



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

**“Simulación del Comportamiento del Cemento Portland Tipo I, con
Adición de un 10% de Zeolita Ecuatoriana y Curado al Agua”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

José Alfredo Camacho Palacios

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

Este trabajo, no hubiera sido concluido con éxito sin la ayuda de todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en su realización, para todos y cada uno de ellos mis sinceros agradecimientos. De manera especial a mi familia, que sin condiciones me brindaron su apoyo total e iluminaron mi sendero, dándome siempre una palabra de aliento cuando mis fuerzas se agotaban.

Al Ing. Juan Carlos Pindo Macas por estar en todo momento, por ser más que un buen guía, un buen amigo. Gracias por enseñarme que todo problema tiene solución y toda duda tiene una respuesta, al Ing. Rodrigo Perugachi B., Director de Tesis por su tiempo y apoyo. A la Escuela Superior Politécnica del Litoral por la formación académica y personal brindada.

DEDICATORIA

Es la oportunidad de expresar mi admiración, respeto y amor; además de mi eterna gratitud a dos seres que aparte de darme la vida, me apoyaron en los buenos y malos momentos. Sembrando en mi confianza y fé; sentimientos que solo saben dar los seres que verdaderamente aman, José Cruz y Delia Floriza. A ellos mis adorables padres, porque con su ejemplo de vida me enseñaron que vale la pena luchar por los ideales.

A mi Hermana y su Esposo.

A mi Esposa

A mis Hijos Nathalia Valeska y José Andrés por ser la razón de mi vida y fuente de energía para continuar.

A Dios por darme siempre la fortaleza necesaria para lograr mis metas y anhelos.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Dra. Cecilia Paredes V. Ph. D.
DELEGADA DEL DECANATO
DE LA FIMCP
PRESIDENTA



Ing. Rodrigo Perugachí B.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Juan Carlos Pindo M.
VOCAL



Ing. Mauricio Cornejo M.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado me corresponde exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



José Alfredo Camacho Palacios.



BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS G."
F. I. M. C. P.

RESUMEN

El presente estudio investigó el comportamiento de la pasta de cemento Portland tipo I en presencia de zeolita ecuatoriana, como aditivo puzolánico en diferentes porcentajes de concentración y a varios días de curado en agua teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Se diseñó e implementó la experimentación basados en la norma ASTM C109; la misma que especifica la elaboración de probetas como unidades experimentales.

Las muestras de zeolita en estado natural se recogieron en el sector Casas Viejas vía Guayaquil-Progreso, las que a través de trituración y molienda fueron reducidas a un tamaño de grano de 45 μm . Luego en este estudio se elaboraron dos mezclas, la primera contenía cemento tipo I + agua + 10% zeolita y la segunda el cemento tipo I + agua + 12,5% zeolita; ambas con relación agua/cemento de 0.3 y cantidad suficiente para llenar 12 probetas por cada porcentaje (10 y 12,5%) de aditivo. Una vez fraguado, se desmoldó para sumergir las probetas en agua a periodos de 7, 14, 21 y 28 días para el primer porcentaje y 4, 11, 18 y 25 para el segundo porcentaje.

Los ensayos de compresión axial realizados hasta la ruptura, generaron información de deformación y esfuerzo para cada día de curado indicado, datos que en su totalidad se usó para hallar el módulo de Young promedio.

Esta investigación cubre un análisis estadístico que ayuda a revelar cuánto influyen los factores tiempo de curado y concentración de zeolita (incluidos los porcentajes asignados a los demás integrantes del tópico de graduación) en la resistencia a la compresión que es la variable respuesta.

Así mismo, estadísticamente se compara estos resultados con los obtenidos del cemento tipo I sin aditivo y del cemento tipo IV que es comercialmente utilizado; adicionalmente, y con mayor importancia, se define ciertos correctores plásticos (m , a) que implícitamente describen el material estudiado, estos escalares son por cada día de ensayo.

Paralelamente para la simulación se implementó en Matlab un algoritmo iterativo que al ingresar los datos de esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia, modulo de Young, deformación y de los correctores indicados, generó la gráfica esfuerzo-deformación característica del material en mención; la misma que ajustamos en lo posible a datos experimentales que también se muestran en ella, para luego interpolar los valores de deformación experimental y obtener los correspondientes esfuerzos teóricos del ensayo.

