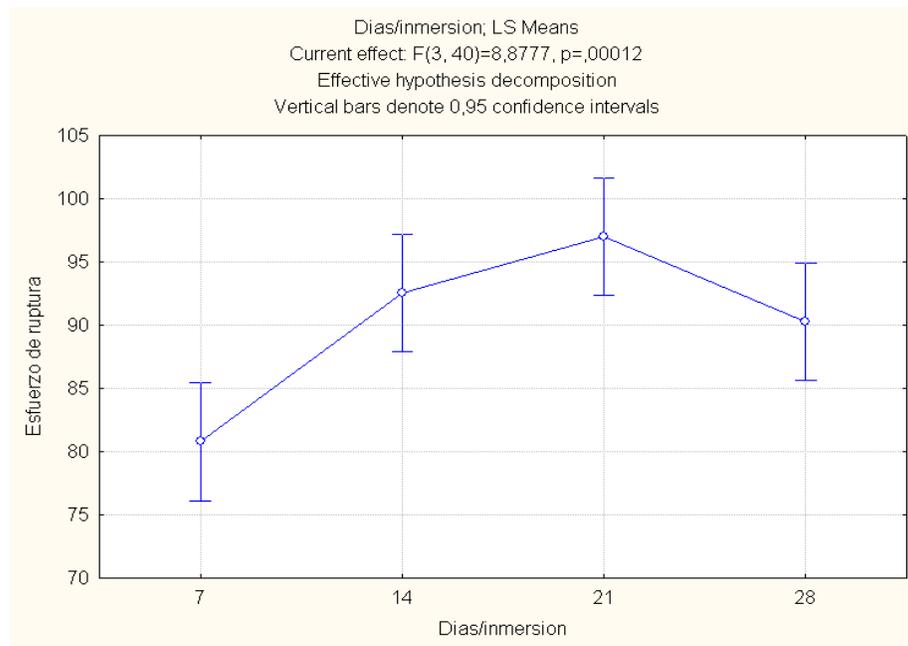


**FIGURA 5.6. ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE DE ZEOLITA 2 AÑADIDO AL CEMENTO PORTLAND TIPO I**

En la siguiente tabla se muestra el intervalo de confianza para el esfuerzo de compresión de acuerdo al tiempo de inmersión de los morteros.

**TABLA 15**  
**INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Cell No.	Dias/inmersión	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



**FIGURA 5.7. ESFUERZO DE RUPTURA VS. DÍAS DE INMERSIÓN**

Se puede observar que hay un valor máximo del esfuerzo de ruptura y el mismo se produce a los 21 días de inmersión de la pasta de cemento tipo I adicionada con zeolita 2, luego empieza a descender.

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

La pasta de zeolita 2 al 5 % con base en cemento Portland Tipo I produce un aumento en el esfuerzo de compresión a partir del día 14 en comparación al cemento Portland Tipo I sin ningún tipo de aditivo.

La pasta de cemento Portland Tipo I con adición de zeolita 2 al 5 % alcanzó una resistencia máxima de 114.63 MPa a los 14 días de inmersión, luego de este tiempo se produjo un descenso en la resistencia a la compresión.

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 aumento 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.

No es posible la creación de una superficie matemática que describa el comportamiento de la resistencia a la compresión a través del tiempo, debido a que no existe una relación marcada y única entre el porcentaje de Zeolita 2 añadido y el tiempo de curado.

No se tabularon los datos de control, ni se inició el estudio de los mismos debido al desfase que existe con el tiempo y porcentajes de Zeolita 2 del estudio realizado, además no es posible una validación porque tampoco fue factible realizar la superficie matemática con los datos de estudio.

## **6.2. Recomendaciones**

Para minimizar los errores de medición debido al factor humano, es recomendable que una misma persona tome los datos experimentales para evitar cambios de perspectiva. Esto debido a que la toma de datos se hace entre mínimo dos personas y en diferentes días.

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.

Se debe mejorar la exactitud en las maquinas que se utilizaron en la experimentación (Metrología). Esto mejorará los intervalos de medición y, por ende se tendría curvas más continuas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Buameister, Theodore. Avallone, Eugene A, Marks: Manual del Ingeniero Mecánico. McGraw-Hill. J. Schey. Tercera Edición en Español. México. 2000
  
- [2] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, Design and Control of Concrete Mixtures. PCA. Seventh Canadian Edition. 2002
  
- [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] 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.
  
- [6] Irwin Miller, John E. Freud, Richard A. Johnson. Probabilidad y estadística para ingenieros, Prentice – Hall, Hispanoamericana S.A. México.

- [7] Walpole, Myers, Myers. Probabilidad y Estadística para Ingenieros, Pearson, México.
- [8] Kwangryul Hwang, Takafumi Noguchi, Fuminiro Tomosawa, "Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete", Elsevier, Abril, 2004
- [9] J.P.B. Leite, V. Slowik, H. Mihashi, "Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures", Elsevier, Noviembre, 2003
- [10] F.P. Ganneau, F.-J. Ulm, J. Gondzio, E.J. Garboczi, "An algorithm for computing the compressive strength of heterogeneous cohesive-frictional materials – Application to cement paste", Elsevier, Febrero, 2007
- [11] R. Hill, The mathematical theory of plasticity, Clarendon Press, Oxford Classic Series, 1998.
- [12] R.I. Borja, Plasticity Modeling and computation, Stanford University Lecture Notes, Chapter 2 and 3, 2006.

