

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

**“Análisis y Simulación Del Comportamiento Del Cemento
Tipo I, Con Adición Del 10% De Zeolita Ecuatoriana
Mediante Curado Al Aire”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Richard Manuel Vélez Mosquera

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

AGRADEZCO PRIMERO A
DIOS POR VERME
PERMITIDO TENER
SIEMPRE A MI LADO UNA
PERSONA MUY
ESPECIAL, BLANCA
VALENZUELA, QUIEN
SUPO CORRESPONDER
COMO PADRE Y MADRE
DURANTE TODOS
ESTOS AÑOS.

DEDICATORIA

A MI ABUELITA, POR SER
UNOS DE LOS PILARES
IMPORTANTES,
DURANTE MI
FORMACIÓN
PROFESIONAL.
IMPULSÁNDOME
SIEMPRE HACIA LA
EXCELENCIA.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Rodrigo Perugachi B.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Juan Pindo M.
VOCAL

Ing. Mauricio Cornejo M.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

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

Richard Vélez Mosquera

RESUMEN

Debido a la falta de mejoramiento de las propiedades mecánicas del cemento en la actualidad; por lo que nuestro trabajo es de índole investigativo, teniendo como objetivo principal de brindar una nueva alternativa al consumidor final al momento de seleccionar una pasta de cemento con propiedades mecánicas modificaciones principalmente en la resistencia máxima a la compresión, mediante la adición de nuevos aditivos Puzolanicos. Dentro de su composición química.

Para la cual se ha determinado analizar los efectos que genera la zeolita Ecuatoriana tipo I, extraída de la Provincia de Santa Elena de la Comuna Manglaralto.

A través de la comparación de resultados obtenidos mediante las pruebas experimentales, realizadas en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Tierra.

Para lo cual se realizaron ensayos mecánicos a las muestras que contienen el 10%, de zeolita a los días 7, 14, 21 y 28 respectivamente. Donde la función de respuesta obtenida fue la resistencia máxima a la compresión uniaxial.

Conjuntamente el estudio era complementado, mediante otros investigadores; Aportando con sus análisis estadísticos de los datos obtenidos en pruebas y condiciones similares, para porcentajes de zeolitas tales como: 5%, 15%, 20% y 25%.

Permitiendo realizar un análisis grupalmente de todos los datos obtenidos, obteniendo finalmente modelos que nos permitan describir el comportamiento de las propiedades mecánicas de la pasta de cemento. Principalmente el Esfuerzo máximo a la compresión, y adicionalmente los esfuerzo de fluencia y modulo elástico. Para diferentes días de curado al aire y porcentajes de zeolita.

Al concluir este trabajo investigativo, se obtuvo un modelo matemático que nos permitió definir el comportamiento de la pasta de cemento compuesto por zeolita Ecuatoriana. Donde se concluye que el porcentaje de zeolita dentro de la composición de la pasta de cemento, no es influyente sobre la resistencia máxima la compresión uniaxial. Respecto a la muestra de control que para nuestro estudio fue el cemento Portland tipo I.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
INTRODUCCIÒN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 Planteamiento.....	3
1.2 Objetivo.....	6
1.3 Metodología.....	9
1.4 Estructura de la tesis.....	12

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO PUZOLANICO.....	15
2.1 Cemento.....	15
2.1.1 Clasificación del Cemento.....	15
2.1.2 Hidratación del Cemento.....	18
2.1.3 El Agua en la hidratación del cemento.....	19
2.1.4 Micro estructura durante la Hidratación.....	21
2.1.5 Influencia de la temperatura de curado en el proceso de hidratación.....	23
2.2 Puzolana:.....	24
2.2.1 Tipos de puzolana.....	24
2.3 Definición de zeolita.....	27
2.3.1. Clasificación de la zeolita.....	28
2.3.2 Propiedades de la zeolita.....	29
2.3.3 Aplicaciones industriales de la zeolita.....	33

2.4 Modelación Matemática, respecto a la Adición de Aditivos, en Cemento de Alto Rendimiento.....	34
2.5 Otras investigaciones relacionadas.....	37

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	45
3.1 Diseño experimental.....	45
3.1.1 Planeación del experimento.....	47
3.1.2 Ejecución de los experimentos.....	49
3.1.3 Procesamiento y análisis de los datos.....	50
3.1.4 Análisis de los resultados estadísticos.....	54
3.2 Preparación y ensayo de probetas.....	55
3.2.1 Composición de Las Muestras.....	55
3.2.2 Preparación de los moldes.....	57
3.2.3 Preparación de las muestras.....	58
3.2.4 Moldeado de las muestras para los ensayos.....	60
3.2.5 Determinación del esfuerzo de compresión.....	61

3.2.6 Aparatos y materiales utilizados para la preparación.....	62
3.3 Simulación computacional.....	64

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANALISIS ESTADISTICOS.....	81
4.1. Ensayo de compresión.....	83
4.2. Análisis estadístico.....	84
4.2.1 Normalización de los datos.....	86
4.2.2 Análisis de varianza.....	89
4.2.3 Análisis de varianza con el uso de contraste.....	94
4.2.4 Análisis de varianza grupal.....	97
4.2.5 Regresión lineal múltiple.....	104
4.3. Resultados de modelo.....	105

CAPÍTULO 5

5. Discusiones de resultados.....	114
-----------------------------------	-----

CAPÍTULO 6.

6. Conclusiones y Recomendaciones.....117

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Materials (Sociedad Americana para el ensayos de los materiales)
ACI	American concrete institute (instituto Americano del concreto)
ACI 318	Building Code Requirement for Structural Concrete. (Códigos para el concreto estructural)
CIICE	Capacidad de Intercambio Iónico
D^i	Coefficiente de Difusión Aparente
Def	Deformación
GL	Grados de libertad
Hr	Horas
HPC	High Performance Concrete. (Concreto de alto rendimiento)
Hr	Horas
Kg-f	Kilogramos fuerzas
mm	Milímetros
r	Radio
m^2/g	Relación entre Superficie Interna / Externa
ASTM C595	Standard Specification For Blended Hydraulic Cements (especificaciones para mezclas de cementos hidráulico).
ASTM C 109	Standard Test Método For Compressive Strength.(ensayos para pruebas de esfuerzos a la compresión)
SC	Suma de cuadrados
t	Tiempo

SIMBOLOGÍA

C3A	Aluminato Tricálcico
ε_{\max}	Deformación unitaria máxima
\emptyset	Diámetro del Poro
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
MK	Metacaolín
E	Modulo de elasticidad
a	Parámetro a dimensional a
m	Parámetro a dimensional m
%	Porcentaje
σ_y	Resistencia de fluencia
σ_u	Resistencia máxima a la compresión
SF	Sílice Fume
C3S	Silicato Tricálcico

INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Metodología de la tesis.....	9
Figura 2.1. Formacion de los productos de hidratacion.....	21
Figura 2.2. Estructura tipica de la zeolita.....	27
Figura 2.3. Comparación de las Ecuaciones ACI 363 - ACI 318.....	41
Figura 3.1. Molino de mandíbulas.....	52
Figura 3.2. Material en balanza electrónica.....	53
Figura 3.3. Molino de rodillos.....	54
Figura 3.4. Agregar zeolita al molino de rodillos.....	54
Figura 3.5. Cuarteo de la zeolita.....	55
Figura 3.6. Tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo.....	55
Figura 3.7. Molino de discos.....	56
Figura 3.8. Agregando zeolita al molino de discos.....	56
Figura 3.9. Primer cuarteo de la zeolita.....	57
Figura 3.10. Tamices #50, 100, 200, 325 y fondo.....	57
Figura 3.11. Molino de bolas.....	58
Figura 3.12. Zeolita con granulometría final.....	59
Figura 3.13. Preparación de moldes.....	63
Figura 3.14. Balanza electrónica encerada.....	63
Figura 3.15. Pesando materiales.....	64
Figura 3.16. Homogenizando cemento + zeolita.....	65
Figura 3.17. Llenando los moldes con pasta.....	66
Figura 3.18. Compactando las probetas.....	66

Figura 3.19.	Reposado de probetas.....	67
Figura 3.20	Probetas cubiertas con plástico.....	67
Figura 3.21	Desmolde de las muestras.....	68
Figura 3.22	Encerada de los diales.....	70
Figura 3.23	Lectura de las cargas y deformaciones.....	70
Figura 3.24	Maquina de ensayos universal.....	73
Figura 3.25	Curva generada con el programa en matlab (teórico).....	81
Figura 4.1	Histograma de los datos, del esfuerzo máximo, 10% zeolita.....	86
Figura 4.2	Probabilidad normal de los residuos.....	86
Figura 4.3	Histograma de los datos de esfuerzo máximo, 12.5% zeolita.....	88
Figura 4.4	Probabilidad normal de los residuos.....	91
Figura 4.5	Gráfica esfuerzo último vs. días de curado.....	94
Figura 4.6	. Grafica de la normalidad de los datos grupales.....	95
Figura 4.7	Gráfica esfuerzo ultimo vs. Porcentajes.....	103
Figura 4.8	Grafica en 3d simulación del esfuerzo máximo, para diferentes % de zeolita, tiempo.....	105
Figura 4.9	Grafica de las curvas de nivel del esfuerzo máximo, para diferentes % de zeolita, tiempos.....	106
Figura 4.10	Grafica en 3d simulación del esfuerzo fluencia, para diferentes % de zeolita, tiempos.....	107
Figura 4.11	Grafica de las curvas de nivel del esfuerzo fluencia, para diferentes % de zeolita, tiempos.....	108
Figura 4.12	Grafica en 3d simulación del modulo elástico, para diferentes % de zeolita, tiempos.....	109
Figura 4.13	Grafica de las curvas de nivel del modulo elástico, para diferentes % de zeolita y tiempos.....	109
Figura 4.14	Grafica en 3d simulación del valor "a", para diferentes % de zeolita y tiempos.....	110
Figura 4.15	Grafica de las curvas de nivel del valor "a", para diferentes % de zeolita, tiempos.....	110
Figura 4.16	Grafica en 3d simulación del valor "m", para diferentes % de zeolita, tiempos.....	111

Figura 4.17 Grafica de las curvas de nivel del valor "m", para diferentes % de zeolita, tiempos.....111

INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1	Componentes del cemento..... 16
Tabla 2	Principales aplicaciones del cemento..... 17
Tabla 3	Requerimiento físicos del cemento..... 17
Tabla 4	Características de la zeolita..... 27
Tabla 5	Clasificación de la zeolita según el tamaño de los poros..... 28
Tabla 6	Capacidad iónica de la zeolita..... 30
Tabla 7	Formato de toma de datos de Resistencia a la Compresión con respecto al Tiempo de Curado..... 47
Tabla 8	Cantidades de Compuestos para la Producción de Morteros según la norma ASTM C 109/c 109m – 02..... 61
Tabla 9	Cantidad de compuesto, para la producción de pasta de cemento compuesto con 10-12.5 % de zeolita..... 63
Tabla 10	Tolerancia permitida en los moldes 73
Tabla 11	Resultados obtenidos para las muestras que contiene 10% de zeolita, a diferentes días de curado..... 84
Tabla 12	Resultados obtenidos para las muestras que contiene 12.5% de zeolita, a diferentes días de curado..... 84
Tabla 13	Datos de esfuerzo máximo, para diferentes días de ruptura con el 10% de zeolita..... 86
Tabla 14	Datos de esfuerzo máximo, para diferentes días de ruptura con 12.5% zeolita88
Tabla 15	Datos de esfuerzo máximo, para un porcentaje de zeolita de 10% a diferentes días de curado.....91
Tabla 16.	Tabla de análisis de varianza para el esfuerzo máximo de la pasta de cemento con 10% de zeolita.....92

Tabla 17	Intervalos de confianza, para la media del esfuerzo máximo, con el 10% zeolita.....	93
Tabla 18	Tabla de probabilidades, mediante prueba Post Hoc de Tukey..	94
Tabla 19	Matriz Coeficientes de los contrastes.....	97
Tabla 20	Matriz contrastes estimados.....	97
Tabla 21	Datos de esfuerzo máximo para diferentes % de zeolita y diferentes días de curado.....	99
Tabla 22	Análisis de la varianza para el esfuerzo máximo de la pasta de cemento, para diferentes % y días	101
Tabla 23	Error estándar de la media del esfuerzo máximo, a diferentes %zeolita y días.....	103
Tabla 24	Tabla de probabilidades, utilizando la prueba Post Hoc de Dunnett	104
Tabla 25	Resultados de la regresión lineal múltiple de los parámetros requeridos para el modelo.....	106
Tabla 26	Valores de los parámetros, para la simulación con 10% de zeolita.....	114
Tabla 27	Valores de los parámetros, para la simulación con 12,5% de zeolita.....	114

INTRODUCCIÓN

Debido a los altos precios de mantenimiento de las obras, dentro del sector de la construcción y la falta de mejoramiento de las propiedades mecánicas del cemento en la actualidad; este estudio tiene la finalidad de brindar una nueva alternativa, en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de la pasta de cemento, con la aplicación de nuevos aditivos puzolánicos.

El presente trabajo de investigación tiene objetivo fundamental, estudiar y simular el comportamiento del cemento hidráulico Pórtland Tipo I, cuando se adiciona diferentes porcentajes de aditivo Puzolánico natural y a diferentes tiempos de curado, siendo esta zeolita ecuatoriana, con muestras tomadas en la provincia de Santa Elena en el sector de Manglaralto.

El medio de curado para realizar las pruebas respectivas fue al aire.

Para la realización de las etapas de experimentación se tomo como referencias normas estándares, tales como: ASTM C 595 – 03(Standard Specification For Blended Hydraulic Cements), y ASTM C 109

(Standard Test Method For Compressive Strength Of Hydraulic Cement Mortars). Para analizar la obtención de los datos realizamos un estudio preliminar, mediante el programa computacional STATISTIC, donde los datos que se tomaron estuvieron dentro de un intervalo de tiempo de (7, 14, 21, 28) días respectivamente, verificando primordialmente la normalidad, los mismo que permitieron obtener un modelo matemático óptimo y la simulación del comportamiento de la resistencia a la compresión del cemento, respecto al tiempo.

Mediante la obtención de estos resultados, se pudo realizar curvas tales como: Esfuerzos vs. Tiempo, para lo cual se tomo como punto de partida el estudio de análisis de elementos finitos y mecánica del continuó.

El análisis de los resultados de este estudio, consistió básicamente en la comparación de propiedades mecánicas, respecto a una muestra de control, siendo éste cemento Pórtland Tipo I, sin porcentajes de aditivos agregados. Adicionalmente se también se comparo con el cemento Tipo IV "comercial".

Finalmente, la expectativa de nuestro estudio, es obtener un cemento con propiedades mecánicas modificadas.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del Problema.

La presente tesis está basada en el cemento, que es un compuesto de carbonatos de calcio y arcilla en forma de polvo fino, obtenido a través del proceso de molienda. El cemento ha sido utilizado desde la época de los alquimistas para múltiples aplicaciones, ya sea para las construcciones de modestas casas hasta la actualidad con grandes construcciones de estructuras y pavimentaciones de calles.

La pasta de cemento utilizado hoy en día para las construcciones se prepara al mezclar cemento con agua, donde el cemento contiene aditivos tales como ceniza volcánica, rocas silíceas sedimentarias, subproductos industriales, etc. Las cuales tienen como función principal de modificar las propiedades normales de la pasta de cemento. Dentro de las cuales tienen como objetivo en aumentar

la resistencia a la compresión, acelerar o retardar el fraguado.

Debido a la evolución del estudio relacionado al cemento, hoy en día existen problemas en la búsqueda de nuevos aditivos, que puedan reemplazar el uso de la ceniza volcánica, como uno de los aditivos del cemento. Permitiendo estos nuevos aditivos, obtener mejoras en sus propiedades mecánicas, siendo principalmente para el estudio, la mejora de la resistencia a la compresión.

Existiendo otro problema dentro de nuestro medios, la falta de un método numérico que permita obtener un modelo matemático, para luego realizar la simulación del comportamiento de la resistencia a la compresión respecto al tiempo, de la pasta de cemento cuando se le agrega un porcentaje de aditivo puzolánico, que para el estudio se tomaron porcentajes del (5, 10, 15, 20, 25) de zeolita, mediante un curado al aire.

1.1.1. Antecedentes y Justificación.

El presente estudio consiste en mejorar las propiedades mecánicas de una pasta de cemento compuesto, después de

agregar cierto porcentaje de zeolita siendo éste el aditivo que provocare las modificaciones al cemento de tipo I.

Todo este período de transición para el curado se le va a realizar en el medio ambiente.

Para luego someter a las probetas del compuesto a varias pruebas de resistencia a la compresión, finalmente analizar y concluir el efecto que tiene el porcentaje del aditivo sobre el cemento.

El estudio no está solo basado en analizar cómo se modifican las propiedades físicas del cemento cuando se le agrega un porcentaje de zeolita tomando como el medio del curado el aire, sino también en el efecto del tiempo del fraguado, cada 7, 14, 21, y 28 días , analizando así las modificaciones de los esfuerzos por cada tiempo.

Todos estos datos fueron comparados con una muestra que se la define técnicamente como **muestra control**. Que es aquella que tiene 0% de aditivos “zeolita”

Con el estudio realizado se obtuvo una pasta de cemento con propiedades mecánicas modificadas, permitiendo así al consumidor final contar con una alternativa más al momento de seleccionar una pasta de cemento compuesta, para un trabajo determinado.

1.2. Objetivos.

1.2.1 Objetivos Generales.

El presente estudio científico-tecnológico tiene por objetivo el obtener un modelo matemático, para poder simular el comportamiento de la resistencia de compresión, respecto a diferentes porcentajes de zeolita y días de curado.

1.2.2 Objetivos específicos.

La presente tesis tiene como objetivos específicos los siguientes:

- ❖ Analizar los efectos en la resistencia a la compresión, de la pasta de cemento, debido a la adición de zeolita a diferentes porcentajes.
- ❖ Analizar los efectos en la resistencia a la compresión, de la pasta de cemento, cuando se expone a diferentes días de curado al aire.
- ❖ Mediante los datos obtenidos, analizar y comparar, respecto al cemento Tipo I (sin aditivo) y Tipo IV (comercial), obteniendo finalmente los porcentajes de zeolita y tiempos de curado más óptimos. Para producir una modificación en la resistencia a la compresión.

1.3. Metodología.

La metodología que se siguió en la siguiente tesis se ve detallada en la Fig. 1.1, la cual detalla los pasos que se siguieron para llevar, para cada uno de nuestros objetivos propuestos.

En el primer paso denominado como “**Identificación de propiedades y características del cemento tipo I**”, se analizaron las propiedades del cemento Pórtland tipo I. Entre las propiedades mecánicas que se analizaron fue la resistencia a la compresión.

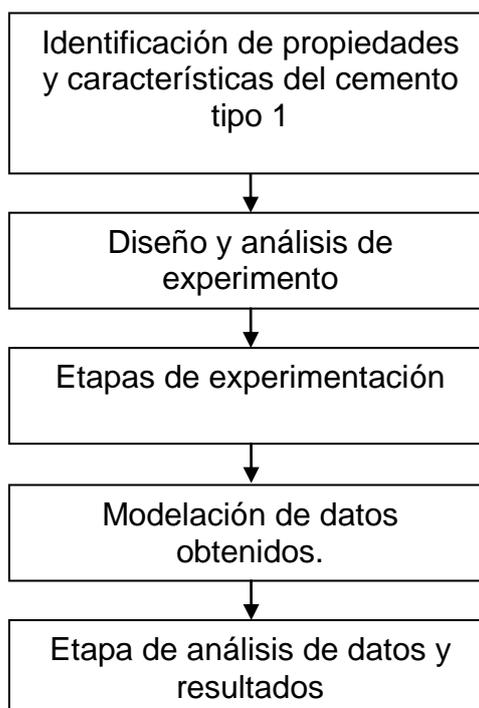


FIGURA 1.1. METODOLOGÍA DE LA TESIS.

En el segundo paso denominado como “**Diseño y análisis de experimentos**”, se realizó la planificación de los experimentos que se debieron efectuar, las cuales contienen pruebas de hipótesis específicas.

En esta parte fue analizado la manera más óptima para obtener un margen de error mínimo en los datos de las pruebas de resistencia a la compresión. La manera más sencilla de realizar fue efectuando comparaciones simultáneas entre ellas.

El tercer paso denominado como “**Etapa de experimentación**”, se definieron todos los parámetros variables y constantes para la obtención de las pruebas, entre los parámetros variable fueron el porcentaje de aditivo y el medio del curado, como parámetro constante fue la relación agua/mezcla, la granulometría de la mezcla.