Entre los resultados obtenidos resalta que la concentración del 15% de zeolita alcanzó una mayor resistencia a la compresión comparada con todos los porcentajes, el cemento tipo I sin aditivos y el cemento tipo IV. Al final también se define el error teórico-práctico que revela el mínimo sesgo de los resultados.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Metodología.....	5
1.4 Estructura del proyecto.....	8
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Generalidades sobre el cemento.....	11

2.2 Tipos de curado.....	17
2.3 Aditivos.....	19
2.3.1 Zeolitas.....	22
CAPÍTULO 3	
3. PROCEDIMIENTO.....	26
3.1 Diseño experimental.....	26
3.2 Preparación y ensayos de probetas.....	39
3.3 Simulación computacional.....	50
CAPÍTULO 4	
4. RESULTADOS.....	62
4.1 Presentación de resultados.....	62
4.2 Análisis estadístico.....	67
4.3 Simulación del modelo matemático.....	84
4.3.1 Ajuste y verificación del modelo.....	86
CAPÍTULO 5	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Alumnioferrito tetracálcico
Atm	Atmósfera
Fl	Fluidez
°C	Grados centígrados
g	Gramo
h	Horas
kg	Kilogramo
Mpa	Mega pascales
m	Metro
mm ³	Milímetro cúbico
mm	Milímetros
min	Minutos
s	Segundos
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
tol	Tolerancia

SIMBOLOGÍA

A	Área de cara lateral de probeta
Épsilon	Deformación
σ	Esfuerzo
σ_y	Esfuerzo de fluencia
$\text{sigmay}(1,1)=100$	Esfuerzo de fluencia inicial (100)
f'_c	Esfuerzo máximo de compresión
σ_u	Esfuerzo máximo o de ruptura
Sigmatrial	Esfuerzo trial
m	Factor de corrección del material
a	Factor de corrección del material
ftrial	Fuerza trial
Deltaepsilon	Incrementos usados de épsilon
$L(1,1)=0$	Inicialización de landa
$\text{sigma}(1,1)=0$	Inicio de sigma (esfuerzo normal)
$\text{sigmay=zeros(irango,1)}$	Inicio de sigma y (esfuerzo de fluencia)
L	Longitud de arista de probeta
E	Modulo de Young
irango	Rango tomado (0 hasta épsilon máximo)
r	Variable común

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1.1 Flujo esquemático de la metodología	5
FIGURA 3.1 Zeolita en estado natural.....	26
FIGURA 3.2 Molino de mandíbulas.....	30
FIGURA 3.3 Balanza de carátula.....	30
FIGURA 3.4 Cuarteo.....	31
FIGURA 3.5 Molino de discos.....	31
FIGURA 3.6 Molino de bolas.....	31
FIGURA 3.7 Tamaño de partículas de muestreo.....	32
FIGURA 3.8 Tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo.....	32
FIGURA 3.9 Equipo para tamizar con tamices 325 y fondo.....	32
FIGURA 3.10 Zeolita con granulometría final 45 mm.....	33
FIGURA 3.11 Preparación de moldes.....	41
FIGURA 3.12 Balanza electrónica encerrada.....	42
FIGURA 3.13 Pesado del material.....	42
FIGURA 3.14 Medidor digital de temperatura y humedad.....	43
FIGURA 3.15 Mezcla homogénea cemento-zeolita en seco.....	43
FIGURA 3.16 Cemento-zeolita-agua en la mezcladora.....	44
FIGURA 3.17 Orden de apisonamiento de especímenes	44
FIGURA 3.18 Llenado de moldes con pasta.....	45
FIGURA 3.19 Compactado de probetas.....	45
FIGURA 3.20 Retiro de exceso de cemento en molde.....	46
FIGURA 3.21 Probetas cubiertas por láminas de plástico.....	46
FIGURA 3.22 Retiro de exceso de mezcla seca.....	47
FIGURA 3.23 Desmolde.....	47
FIGURA 3.24 Probetas sumergidas en agua.....	48
FIGURA 3.25 Máquina para ensayos de compresión.....	49
FIGURA 3.26 Indicador de fuerza tipo carátula.....	50