# ANEXOS

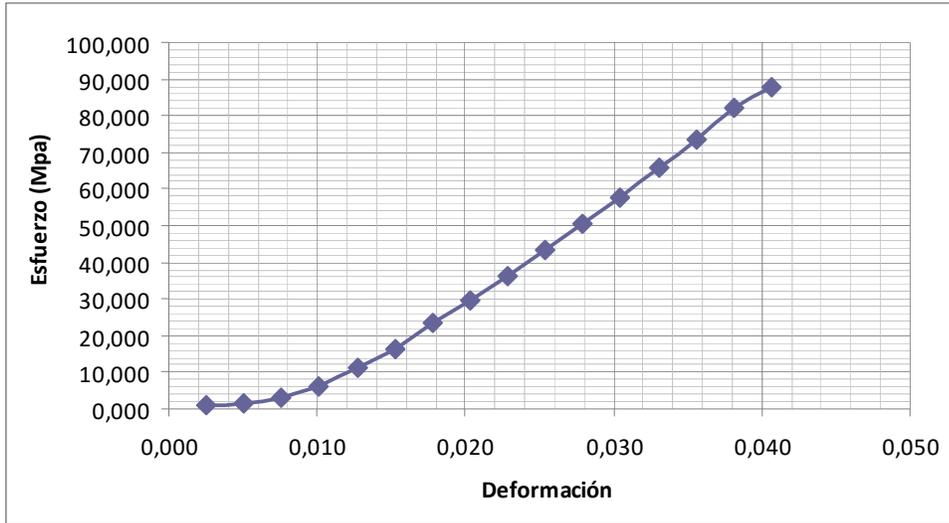
## ANEXO 1

### TABLAS Y GRÁFICOS DE DATOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO

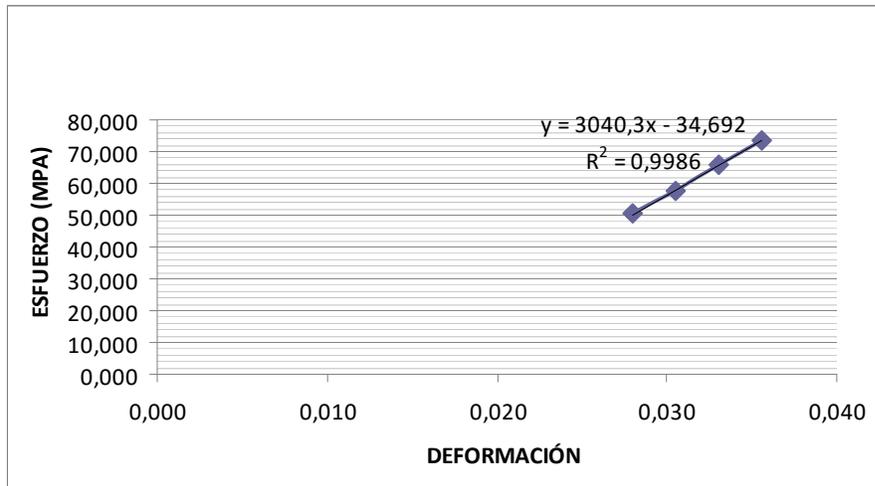
#### Probeta 1 a los 7 días de curado

#### DATOS DE PROBETA 1 A LOS 7 DÍAS DE CURADO

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	230	2254	2500	0,902
0,254	0,005	440	4312	2500	1,725
0,381	0,008	830	8134	2500	3,254
0,508	0,010	1570	15386	2500	6,154
0,635	0,013	2870	28126	2500	11,250
0,762	0,015	4200	41160	2500	16,464
0,889	0,018	6000	58800	2500	23,520
1,016	0,020	7500	73500	2500	29,400
1,143	0,023	9250	90650	2500	36,260
1,270	0,025	11000	107800	2500	43,120
1,397	0,028	12900	126420	2500	50,568
1,524	0,030	14650	143570	2500	57,428
1,651	0,033	16800	164640	2500	65,856
1,778	0,036	18750	183750	2500	73,500
1,905	0,038	20950	205310	2500	82,124
2,032	0,041	22350	219030	2500	87,612



**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 1 A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

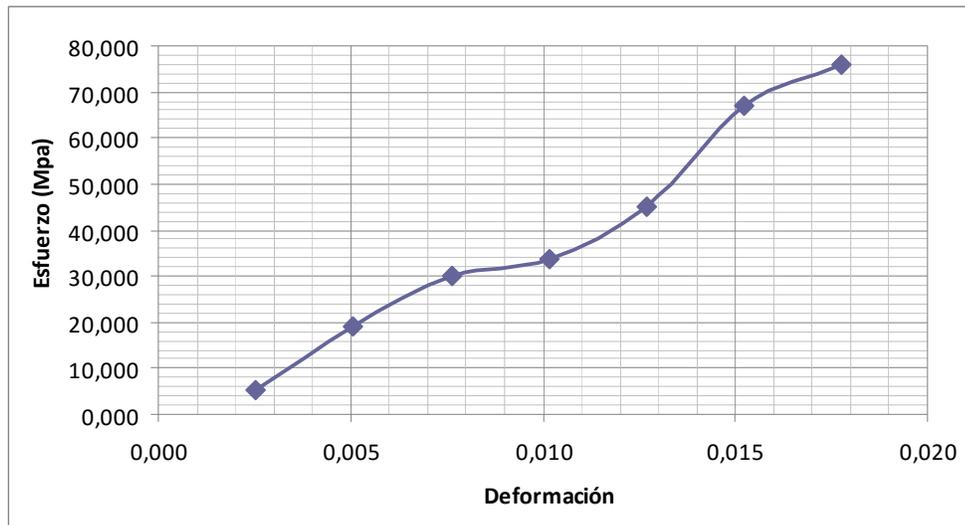


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 1 A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

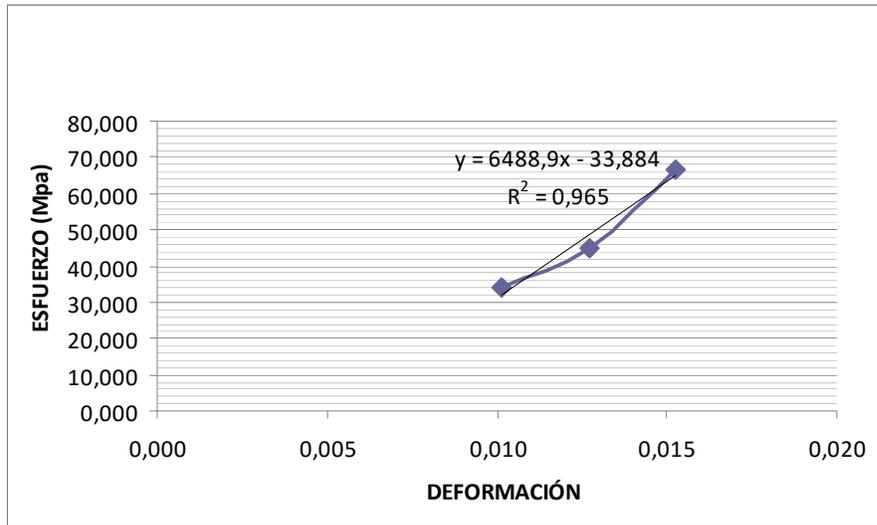
## Probeta 2 a los 7 días de curado

### DATOS DE PROBETA 2 A LOS 7 DÍAS DE CURADO

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	1363,64	13364	2500	5,345
0,254	0,005	4909,09	48109	2500	19,244
0,381	0,008	7636,36	74836	2500	29,935
0,508	0,010	8636,36	84636	2500	33,855
0,635	0,013	11454,55	112255	2500	44,902
0,762	0,015	17045,45	167045	2500	66,818
0,889	0,018	19340,91	189541	2500	75,816



### ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 2 A LOS 7 DÍAS DE CURADO

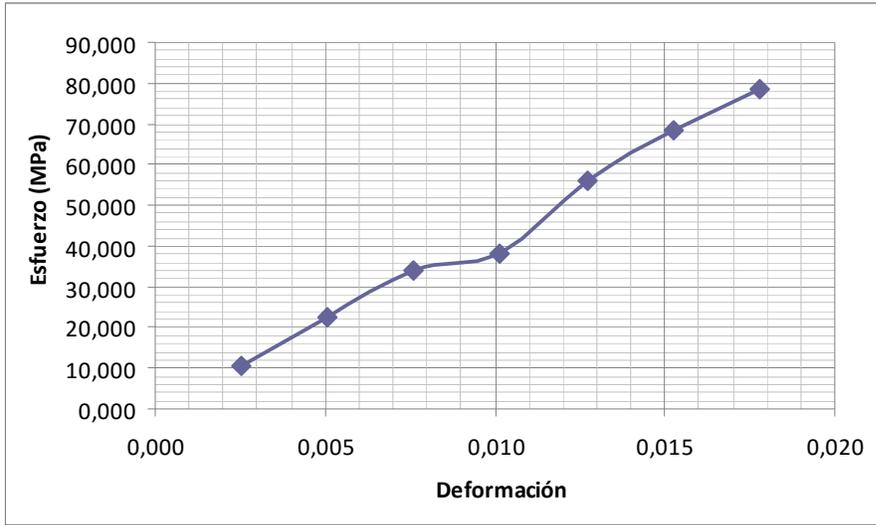


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE  
PROBETA 2 A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

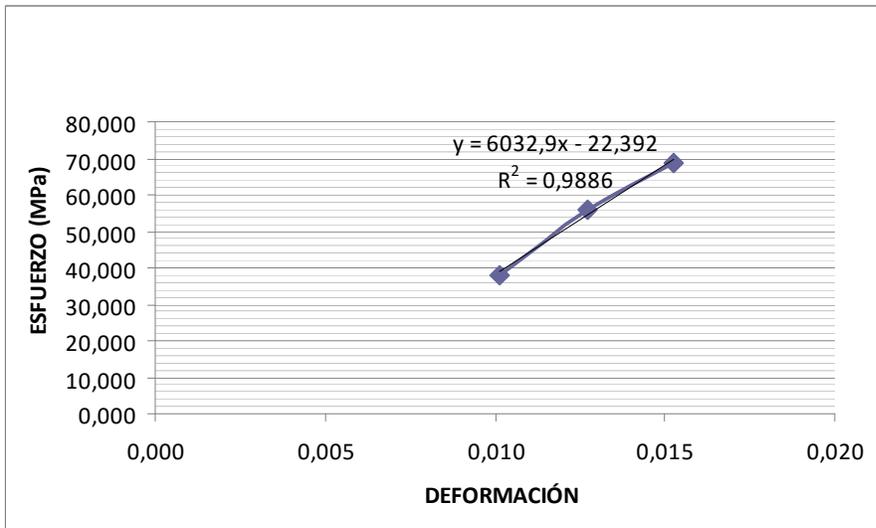
**Probeta 3 a los 7 días de curado**

**DATOS DE PROBETA 3 A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	2727,27	26727	2500	10,691
0,254	0,005	5727,27	56127	2500	22,451
0,381	0,008	8636,36	84636	2500	33,855
0,508	0,010	9681,82	94882	2500	37,953
0,635	0,013	14318,18	140318	2500	56,127
0,762	0,015	17500	171500	2500	68,600
0,889	0,018	20000	196000	2500	78,400



**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 3 A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

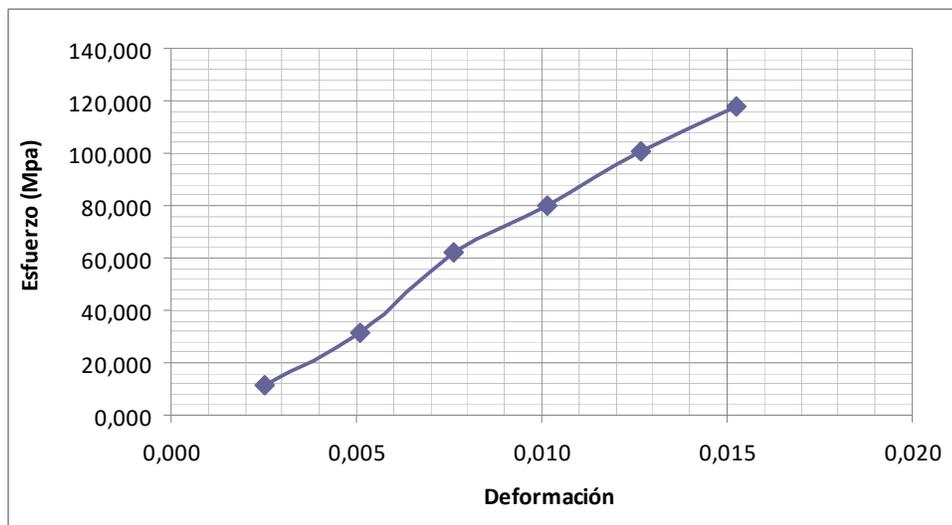


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 3 A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

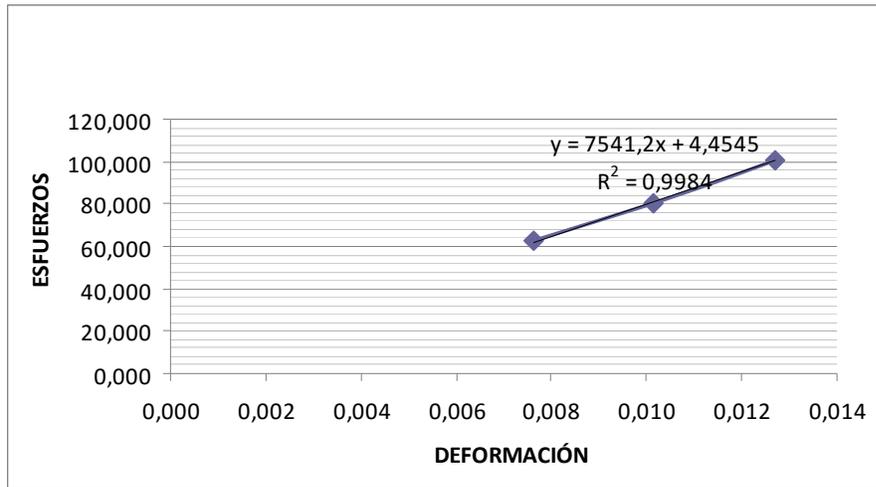
## Probeta 1 a los 14 días de curado

### DATOS DE PROBETA 1 A LOS 14 DÍAS DE CURADO

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	2909,09	28509	2500	11,404
0,254	0,005	7954,55	77955	2500	31,182
0,381	0,008	15909,09	155909	2500	62,364
0,508	0,010	20454,55	200455	2500	80,182
0,635	0,013	25681,82	251682	2500	100,673
0,762	0,015	30000,00	294000	2500	117,600



### ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 1 A LOS 14 DÍAS DE CURADO

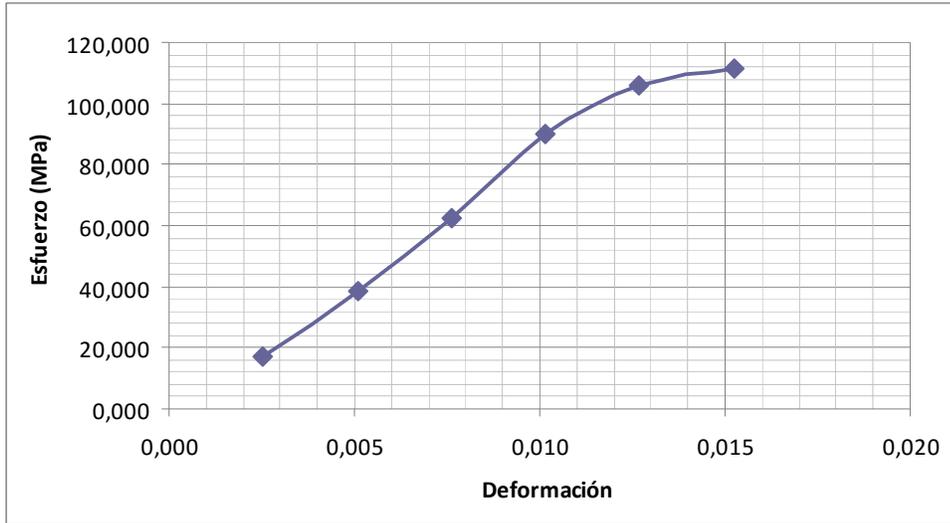


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE  
PROBETA 1 A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

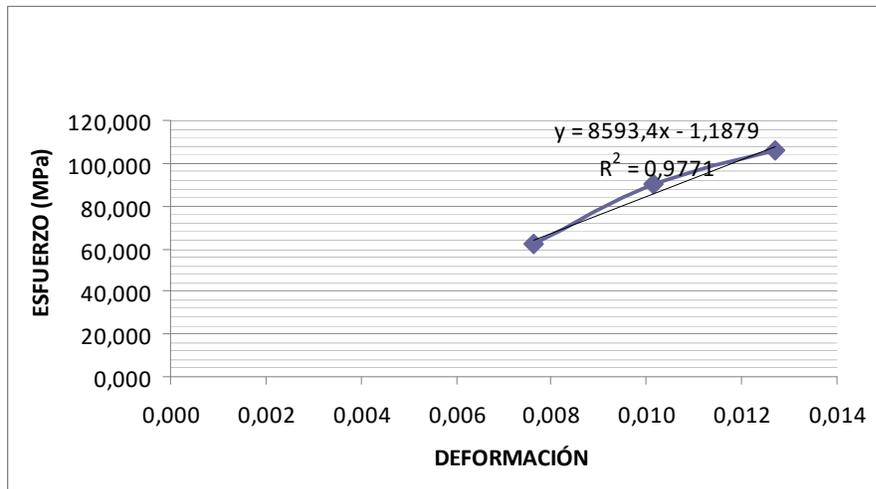
**Probeta 2 a los 14 días de curado**

**DATOS DE PROBETA 2 A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	4363,64	42764	2500	17,105
0,254	0,005	9863,64	96664	2500	38,665
0,381	0,008	15909,09	155909	2500	62,364
0,508	0,010	22954,55	224955	2500	89,982
0,635	0,013	27045,45	265045	2500	106,018
0,762	0,015	28409,09	278409	2500	111,364



**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 2 A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

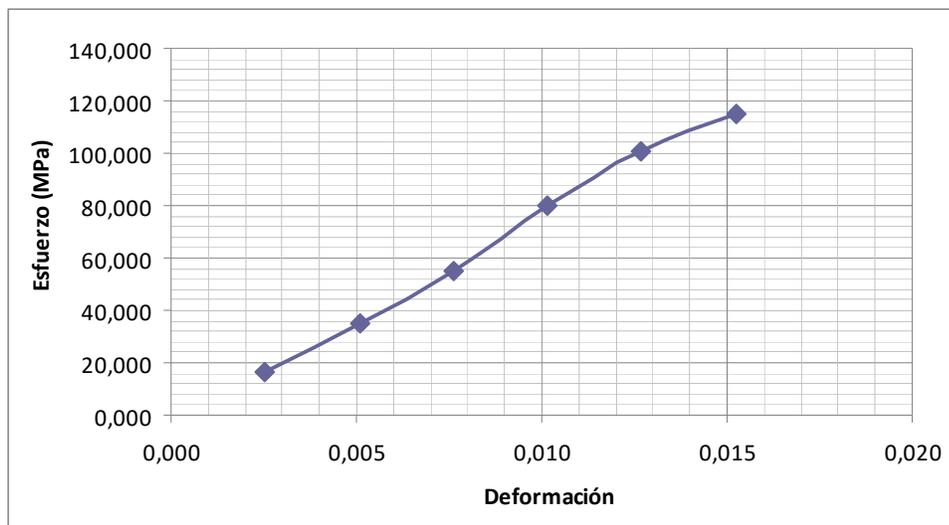


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 2 A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

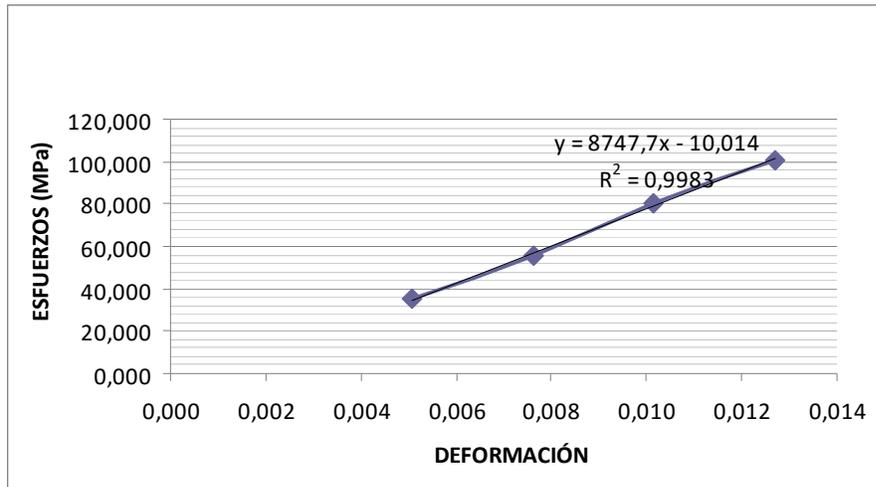
### Probeta 3 a los 14 días de curado

#### DATOS DE PROBETA 3 A LOS 14 DÍAS DE CURADO

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	4272,73	41873	2500	16,749
0,254	0,005	8909,09	87309	2500	34,924
0,381	0,008	14090,91	138091	2500	55,236
0,508	0,010	20454,55	200455	2500	80,182
0,635	0,013	25681,82	251682	2500	100,673
0,762	0,015	29318,18	287318	2500	114,927



#### ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 3 A LOS 14 DÍAS DE CURADO

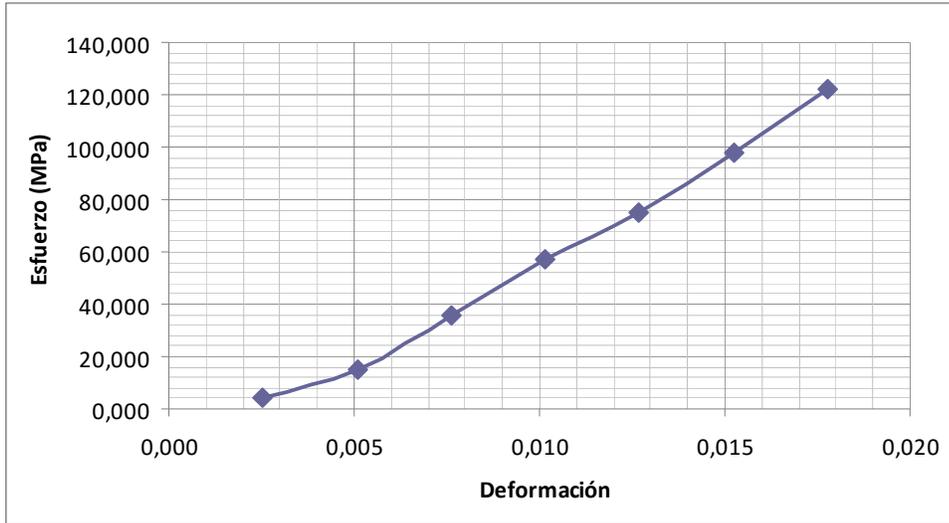


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE  
PROBETA 3 A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

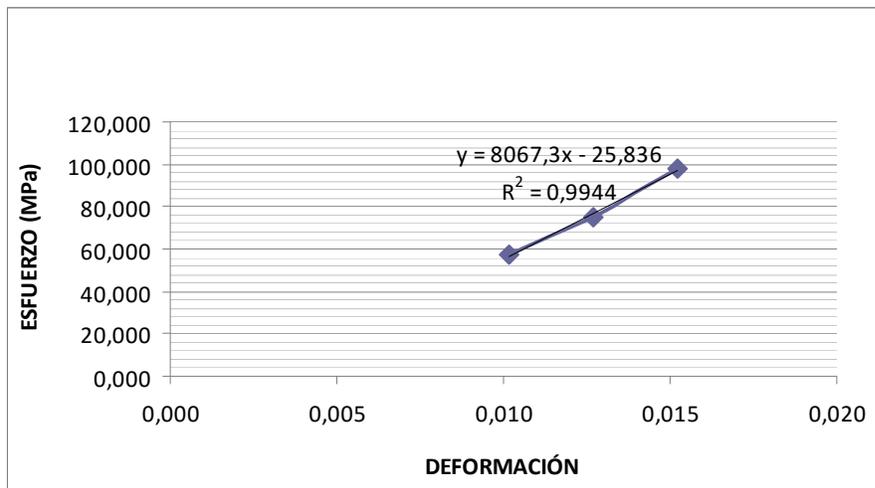
**Probeta 1 a los 21 días de curado**

**DATOS DE PROBETA 1 A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	1090,91	10691	2500	4,276
0,254	0,005	3818,18	37418	2500	14,967
0,381	0,008	9090,91	89091	2500	35,636
0,508	0,010	14545,45	142545	2500	57,018
0,635	0,013	19090,91	187091	2500	74,836
0,762	0,015	25000,00	245000	2500	98,000
0,889	0,018	31136,36	305136	2500	122,055



**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 1 A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

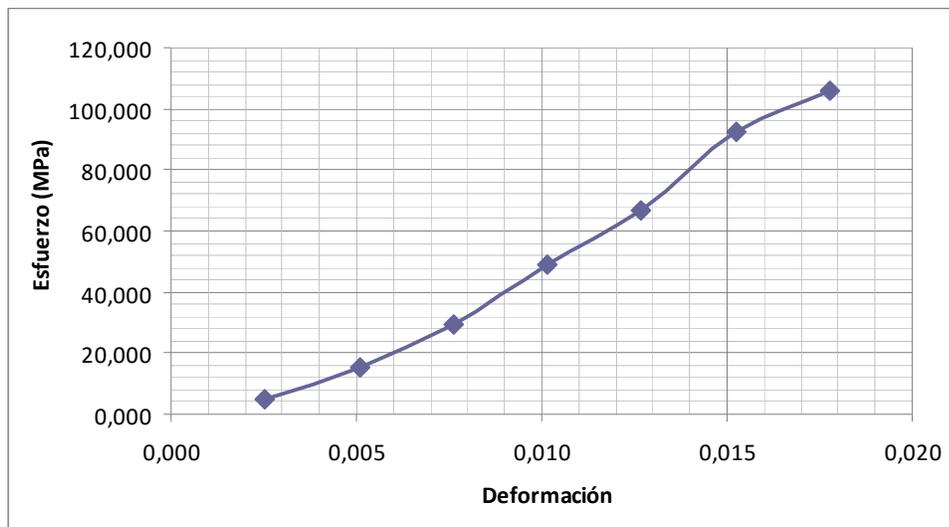


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 1 A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

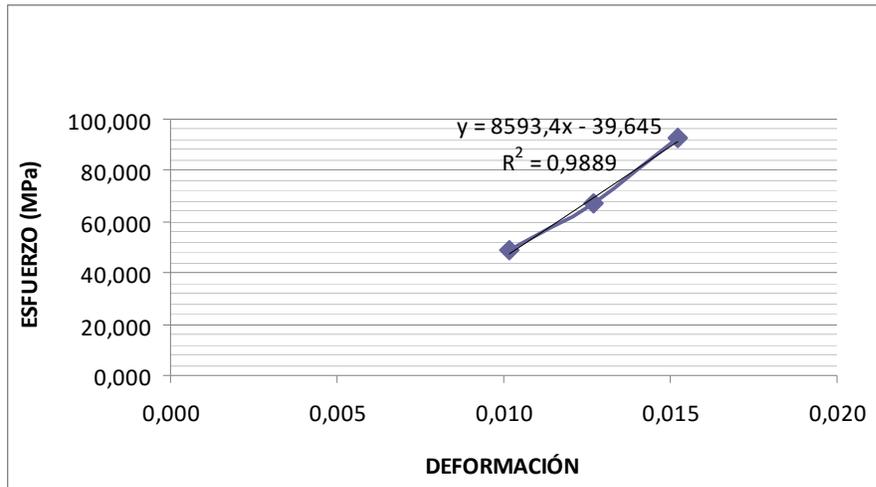
## Probeta 2 a los 21 días de curado

### DATOS DE PROBETA 2 A LOS 21 DÍAS DE CURADO

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	1272,73	12473	2500	4,989
0,254	0,005	3909,09	38309	2500	15,324
0,381	0,008	7500,00	73500	2500	29,400
0,508	0,010	12500,00	122500	2500	49,000
0,635	0,013	17045,45	167045	2500	66,818
0,762	0,015	23636,36	231636	2500	92,655
0,889	0,018	27045,45	265045	2500	106,018



### ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 2 A LOS 21 DÍAS DE CURADO

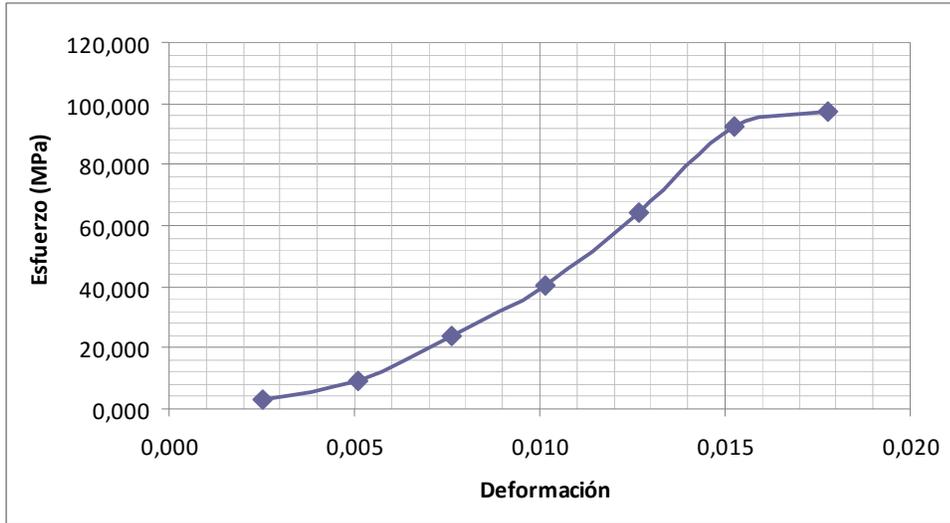


**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE  
PROBETA 2 A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

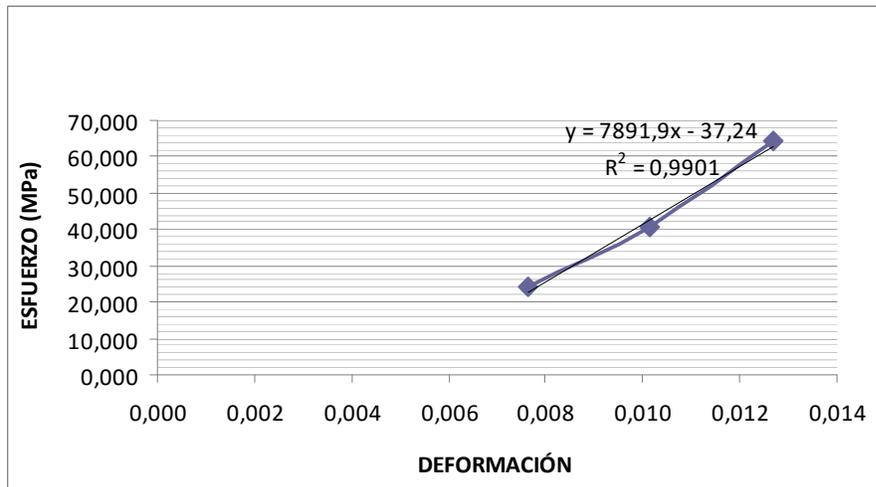
**Probeta 3 a los 21 días de curado**

**DATOS DE PROBETA 3 A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

MARCA (mm)	Deformación	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (Mpa)
0,127	0,003	818,18	8018	2500	3,207
0,254	0,005	2409,09	23609	2500	9,444
0,381	0,008	6136,36	60136	2500	24,055
0,508	0,010	10363,64	101564	2500	40,625
0,635	0,013	16363,64	160364	2500	64,145
0,762	0,015	23636,36	231636	2500	92,655
0,889	0,018	24772,73	242773	2500	97,109



**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 3 A LOS 21 DÍAS DE CURADO**



**LINEALIZACIÓN DE CURVA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN DE PROBETA 3 A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

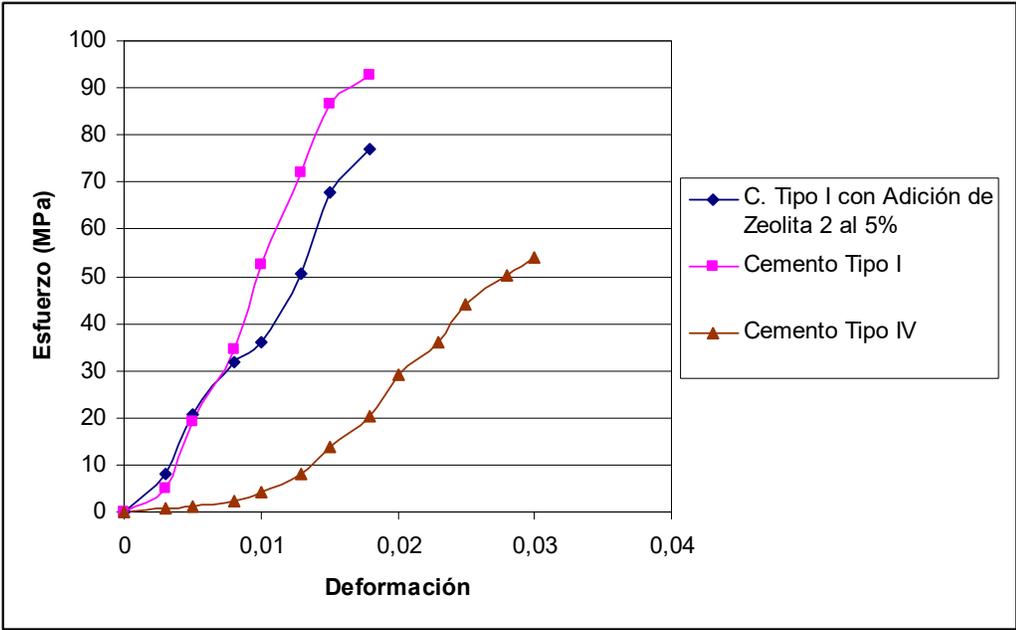
## ANEXO 2

### COMPARACIÓN DE ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN CEMENTO PORTLAND TIPO I Y TIPO IV SIN ADITIVO Y CEMENTO TIPO I CON ADICIÓN DE 5 % DE ZEOLITA 2 PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO

#### Esfuerzos a los 7 días de curado

#### COMPARACIÓN DE ESFUERZOS A LOS 7 DÍAS DE CURADO

Tiempo de Curado 7 días			
Tipo de Cemento	Cemento I con Zeolita 2 al 5%	Cemento I	Cemento IV
Deformación Unitaria	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0,003	8,02	5,16	0,72
0,005	20,85	18,99	1,24
0,008	31,89	34,47	2,16
0,01	35,90	52,51	4,19
0,013	50,51	72,09	8,18
0,015	67,71	86,62	13,8
0,018	77,11	92,85	20,21
0,02			29,1
0,023			35,97
0,025			44,15
0,028			50,03
0,03			53,96