El cuarto paso denominado como “**Modelación de datos**”, esta sección consistió en realizar un modelo mediante la ayuda de programas de estadísticos y matemáticos, tales como Matlab mediante métodos de elementos finitos, todo esto tiene como finalidad tener ciertos valores de espera del comportamiento de las probetas respecto a los esfuerzos.

Mediante el programa computacional estadística, se analizó con la tabla anova el nivel de confianza de las pruebas, y de esta manera determinando si existen diferencias significativas entre las muestras

de nuestro modelo, permitiendo la aceptación o rechazo de la hipótesis previamente planteada en nuestro estudio.

En el quinto paso denominado como **“Etapas de análisis de datos y resultados”**, en esta sección se realizaron comparaciones del esfuerzo a la compresión de las muestras compuesta por diferentes porcentajes de zeolita, curadas al aire, respecto al cemento Tipo I (0% zeolita) y cemento Tipo IV (comercial).

1.4. Estructura de la tesis.

El presente trabajo de tesis está compuesto de seis capítulos, los cuales se detallan a continuación.

El primer capítulo denominado **“Generalidades”**, contiene una perspectiva muy general del cemento Pórtland tipo I, su evolución, la importancia dentro del desarrollo tecnológico. También de los mejoramientos de las propiedades mecánicas mediante ciertos aditivos tales como la zeolita y limonita.

El segundo capítulo denominado **“Estado del Arte del Cemento”** contiene toda la información concerniente al cemento, el proceso de fabricación, las propiedades, características, elementos que los conforman los tipos de aditivos que puede contener el cemento Portland Tipo I, parámetros constante y variables para mejorar las propiedades del cemento, además, se presentaron los medios de curado que pueden estar expuesto el concreto para las pruebas.

En el tercer capítulo denominado **“Procedimiento y diseño experimental”**, contiene la secuencia que se siguió para la obtención de los datos dentro de la experimentación, además, se mostro el diseño que se utilizó para la obtención de los datos de la resistencia a la compresión, para un tiempo de fraguado determinado, luego se realizó un análisis estadístico mediante el uso de la tabla anova, permitiendo saber si existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, y de este modo aceptar o rechazar nuestras hipótesis iniciales en favor o en contra de las hipótesis experimentales.

El cuarto capítulo denomina **“Resultados y análisis estadísticos”**, se determinó si el modelo computacional es adecuado o no,

mediante una validación de datos. Como a manera de ejemplo, para la pasta de cemento compuesta por 10% le corresponde el porcentaje de validación igual a 12,5% de zeolita.

El quinto capítulo denominado “**Discusiones de resultados**”, contiene, el análisis si la pasta de cemento compuesta por zeolita, tuvo algún tipo modificación de sus propiedades mecánicas, específicamente en la resistencia a la compresión. Tomando como referencia para la comparación el cemento Tipo I y cemento Tipo IV. Adicionalmente se discutió el efecto del tiempo de fraguado sobre la resistencia a la compresión.

El sexto capítulo denominado “**Conclusiones y Recomendaciones**”, contiene todas las conclusiones que surgieron como consecuencia, de los objetivos trazados previo a la investigación de la presente tesis. Adicionalmente recomendaciones de cierta mejoras para un posteriores investigaciones.

CAPITULO 2

2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO PUZOLANICO

2.1. Cemento Pórtland tipo I.

El cemento Pórtland es un polvo muy fino, color grisáceo, que se compone básicamente de silicatos de calcio y de aluminio que provienen de calizas, arcillas y yeso, mediante procesos especiales. El color es parecido a las piedras de la región Pórtland, en Inglaterra, de ahí el origen de su nombre. Entre los diferentes tipos de cementos hidráulicos, el más empleado es el cemento Portland, existiendo también el cemento natural y el de un alto contenido de alúmina.(1)

2.1.1 Clasificación de lo Cementos.

Cemento Pórtland: (también denominado como cemento tipo 1-RTCR, y que cumple con las especificaciones físicas de la norma ASTM C150 para el cemento tipo 1) cemento hidráulico

producido al pulverizar clinker y una o más formas de sulfato de calcio como adición de molienda (2).

Cemento hidráulico modificado con puzolana; cemento tipo MP-RTCR: cemento hidráulico que consiste en una mezcla homogénea de clinker, yeso y puzolana (y otros componentes minoritarios), producido por molienda conjunta o separada.

Cemento hidráulico modificado con escoria; cemento MS-RTCR: cemento hidráulico que consiste en una mezcla homogénea de clinker, yeso y escoria granulada de alto horno (y otros componentes minoritarios), producida por molienda conjunta o separada. . A continuación tabla 1, se puede ver que los componentes de mayor porcentaje, dentro de la composición del cemento; es el clinker y el yeso. Otro elemento representativo; es el mineral puzolánico, que en presencia de la humedad esté reaccionara, formando un nuevo producto con propiedades aglomerante. (3)

TABLA 1
PRINCIPALES ELEMENTOS Y PORCENTAJES DEL
CEMENTO

CLINKER- YESO	50 , 90 XXXX	50 - 95 6 - 35	20, 34 XXXX	95, 100 XXXX	50, 90 XXXX
CALIZA					
MINERALES PUZALANICOS	6- 50	6 - 35	XXXX	XXXX	6 - 50
ESCORIA GRANULADA	XXXX	6 -35	XXXX	XXXX	XXXX
OTROS	0 - 5	0 - 5	0- 5	0 -5	0- 5

Fuente: Instituto costarricense del cemento y concreto "tipos de cementos"

Mediante tabla 2. Se puede ver que el cemento tipo I dentro de la manufacturación, es el más importante, debido a su amplia aplicación, mientras que los otros son aplicados con fines especiales.

A Continuación tabla 3. Indicó el tipo de pruebas aplicable para un mortero, según la norma ASTM, para cada tipo de cemento

TABLA 2
PRINCIPALES APLICACIONES DEL CEMENTO

TIPO CEMENTO	APLICACIONES EN CONCRETOS Y MORTEROS
I	CONCRETOS DE USO GENERAL
I-AR	CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA INICIAL
MP-AR	CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA INICIAL CON MODERADA RESISTENCIA A LOS SULFATOS
MP	CONCRETOS Y MORTEROS DE USO GENERAL QUE NO DEMANDEN ALTA RESISTENCIA INICIAL
ALBANILERIA	NO SE RECOMIENDA PARA FABRICACION DE CONCRETOS DE USO ESTRUCTURAL, USO DE MORTEROS

Fuente: Instituto costarricense del cemento y concreto "tipos de cementos"

TABLA 3
REQUIRIMIENTOS FÍSICOS SEGÚN ASTM.

TIPO DE CEMENTO	PRUEBA ASTM	MP-RTCR	UG-RTCR	TIPO I -RTCR	TIPO I -RTCR/AR
SUPERFICIE ESPECIFICA	C 204	1	1	280	
FINURA PASANTE EN MALLA	C 430	1	1	1	1
CAMBIO DE LONGITUD	C 151	0.8	0.8	0.8	0.8
TIEMPO DE FRAGUADO	C 191				
INICIAL NO MENOR DEL MIN		45	45	45	45
INICIAL NO MAS DEL MIN		420	420	420	420
CONTENIDO DE AIRE EN EL VOLUMEN DEL MORTERO	C 185	12	12	12	12
RESISTENCIA A LA COMPRESION	C 109				
1 DIA					12
3 DIAS		13	10	10	24
7 DIAS		20	17	17	
28 DIAS		25	28	28	
CALOR DE HIDRATACION	C 186				
7 DIAS		290	250	250	
28 DIAS		330	290	290	

Fuente: normas ASTM.

2.1.2 Hidratación del Cemento

Los cementos fraguan y endurecen al ser mezclados con agua, debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua. La hidratación del cemento es una reacción altamente exotérmica.

Luego del proceso de sinterización que le da origen, los constituyentes básicos del cemento son: silicato tricálcico C3S, silicato dicálcico C2S, aluminato tricálcico C3A y Ferroaluminato tetracálcico C4FA. Estos minerales, en contacto con el agua reaccionan dando los siguientes productos hidratados: los silicatos cálcicos se transforman básicamente en silicatos cálcicos hidratados CSH e hidróxido de calcio CH (4), el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico forman Aft (etringita) y Afm (monosulfato).

Durante el proceso de fraguado se produce un cambio de un sistema de copos hacia un sistema de esqueleto viscoelástico capaz de resistir tensiones. Los cuatro componentes principales del cemento se diferencian no solamente por el calor liberado en el proceso de hidratación, sino también por la velocidad a la cual se produce la reacción de hidratación, siendo diferente en cada uno de ellos pero no del todo desacoplado.

Se han realizado intentos para modelar el proceso de hidratación teniendo en cuenta las interacciones que ocurren entre los diferentes compuestos, pero aún no se han logrado resultados cualitativamente razonables. (5)

2.1.3 El Agua en la hidratación del cemento.

Durante el proceso de hidratación el agua puede encontrarse en diferentes estados:

Agua químicamente ligada: es aquella que forma parte del sólido generado o sea la que se combina con el cemento para producir una nueva fase diferente del agua y del cemento.

Agua físicamente ligada: es aquella que se encuentra adsorbida a la superficie de la partícula de gel y ocupa los poros del gel.

Agua libre: resto de agua que se encuentra en la pasta saturada y ocupa los poros capilares.

A partir de estas definiciones existe otra división arbitraria sobre el agua en la mezcla. A los fines prácticos se pueden considerar dos categorías:

Agua evaporable: Es el agua que puede ser extraída de la mezcla a una cierta presión de vapor. Está constituida por el agua físicamente ligada y el agua libre.

Agua no evaporable: Es el agua que no puede ser extraída de la mezcla a una cierta Presión de vapor. Se trata en general del agua químicamente ligada y su cantidad aumenta a medida que avanza la reacción de hidratación

2.1.4 Microestructura Durante El Proceso De Hidratación

Fase inicial

A los 10 min de mezclados el cemento con el agua ya puede observarse, con la ayuda de un microscopio electrónico, la aparición de geles alrededor de los granos de cemento no hidratado, junto con pequeñas láminas delgadas de silicato de calcio hidratado CSH. Tal como se ilustra en la figura 2.1 (a).

Fase Intermedia.

Esta fase se caracteriza por la hidratación del 30-40% del silicato tricálcico C3S y por el comienzo de la fase de endurecimiento de la pasta. Entre las 3-5 hr. se puede verificar la aparición de una cierta cohesión en la pasta. Los productos que se forman fuera de la frontera original del grano se denominan productos externos, mientras que los que se forman dentro de la misma son los denominados productos internos. Durante las 5-10 hr. Iniciales, la reacción del silicato tricálcico C3S genera productos externos de SCH que forman una cubierta sobre la red de bastoncillo de Aft que se ha generado. Tal como se ilustra en la figura 2.1 (b).

Fase Final.

A las 24 hr. de comenzada la reacción, el C3S sigue reaccionando y generando productos internos. A medida que los granos completamente hidratados se van superponiendo entre sí, la resistencia y el módulo de elasticidad de la pasta aumentan. En esta fase la mayoría de los granos pequeños del cemento ya han hidratado completamente. Después de 2 días el espacio ocupado originalmente por el agua es ocupado por los productos de la hidratación.

Los productos externos se vuelven fibrosos y más densos. En esta etapa se encuentran fibras de CSH de 1 mm de longitud con un diámetro de 0.01 mm. También se encuentran partículas de CSH en forma de láminas con tamaños del mismo orden de magnitud. El esqueleto básico se forma entre los 7 y los 28 días. Tal como se ilustra en la figura 2.1 (c)

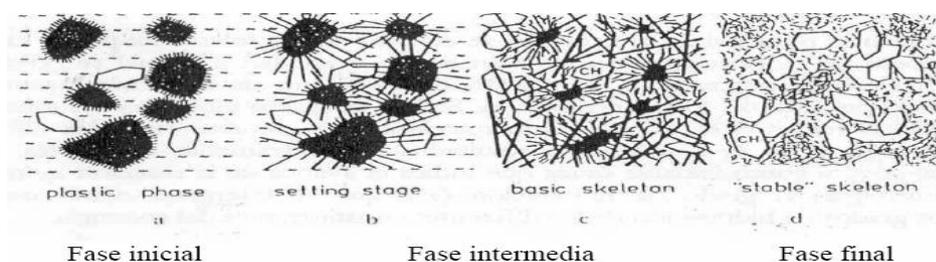


FIGURA 2.1 FORMACION DE LOS PRODUCTOS DE HIDRATACION

2.1.5 Influencia De La Temperatura De Curado En El Proceso De Hidratación.

La velocidad a la cual se desarrolla la resistencia a compresión de una pasta de cemento está en función de la velocidad con la que hidratan sus cuatro componentes fundamentales; En una pasta de cemento, a temperaturas normales de curado (10-25 °C), el porcentaje de alita que se hidrata a los 28 días es cercano al 100%. La belita, en cambio, es más lenta de reaccionar, y es la principal responsable de la hidratación una vez superados los 28 días. El aumento de temperatura tiene un efecto acelerador del proceso de hidratación de la alita, que es mas marcado que en el caso de la belita.

2.2 Definición de Puzolana.

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales compuesto principalmente por sílice amorfa, que si sola no tiene muchas propiedades hidráulicas, pero si se las descomponen en pequeñas partículas y en presencia de humedad este reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, formando un nuevo producto con propiedades aglomerantes.(6)

2.2.1 Tipos de Puzolana

Existen dos tipos de puzolana, las puzolanas artificiales y puzolanas naturales.

❖ **Puzolanas Artificiales** Las puzolanas artificiales son subproductos industriales y materiales tratados térmicamente, a continuación se describe las siguientes.

Cenizas Volcánicas (fly ash): Subproducto de las centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible. Polvo fino constituido esencialmente de partículas esféricas. (7)

Arcillas Activadas Térmicamente: Las arcillas naturales no presentan actividad puzolànica a menos que la estructura cristalina sea destruida mediante un tratamiento térmico a temperatura del orden 600 – 900° C.

Microsilice: Subproducto de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arcos eléctrico para la producción de silicio de aleaciones de ferrosilicio. Una vez que este material está extremadamente fino, es colectado por filtración de los gases de escape del horno, filtros de mangas.

Cenizas De Cáscara De Arroz: Producida por la calcinación controlada de la cáscara de arroz. Esta consiste básicamente de sílice amorfa >90 %, y posee gran actividad puzolànica.

❖ **Puzolanas Naturales:** Las puzolanas naturales son consideradas como material de naturaleza silíceo. A continuación algunos tipos de esta puzolana.

Cenizas Volcánicas: Estas se forman por erupción de carácter explosivo, en pequeñas partículas templadas a temperaturas ambiente, originando la formación del estado vítreo.

Toba Volcánica o Zeolita: Producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación.

Diatomitas: Puzolanas de origen orgánicos. Depósito de capas silíceas de microscópica algas acuáticas unicelulares.

2.3 Definición de Zeolita.

Las zeolitas pertenecen a la familia de los tectosilicatos y son aluminosilicatos cristalinos, con elementos de los grupos I y II como cationes. Consisten en un armazón de tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$ conectados el uno al otro en las esquinas por medio de átomos de oxígeno. (8)

La estructura presenta canales y cavidades de dimensiones moleculares en las cuales se encuentran los cationes de compensación, moléculas de agua u otros adsorbatos y sales. Este tipo de estructura microscópica hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande, entre 500 y 1000 m^2/g , con relación a su superficie externa.

Sin embargo esta superficie es poco accesible para los contaminantes de tipo macromolecular. Como se puede apreciar en la figura 2.2

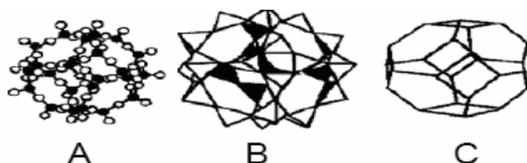


FIGURA 2.2 ESTRUCTURA TÍPICA DE LAS ZEOLITAS. (a) ATÓMICAS, (b) TETRAÉDRICA, (c) CRISTALINA

La microporosidad de estos sólidos es abierta y la estructura permite la transferencia de materia entre el espacio intracristalino y el medio que lo rodea. Esta transferencia está limitada por el diámetro de los poros de la zeolita, ya que sólo podrán ingresar o salir del espacio intracristalino aquellas moléculas cuyas dimensiones sean inferiores a un cierto valor, el cual varía de una zeolita a otra. A continuación la tabla 4, ilustró el valor límite del diámetro del poro de la zeolita, para obtener la mayor transferencia de materia entre el espacio intracristalino y el medio que lo rodea. Deberá ser no mayor a 12 Å.

TABLA 4

CARACTERÍSTICA GENERALES DE LAS ZEOLITAS.

PROPIEDADES	VALOR
DIAMETROS DEL PORO	2 a 12 Å
DIAMETROS DE LAS CAVIDADES	6 a 12 Å
SUPERFICIE INTERNA	500-1000 m ² /seg

Fuente: Escuela Superior Politécnica del Ejercito
"temas del concreto armado"

2.3.1 Clasificación de la Zeolita.

A continuación la tabla 5, ilustró la clasificación de la zeolita, considerando el número de átomos de oxígeno que forman los anillos o poros por los cuales se penetra al espacio intracrystalino.

TABLA 5

CLASIFICACIÓN DE LAS ZEOLITAS RESPECTO AL TAMAÑO DE LOS POROS

Zeolita	Átomos de O que forman la abertura	Diámetro de poro θ (Å)	Ejemplos
Poros extragrandes	18	$\theta > 9$	MCM-9, VPI-5
Poros grandes	12	$6 < \theta < 9$	Y, β , Ω
Poros medianos	10	$5 < \theta < 6$	ZSM-5, ZSM-11
Poros pequeños	8	$3 < \theta < 5$	Erionita, A

Fuente: Instituto nacional de investigaciones nucleares
"zeolita y características y propiedades"

2.3.2 Propiedades de La Zeolita.

Las principales propiedades de la zeolita se detallan a continuación:

- ❖ Intercambio iónico y selectividad.
- ❖ Difusividad aparente.
- ❖ Capacidad de intercambio catiónico.

A continuación las definiciones respectivas de dichas propiedades.

Intercambio Iónico y Selectividad: El intercambio iónico es una de las propiedades más importantes de las zeolitas debido a que por un lado se pueden llevar a cabo modificaciones de las zeolitas, para cambiar sus propiedades superficiales (afinidad por compuestos orgánicos) y por otro lado, esta propiedad de intercambio iónico es útil en más de un proceso industrial, en la agricultura, en la acuicultura y en usos ambientales.

El comportamiento del intercambio iónico en una zeolita depende de:

- ❖ La topología de la red.
- ❖ El tamaño del ion y su carga.
- ❖ La densidad de carga de la zeolita.

El comportamiento del intercambio iónico en las zeolitas depende de varios factores que determinan la selectividad, siendo algunos de ellos:

- ❖ Naturaleza de los cationes: tamaño, carga iónica, forma.
- ❖ Temperatura.
- ❖ Concentración de los cationes en solución.

Capacidad de Intercambio Catiónico: El cociente Si/Al determina la capacidad total de intercambio (meq/g) en una zeolita y se determina fácilmente contando el número de átomos de aluminio en la celda unidad (N^{Al}) según la ecuación $C = (N^{Al} / N_{AV}) / \rho Vc$. En donde N_{AV} es el número de Avogadro, ρ es la densidad de la zeolita y Vc es el volumen de la celda unitaria. Por lo tanto la capacidad de intercambio iónico esperada para las zeolitas naturales (CIIE) está en función de la densidad de carga de la estructura aniónica de la zeolita, es decir, del grado de sustitución del Al^{3+} por el Si^{4+} en la red

cristalina. Entre mayor es la sustitución, mayor será la cantidad de cationes necesaria para mantener la electro neutralidad y por lo tanto se tendrá una alta CIICE. A continuación tabla 6, ilustrará los diferentes CIIE para varias zeolitas naturales, donde la zeolita natural Analcima tiene la mayor relación (4,5 meq / g). Por lo que contiene, una mayor cantidad de cationes para poder mantener la electro neutralidad.

TABLA 6

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO.