FIGURA 3.27	Ruptura de probetas.....	50
FIGURA 3.28	Descripción esquema esfuerzo-deformación.....	51
FIGURA 3.29	Pantalla de respuesta del programa Matlab.....	60
FIGURA 3.30	Curva esfuerzo – deformación en Matlab.....	61
FIGURA 4.1	Histograma de frecuencias de E para el 10%, día7.....	69
FIGURA 4.2	Intervalos de confianza para curado 10%.....	73
FIGURA 4.3	Intervalos de confianza para curado 12,5%.....	75
FIGURA 4.4	Variación media según factor % de zeolita.....	81
FIGURA 4.5	Resumen del efecto del factor % de zeolita.....	82
FIGURA 4.6	Variación media y factor días de curado.....	83
FIGURA 4.7	Gráfica de superficie del análisis grupal	84
FIGURA 4.8	Esfuerzo-deformación G1/ 10%/ día7 Matlab.....	85
FIGURA 4.9	Gráfica función de respuesta conjunta con el tipo IV...	89
FIGURA 4.10	Gráfica función de respuesta general con el tipo IV....	90

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1	Tolerancia de los moldes utilizados.....28
TABLA 2	Tabla de tamices y tamaño de partículas.....33
TABLA 3	Porcentajes de mezcla para especímenes.....40
TABLA 4	Tabla de porcentajes y días de curado.....48
TABLA 5	Tablas de esfuerzos por día del 10% zeolita.....63
TABLA 6	Tablas de esfuerzos por día del 12.5% zeolita.....64
TABLA 7	Esfuerzos promedios por día del 10% zeolita.....65
TABLA 8	Esfuerzos promedios por día del 12,5% zeolita.....66
TABLA 9	Tabla de medias e Int. de confianza de E, 10%.....68
TABLA 10	Tabla de medias e Int. de confianza de E, 12.5%.....68
TABLA 11	Datos ingresados al programa estadístico, 10%.....71
TABLA 12	Tabla de indicadores estadísticos, 10%.....72
TABLA 13	Tabla de resultados de Duncan 10%.....73
TABLA 14	Datos ingresados al programa estadístico 12,5%.....74
TABLA 15	Tabla de indicadores estadísticos 12,5%.....74
TABLA 16	Tabla de resultados de Duncan 12,5%.....75
TABLA 17	Tabla de datos del grupo zeolita / curado agua.....77
TABLA 18	Tabla de medias del grupal por Duncan.....80
TABLA 19	Indicadores característicos de muestras.....84
TABLA 20	Tabla de errores directos finales.....86
TABLA 21	Tabla que incluyen al cemento tipo IV.....88

INTRODUCCIÓN

El cemento básicamente está compuesto por clinker, yeso y aditivos minerales, que al añadir agua se obtiene la denominada pasta de cemento, que es el material de estudio en esta investigación. Se procede reconociendo que tan influyentes son la adición de zeolita y el tiempo de curado en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento.

Se estudia la posibilidad de que la zeolita ecuatoriana como material puzolánico sustituya en la industria cementera a los aditivos usados actualmente en la producción de cemento; esto entre otras ventajas disminuiría la cantidad de clinker usada en la formulación del cemento, lo que a su vez reduce las emisiones de CO₂. Adicionalmente, con este planteamiento se estudió la posibilidad de mejorar la resistencia a la compresión del cemento que se comercializa actualmente.

El objetivo es simular el comportamiento de la pasta de cemento tipo I en presencia de zeolita ecuatoriana como aditivo, en diferentes porcentajes de concentración y varios tiempos de curado en agua, teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión. Es decir, específicamente se estudia el efecto que tiene la adición de zeolita natural ecuatoriana en diferentes concentraciones y diferentes tiempos de curado al agua (7, 14, 21, 28 días) en la pasta de cemento. Para esto se obtiene el valor de la

resistencia a la compresión de probetas normalizadas, se analiza estadísticamente estos resultados respecto al cemento tipo I sin aditivos y al cemento tipo IV que es el comercialmente utilizado.

La metodología comprende un diseño experimental normalizado que restringe el proceso de recolección, tratamiento, elaboración y ensayo de unidades experimentales; cuya función de respuesta (resistencia a la compresión) es tabulada y analizada estadísticamente, para luego estos datos ingresarlos en un algoritmo que simula el comportamiento teórico del material estudiado.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema.

El estudio de los materiales no metálicos, y en particular de los materiales de construcción, cobra gran importancia debido a su influencia en los ámbitos del progreso urbanístico y el bienestar común. La confluencia del interés científico y tecnológico con el interés social y de desarrollo, convierten a la innovación de materiales de construcción en una rama interesante de estudio y profundización del conocimiento.

Nuestro país posee yacimientos extensos de zeolitas naturales sin explotar, entonces se crea la oportunidad para realizar una investigación, que ayude a definir cuan efectiva resulta la adición de zeolita natural ecuatoriana a la mezcla básica de pasta de cemento Pórtland tipo1.