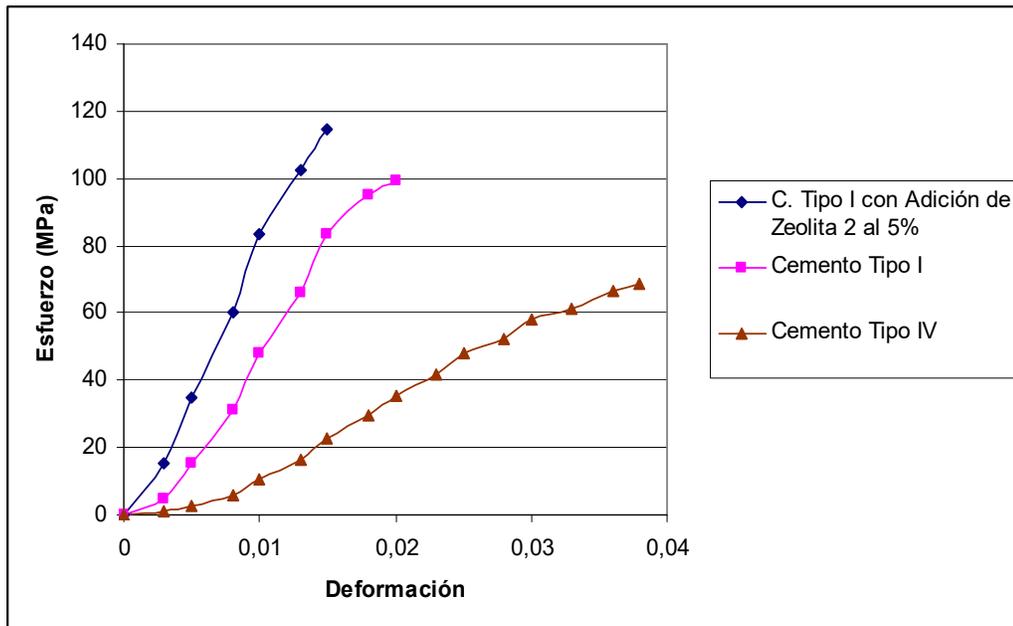


**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO A LOS 7 DÍAS DE CURADO**

**Esfuerzos a los 14 días de curado**

**COMPARACIÓN DE ESFUERZOS A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

Tiempo de Curado 14 días			
Tipo de Cemento	Cemento I con Zeolita 2 al 5%	Cemento I	Cemento IV
Deformación Unitaria	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
0.003	15,09	4.57	0.92
0.005	34,92	15.49	2.55
0.008	59,99	30.91	5.76
0.010	83,45	47.88	10.73
0.013	102,45	65.86	16.22
0.015	114,63	83.66	22.56
0.018		95.22	29.43
0.020		99.38	35.64
0.023			41.86
0.025			47.94
0.028			52.32
0.030			57.88
0.033			61.28
0.036			66.71
0.038			68.67

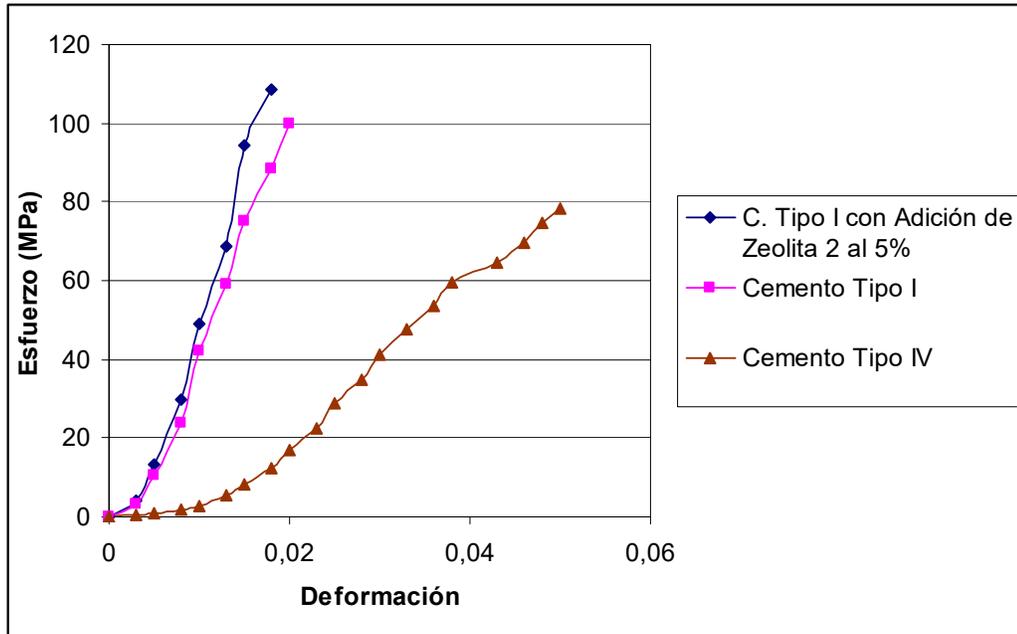


**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO A LOS 14 DÍAS DE CURADO**

**Esfuerzos a los 21 días de curado**

**COMPARACIÓN DE ESFUERZOS A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

Tiempo de Curado 21 días			
Tipo de Cemento	Cemento I con Zeolita 2	Cemento I	Cemento IV
Deformación Unitaria	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0
0,003	4,16	3,2	0,46
0,005	13,24	10,74	1,05
0,008	29,7	23,79	1,77
0,01	48,88	42,3	2,94
0,013	68,6	59,03	5,56
0,015	94,44	75,05	8,37
0,018	108,39	88,4	12,16
0,02		99,97	17
0,023			22,56
0,025			28,78
0,028			34,66
0,03			41,2
0,033			47,42
0,036			53,5
0,038			59,51
0,043			64,42
0,046			69,65
0,048			74,88
0,05			78,48



**ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO A LOS 21 DÍAS DE CURADO**

## ANEXO 3

### PROGRAMACIÓN EN MATLAB

#### Programa

```
clear;

clc;

E=9376.33e6;      %Modulo de Elasticidad (varía según el día de curado)
m=0.00643962;    %Varía según el día de curado
a=0.33;          %Constante para todos los días de curado
de=0.00254;      %Variación de la deformación (todos los días de curado)
def=0.018;       %Deformación final (varía según día de curado)

e=[0:de:def]';

k=size(e);

iteracion=k(1,1);

G(1)=0;

Gy(1)=81.30e6;

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 ('Esfuerzo Vs. Deformación')

xlabel('Deformacion');

ylabel('Esfuerzo (MPa)');

legend('Modelo Bilineal 21 Días');

grid;

hold on;

x=[0 0.003 0.005 0.008 0.010 0.013 0.015 0.018];      %Datos Experimentales
y=[0 3.21e6 9.44e6 24.05e6 40.63e6 64.15e6 92.65e6 97.11e6];

plot(x,y,'r');