Nombre de la zeolita natural	CIIE (meq/g)
Analcima	4,5
Chabacita	3,9
Clinoptilolita	2,2
Erlonita	2,8
Faujasita	3,6
Ferrenita	2,3
Heulandita	3,2
Laumontita	4,3

Fuente: Escuela Superior Politécnica del Ejercito "temas del concreto armado"

2.3.3 Aplicaciones Industriales de la Zeolita.

Agricultura: es utilizado para el tratamiento del suelo gracias a sus propiedades de intercambio iónico y retención de agua. Al aumentar la capacidad del intercambio iónico este mejorar las propiedades para retener el nitrógeno del suelo.

Construcción: la zeolita es utilizado para la producción de cemento puzolánicos.

Absorción / Desorción De Gases y Agua: Aprovechando su capacidad de absorción, debido a su afinidad con el agua, este es empleado en sistema donde se requiera el control de niveles de humedad.

Control De Malos Olores: Es aquí donde se emplea unas de la características de la zeolita como es; el intercambio iónico y la selectividad con el amoniaco. Por lo que se utiliza en fabricación de plantillas de zapatos.

2.4 Modelación matemática, respecto a la adición de aditivos, en el Cemento de alto rendimiento.

El módulo de elasticidad de un material es una propiedad importante para el modelamiento de su conducta constitutiva y para su debida utilización en diversas aplicaciones estructurales (9).

Comparación con las ecuaciones código ACI.

El módulo de elasticidad de los resultados de la prueba se compara con las ecuaciones de predicción de ACI 318-02 y ACI 363 para evaluar la exactitud de estas ecuaciones en predecir los valores de módulo cuando se añadió puzolana en el hormigón y cuando los métodos de curación se cambian. (10)

La ecuación ACI 318-02 para la predicción de el módulo de elasticidad del hormigón a los 28 días de prueba, después de haber una media unidad de w_c es la densidad del hormigón en kg/m^3 y f'_c , es la resistencia a la compresión del cilindro a los 28 días en MPa, en función de su resistencia a la compresión se da por:

$$E_c = 0.0427(w_c)^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad \text{for } f'_c \leq 42 \text{ MPa}$$

Fuente: Normas ACI 318

La ecuación de predicción ACI 363 de alta resistencia, viene dado por:

$$E_c = (0.0297 \sqrt{f'_c} + 0.0617) (w_c)^{1.5}$$

Fuente: Norma ACI 363

Mediante la figura 2.3 (d), permitió observar que la ecuación ACI 363 tiene una mejor predicción de los valores de módulo, que la ecuación proveniente de la ACI 318-02. La mejor curva que se ajusta para estos datos es la efectuada a partir de la ecuación ACI 363. Este gráfico muestra que la ecuación ACI 363 puede ser utilizada para predecir valores para módulo de elasticidad para HPC con los porcentajes de las cenizas volantes y humo de sílice. Sin embargo, una forma más simple de similar a la ecuación ACI 318-02, es la ecuación propuesta por Nassif. (2004), permitiendo analizar HPC, cuando se le agrega materiales puzolánicos.

$$E_c = 0.036(w_c)^{1.5} \sqrt{f'_c}$$

Fuente: Norma ACI 318.

Mediante la figura 2.3 (a), permitió observar que cuando se ha agregado SF (silica fume), la ecuación ACI 363 es mejor que la ACI 318-02, mientras que en la figura 2.3 (b) este último fue mejor que la anterior. También se puede concluir a partir de la figura 2.3 (c), que para grandes cantidades de materiales puzolánicos, las ecuaciones ACI 363 y ACI 318-02, no pudieron predecir con precisión el módulo de elasticidad.

Resultados de la comparación de las ecuaciones ACI 363- 318.

La ecuación ACI 363 parece proporcionar una buena predicción del módulo de elasticidad de HPC utilizando materiales puzolánicos, para grandes cantidades de cenizas volantes, la predicción no es exacta, y que tiende a subestimar el módulo de elasticidad. Además, para las mezclas con una combinación de SF(sílice fume) y FA (fly ash), la ecuación ACI 363 sobrestima el módulo de elasticidad valores. (11)

2.5 Otras investigaciones relacionadas.

Efectos de la adición de Metacaolín en el Cemento Pórtland.

Este trabajo investigativo, fue realizado en la Universidad Nacional de Colombia- Medellín, Grupo del Cemento y Materiales de Construcción, en el año 2006 por el Ingeniero Juan Camilo Restrepo Gutiérrez (12).

Se presenta una amplia revisión de los efectos de la adición de Metacaolín (MK) en la fabricación y utilización del cemento Pórtland, considerando el MK como un producto que tiene efectos puzolánicos.

Entre las propiedades que atribuyen a los cementos con adiciones, se encuentra la referente a su cualidad puzolánica, que consiste en una serie de reacciones ocurridas durante la etapa de fraguado y endurecimiento. Además, contribuyeron al aumento de las resistencias mecánicas y de la durabilidad, más allá de las que se alcanzarían sin la adición de puzolanas.

Efecto Puzolánico del Metacaolín (MK)

Las diferentes investigaciones realizadas con MK permiten establecer un panorama sobre el desarrollo de estos estudios, que dan cuenta del interés de los investigadores en este material.

La actividad puzolánica del Metacaolín se evidencia cuando se obtiene un material con una serie de ventajas sobre los cementos Pórtland sin adiciones, tales como:

- ❖ Incremento de las propiedades mecánicas especialmente a edades tempranas.
- ❖ Incremento de la resistencia al ataque de sulfatos.
- ❖ Incremento del refinamiento de poros.
- ❖ Disminución en la evolución del calor de hidratación.

Mejoramientos de las Propiedades Mecánicas.

- ❖ Los resultados de la investigación establecen que al realizar reemplazos de MK por cemento con porcentajes del 10%, se logran los máximos valores de resistencias a compresión. Valores superiores al 10% no muestran aumentos significativos.

Las máximas resistencias relativas se dieron a los 14 días, lo que les permitió establecer que la actividad puzolànica del MK alcanza su punto máximo de reacción en este período de tiempo.

- ❖ Cuando se realizan reemplazos alrededor del 30% de la masa del cemento, el Metacaolín puede actuar como un acelerante del fraguado.

Esta investigación concluye que el Metacaolín es una puzolana alumínica, que facilitó el ataque por sulfatos a los cementos, acortando su durabilidad aún cuando estos cementos sean de elevada resistencia a este medio agresivo; pero por otro lado, la dosificación adecuada del yeso de 15.05% se definió como el porcentaje más óptimo, elevando las resistencias mecánicas a la compresión si se curan con agua durante el tiempo necesario, a su vez estos cementos presentaron retracciones cuando el porcentaje de SO_3 es menor al 7% ya que actuarón como retardador de fraguado del C_3S del cemento permitiendo una mayor hidratación.

El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánicos.

Este trabajo investigativo, se realizo como tesis en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en el año 2004 por la Ingeniera Civil Paola Alexandra Robalino Espinoza.(13)

La presente tuvo como finalidad, demostrar las ventajas que ofrece este mineral Puzolánico natural, dentro del medio de la construcción, para la producción de cemento Puzolánicos.

Este trabajo se realizó bajo la Norma ASTM C618 – 01 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Puzzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.

Al finalizar el estudio unos de los principales logro, fue la comprobación del índice de actividad puzolánica, ya que el reemplazo del 20% del cemento Portland, cumpliendo con las normas ASTM C618-03, a los 7 y 28 días de curado, siendo estas curadas en agua. Donde las muestras analizadas sobrepasaron el índice de 75%, siendo este el valor mínimo, propuesto por la norma, para el uso de la puzolana natural en el hormigón.

Con el uso del cemento puzolánico, el constructor tendrá varias ventajas, tales como una mejor manejabilidad de las mezclas frescas, adicionalmente una mayor resistencia a la compresión después de los 28 días.

Desde el punto de vista de la explotación de la materia prima para la elaboración de cemento; Se propone una nueva alternativa, para las empresas principalmente ubicadas en Guayaquil. Existiendo Zeolita natural, en el Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía a la Perimetral. Por lo que no tendrían que movilizarse a la provincia del Chimborazo; Lugar que tradicionalmente provee ceniza volcánica; siendo la materia prima, para las empresas cementeras ubicadas en Guayaquil en la actualidad.

Efectos de Materiales Puzolánicos en el Cemento de Alto Rendimiento.

Este trabajo investigativo, fue realizado en el Departamento Civil, de la universidad Estatal, New Jersey, en el año 1998 por los Ing. Hani H. Nassif, Husam Najm (14).

El objetivo de el estudio fue evaluar los efectos de la puzolana como la FA (cenizas volantes), SF (humo de sílice), y GBFS (de granulación de escoria de alto horno) y el efecto de métodos de curación en el módulo de elasticidad de HPC y su variación con el tiempo. Una ecuación que relaciona la elástica módulo, E , y concreta la fuerza, se desarrolla sobre la base de la evaluación experimental. Por otra parte, una detallada comparación de esta ecuación con la ACI-318 y ACI-363.

Mediante las curva, obtenidas a partir de los datos experimentales con los diferentes materiales Puzolánicos, se puede realizar una comparación de las ecuaciones provenientes de la norma ACI 363 y ACI 318-02, respecto a la simulación del comportamiento de las propiedades mecánicas de la pasta de cemento.

- ❖ La adición de sílice de humo para HPC tuvo el efecto de reducción de la tasa de aumento de los módulos de elasticidad respecto a la edad. El motivo de esta reducción fue debido a que la alta tasa de hidratación de hormigón que contienen sílice de humo en las primeras edades. Por lo tanto el módulo de elasticidad para edades tempranas, es más alta con una gradual disminuir con el tiempo.

- ❖ La tasa de aumento del módulo de elasticidad fue inferior a la de resistencia a la compresión.

- ❖ Cuando se ha añadido SF (sílice fume), la ecuación ACI 363 es mejor que la ACI 318-02, mientras que en la figura 2.3 (b) este último es mejor que la anterior. Es observó también que en la figura 2.3(c), cuando se utilice grandes cantidades de materiales puzolánicos las ecuaciones, ACI 363 y ACI 318-02, no pueden predecir con precisión la elasticidad módulo.

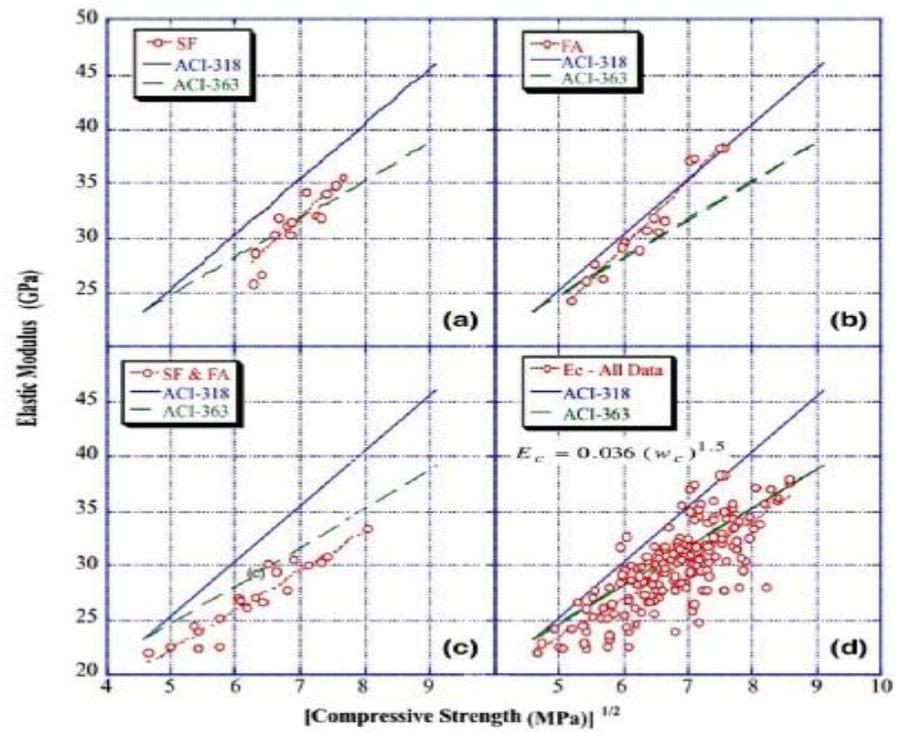


FIGURA 2.3 COMPARACIÓN DE LAS ECUACIONES ACI 363- 318

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. Diseño Experimental.

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se verán afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia podrá estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta.

Las técnicas de diseño de experimentos, se sustentan básicamente en una buena planificación, por lo que su objetivo fundamental es estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, brindando una alta eficiencia al momento de proporcionar resultados, siendo estos muy acordes a la realidad; con un número de réplicas muy moderadas, disminuyendo así, el tiempo y costo de operación para un determinado estudio.

Nuestro diseño experimental, consta de las siguientes etapas:

1. Planeación del experimento

- ❖ Definición del problema
- ❖ Definición del objetivo
- ❖ Selección del o los factores que interesa evaluar
- ❖ Definición de la variable respuesta
- ❖ Planteamiento de la(s) hipótesis que se desea probar.
- ❖ Determinación del diseño experimental adecuado

2. Ejecución del experimento

- ❖ Se deben realizar las asignaciones de tratamientos de acuerdo a las restricciones particulares de cada diseño.

3. Procesamiento y análisis de resultados.

- ❖ Contrastar las hipótesis planteadas de acuerdo con un nivel de significancia predeterminado.

3.1.1 Planeación del experimento.

En esta etapa se establecieron, los objetivos, los factores, las funciones de respuestas, planteamiento de las hipótesis, y por último la determinación de un modelo, que pueda definir, los vínculos existentes entre los factores y las respuestas. Para el estudio la función de respuesta que vamos a definir fue, la resistencia a la compresión respecto al tiempo de ensayo. Respecto a los factores principales de la experimentación, para el estudio fue, el tiempo de curado, y sus respectivos niveles que fueron (7, 14 21, 28) días respectivamente. Las variables independientes que se definieron fue el, porcentaje de aditivo, y las condiciones de curado de las muestras (para nuestro estudio fue; al aire). Las variables cuyos valores constantes fueron la relación agua/mezcla y la granulometría del material.

Respecto a la hipótesis nula, tomada para nuestro estudio fue: que la media de los datos de resistencia a la compresión de la

muestra de estudio (pasta de cemento compuesto por zeolita) es igual a la media de la muestra de control (pasta de cemento sin adición de zeolita).

Respecto a los ensayos de compresión de las muestras, se los realizaron, tomando como referencias la norma ASTM C109/C 109M (15), pero con ciertas modificaciones respecto a los días de ruptura de las mismas, ya que los días definidos por la norma son (1, 3, 7, 28), mientras que para nuestro estudio fueron (7, 14, 21, 28). Las pruebas se las llevaron a cabo en la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, mediante la máquina de ensayos universales, electromecánica, marca Soiltest, modelo Versa Teste, capacidad de carga máxima 300.000 Kg, se obtuvieron 3 datos. Para obtener las medias respectivas de cada uno de los niveles (7, 14, 21, 28) de los días. Cuyos valores sirvieron posteriormente, para graficar la variación de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo de curado de la pasta de cemento compuesto. A continuación la tabla 7, mostró la forma como se recolectaron los datos de resistencia a la compresión, para los diferentes tiempos de curado.

TABLA 7

FORMATO DE TOMA DE DATOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON RESPECTO AL TIEMPO DE CURADO.

	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	7 Días	14 Días	21 Días	28 Días
% zeolita	Dato 1	Dato 4	Dato 7	Dato 10
	Dato 2	Dato 5	Dato 8	Dato 11
	Dato 3	Dato 6	Dato 9	Dato 12

3.1.2 Ejecución de los experimentos.

La obtención de las probetas de pasta de cemento compuesto y sus respectivas pruebas, se efectuaron en el Laboratorio de Resistencia de los Materiales de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Tomando como referencia la norma ASTM C109/C 109M, pero con ciertas modificaciones, respecto a los pesos de los componentes que conforman la muestra de estudio. El procedimiento experimental de la fabricación de la probetas y sus respectivas pruebas se lo detalla en la siguiente sección 3.2." de la presente tesis.

3.1.3 Procesamiento y análisis de los datos.

Para realizar el procesamiento de los datos es necesario primero agruparlos dentro de una matriz de los experimentos, denominada también “matriz de diseño”, la cual tiene como finalidad representar el conjunto de combinaciones de los niveles de los factores (7, 14, 21, 28) días de curado. En esta matriz, las filas corresponden a los experimentos a efectuarse y las columnas corresponden a las variables codificadas.

Una vez que generada la matriz de diseño, la cual adicionalmente sirvió para llevar un control constante de los datos obtenidos, ya que los valores de la resistencia de compresión para las muestras que fueron curadas en el mismo tiempo y con el mismo % de zeolita no estuvieron muy lejos una respuesta de la otra (de lo contrario se estarían realizando errores de operación dentro del experimento). A los valores de las réplicas de la resistencia a la compresión le obtuvimos la media correspondiente para cada uno de los días de curado (7, 14, 21, 28) días, cuyos valores de las medias sirvieron para poder graficar la variación de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo de curado de la pasta de cemento compuesto, las medias las encontraremos de la siguiente manera:

$$\bar{r}_j = \frac{\sum_{i=1}^3 r_i}{3}$$

Una vez que se obtuvieron todos estos valores, se procedió a graficar los valores de la resistencia a la compresión en función de los días de curado, para poder determinar el modelo que sigue la resistencia a la compresión de la pasta de cemento compuesto curada al aire y con el 10% de zeolita como aditivo.

El “modelo estadístico” que se obtuvo declaró la forma de distribución probabilística que tendría la resistencia a la compresión de las muestras, para especificar esta distribución es necesario primero relacionar la variable aleatoria (resistencia a la compresión de las muestras), a la variable independiente en el experimento (tiempo de curado).

Para determinar el modelo, que pueda relacionar la resistencia a la compresión de las muestras con el tiempo de curado, se utilizará el modelo de regresión, por lo que podría ser lineal o cuadrático.

Regresión lineal simple.

Sólo se maneja una variable independiente, por lo que sólo cuenta con dos parámetros.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

Donde ε_i es el error asociado a la medición del valor X_i y siguen los supuestos de modo que $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ (media cero, varianza constante e igual a un σ).

Regresión lineal múltiple.

Maneja varias variables independientes. Cuenta con varios parámetros.

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_{ip} + \varepsilon_i$$

Donde ε_i es el error asociado a la medición i del valor X_{ip} y siguen los supuestos de modo que $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ (media cero, varianza constante e igual a un σ).

Error experimental

Un error experimental es una desviación del valor medido de una magnitud física respecto al valor real de dicha magnitud.

En general los errores experimentales son ineludibles y dependen básicamente del procedimiento elegido y la tecnología disponible para realizar la medición.

Existen dos maneras de cuantificar el error de la medida:

Error absoluto, que corresponde a la diferencia entre el valor medido f_m y el valor real f_r .

$$e_{abs} = f_m - f_r$$

•

Error relativo, que corresponde a él cociente entre el error absoluto y el valor medido f_m y el valor real f_r .

$$e_{rel} = \frac{f_m - f_r}{f_r}$$

3.1.4 Análisis de los resultados estadísticos.

Una vez obtenidas las curvas de la regresión así como la función obtenida por el modelo de regresión, permitiendo relacionar las medias de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado se procedió a realizar el análisis de los resultados obtenidos. Estas curvas obtenidas estadísticamente, fueron ajustadas como él modelo matemático obtenido, mediante

análisis numéricos con el soporte de técnicas y fundamentos de elementos finitos y teoría de elasticidad. Obteniendo finalmente la estimación de un modelo matemático, quien permitió simular el comportamiento de una pasta de cemento compuesto, a diferentes porcentajes de zeolita, a diferentes días, mediante curado al aire.

3.2. Preparación y ensayo de las probetas.

Para la preparación y el ensayo de las probetas, se tomó como referencia, la norma C 109/C 109M – 02. Pero por efecto del estudio se realizó ciertas modificaciones. Tal como; en vez de utilizar morteros (Cemento + H₂O + arena), se lo realizó mediante una pasta de cemento compuesto (Cemento + H₂O + 10% zeolita).

Donde el agua que se utilizó fue "Potable", ya que las mayorías de las aplicaciones de la pasta de cemento, se lo realizan con este tipo agua; El principal factor de su aplicación, es la fácil obtención del mismo. Permitiendo, posteriormente obtener la simulación del comportamiento de la pasta de cemento compuesto. Más ajustados a la "realidad"

3.2.1 Procedimiento de Molienda.

Una vez recolectadas la piedras (zeolita), en la Provincia de Santa Elena, "Manglaralto", fueron llevadas al laboratorio de Resistencia de los Materiales de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Donde se efectuará el respectivo proceso de la molienda.