Es decir, se estudia si la zeolita como material puzolánico tiene la posibilidad de sustituir a los aditivos usados actualmente en la producción industrial del cemento. Además, con esto se puede reducir emisiones de CO₂ como resultado de la disminución de la cantidad clinker en la formulación del cemento.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es simular el comportamiento de la pasta de cemento tipo I en presencia de zeolitas ecuatorianas como aditivo en diferentes concentraciones, en varios tiempos de curado en agua y teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Los objetivos específicos son:

- Crear unidades experimentales de pasta de cemento, donde se estudia el efecto que tiene la adición de zeolita natural a diferentes concentraciones.
- Estudiar el comportamiento de la pasta de cemento en diferentes periodos de curado al agua (4, 7, 11, 14, 18, 21, 25 y 28 días)
- Los resultados estadísticos y matemáticos son analizados con respecto a otras con concentraciones diferentes de zeolita, al

cemento tipo I sin aditivos y también con respecto al cemento tipo IV comercialmente utilizado.

1.3. Metodología

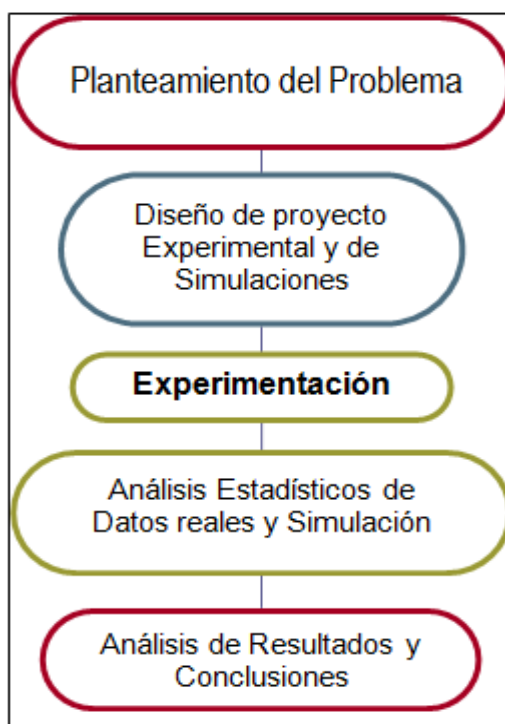


FIGURA 1.1 FLUJO ESQUEMATICO DE LA METODOLOGÍA

Planteamiento del problema: como antes ya se describió el punto de partida es que la demanda general de cemento ha aumentado considerablemente en los últimos años y que en nuestro país se sabe existen yacimientos puzolánicos, situaciones que justifican el realizar estudios que revelen si es posible sustituir componentes habituales del

cemento, por la zeolita natural ecuatoriana, para lo cual se procede a realizar el diseño del experimento.

Diseño de proyecto experimental y de simulaciones: el experimento tuvo como objetivo, simular (utilizando métodos numéricos) el comportamiento de materiales compuestos como el cemento. El diseño incluye restringir los procedimientos a normas preestablecidas para este tipo de ensayos. Introducir en los modelos el efecto de materiales aditivos, como puzolanas, para así saber cómo variar la composición de los materiales estructurales. Se coordinó los trabajos de modelación con la experimentación de laboratorio, con el objeto de lograr el mayor ajuste de los modelos con la realidad del comportamiento del material compuesto.

Paralelamente, se implementa un modelo simulado por computadora de todo el proceso con datos generados por otras muestras de manera progresiva en tiempos diferentes de curado.

Experimentación: se analizó el comportamiento del cemento al introducir un 10% de aditivo (Zeolita) y un curado en agua; para esto fue necesario recolectar muestras de este mineral, en un sitio geográfico específico, cuya proximidad fue indicada por el mapa de minerales del Ecuador, proporcionado por la Espol.

El protocolo de experimentación y ensayo se basó en una de las normas ASTM, la cual restringe todos los procedimientos y cálculos realizados. La ejecución del experimento se realizó en las instalaciones del laboratorio de minerales de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra y en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de Producción. Los especímenes desde su estado natural fueron reducidos a polvo a través de ciclos de moliendas y tamizados. Se elaboraron probetas con forma y composición específica, en las mismas que el porcentaje de cada componente y su tiempo de curado en agua, representan las variables de entrada del experimento, además se tuvo otras variables cuyos valores se mantuvieron constantes la relación agua/mezcla y la granulometría del material. Dentro de la experimentación, el protocolo diseñado enunció un cronograma de ensayos de resistencia a la compresión (variable de respuesta), que generó información suficiente para el proseguir con la siguiente etapa de este estudio.