```

## Función Newton Raphson

```
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+deltalampda(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

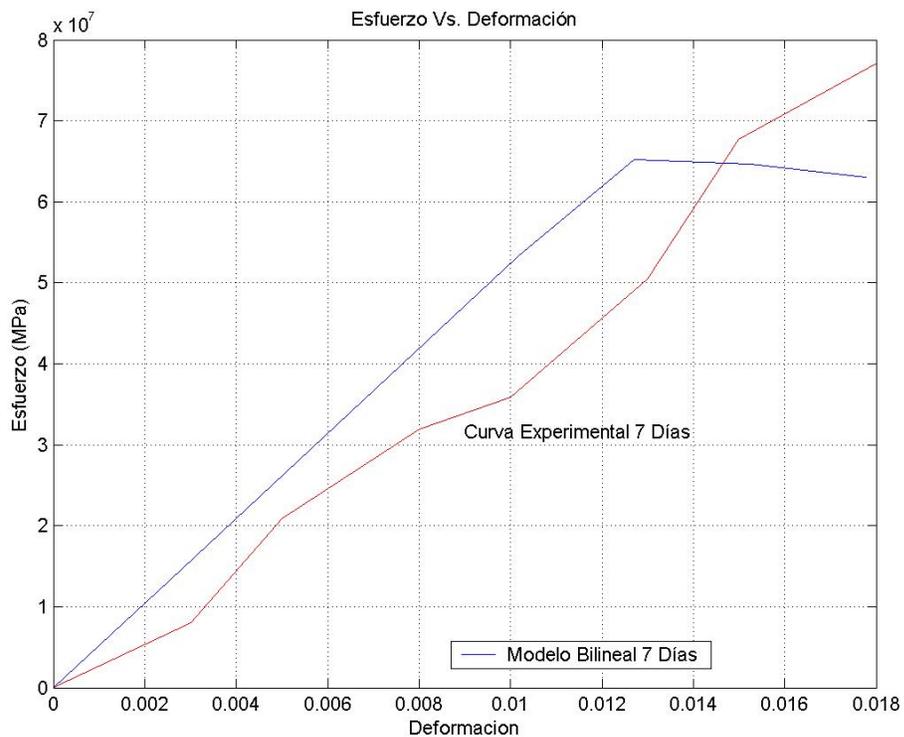
    end

end

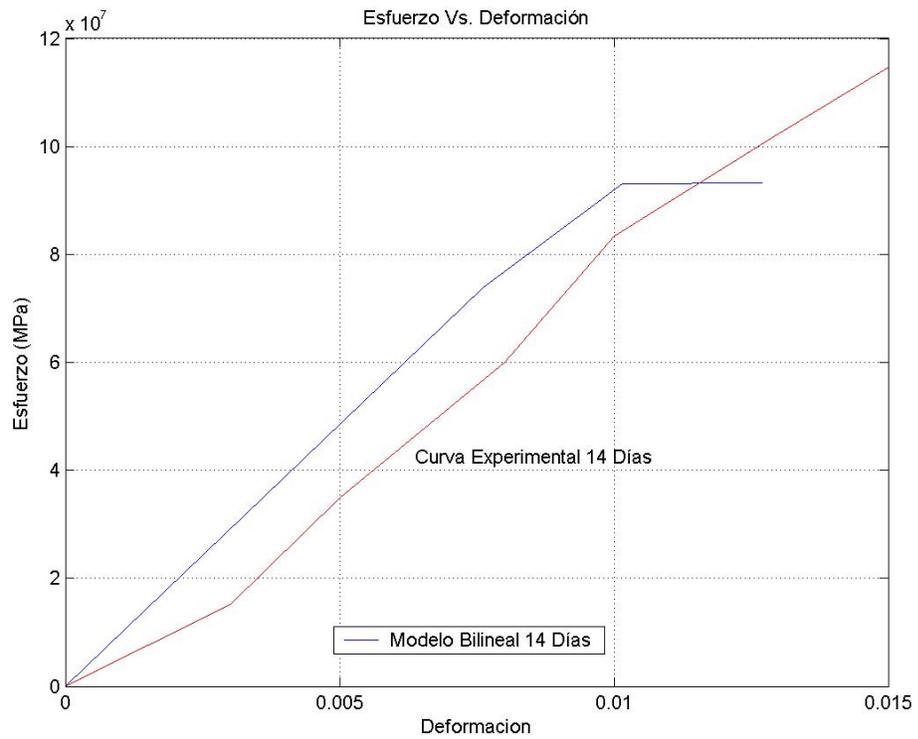
end
```

## ANEXO 4

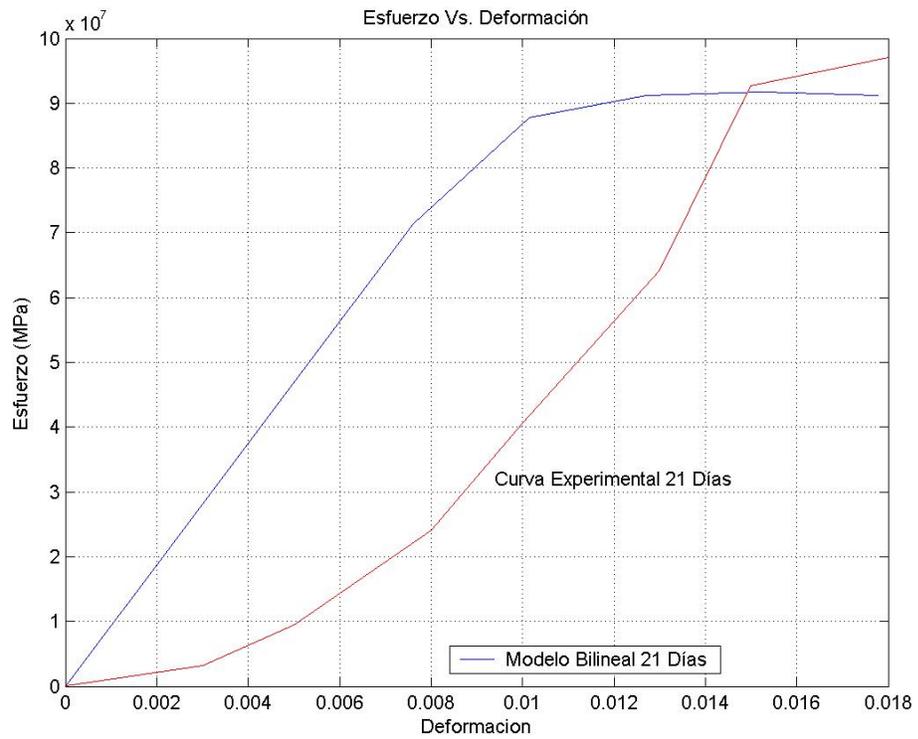
### **SIMULACIÓN EN MATLAB DEL COMPORTAMIENTO DEL ESFUERZO PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO**



### **MODELO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN EN MATLAB DE ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA PASTA DE CEMENTO TIPO I CON ADICIÓN DE ZEOLITA 2 AL 5 % Y 7 DÍAS DE CURADO**



**MODELO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN EN MATLAB DE  
ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA PASTA DE CEMENTO  
TIPO I CON ADICIÓN DE ZEOLITA 2 AL 5 % Y 14 DÍAS DE  
CURADO**



**MODELO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN EN MATLAB DE  
ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA PASTA DE CEMENTO  
TIPO I CON ADICIÓN DE ZEOLITA 2 AL 5 % Y 28 DÍAS DE  
CURADO**