1. Mediante un combo, se procedió a reducir el tamaño de las piedras, para poder ingresar posteriormente a los respectivos molinos.
2. Para reducir la granulometría de las zeolita, se debió pasar primero por el molino de mandíbulas, teniendo en cuenta que se debe agregar el material poco a poco, para evitar trabamientos.

Figura. (3.1)



FIGURA. 3.1 MOLINO DE MANDÍBULAS

3. Se repitió el procedimiento sucesivamente, hasta que se pudo visualizar, que la granulometría era constante en todo el material.
4. Se pesó la zeolita y uso la cantidad requerida, en la sección 3.2.2 se detalla, los cálculos para la obtener la cantidad de zeolita requerida. Figura (3.2)



FIGURA 3.2. MATERIAL EN BALANZA ELECTRÓNICA

5. Se paso la zeolita por el molino de tornillo, quien tuvo como finalidad obtener una granulometría del material, alrededor de 300 μm . Figura (3.3)



FIGURA 3.3. MOLINO DE RODILLOS

6. se repitió el procedimiento, hasta que se pudo visualizar una granulometría constante en todo el material. Figura (3.4)



FIGURA 3.4. AGREGAR ZEOLITA AL MOLINO DE RODILLOS

7. Se cuartear la zeolita y luego se tomó una porción de 100 gr, para realizar el primer tamizado. Figura (3.5).



FIGURA 3.5. CUARTEO DE LA ZEOLITA

8. Se pasó los 100 gr por los tamizadores respectivos, tales como él # 14, 18, 40, 50 y fondo. Esto significa en el mismo orden: 1,4 cm, 40 mm, 425 μm , 300 μm . Figura (3.6)



FIGURA 3.6. TAMICES # 14, 18, 40, 50 Y FONDO

9. El segundo molino que se pasó la zeolita fue él de disco. Figura (3.7).



FIGURA 3.7. MOLINO DE DISCOS

10. Se repitió el procedimiento con todo el material. Figura (3.8)



FIGURA 3.8. AGREGANDO ZEOLITA AL MOLINO DE DISCOS

11. Se cuarteo la zeolita y luego se tomo una porción de 100 gr, para realizar el primer tamizado. Figura (3.9).



FIGURA 3.9. PRIMER CUARTEO DE LA ZEOLITA

12. Se peso los 100 gr de zeolita, por el tamizador, con tamices # 50, 100, 200, 325 y fondo. Esto es en el mismo orden los siguientes: 300 μm , 150 μm , 75 μm , 45 μm . figura (3.10)



FIGURA 3.10. TAMICES #50, 100, 200, 325 Y FONDO

13. Finalmente, se paso la zeolita por el molino de bolas, todo esté proceso duro 50 minutos. Figura [3.11]



FIGURA 3.11. MOLINO DE BOLAS.

14. Se cuarteo la zeolita.
15. Se tomo una porción del cuarteo y pesar 100 gramos.
16. Se peso los 100 gr de zeolita, por el tamizador, con tamices # 325 y fondo.
17. Para dar por concluido el proceso de la molienda. Se debió pasar al menos el 60% de la muestra al fondo, de lo contrario, se tuvo los pasos del 15 al 18. Obteniendo finalmente una granulometría de 45 μm . Figura (3.12)

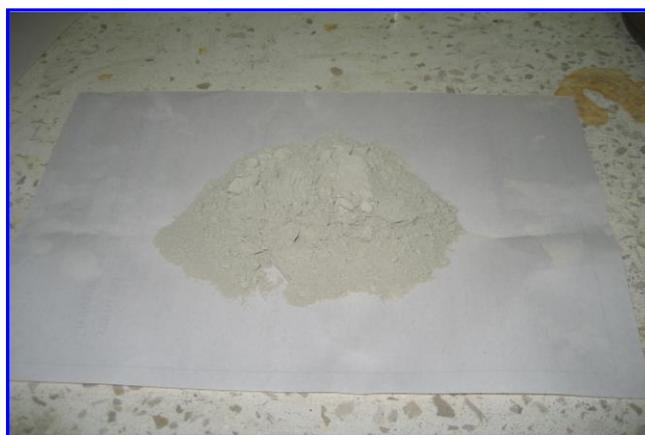


FIGURA 3.12. ZEOLITA CON GRANULOMETRIA FINAL

3.2.2 Composición de las muestras.

Como ya se definió al inicio, la muestra de estudio, será una pasta de cemento compuesto, cuya composición es básicamente (Cemento + H₂O + zeolita), siendo éste una de la variante más importantes de la norma ASTM C 109/C 109M – 02, ya que está se la realiza con morteros, cuyos componentes básicos son (Cemento + H₂O + Arena).

Temperatura y Humedad

La temperatura al contorno de la mezcla de la loza, molde y placas de la base estuvo a una temperatura aproximada de 23 ± 3 ° C. La temperatura de la mezcla agua, habitación húmeda y

el agua del tanque de almacenamiento estuvo a una temperatura aproximada de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

La humedad relativa del laboratorio no paso del 50%, la según los requisitos de las especificaciones C511.

A continuación la tabla 8, ilustró la cantidad de los compuestos, para la obtención de seis morteros según la norma ASTM C 109/C 109M – 02. Luego se realizó los ensayos de compresión.

TABLA 8
CANTIDADES DE COMPUESTOS PARA LA PRODUCCIÓN DE
MORTEROS " NORMA ASTM C 109/C 109M – 02".

Detalles	Cantidad.	
Número de morteros.	6	9
Cemento (g).	500	740
Arena (g).	1375	2035
Agua (mL).	242	359
Aire de arrastre.	230	340
Otros.	-	-

La modificación que se le efectuó a la norma consistió simplemente, en preparar una mezcla de 3000g para las 12 probetas, que a manera de ejemplo para la obtención de las cantidad de zeolita y cemento, tomaremos como referencia una pasta de cemento compuesta por el 10%; correspondiéndole la la cantidad de zeolita (300g), y el restante, le corresponde a la

cantidad de cemento (2700g) dentro de la mezcla, para la obtención de la pasta de cemento compuesto. De acuerdo a la norma la cantidad de agua a utilizar es 0.485 por la cantidad de cemento especificado en la norma, el porcentaje de agua que se utilizó para la muestra fue de 0.3 por la cantidad total en gramos de cemento más zeolita (3000g) por lo que la cantidad de agua fue 900mL.

Mientras que la tabla 9, especificó las cantidades de compuestos, necesarios para obtener doce muestras de pasta de cemento compuesto, para un porcentaje del 10% y 12,5% (convalidación) de zeolita, según las modificaciones antes mencionada, a la norma ASTM C 109/C 109M – 02.

TABLA 9
CANTIDAD DE COMPUESTO, PARA LA PRODUCCIÓN DE
PASTA DE CEMENTO COMPUESTO CON 10-12.5 % DE
ZEOLITA.

Detalles	Cantidad.	
	10%	12,50%
Numero de Muestras.	12	12
Cemento (g).	2700	2625
Zeolita (g).	300	375
Agua (mL).	900	900
Aire de arrastre.	-	-
Otros.	-	-

3.2.3 Preparación de los moldes.

- ❖ Se aplicó una capa delgada de agente de aceite en el interior del molde.
- ❖ se limpió el contorno interior del molde y la base para eliminar algún exceso de agente en liberación.
- ❖ Después de la pulverizada, se limpió con un paño limpio el exceso de lubricante. Figura 3.13



FIGURA 3.13. PREPARACION DE MOLDES

3.2.4 Preparación de las muestras.

Una vez definidos las cantidades de material a utilizar, para la obtención de la pasta de cemento compuesto, y las medidas de las cantidades requeridas de agua, cemento y zeolita. A continuación se procede a la preparación de la misma.

1. Se procedió a encerrar la balanza electrónica tomando en cuenta peso del recipiente. Figura (3.14)



FIGURA 3.14. BALANZA ELECTRÓNICA ENCERADA

2. Se peso en la balanza electrónica la zeolita en la cantidad indicada, es decir, 300 gr cuando contiene un 10% de zeolita en su composición y 375 gr para el 12,5% (convalidación). Figura (3.15)

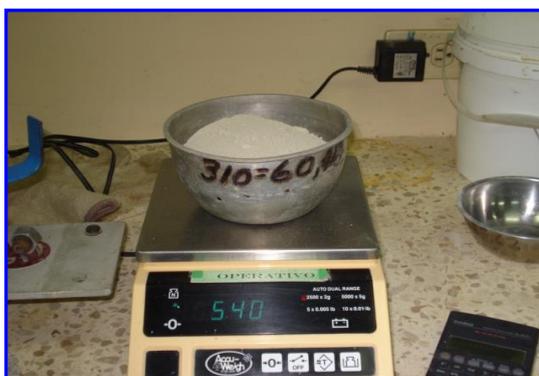


FIGURA 3.15. PESANDO MATERIALES

3. Se peso en la balanza electrónica el cemento en la cantidad indicada, es decir 2700 gr para el 10% de zeolita y 2625 gr para el 12,5%(convalidación)

4. Se peso en la balanza electrónica el agua en la cantidad indicada.
5. Antes de proceder a hacer la mezcla, se tomo datos de temperatura y humedad relativa del cuarto, esto es muy importante por ser factores externos que podrían afectar al en la toma de datos para el estudio.
6. Se colocó en la mezcladora el cemento y la zeolita por 10 minutos a velocidad baja para homogeneizar la mezcla. Figura (3.16)



FIGURA 3.16. HOMOGENIZANDO CEMENTO + ZEOLITA

7. Se apagó la mezcladora, poniéndola a velocidad uno, encenderla y agregar poco a poco el agua, una vez que se adicione todo, se mantuvo la mezcladora a esta misma velocidad por 45 segundos.

- Los moldes se llenaron en dos capas, luego de la primera capa apisonar. La presión de apisonado fue lo suficiente mayor para asegurar el correcto llenado del molde. Figura (3.17)



FIGURA 3.17. LLENANDO LOS MOLDES CON PASTA

- Se compacto las probetas, dando pequeños golpes en la base y lados de la misma, para que salgan las burbujas que se han



formado en el interior al adicionar la mezcla. Figura (3.18)

FIGURA 3.18 COMPACTANDO LAS PROBETAS

10. Se dejó reposar las probetas por unos minutos. Figura (3.19)

11. Se retiró el exceso de mezcla de las probetas, para mejorar el acabado de la cara superior de la misma.



FIGURA 3.19. REPOSADO DE PROBETAS

12. Se cubrió las probetas con plástico para evitar que pierdan agua en exceso y dejarlas por 24 horas. Figura (3.20)



FIGURA 3.20. PROBETAS CUBIERTAS CON PLASTICO

Procedimiento para desmolde

1. Se retiro el plástico colocado en los moldes el día anterior.
2. Se retiro el exceso de mezcla de la cara superior, para definir los bordes de la muestra.
3. Se abrió los moldes.
4. Se marco las caras superiores de las probetas.
5. Se marco las probetas bajo el código establecido.
6. Se peso cada una de las probetas.
7. Se expuso al medio de curado "aire". Figura (3.21)



FIGURA 3.21. DESMOLDE DE LAS MUESTRAS

3.2.6 Determinación del esfuerzo de compresión.

- ❖ En esta fase del estudio, se realizó otra modificación de la norma ASTM C 109/C 109M – 02, quien la hemos tomados como referencia, por lo que define los días y tolerancia para realizar las pruebas de compresión de la siguiente manera: 24h \pm 0.5h, 3días \pm 1h, 7días \pm 3h, 28días \pm 12h. Ya que para este estudio las pruebas se realizarón cada 7 días \pm 3h, 14 días \pm 6h, 21días \pm 9h, 28 días \pm 12h, por lo que para la obtención, de las nuevas tolerancias solo se efectúo una interpolación de los datos referenciales por la norma.

- ❖ Se limpio las superficies de las caras de los cubos, principalmente las que estaban en contacto con la maquina.

- ❖ Se encero la máquina, que no es más que colocar los medidores en 0,00kgf y 0,00 in, tanto en el dial de la carga como deformación. Figura (3.22)
- ❖ La proporción de carga aplicada fue relativa a la proporción del movimiento entre las placas superior e inferior de las caras de las muestras, estando esta carga en el rango de 900 y 1800N/s.



FIGURA 3.22 ENCERADA DE LOS DIALES

- ❖ se cogieron las medidas respectivas de carga, por cada deformación; (para el estudio, le corresponde una carga respectiva por cada 0,005 in), datos que posteriormente sirvieron para graficar la curva esfuerzo vs deformación. Figura (3.23)



FIGURA 3.23. LECTURA DE LAS CARGAS Y DEFORMACIONES

3.2.7 Aparatos y materiales utilizados para la preparación.

- ❖ **Balanza**, equipo electrónico SARTORIUS certificada ISO 9001 que nos permite medir en gramos la masa respectiva de los componentes de la pasta de cemento compuesto. Esta tuvo un rango de medición hasta 2000 gramos.

- ❖ **Vaso graduado**, de apropiada capacidad (preferencia lo suficientemente largo para medir el agua a utilizar en la mezcla), para entregar el volumen indicado a 20°C. La variación permisible debió ser de ± 2 ml. Estas graduaciones tenían subdivisiones de 5ml.

- ❖ **Paleta**, que tenía una hoja de acero de 100 a 150mm en longitud, y con filos rectos.

❖ **Los moldes de las muestras**, para los cubos de 50mm tenían un ajuste apropiado. Los moldes tenían 3 compartimientos para los cubos. Las partes de los moldes cuando se ensamblaron estaban muy juntos. Los moldes eran de metal duro. Para los moldes nuevos la dureza Rockwell del metal era de 55 HRB. Los lados de los moldes eran suficientemente rígidos para prevenir la propagación o las rompeduras. Las caras interiores del molde eran superficies planas y se ajustaban según tolerancias, que las pudo visualizar en la tabla 10.

TABLA 10

TOLERANCIA PERMITIDA EN LOS MOLDES

Parámetros	Moldes de los cubos.	
	Nuevos	Usados
Superficies de los lados	<0,025mm	<0,05mm
Dist. entre lados opuestos	50 ± 0,13mm	50 ± 0,50mm
Altura de los compartimientos	50 ^{+ 0,25mm} - 0,13mm	50 ^{+ 0,25mm} - 0,38mm

Fuente. Norma ASTM C 109. Enero 2008

❖ **Maquina de Pruebas de Compresión**, fue una máquina de ensayos universales, electromecánica, marca Soiltest, modelo Versa Teste, capacidad de carga máxima 300.000 Kg, con

suficiente abertura entre las caras superior e inferior para poder utilizar aparatos de verificación. Figura (3.24)



FIGURA 3.24. MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL

3.3 Simulación Computacional

En esta sección se realizó la simulación del comportamiento de la pasta de cemento compuesto por diferentes porcentajes de zeolita, mediante la obtención previa de un modelo matemático, donde el

principal criterio utilizado es la "teoría de la inelasticidad de los materiales".

Posteriormente se realizó la programación respectiva mediante, el programa Matlab, donde se obtuvo finalmente curvas tales como: Esfuerzo VS. Deformación. % zeolita VS Esfuerzo, entre otras, permitiendo analizar los efectos del porcentaje de zeolita, sobre la resistencia a la compresión de la pasta de cemento, a través del tiempo.

Mediante estos criterios, se pudo definir el comportamiento de la pasta de cemento compuesto, donde una parte se comparte de forma lineal, donde la definimos como **Región Elástica** y la otra que se comporta en forma no lineal, donde la definimos como **Región Plástica**.

La zona elástica, se la define, a partir de la teoría de la deformación, donde se definió como el gradiente simétrico del desplazamiento, y teniendo en cuenta que todo tensor tiene una parte simétrica y una parte antisimétrica.

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

Por lo que de una forma generalizada se definió la deformación en la zona elástica, mediante la siguiente relación.

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

Por lo consiguiente la parte no lineal, definida ya como la zona Elástica, se desarrollo mediante el Método de Newton Raphson. Siendo este un método con un esquema iterativo, definido siempre por un vector residual igual a cero. A continuación la expresión matemática.

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

Donde (μ^*) fue la solución y va a ser dependiente de las propiedades del material.

Desarrollo del Modelo Matemático

El siguiente algoritmo, mostró el comportamiento de un material, partiendo del modelo bilineal; las variables implicadas y el desarrollo del mismo se explica a continuación.

Datos:

$d\varepsilon$: la variación de la deformación.

ε : El rango de la deformación.

$\sigma(1)$: El esfuerzo inicial en el punto de origen. [MPa].

E: El módulo elástico o módulo de Young. [MPa].

H': El módulo plástico del material.

a, m: constantes del material.

λ : La magnitud de ε_p , el cual irá cambiando al entrar a la zona plástica.

$\Delta \lambda$: Variación de λ

$\lambda(1)$: El valor inicial de λ el cual es cero, puesto que se parte de la región elástica.

σ_{tr} : Predictor del esfuerzo elástico. [MPa].

A continuación, se definieron los valores iniciales para los datos del problema:

$$m=0.003;$$

$$a=0.3;$$

```

dE=0.000025;

E=[0:dE:0.025]';

O(1)=0;

E=20000e6;

n=size(epsilon);

ntot=n(1,1);

Oy(1)=10e6;

lambda(1)=0;

```

Desarrollo del Algoritmo para encontrar la Curva de Esfuerzo vs Deformación.

1. El lazo cerrado **for**, tiene como objetivo dentro del algoritmo, para encontrar los esfuerzos en la zona elástica..

for i=1:ntotal,

otr (i+1)=sigma(i)+E*de;

Ftr(i+1)=abs(otr(i+1))-Oy(i);

2. El lazo if, permite definir la condición $tr(i+1) > 0$, quien de cumplirse tiene como objetivo principal de saber que si estamos en la región plástica , quien es la región de mayor interés de nuestro estudio.

3. De darse la condición anteriormente mencionada, quien garantizó que se encuentra en la región plástica, entonces se procedió a realizar el algoritmo Newton-Raphson.

4. A continuación, se definen las variables dependientes de la función de la magnitud de la deformación plástica.

Para luego calcular $\Delta\lambda$

$[\Delta\lambda(i+1), H'(i+1)] = \text{NewtonRaphson}(F_{tr}(i+1), E, \sigma_y(1), a, m, \lambda(i))$.

5. Una vez encontrados los valores de $\Delta\lambda$, con la ecuación 1, se procedió a calcular el valor de λ , calculando los valores del esfuerzo para la región plástica.

$\lambda(i+1) = \Delta\lambda(i+1) + \lambda(i)$;

$\sigma(i+1) = \sigma_{tr}(i+1) - E * dL(i+1) * \text{sign}(\sigma_{tr}(i+1))$;

$\sigma_y(i+1) = \sigma_y(i) + H'(i+1) * \Delta\lambda(i+1)$;

6. Si la condición $F_{tr}(i+1) > 0$, propuesta por el lazo **if**, no se cumplió, entonces se concluye que el material se encuentra en la zona elástica, por lo que se cierra el lazo **if** y el lazo **for**.

else

```

λ(i+1)=0;

σ(i+1)=σtr(i+1);

σy(i+1)=σy(i);

end

end

```

7- Desarrollo del algoritmo de Newton-Raphson:

7.1 Primero se define la función, con sus respectivas variables dependiente y luego la tolerancia.

Function $[\Delta\lambda^*, H'n1]=\text{NewtonRaphson}(a,m,Ft,E,Gy0,ln)$

To=1e-10

7.2 Igualamos la tolerancia a $\Delta\lambda$, para que nunca sea igual a cero, teniendo como finalidad de evitar tener problema al momento de correr el programa, por lo que lo acercamos a un valor muy aproximado al cero, que es la "tolerancia".

$\Delta\lambda(1)=\text{tol};$

for k=1:150,

Al derivar $\delta\sigma/\delta\Delta\lambda$ se obtuvo la ecuación para hallar **modulo plástico H'**

$$H'(k) = a \cdot \sigma_0 \cdot \sqrt{m} \cdot (m - \Delta\lambda(k) - \lambda_n) / ((m + \Delta\lambda(k) + \lambda_n)^2 \cdot \sqrt{\Delta\lambda(k) + \lambda_n});$$

Una vez encontrado H' , se paso a calcular la función residual $r(k)$

$$r(k) = Ft - \Delta\lambda(k) \cdot (E + H'(k));$$

Donde **A** es el Jacobiano de mi función residual .

$$A(k) = -E - H'(k) + \Delta\lambda(k) \cdot \sigma_0 \cdot a \cdot \sqrt{m} \cdot (2 \cdot (m + \Delta\lambda(k) + \lambda_n) \cdot (\Delta\lambda(k) + \lambda_n) + 4 \cdot (m - \Delta\lambda(k) - \lambda_n) \cdot (\Delta\lambda(k) + \lambda_n) + (m + \Delta\lambda(k) + \lambda_n) \cdot (m - \Delta\lambda(k) - \lambda_n)) / (2 \cdot (m + \Delta\lambda(k) + \lambda_n)^3 \cdot (\Delta\lambda(k) + \lambda_n)^{1.5});$$

Para luego finalmente hallar el valor de $\Delta\lambda(k+1)$

$$\Delta\lambda(k+1) = \Delta\lambda(k) - r(k)/A(k);$$

Mediante la condición del lazo **if**, se pudo ver que si se cumple.

Calculando H_{n1}

$$\text{if } \text{norm}(r(k)) < \text{tol} \cdot \text{norm}(r(1))$$

$$\Delta\lambda^* = \Delta\lambda(k+1);$$

$$H_{n1} = a \cdot G_y \cdot \sqrt{m / (\Delta\lambda(k+1) + \lambda_n)} \cdot (m - \Delta\lambda(k+1) - \lambda_n) / (m + \lambda_n + \Delta\lambda(k+1))^2;$$

```
Break
```

```
end
```

7.3. Finalmente, se procedió a graficar la curva de esfuerzo deformación, con todos los datos previamente obtenidos. Figura (3.25)

```
esfuerzo=σ(1:ntotal);
```

```
plot (ε,esfuerzo).
```

8. Finalmente se determino el valor del esfuerzo último σ_u cuyo valor está dado por unidades "Pa".

```
σu=esfuerzo(1,1);
```

```
m=ntotal-1;
```

```
for n=1:m,
```

```
if esf(1,n+1) > σu
```

```
σu =esfuerzo(1,n+1);
```

```
end
```

```
σu=1.9200e+007
```



**FIGURA 3.25. CURVA GENERADA CON EL PROGRAMA EN
MATLAB (TEORICO)**

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

4.1. Ensayo de compresión.

Mediante la tabla 11, se muestran los datos experimentales obtenidos, de las pruebas de compresión a las muestras, que contienen un 10% de zeolita, ensayada en los días (7, 14, 21, 28), mediante curado "Aire".

Mientras que la tabla 12, muestra los datos experimentales obtenidos, a las muestras que contienen 12.5% de zeolita, ensayadas en los días (4, 11, 18, 25), mediante curado "Aire".

TABLA 11

**RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS MUESTRAS QUE
CONTIENE 10% DE ZEOLITA, A DIFERENTES DIAS DE CURADO**

VARIABLES DEPENDIENTES		RESULTADOS VARIABLES INDEPENDIENTES					
DÍAS	PORCENTAJE	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Deformación Máxima	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
7	10	52,332	62,132	0,03810	1716,9291	0,19	0,00191
7	10	55,860	57,820	0,03048	1999,2842	0,04	0,00156
7	10	49,980	56,252	0,02337	2459,6457	0,13	0,00100
14	10	50,960	53,900	0,02794	2006,2991	0,06	0,00107
14	10	55,860	57,820	0,03048	1999,2842	0,04	0,00156
14	10	56,840	59,780	0,03556	1721,3810	0,05	0,00100
21	10	38,220	40,180	0,03048	1367,9313	0,05	0,00111
21	10	43,120	44,100	0,02540	1886,2642	0,02	0,00202
21	10	41,356	45,080	0,02540	1809,0989	0,09	0,00100
28	10	58,800	62,720	0,03810	1653,5433	0,07	0,00100
28	10	63,700	65,660	0,04064	1671,9160	0,03	0,00137
28	10	68,600	71,540	0,04064	1800,5249	0,04	0,00100

TABLA 12

**RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS MUESTRAS QUE
CONTIENEN 12.5% ZEOLITA, A DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

VARIABLES DEPENDIENTES		RESULTADOS VARIABLES INDEPENDIENTES					
DÍAS	PORCENTAJE	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Deformación Máxima	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
4	12,5	53,900	57,820	0,0330	1768,3727	0,07	0,00100
4	12,5	49,000	52,920	0,0305	1753,7581	0,08	0,00100
4	12,5	51,548	56,840	0,0330	1844,9535	0,10	0,00221
11	12,5	49,787	59,567	0,0128	4900,3087	0,20	0,00100
11	12,5	30,939	54,232	0,0152	4060,2550	0,75	0,00188
11	12,5	45,431	58,677	0,0102	5962,0400	0,29	0,00100
18	12,5	44,100	45,080	0,0279	1736,2205	0,02	0,00198
18	12,5	42,140	44,492	0,0279	1659,0551	0,06	0,00112
18	12,5	41,356	44,688	0,0305	1480,1710	0,08	0,00100
25	12,5	35,868	40,180	0,0203	2017,3228	0,12	0,00100
25	12,5	42,140	45,668	0,0254	1843,3946	0,08	0,00100
25	12,5	37,828	41,748	0,0254	1654,7600	0,01	0,00100

En los apéndices A-D, se encuentran los datos obtenidos experimentales, para cada probeta compuesta por 10% de zeolita, para los días (7, 14, 21,28). Mientras que en el anexos E-H, contienen para él 12.5% de zeolita, para los días (4, 11, 18, 25).

4.2. Análisis estadísticos.

4.2.1 Normalización de los datos individual.

Para verificar que los datos experimentales son normales; se realizó un análisis, mediante el uso de la prueba de Shapiro y Wilk.

Por lo que se determinó como hipótesis nula y alternativa las siguientes:

- Ho: Los datos tienen una distribución normal
- H1: Los datos no tienen distribución normal.

Donde, se acepta la hipótesis nula, si la probabilidad de ser normales los datos es mayor, que nuestro nivel significancia $\alpha = 0.05$, obtenido a partir de una confiabilidad del 95%.

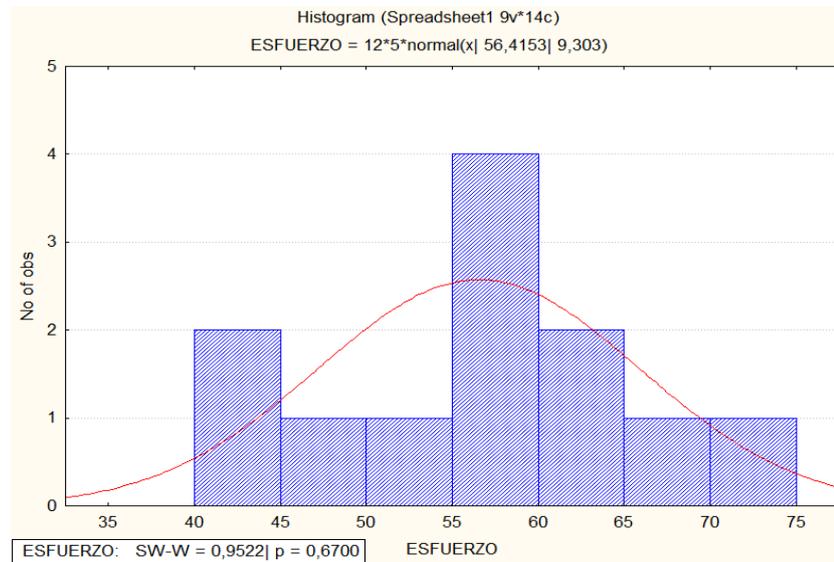
En la tabla 13, se ilustró datos del esfuerzo máximo, para los diferentes días de ruptura, con él 10% zeolita, los cuales son ingresados al programa STATISTIC para analizar la normalidad de los mismo.

TABLA 13.

DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO, PARA DIFERENTES DÍAS DE RUPTURA

DÍAS	ESFUERZO(MPa)
7	62,132
7	57,820
7	56,252
14	53,900
14	57,820
14	59,780
21	40,180
21	44,100
21	45,080
28	62,720
28	65,660
28	71,540

En la figura 4.1, se ilustró la distribución de los datos del esfuerzo máximo. Por lo tanto se acepta la hipótesis de normalidad; debido a que la probabilidad de ser normales los datos es de $p=0.67$, siendo esté mayor a nuestro nivel significancia $\alpha = 0.05$, obtenido a partir de una confiabilidad del 95%.



**FIGURA 4.1 HISTOGRAMA DE LOS DATOS, DEL
ESFUERZO MÁXIMO, 10% ZEOLITA.**

En la figura 4.2, se ilustró las suposiciones de la varianza homogénea de nuestra función de respuesta (esfuerzo máximo), para una pasta de cemento compuesto (10% zeolita).

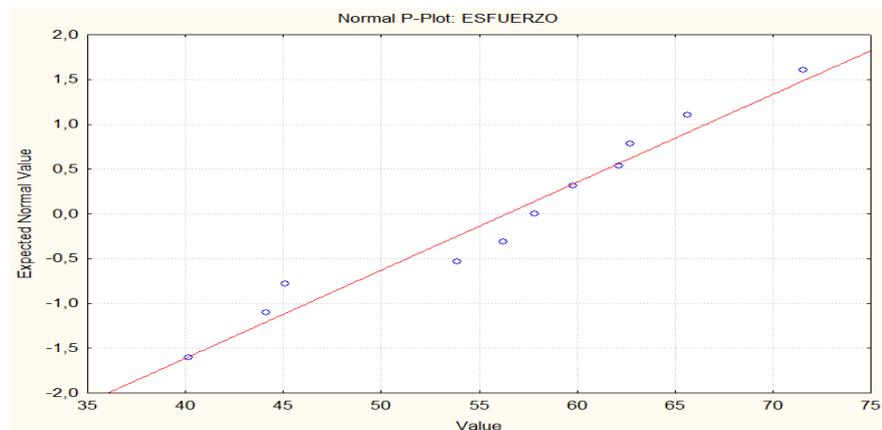


FIGURA 4.2 PROBABILIDAD NORMAL DE LOS RESIDUOS

La tabla 14, ilustró datos de esfuerzo último, para los diferentes días de ruptura, con él 12.5% zeolita, los cuales fueron ingresados al programa STATISTIC para analizar la normalidad de los mismo.

TABLA 14.

**DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO, PARA DIFERENTES DÍAS
ZEOLITA 12.5%**

DIAS	ESFUERZO
4	57,820
4	52,920
4	56,840
11	59,567
11	54,232
11	58,677
18	45,080
18	44,492
18	44,688
25	40,180
25	45,668
25	41,748

En la figura 4.3, se ilustró la distribución de los datos del esfuerzo máximo. Por lo tanto se acepto la hipótesis de normalidad, debido a que la probabilidad de ser normales los datos es de $p=0.09$, siendo esté mayor a nuestro nivel significancia $\alpha = 0.05$, obtenido a partir de una confiabilidad del 95%.

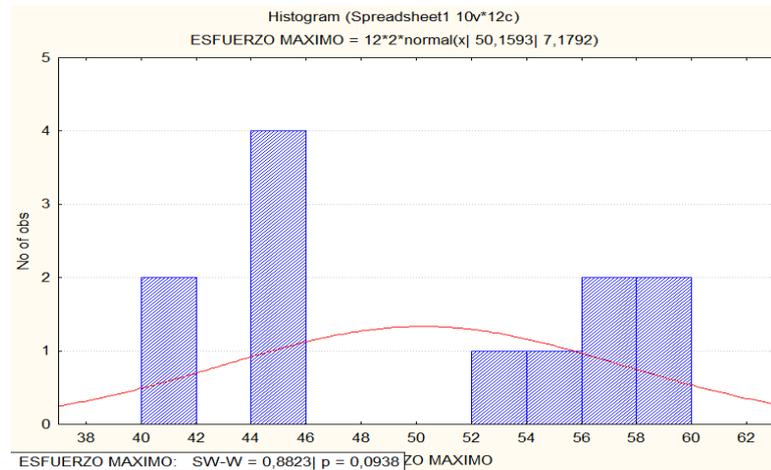


FIGURA 4.3 HISTOGRAMA DE LOS DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO, 12.5% ZEOLITA.

En la figura 4.4, se ilustró las suposiciones de la varianza homogénea de nuestra función de respuesta (esfuerzo máximo), para una pasta de cemento compuesto (12.5% zeolita).

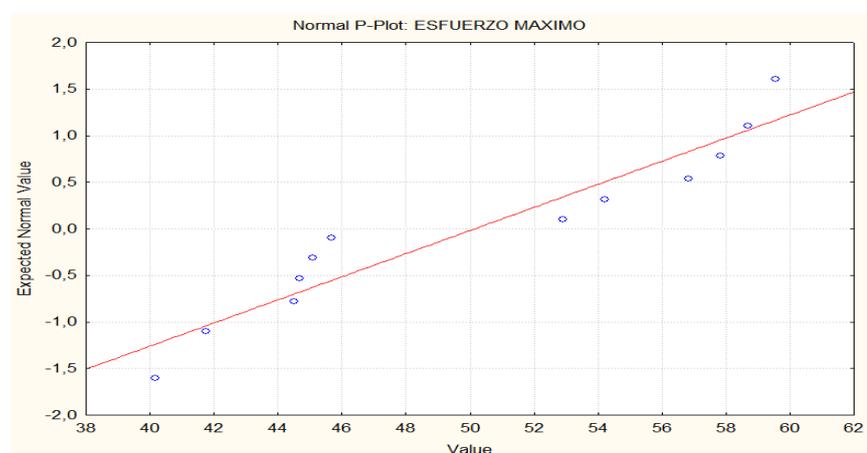


FIGURA 4.4 PROBABILIDAD NORMAL DE LOS RESIDUOS

4.2.2 Análisis de varianza.

Una vez verificado, la normalidad de los datos, se procedió a realizar un análisis de varianza simple (ANOVA - un solo factor), mediante el Software STATISTIC.

Este análisis sirvió para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos; cuando se varía el tiempo de curado, siendo estos los días (7, 14, 21, 28), cuando el contenido de zeolita es el 10%.

Por lo que se determinó como hipótesis nula y alternativa las siguientes:

- H_0 : Las medias de los tratamientos son iguales
- H_1 : Al menos dos de las medias no son iguales.

Donde la hipótesis nula H_0 , se rechaza, porque el nivel de significancia de F (calculado), fue mayor que el F (crítico)."

$$f > f_{\alpha[k-1, k(n-1)]}$$

En la tabla 15, se ilustró datos de esfuerzo máximo, para los diferentes días de ruptura, con él 10% zeolita, los cuales son ingresados al programa STATISTIC, para analizar si existe diferencia significativa entre las medias., mediante la tabla (ANOVA - un solo factor).

TABLA 15
DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO, PARA UN PORCENTAJE
DE ZEOLITA DE 10% A DIFERENTES DÍAS DE CURADO

VARIABLES INDEPENDIENTES		VARIABLE DEPENDIENTE
DIAS	PORCENTAJE	Esfuerzo Máximo (Mpa)
7	10	62,132
7	10	57,820
7	10	56,252
14	10	53,900
14	10	57,820
14	10	59,780
21	10	40,180
21	10	44,100
21	10	45,080
28	10	62,720
28	10	65,660
28	10	71,540

Se procedió a calcular el valor de F crítico, con los siguientes parámetros. $k=4$, $n=3$, donde la función $F_{\alpha[k-1,k(n-1)]}$, quedó definida con (3,8) grados de libertad, obteniendo que él valor de F crítico, igual a 4.07 según datos tabulados.

Según la tabla 16, se ilustró, que el valor de $F_{\text{calculado}}$ fue (25,46), siendo este valor mayor que el valor de $F_{\text{crítico}}$ (4.07). Por lo tanto se rechazó la hipótesis nula H_0 a favor de la hipótesis alterna H_1 . Es decir que existió una diferencia significativa entre a menos una las medias de las mezclas. Por lo tanto se pudo interpretar que conforme transcurra el tiempo al menos una de las muestras tenía una variación, en la resistencia máxima a la compresión.

TABLA 16

**TABLA DE ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ESFUERZO
MÁXIMO DE LA PASTA DE CEMENTO CON 10% DE
ZEOLITA**

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F	p
Intercepto	38192,28	1	38192,28	3385,390	0,000000
Tiempo de Curado (días)	861,76	3	287,25	25,462	0,000191
Error	90,25	8	11,28		

Según la tabla 17, se ilustró que los valores de la medias para la variable dependiente "esfuerzo máximo a la compresión"; estuvo dentro del rango definido por intervalo de confianza del 95%.

TABLA 17

**INTERVALOS DE CONFIANZA, PARA LA MEDIA DEL
ESFUERZO MÁXIMO, CON EL 10% ZEOLITA.**

Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)				N
	Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
			-95.00%	+95.00%	
7	58,73467	1,757940	51,17086	66,29847	3
14	57,16667	1,728558	49,72928	64,60405	3
21	43,12000	1,496975	36,67904	49,56096	3
28	66,64000	2,592836	55,48393	77,79607	3

Una vez analizado los valores mediante la tabla anova, se puede determinar, que existió diferencia significativa entre al menos una de medias de las mezclas. Por lo que el siguiente paso fue, saber cuáles son aquellos días, en existió estas variaciones de las medias del esfuerzo máximo.

Por lo que mediante las pruebas de prueba Post Hoc de Tukey, se analizó cuales son los días que existe alguna diferencia significativa entre las medias, obteniendo finalmente una tabla de probabilidades, que mediante análisis estadísticos permitió, tomar la decisión de aceptación o rechazo la hipótesis nula.

Mediante la tabla 18, se ilustró las probabilidades de que existiera una diferencia significativa entre las medias, obtenida a partir, de las pruebas de Post Hoc Tukey, donde se pudo interpretar que entre los días 7 y 21; 14 y 21; 14 y 28; 21 y 28, existió una diferencia significativa entre las medias del esfuerzo máximo. Debido a que la probabilidad entre ellas, era menor a $p=0,05$, obtenida a partir de un intervalo de confianza del 95%.

TABLA 18

**TABLA DE PROBABILIDADES, MEDIANTE PRUEBA POST
HOC DE TUKEY**

	Tiempo de Curado (días)	{1}	{2}	{3}	{4}
		58.733	57.168	43.129	66.640
1	7		0,937841	0,002195	0,078602
2	14	0,937841		0,004124	0,035244
3	21	0,002195	0,004124		0,000321
4	28	0,078602	0,035244	0,000321	

Mediante la figura 4.5, se puede comprobar la diferencia significativa existente entre los días 7 y 21; 14 y 21; 14 y 28; 21 y 28. Donde se aprecia que entre los días 7 y 14 se mantiene

constante la media de los esfuerzo máximo, mientras que entre los días 14 y 21 existió un descenso de la media del esfuerzo máximo, por lo contrario entre los días 21 y 28 existe un incremento.

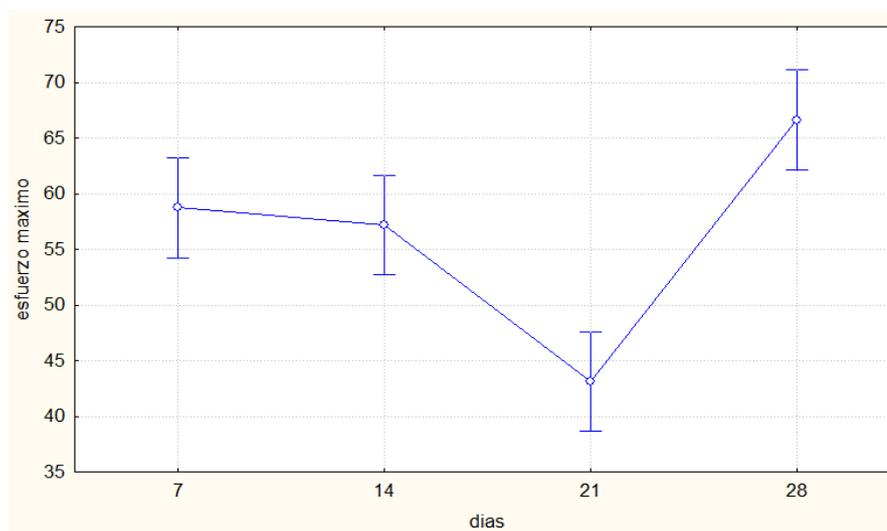


FIGURA 4.5. GRÁFICA ESFUERZO ÚLTIMO VS. DÍAS DE CURADO.

4.2.3 Análisis de Varianza con el uso de Contrastes.

En la sección anterior se observó que los mejores resultados se obtuvieron, con el tratamiento de 28 días, tal como lo indicó la Figura 4.5, el siguiente paso fue verificar mediante el uso comparaciones múltiples si existen diferencias significativas entre el tratamiento de 28 días con el resto de tratamientos.

Para la cual, se determinó como hipótesis nula; que la diferencia de las medias de los tratamientos a los días (7, 14, 21), respecto al tratamiento del día 28. Será igual a cero.

Por lo que se generó una tabla 19, que se ha denominada matriz de coeficientes de contrastes, la cual nos permitió realizar las comparaciones entre los tratamientos. Obteniendo posteriormente la tabla 20, denominada matriz de coeficientes estimados, de donde se escogió como el mejor tratamiento, el que tuvo una probabilidad menor a $p=0.05$, obtenida a partir de un intervalo de confianza del 95%.

Contraste 1:

$$H_0: \mu_1 - \mu_4 = 0; \quad H_1: \mu_1 - \mu_4 \neq 0$$

Contraste 2:

$$H_0: \mu_2 - \mu_4 = 0; \quad H_1: \mu_2 - \mu_4 \neq 0$$

Contraste 3:

$$H_0: \mu_3 - \mu_4 = 0; \quad H_1: \mu_3 - \mu_4 \neq 0$$

TABLA 19

MATRIZ COEFICIENTES DE LOS CONTRASTES

DIAS	CELL	CONTRASTE1	CONTRASTE2	CONTRASTE3
7	3	-1	0	0
14	3	0	-1	0
21	3	0	0	-1
28	3	1	1	1

TABLA 20

MATRIZ CONTRASTES ESTIMADOS

	Estimate	Std.Err	t	p	-95,00%	+95,00%
CONTRASTE 1	7,90533	2,742444	2,882587	0,020430	1,58125	14,22942
CONTRASTE 2	9,47333	2,742444	3,454340	0,008639	3,14925	15,79742
CONTRASTE 3	23,52000	2,742444	8,576292	0,000026	17,19591	29,84409

La tabla 20, ilustró que el mejor tratamiento se dió, para el día 28, debido que los coeficientes estimados para todos los contraste son diferentes de cero, rechazando la hipótesis nula y aceptando la hipótesis alterna.

4.2.4 Normalización de los datos “grupales”.

Para verificar que los datos experimentales son normales; se debe realizar un análisis, mediante el uso de la prueba de Shapiro y Wilk.

Para realizar este análisis tenemos las siguientes hipótesis:

- Ho: Los datos tienen una distribución normal
- H1: Los datos no tienen distribución normal.

Donde, se acepta la hipótesis nula, si la probabilidad de ser normales los datos es mayor, que nuestro nivel significancia $\alpha = 0.05$, obtenido a partir de una confiabilidad del 95%.

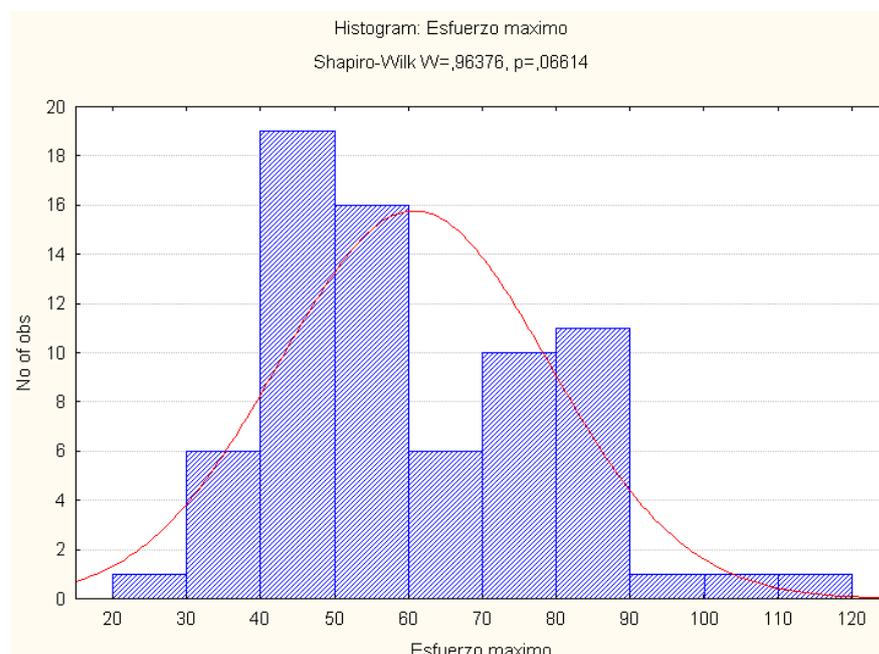
En la tabla 21, se ilustró datos del esfuerzo máximo, para los diferentes, días de ruptura y % zeolita, los cuales son ingresados al programa STATISTIC para analizar la normalidad de los mismos.

TABLA 21

**DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO PARA DIFERENTES % DE
ZEOLITA Y DIFERENTES DÍAS DE CURADO**

Tiempo de Curado (días)	Porcentaje de Zeolita (%)						
	0 Control	5	10	15	20	25	Tipo IV
7	80.015	46.060	62.132	49.980	49.000	33.320	499.570
7	80.015	59.780	57.820	57.820	47.040	45.668	452.441
7	82.682	57.820	56.252	52.920	44.100	47.236	452.441
14	87.128	64.012	53.900	59.780	44.100	41.160	508.996
14	88.017	66.679	57.820	55.860	49.000	45.080	499.570
14	88.017	67.568	59.780	47.040	55.860	50.960	490.144
21	63.700	66.679	40.180	48.020	51.940	42.140	452.441
21	63.308	66.679	44.100	51.940	48.020	43.120	405.311
21	66.640	76.459	45.080	51.940	54.880	49.980	424.163
28	77.348	67.568	62.720	59.780	67.568	54.880	405.311
28	76.459	68.457	65.660	47.040	68.457	45.080	424.163
28	77.348	73.792	71.540	54.880	65.790	50.960	429.819

En la figura 4.7, se ilustró la distribución de los datos del esfuerzo máximo. Por lo tanto se acepto la hipótesis de normalidad; debido a que la probabilidad de ser normales los datos es de $p=0.066$; Siendo esté mayor a nuestro nivel significancia $\alpha = 0.05$, obtenido a partir de una confiabilidad del 95%.



**FIGURA 4.7 HISTOGRAMA DE LOS DATOS, DEL
ESFUERZO MÁXIMO, PARA DIFERENTES PORCENTAJES
DE ZEOLITA.**

4.2.5 Análisis de Varianza "Grupal".

El análisis de varianza simple, se efectuó mediante la tabla (ANOVA – análisis factorial). Las hipótesis para el análisis fueron:

Ho: Las medias de los tratamientos son iguales

H1: Al menos dos de las medias no son iguales

Una vez que se verificó la normalidad de los datos, fueron ingresados en el programa STATISTIC, para analizar si existe diferencia significativa, entre al menos dos de las medias.

Finalmente se obtuvo la tabla 22, quien permitió determinar que existió una diferencia significativa entre al menos dos de las medias del esfuerzo máximo, para las muestras compuestas por diferentes porcentajes de zeolita, a diferentes días de curado, donde el medio de curado será "Aire".

TABLA 22

**ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL ESFUERZO MÁXIMO DE
LA PASTA DE CEMENTO, PARA DIFERENTES
PORCENTAJES Y DIAS.**

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

La tabla 23, ilustró los valores de la medias para la variable dependiente "esfuerzo máximo a la compresión"; estuvieron dentro del rango definidos por intervalo de confianza del 95%.

Una vez analizado los valores mediante la tabla anova (factorial), se pudo determinar la existencia de diferencia significativa entre al menos dos de medias de las mezclas. Por lo que el siguiente paso fue, saber cuáles son aquellos días y porcentajes, en la que existió estas variaciones de las medias del esfuerzo máximo.

Por lo que mediante las pruebas de prueba Post Hoc de Dunnett, se analizó cuales fueron los días y porcentajes, para la cual existió esa variación de esfuerzo. Respecto a la muestra compuesta por cemento Tipo I y Tipo IV.

Donde la prueba consistió en realizar las comparaciones respectivas del esfuerzo máximo a la compresión, obtenido a diferentes días y porcentajes, respecto a la muestra de control, quien en secciones anteriores la definió como aquella que no contiene % de zeolita. Y adicionalmente se realizaron comparaciones con el Cemento Tipo IV (comercial), donde la

hipótesis nula para nuestro estudio fue, que la media del esfuerzo máximo a diferentes días y porcentajes es menor que la media del control.

TABLA 23
ERROR ESTANDAR DE LA MEDIA DEL ESFUERZO
MÁXIMO A DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y
DÍAS.

% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)				N
		Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
				-95.00%	+95.00%	
0	7	8.090.410	2.464.735	7.594.841	8.585.978	3
0	14	8.772.019	2.464.735	8.276.451	9.267.587	3
0	21	6.454.933	2.464.735	5.959.365	6.950.502	3
0	28	7.705.152	2.464.735	7.209.584	8.200.720	3
5	7	5.455.333	2.464.735	4.959.765	5.950.902	3
5	14	6.608.650	2.464.735	6.113.081	7.104.218	3
5	21	6.993.907	2.464.735	6.498.339	7.489.475	3
5	28	6.993.907	2.464.735	6.498.339	7.489.475	3
10	7	5.873.467	2.464.735	5.377.898	6.369.035	3
10	14	5.716.667	2.464.735	5.221.098	6.212.235	3
10	21	4.312.000	2.464.735	3.816.432	4.807.568	3
10	28	6.664.000	2.464.735	6.168.432	7.159.568	3
15	7	5.357.333	2.464.735	4.861.765	5.852.902	3
15	14	5.422.667	2.464.735	4.927.098	5.918.235	3
15	21	5.063.333	2.464.735	4.567.765	5.558.902	3
15	28	5.390.000	2.464.735	4.894.432	5.885.568	3
20	7	4.671.333	2.464.735	4.175.765	5.166.902	3
20	14	4.965.333	2.464.735	4.469.765	5.460.902	3
20	21	5.161.333	2.464.735	4.665.765	5.656.902	3
20	28	6.727.190	2.464.735	6.231.622	7.222.759	3
25	7	4.207.467	2.464.735	3.711.898	4.703.035	3
25	14	4.573.333	2.464.735	4.077.765	5.068.902	3
25	21	4.508.000	2.464.735	4.012.432	5.003.568	3
25	28	5.030.667	2.464.735	4.535.098	5.526.235	3
Tipo IV	7	4.681.504	272.102	1.570.980	4.005.566	3
Tipo IV	14	4.995.698	0.94258	0.544201	4.761.547	3
Tipo IV	21	4.273.050	237.212	1.369.544	3.683.783	3
Tipo IV	28	4.197.643	128.321	0.740861	3.878.877	3

Mediante la tabla 24, se ilustró las probabilidades para aceptación o rechazo de la hipótesis nula, planteada previamente por el estudio, datos obtenidos mediante la prueba de Post Hoc Dunnett, donde se pudo demostrar, que existió alguna diferencia significativa con la media del esfuerzo máximo del control. Siendo los siguientes días con su respectivos %; día 21 con un porcentaje del 5% y el día 28 con un porcentaje del 5%. Debido a que las probabilidades de tener una media menor a la del control, son mayores a $p=0,05$, obtenida a partir de un intervalo de confianza del 95%. Por lo que se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna.

TABLA 24
TABLA DE PROBABILIDADES, UTILIZANDO LA PRUEBA
POST HOC DE DUNNETT.

		7 días	14 días	21 días	28 días
		{1}	{1}	{1}	{1}
Porcentaje (%)		80.904	87.720	64.549	77.052
1	0				
2	5	0.000041	0.000056	0.999041	0.075651
3	10	0.000142	0.000022	0.000028	0.010820
4	15	0.000035	0.000022	0.000551	0.000030
5	20	0.000023	0.000022	0.001031	0.015910
6	25	0.000022	0.000022	0.000040	0.000023
7	Tipo IV	0.000023	0.000022	0.000027	0.000022

Mediante la figura 4.7, se pudo comprobar que existió diferencia significativa, cuando las muestra fueron expuestas a 21 días de curado al aire, entre la muestras que contenían 0% y 5% de zeolita.

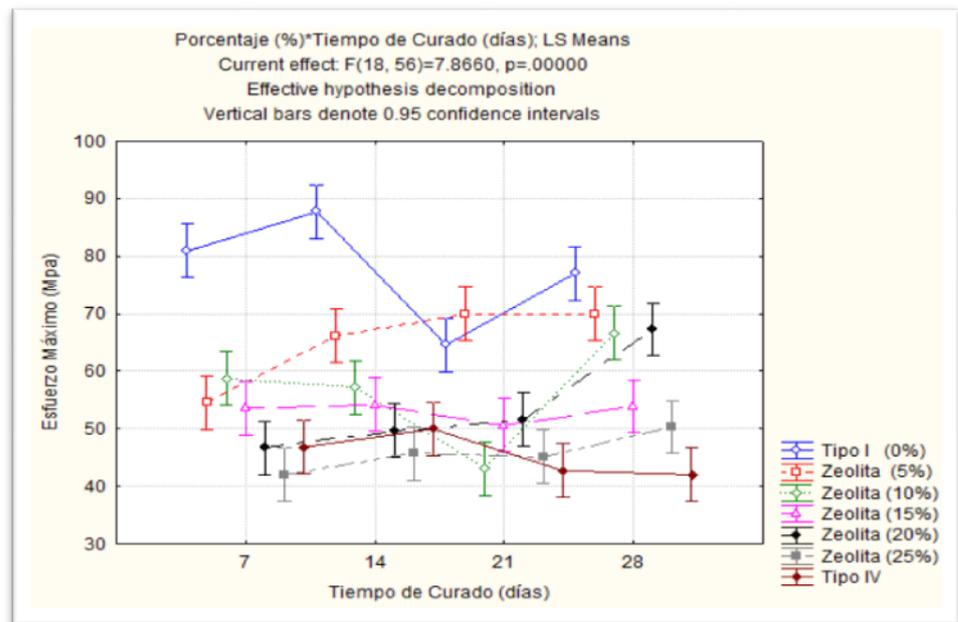


FIGURA 4.7 GRÁFICA ESFUERZO ÚLTIMO VS. PORCENTAJES

4.2.6 Regresión lineal múltiple.

Ya que para el estudio "grupal", existió más de una variable independiente, por lo que tuve que obtener funciones que me representan a cada variable dependiente, tales como esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, modulo de rigidez, datos que

servió para obtener, un modelo matemático, que una vez lo ingrese en el programa Matlab, pude simular el comportamiento de la pasta de cemento compuesto de zeolita, para cualquier porcentaje y día.

Mediante la tabla 25, se mostró que el modelo de regresión exponencial, se ajustó muy bien para todas las variables dependientes requeridos para la obtención del modelo matemático. Posteriormente permitió obtener las graficas respectivas.

En los apéndices **I-M**, se mostró las estimaciones de los parámetros de los esfuerzos fluencia, esfuerzo máximo, m. Respectivamente.

TABLA 25
RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DE
LOS PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL MODELO

Variable Dependiente	R	R ²	R ²	Modelo			Residual			F	p
	Múltiple	Múltiple	Ajustado	SC	GL	CM	SC	GL	CM		
Ln (Esfuerzo Máximo)	0.84121	0.70764	0.6854	2.30	5	0.459	0.950	66	0.014	3.195	0.000
Ln (Esfuerzo de Fluencia)	0.79557	0.63293	0.6051	1.71	5	0.342	0.993	66	0.015	2.276	0.000
Ln (Modulo Elástico)	0.67147	0.45087	0.4349	6.08	2	3.044	7.415	69	0.107	2.833	0.000
Ln (m)	0.37346	0.13947	0.1015	1.35	3	4.528	8.381	68	1.232	3.674	0.016

4.3 Resultados de modelo.

Mediante la figura 4.8, se ilustró la simulación del esfuerzo máximo, donde se pudo interpretar que los valores máximos se los obtuvo, cuando el porcentaje de adición de zeolita, estaba entre 0-5 %. Alcanzando valores promedios de 80 MPa.

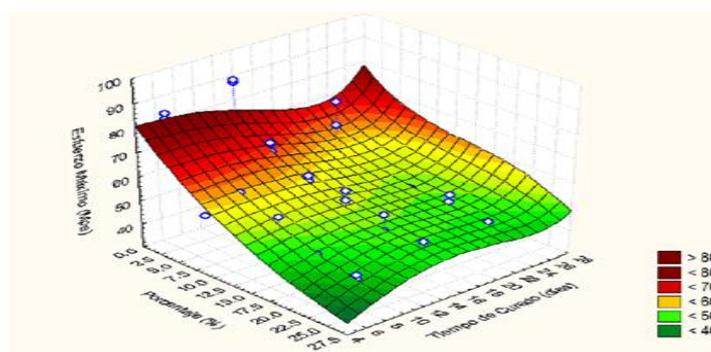


FIGURA 4.8 GRÁFICA EN 3D SIMULACIÓN DEL ESFUERZO MÁXIMO, PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA, Y TIEMPOS.

Mediante la figura 4.9, se mostró que los valores máximos de esfuerzo se lo obtuvo, cuando la muestra se encontraba expuesta a los 14 días de curado al aire, con un porcentajes entre 0-5%.

Mediante la figura 4.10, se ilustró la simulación del esfuerzo fluencia, donde se puede interpretar que los valores máximos se los obtuvo, cuando el porcentaje de adición de zeolita, dentro de la pasta de

cemento, estaba entre 0-5 %. Alcanzando valores promedios de 60 MPa.

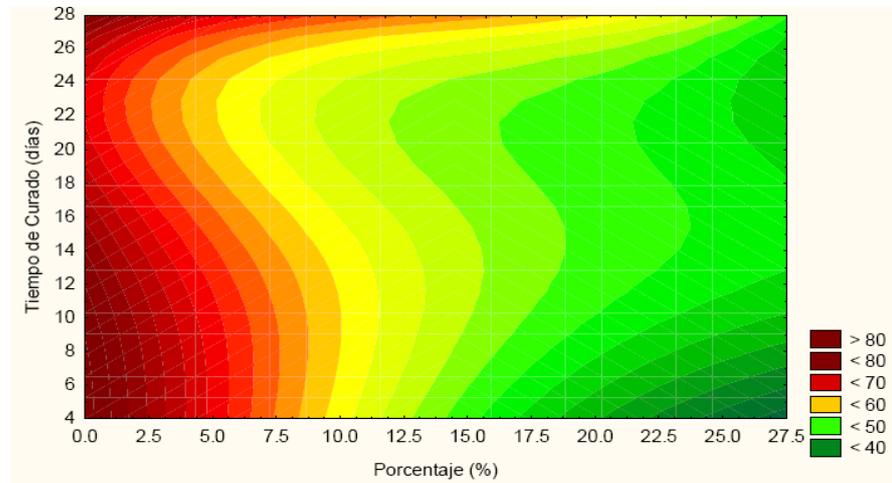


FIGURA 4.9. GRÁFICA DE LAS CURVAS DE NIVEL DEL ESFUERZO MÁXIMO, PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPOS.

Mediante la figura 4.11, se ilustró que el valor máximo del esfuerzo fluencia se lo obtuvo, cuando la muestra se encontraba expuesta a los 14 días de curado al aire, con un porcentaje de zeolita entre 0-5%

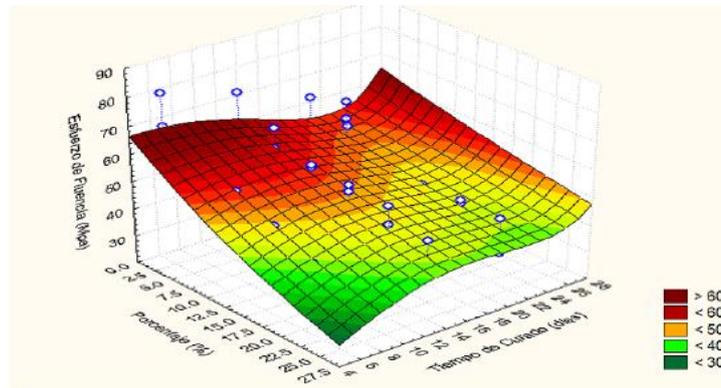


FIGURA 4.10. GRAFICA EN 3D SIMULACIÓN DEL ESFUERZO FLUENCIA, PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPOS.

Mediante la figura 4.12, se ilustró la simulación del módulo elástico, donde se pudo interpretar que los valores máximos se los obtiene, cuando el porcentaje de adición de zeolita. Está entre 0-5 %. Alcanzando valores promedios de 300 MPa.

Mediante la figura 4.13, se ilustró que el valor máximo del módulo elástico se lo obtuvo, cuando la muestra se encontraba expuesta a los 14 de curado al aire, con un porcentajes entre 0-5%.

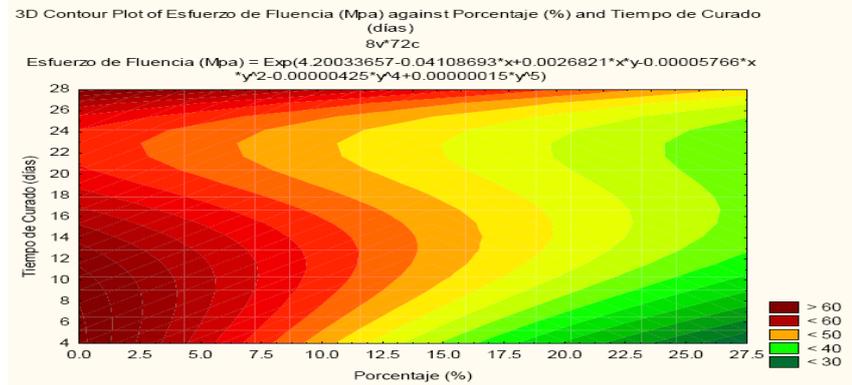


FIGURA 4.11. GRÁFICA DE LAS CURVAS DE NIVEL DEL ESFUERZO FLUENCIA, PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y TIEMPOS.

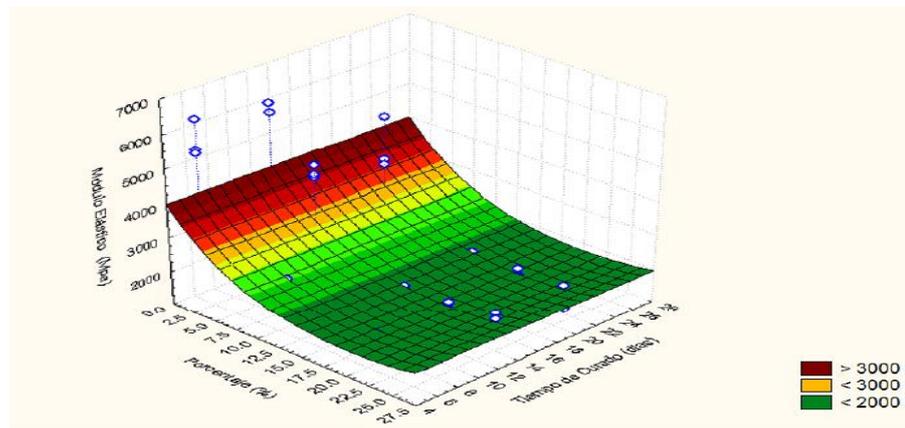


FIGURA 4.12. GRÁFICA EN 3D SIMULACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO, PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA, Y TIEMPOS.

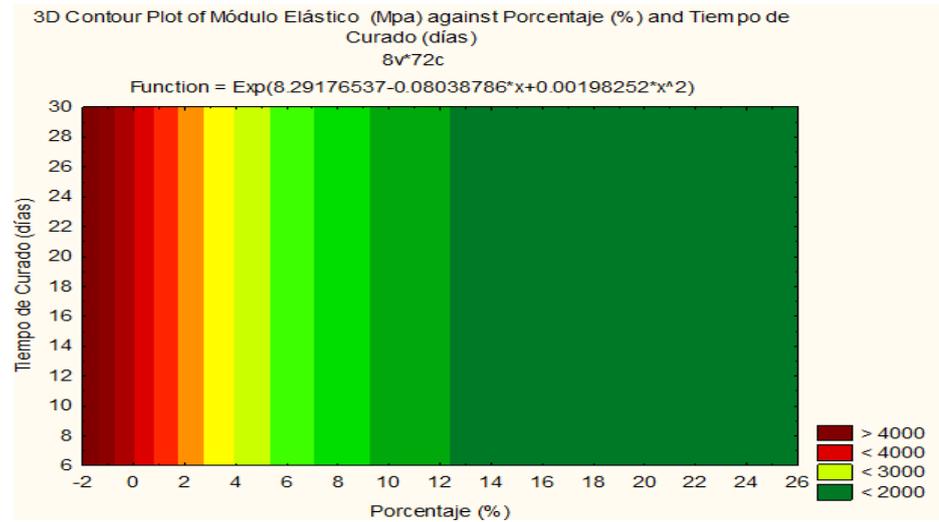
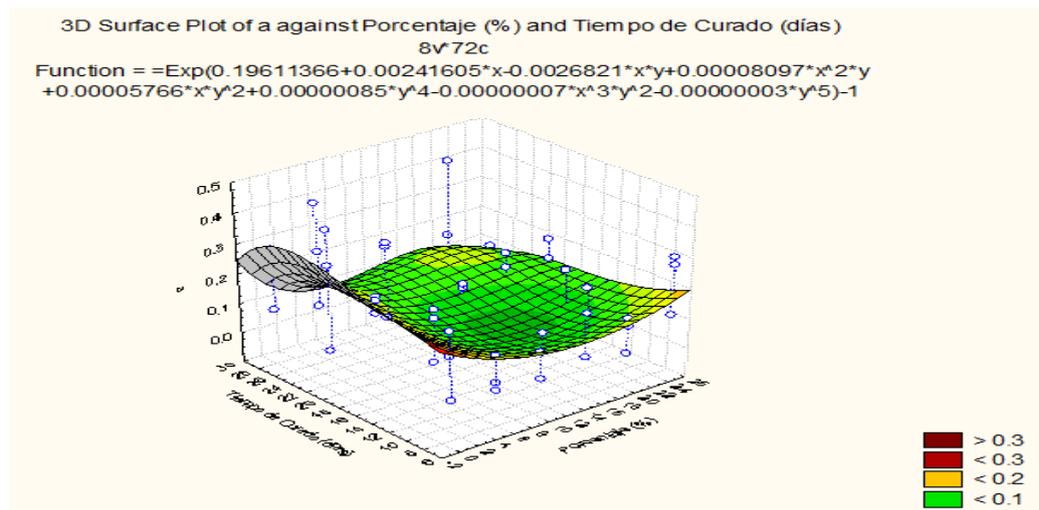


FIGURA 4.13. GRÁFICA DE LAS CURVAS DE NIVEL DEL MODULO ELASTICO, PARA DIFERENTES % DE ZEOLITA, Y TIEMPOS.



IGURA 4.14. GRÁFICA EN 3D SIMULACION DEL VALOR "a", PARA DIFERENTES % DE ZEOLITA, Y TIEMPOS.

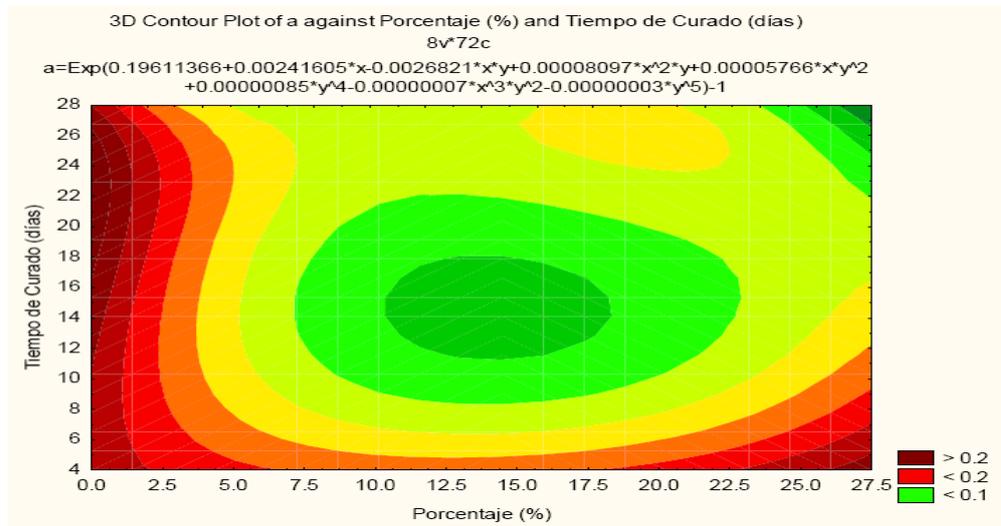


FIGURA 4.15. GRÁFICA DE LAS CURVAS DE NIVEL DEL VALOR "a", PARA DIFERENTES % DE ZEOLITA, Y TIEMPOS.

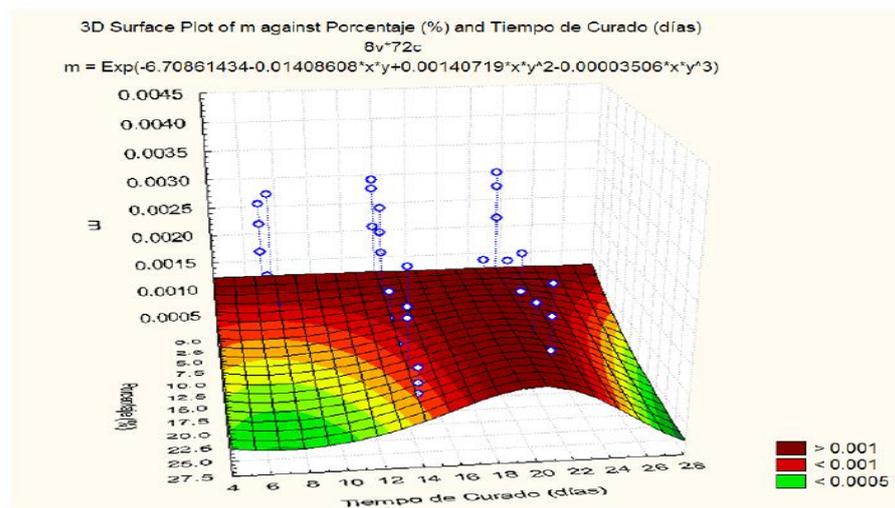


FIGURA 4.16. GRÁFICA EN 3D SIMULACION DEL VALOR "m", PARA DIFERENTES % DE ZEOLITA Y TIEMPOS.

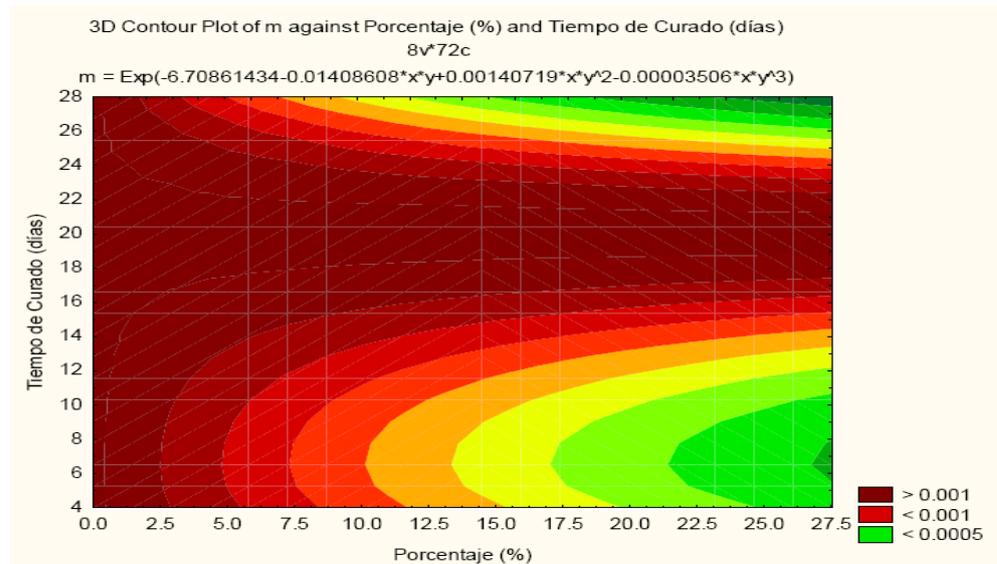


FIGURA 4.17. GRÁFICA DE LAS CURVAS DE NIVEL DEL VALOR “m”, PARA DIFERENTES % DE ZEOLITA, Y TIEMPOS.

4.3.1 Simulación de los datos obtenidos, para las muestras que contienen 10 y 12.5 % de zeolita a los diferentes días de curado.

Las tabla 26 y 27, mostrarán los valores de los parámetros para la simulación del comportamiento de la pasta de cemento, para 10 y 12,5% de zeolita respectivamente.

TABLA 26

**VALORES DE LOS PARAMETROS, PARA LA SIMULACION
CON 10% DE ZEOLITA**

Variables Independientes		Parámetros del Modelo de Simulación					
Porc. (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
10	7	51.54	57.57	2177.9	0.02733	0.12240	0.000804
10	14	52.95	56.99	2177.9	0.02733	0.07634	0.001023
10	21	48.64	53.64	2177.9	0.02569	0.09562	0.001221
10	28	57.83	63.48	2177.9	0.02520	0.09765	0.000664

TABLA 27

**VALORES DE LOS PARAMETROS, PARA LA SIMULACION
CON 12,5% DE ZEOLITA**

Variables Independientes		Parámetros del Modelo de Simulación					
Porc. (%)	Tiempo de Curado (días)	Fluencia (Mpa)	Máximo (Mpa)	Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
12.5	4	45.07	52.49	1991.58	0.02713	0.16450	0.000777
12.5	11	50.92	54.87	1991.58	0.02837	0.07769	0.000824
12.5	17	49.10	52.73	1991.58	0.02569	0.02766	0.001188
12.5	25	48.38	53.71	1991.58	0.02791	0.01102	0.000944

En los anexos N-O, se ilustró las graficas del comportamiento de la pasta de cemento compuesto por el 10 y 12,5% zeolita (convalidación), expuestas a los tiempos de curado respectivos.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

La adición de zeolita ecuatoriana extraída de la provincia de Santa Elena de la comuna Manglaralto en el cemento Portland tipo I, produjo una disminución sobre la resistencia máxima a la compresión de una pasta de cemento, respecto a la muestra patrón (contiene 0% de zeolita dentro de su composición); cuando se le agregó porcentajes de zeolita tales como: (5, 10, 15, 20, 25) respectivamente.

Por lo tanto se pudo concluir que mientras más, se aumente el porcentaje de zeolita, la resistencia máxima a la compresión disminuirá, respecto al cemento Tipo I (sin porcentaje de zeolita)

Mientras que la adición del 5% de zeolita ecuatoriana en la pasta de cemento, mediante curado al aire. Produjo un aumento de 10 MPa en la resistencia máxima a la compresión, respecto al cemento Tipo IV (comercial).

Teniendo un efecto contrario sobre la resistencia a la compresión de la pasta de cemento, cuando se le agregó un porcentaje de zeolita ecuatoriana igual a (10, 15, 20, 25), bajo en el mismo tipo de curado.

5.2. Recomendaciones.

Se recomienda que para los próximos trabajos de investigación, utilizar máquinas de ensayos de compresión universal, que permitan obtener datos mediante un software, eliminando en gran cantidad los errores, producto de una mala lectura experimental y calibración de equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abram's, D.A "Design and control of concrete mixtures", Institute Structural materials Research laboratory, pág 20, 1918.
2. Cesar Echevarría, Modulo del Hormigón" (Universidad Nacional de Colombia, sede en Medellín, 2002).
3. Hugo Barrera, Sergio Enríquez y Diego Salgado, "Influencia del cemento y sus adiciones en la corrosión del acero en hormigón armado"(Departamento de ingeniería, Universidad de Santiago Chile, 2004.
4. S.K Antiohosa, V.G. Papadakis y S. Tsimas, "Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes", Universidad Técnica Nacional de Atenas, Escuela de Ingeniería Química, 2003.

5. F. Canpolat , K. Yılmaz, y M.A. Yurdusev,” Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production”, Department of Civil Engineering, Celal Bayar University, Manisa, Turkey, Febrero de 2003.
6. Olguín María “Zeolitas características y propiedades”, Instituto nacional de investigaciones nucleares, depto. de química, [México], Febrero de 2001.
7. Solís Romel y Moreno Erick, “Influencia del curado en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo”, revista académica de la Facultad ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán., Noviembre 2005.
8. Cabrera Oscar y Donza Horacio, “Efecto del curado en los hormigones de alta performance”, facultad de ingeniería del valle, (www.efn.uncor.edu/dep/estruct/ciath/curadhad.pdf).

9. J. Zelic, D. Rusic, R. Krstulovic, "A mathematical model for prediction of compressive strength in cement–silica fume blends", faculty of chemical technology, department of engineering and technology, university of split, (Croacia), 2004.
10. ACI 318, "Building code requirement for structural concrete".
11. ACI 363, "State of the art report on high strength concrete".
12. Camilo Juan, "Efecto de la adición de Metacaolín en el cemento Pórtland, Universidad Nacional de Colombia (Medellín), 2006.
13. Robalino Paola, "El uso de la zeolita como una adición mineral para producir cemento Puzolánico", (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2004.
14. Nakin Suksawan¹, Hani. Nassif, "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of hpc, Department of Civil and Environmental Engineering, The State University of New Jersey, 2004.

15. ASTM C 109/C 109M – 02, (Standard Test Method For Compressive Strength).

APÉNDICE A

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 7 DIAS CURADO

"AIRE"

CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 7 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	25,5 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	69,6 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	0,8624	0,00254	0,9800	0,00254	1,1368
0,00508	1,8424	0,00508	1,9600	0,00508	3,7240
0,00762	3,9200	0,00762	5,2920	0,00762	9,2120
0,01016	7,4872	0,01016	9,6040	0,01016	16,3856
0,01270	12,5440	0,01270	16,0720	0,01270	21,9520
0,01524	18,3456	0,01524	22,5400	0,01524	31,3600
0,01778	24,1080	0,01778	29,4000	0,01778	40,7680
0,02032	30,3800	0,02032	35,8680	0,02032	49,9800
0,02286	35,8680	0,02286	43,3160	0,02337	56,2520
0,02540	41,7480	0,02540	49,0000		
0,02794	47,0400	0,02794	55,8600		
0,03048	52,3320	0,03048	57,8200		
0,03302	56,4480				
0,03556	59,9760				
0,03810	62,1320				

APÉNDICE B

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 14 DIAS CURADO "AIRE"

CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 14 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	27,3 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	62,6 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	1,1760	0,00254	0,7840	0,00254	0,7840
0,00508	3,5280	0,00508	2,5480	0,00508	1,7640
0,00762	7,4480	0,00762	5,8800	0,00762	3,1360
0,01016	12,7400	0,01016	10,5840	0,01016	5,2920
0,01270	19,0120	0,01270	16,0720	0,01270	9,8000
0,01524	24,5000	0,01524	21,5600	0,01524	14,7000
0,01778	31,9480	0,01778	29,4000	0,01778	20,5800
0,02032	38,2200	0,02032	35,2800	0,02032	27,4400
0,02286	44,1000	0,02286	42,1400	0,02286	33,3200
0,02540	50,9600	0,02540	50,5680	0,02540	39,2000
0,02794	53,9000	0,02794	55,8600	0,02794	46,0600
		0,03048	57,8200	0,03048	51,9400
				0,03302	56,8400
				0,03556	59,7800

APÉNDICE C

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 21 DIAS

CURADO "AIRE"

CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 21 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	26,3 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	62,8 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	0,7840	0,00254	0,9800	0,00254	1,7640
0,00508	2,3520	0,00508	3,1360	0,00508	4,1160
0,00762	4,3120	0,00762	7,2520	0,00762	6,6640
0,01016	6,8600	0,01016	11,7600	0,01016	10,9760
0,01270	11,1720	0,01270	17,6400	0,01270	14,8960
0,01524	15,4840	0,01524	23,5200	0,01524	20,5800
0,01778	19,6000	0,01778	30,3800	0,01778	26,4600
0,02032	24,5000	0,02032	36,2600	0,02032	32,3400
0,02286	27,4400	0,02286	43,1200	0,02286	41,3560
0,02540	32,3400	0,02540	44,1000	0,02540	45,0800
0,02794	38,2200				
0,03048	40,1800				

APÉNDICE D

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 28 DIAS

CURADO "AIRE"

CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 28 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	27,1 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	64,9 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	0,5880	0,00254	0,7840	0,00254	0,5880
0,00508	1,1760	0,00508	1,9600	0,00508	1,5680
0,00762	2,1560	0,00762	3,3320	0,00762	2,7440
0,01016	3,5280	0,01016	5,4880	0,01016	3,9200
0,01270	7,6440	0,01270	8,4280	0,01270	6,4680
0,01524	11,9560	0,01524	13,3280	0,01524	11,7600
0,01778	17,8360	0,01778	18,2280	0,01778	16,6600
0,02032	23,5200	0,02032	23,5200	0,02032	22,5400
0,02286	29,4000	0,02286	29,4000	0,02286	28,4200
0,02540	35,2800	0,02540	35,2800	0,02540	34,3000
0,02794	41,1600	0,02794	42,1400	0,02794	40,1800
0,03048	47,0400	0,03048	48,0200	0,03048	48,0200
0,03302	52,9200	0,03302	53,9000	0,03302	53,9000
0,03556	58,8000	0,03556	58,8000	0,03556	60,7600
0,03810	62,7200	0,03810	63,7000	0,03810	68,6000
		0,04064	65,6600	0,04064	71,5400

APÉNDICE E

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 4 DIAS

CURADO "AIRE"

DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO					
CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 4 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	25,3 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	69,3 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	0,5880	0,00254	0,5880	0,00254	0,6664
0,00508	1,5680	0,00508	1,1760	0,00508	2,3520
0,00762	3,1360	0,00762	3,4496	0,00762	5,9976
0,01016	6,7816	0,01016	6,6640	0,01016	10,3096
0,01270	10,9760	0,01270	10,9760	0,01270	15,2880
0,01524	17,2480	0,01524	16,3856	0,01524	21,3640
0,01778	23,5200	0,01778	21,1680	0,01778	28,0280
0,02032	29,4000	0,02032	28,2240	0,02032	34,3000
0,02286	36,2600	0,02286	35,0840	0,02286	40,3760
0,02540	42,1400	0,02540	40,3760	0,02540	46,0600
0,02794	48,0200	0,02794	49,0000	0,02794	51,5480
0,03048	53,9000	0,03048	52,9200	0,03048	55,2720
0,03302	57,8200			0,03302	56,8400

APÉNDICE F

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 11 DIAS CURADO "AIRE"

DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO					
CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 11 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	26,1 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	69,2 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	1,5680	0,00254	0,7840	0,00254	2,7440
0,00508	7,0560	0,00508	2,3520	0,00508	5,4880
0,00762	13,3280	0,00762	8,2320	0,00762	10,5840
0,01016	20,7760	0,01016	16,0720	0,01016	22,7360
0,01270	23,9120	0,01270	22,7360	0,01270	34,1040
0,01524	36,0640	0,01524	30,9680	0,01524	45,4720
0,01778	41,1600	0,01778	34,8880	0,01778	49,0000
0,02032	49,7840	0,02032	38,0240	0,02032	58,8000
0,02286	58,4080	0,02286	41,5520		
0,02540	59,5840	0,02540	50,5680		
		0,02794	51,7440		
		0,03048	54,4880		

APÉNDICE G

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 18 DIAS

CURADO "AIRE"

DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO					
CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 18 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	25,3 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	69,4 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	0,9800	0,00254	1,1760	0,00254	0,7840
0,00508	2,9400	0,00508	2,7440	0,00508	2,5480
0,00762	6,2720	0,00762	5,6840	0,00762	4,9000
0,01016	10,5840	0,01016	9,4080	0,01016	8,6240
0,01270	15,6800	0,01270	15,4840	0,01270	13,5240
0,01524	20,5800	0,01524	21,1680	0,01524	18,6200
0,01778	26,4600	0,01778	25,0880	0,01778	23,5200
0,02032	31,9480	0,02032	30,3800	0,02032	28,2240
0,02286	38,2200	0,02286	36,2600	0,02286	32,3400
0,02540	44,1000	0,02540	42,1400	0,02540	36,2600
0,02794	45,0800	0,02794	44,4920	0,02794	41,3560
		0,03048	52,9200	0,03048	44,6880
				0,03302	56,8400

APÉNDICE H

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS, A LOS 11 DIAS

CURADO "AIRE"

DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO					
CONDICIONES DE ENSAYOS A LOS 25 DIAS CURADO "AIRE"					
Temperatura:	25,5 °C			Área	2500mm ²
Humedad:	69,3 RH			Código:	G6/10/07
Longitud:	50 mm			Máquina:	Café EM
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)	Deformación	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	0,7840	0,00254	0,9016	0,00254	0,9800
0,00508	2,1560	0,00508	2,3520	0,00508	2,1560
0,00762	4,7040	0,00762	5,4880	0,00762	4,9000
0,01016	14,3080	0,01016	9,9960	0,01016	8,8200
0,01270	21,1680	0,01270	14,8960	0,01270	14,1120
0,01524	28,0280	0,01524	21,5600	0,01524	19,2080
0,01778	35,8680	0,01778	27,4400	0,01778	26,4600
0,02032	40,1800	0,02032	33,9080	0,02032	31,3600
		0,02286	42,1400	0,02286	37,8280
		0,02540	45,6680	0,02540	41,7480

APÉNDICE I

ESTIMACION DE LA FUNCION " MÓDULO DE ELASTICIDAD "

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

Ln (Módulo de elasticidad)										
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (B)	Error Estándar	Intervalo de Confianza B	
					-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto	8,29	0.085772	96.672	0.000000	8.121	8.463				
x	-0.080388	0.016136	-4.982	0.000004	-0.112578	-0.048198	-1.585	0.318150	-2.220	-0.950309
x ²	0.001983	0.000620	3.200	0.002078	0.000747	0.003218	1.018	0.318150	0.38338	1.653

APÉNDICE K

ESTIMACION DE LA FUNCION " ESFUERZO DE FLUENCIA "

$$\sigma_y = e^{4.2003365 - 0.0410869x + 0.0026821xy - 0.00005766xy^2 - 0.00000425y^4 + 0.00000015y^5}$$

Ln (Esfuerzo de Fluencia)										
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (B)	Error Estándar	Intervalo de Confianza B	
					-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto	4.200337	0.04196080	100.101	0.000000	4.117	4.284				
x	-0.04108693	0.00760803	-5.401	0.000001	-0.056277	-0.025897	-1.809	0.335012	-2.478	-1.140
xy	0.00268210	0.00098245	2.730	0.008112	0.000721	0.004644	2.638	0.966140	0.70861	4.567
xy ²	-0.00005766	0.00002819	-2.045	0.044827	-0.000114	-0.000001	-1.562	0.763643	-3.086	-0.03713
y ⁴	-0.00000425	0.00000111	-3.816	0.000302	-0.000006	-0.000002	-5.334	1.397985	-8.125	-2.543
y ⁵	0.00000015	0.00000004	3.872	0.000250	0.000000	0.000000	5.375	1.388154	2.604	8.147

APÉNDICE L

ESTIMACION DE LA FUNCION " ESFUERZO DE MAXIMO "

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

Ln (Esfuerzo Máximo)										
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar	Intervalo de Confianza β	
					-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto	4.396	0.04517187	97.327	0.000000	4.306	4.487				
x	-0.03867087	0.00589225	-6.563	0.000000	-0.05043513	-0.02690661	-1.554	0.236831	-202.717	-1.081
x ² y	0.00008097	0.00002806	2.886	0.005269	0.00002495	0.00013699	1.763	0.610861	0.54326	2.983
y ⁴	-0.00000341	0.00000094	-3.622	0.000569	-0.00000528	-0.00000153	-3.899	1.076468	-604.789	-1.749
x ³ y ²	-0.00000007	0.00000003	-2.179	0.032903	-0.00000014	-0.00000001	-0.96490	0.442808	-184.899	-0.08081
y ⁵	0.00000012	0.00000003	3.737	0.000392	0.00000006	0.00000018	3.939	1.054.013	183.418	6.043

APÉNDICE N

ESTIMACION DE LA FUNCION " m "

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

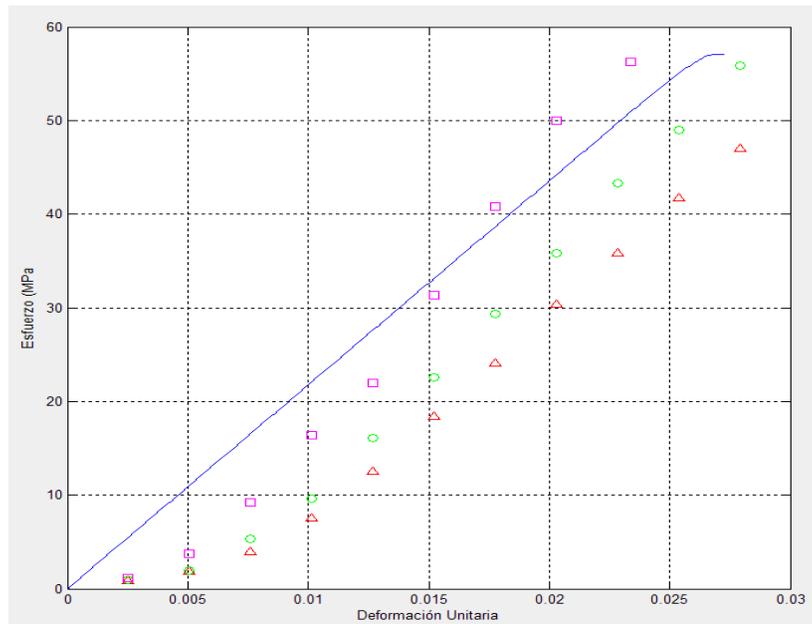
Ln (m)										
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
					-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto	-6.708.614	0.231060	-2.903	0.000000	-7.170	-6.248				
xy	-0.0140861	0.005709	-2.468	0.016128	-0.02548	-0.00269	-2.310	0.935990	-4.177	-0.44184
xy ²	0.0014072	0.000544	2.587	0.011839	0.00032	0.00249	6.355	2.457	1.452	11.258
xy ³	-0.0000351	0.000013	-2.704	0.008646	-0.00006	-0.00001	-4.417	1.634	-7.677	-1.158

Mediante el apéndice O, se mostró la simulación del comportamiento de la pasta de cemento compuesto por 10%zeolita, para los días (7, 14, 21 ,28), donde se definió con el color azul la curva **(real)**, roja y verde, como la curva **(experimental)**.

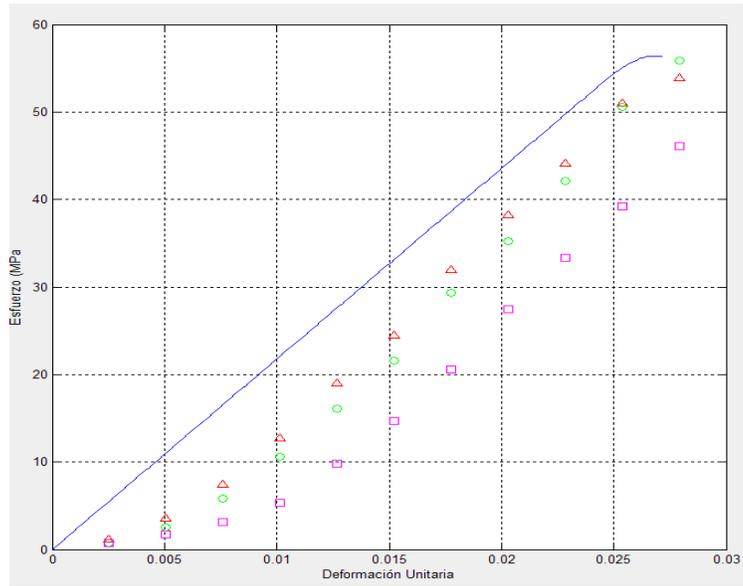
APÉNDICE O

SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO "REAL Y EXPERIMENTAL" CON EL 10% ZEOLITA", PARA DIFERENTES DIAS.

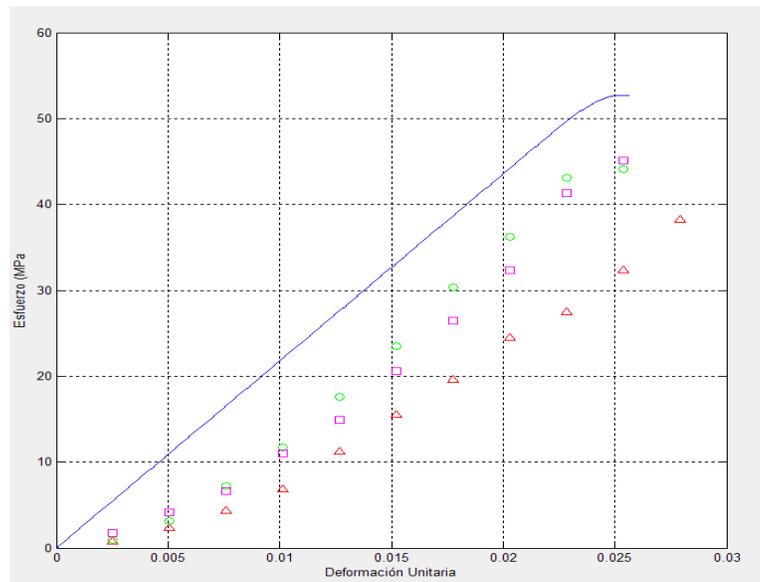
CURVA, 10% DE ZEOLIA AL DIA 7



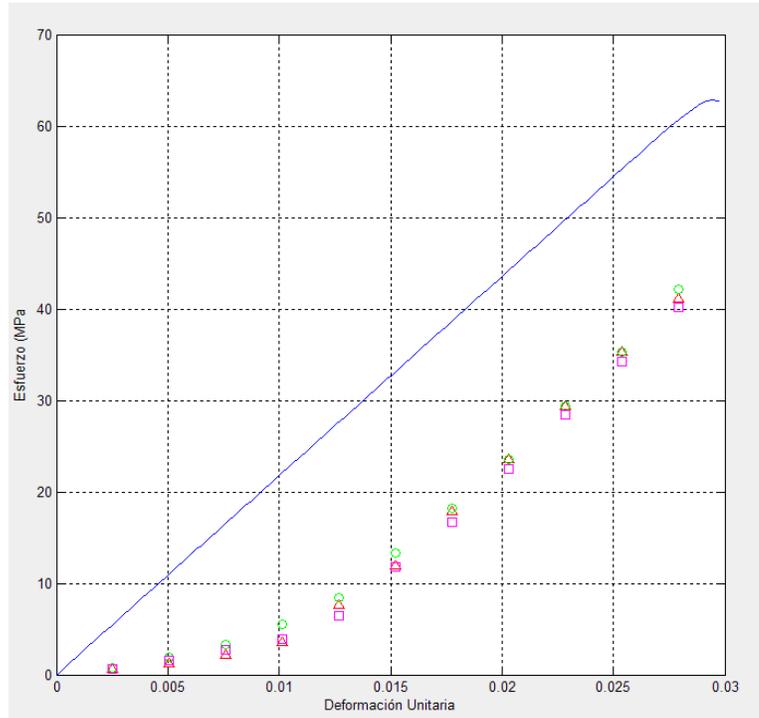
CURVA, 10% DE ZEOLIA AL DIA 14



CURVA, 10% DE ZEOLIA AL DIA 21



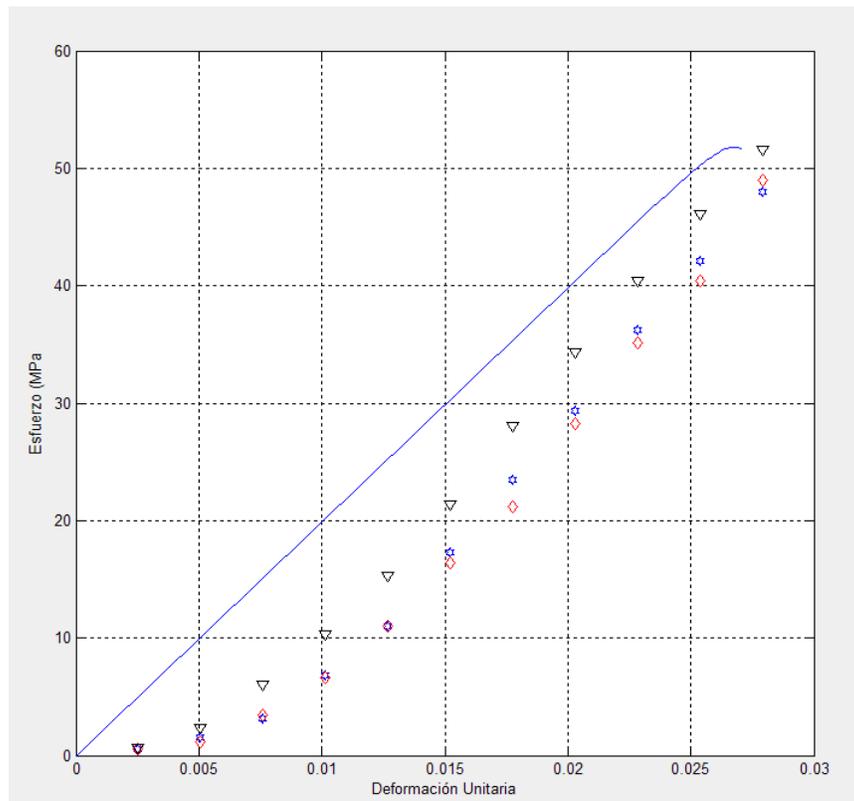
CURVA, 10% DE ZEOLIA AL DIA 28



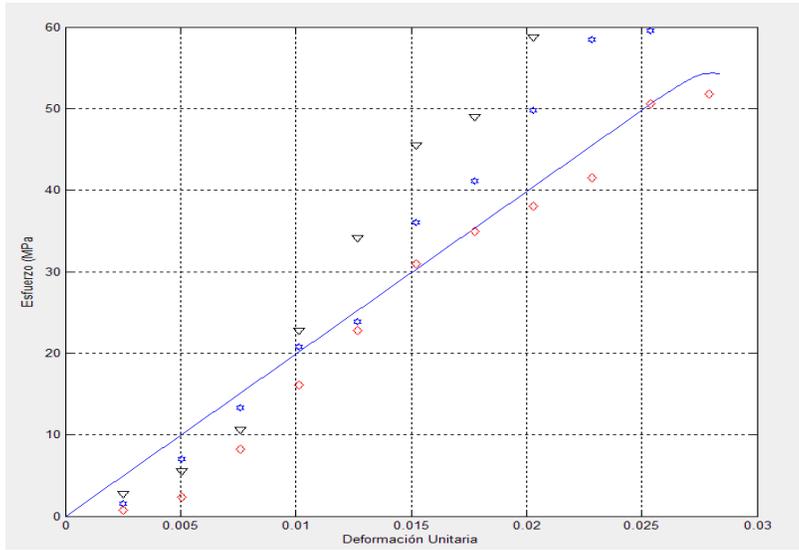
APÉNDICE P

SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO "REAL Y EXPERIMENTAL" CON EL 12,5% ZEOLITA", PARA DIFERENTES DIAS

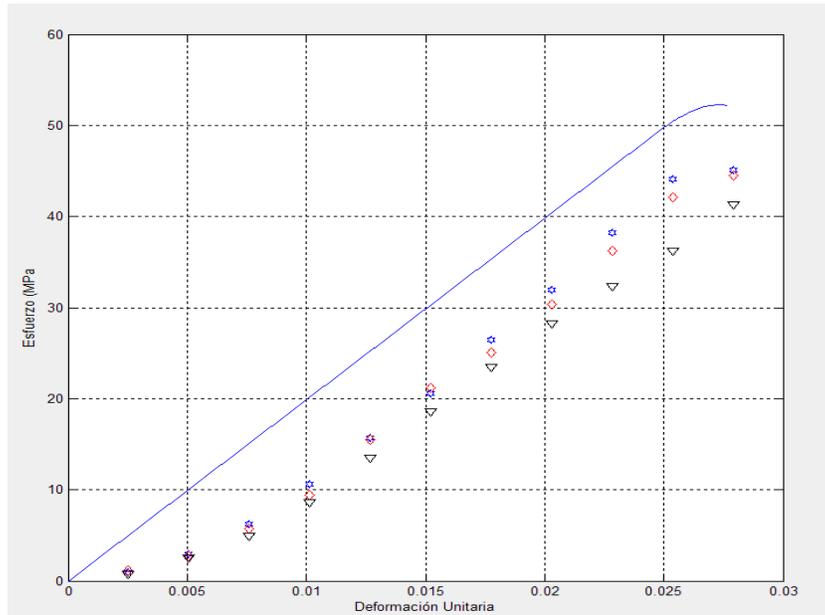
CURVA 12.5% DE ZEOLIA AL DIA 4



CURVA 12.5% DE ZEOLIA AL DIA 11



CURVA 12.5% DE ZEOLIA AL DIA 18



CURVA 12.5% DE ZEOLIA AL DIA 25