Análisis Estadísticos de Datos reales y Simulación: mediante cálculos necesarios se validó la hipótesis estadística de investigación a través del método más idóneo para la experimentación. Para dicho análisis estadístico en particular se usó un programa de computadora de alta confiabilidad, el cual proporcionó valores de la media, varianza y errores estándar; que asu vez se compararon con el material de

referencial (0% puzolana) para cada una de las condiciones de curado establecidas. Estos cálculos generaron datos depurados que se implementaron en el programa de simulación, el mismo que proporciona valores teóricos de esfuerzos que también fueron añadidos a la tabla de comparación general, permitiendo una apreciación puntual del error en los resultados.

Análisis de Resultados y Conclusiones: las tablas de resultados mostraron los cambios de las propiedades y porcentajes de error; de aquí se deduce la relevancia del proyecto y aporte científico que representa para las nuevas generaciones y la comunidad industrial en general.

En lo técnico, luego de haber hecho el curado para las distintas mezclas y considerando los diferentes días de ensayo, físicamente en lo posterior se podrá realizar microscopía y difracción (SEM-EDX y XRD) (estudios que no se incluyen) para poder cuantificar las distintas fases y sus distribuciones siendo la función de respuesta la resistencia a la compresión uniaxial al tiempo de ensayo.

1.4. Estructura del proyecto

El capítulo 1 incluye las generalidades, y se destacan varios puntos de importancia, tales como, planteamiento del problema que hace referencia a la necesidad o aspiración que se intenta satisfacer, que

en este caso fue observar la influencia de la zeolita adicionada al cemento tipo I; y las justificaciones que explica las causas y razones de este estudio.

Este capítulo también contiene objetivos, tanto generales como específicos, los cuales denotan la relevancia final de esta investigación. Aquí lógicamente se incluye la metodología a usar y estructura de contenido de esta tesis.

El capítulo 2 denominado marco teórico, explica los diferentes conceptos y definiciones de materiales, equipos y herramientas utilizadas o concernientes a esta investigación. Esta sección procura ampliar el horizonte técnico para realizar conclusiones con una buena referencia. Cada sección de esta parte ayuda a interpretar los resultados de una manera más objetiva.

El capítulo 3, resulta de gran importancia porque describe el procedimiento experimental desde sus inicios hasta sus mayores alcances, es decir, aquí se explica de forma detallada, como se hace y por que se realiza cada actividad experimental. En esta sección se define el diseño del experimento en sí, sustentado o demostrado bajo conceptos teóricos básicos, cada exclusión o adhesión de información o procedimiento, de modo que se pueda en cualquier momento saber que datos se manejan y que procedimiento exacto se está aplicando.

El capítulo 4 es llamado de resultados, es decir, incluye lo generado por el protocolo descrito en el capítulo anterior. La parte relevante de esta sección es el estudio estadístico individual y de grupo de los porcentajes de concentración de zeolita, sometidos a diferentes tiempos de curado en agua. Lo que a su vez representa la fuente o base para el análisis computacional de simulación, que ajusta el modelo de comportamiento de las propiedades finales del cemento.

Al final, el capítulo 5 desarrolla las conclusiones y observaciones obtenidas en el transcurso del presente trabajo, así como se expondrán las posibles recomendaciones para este y futuros trabajos de similares características.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades sobre el cemento

Cemento natural. Cemento hidráulico producido por calcinación de una piedra caliza arcillosa, formada naturalmente, a una temperatura debajo del punto de fusión y luego molida hasta un polvo fino. Se dice hidráulico porque fragua y endurece por interacción química con el agua y que es capaz de hacerlo bajo el agua [1].

De manera general, se puede decir que es un material aglomerante y aglutinante capaz de unir fragmentos de propiedades físicas diferentes y así formar un sólido único o piedra artificial.

Cemento pórtland. Cemento hidráulico producido por pulverización de clinker de cemento pórtland y usualmente conteniendo sulfato de calcio [2].

Clinker de cemento pórtland. Clinker parcialmente fundido por procesos de calcinación, consistente predominantemente de silicatos cálcicos hidráulicos cristalinos [3].

Cemento pórtland puzolánico. Cemento hidráulico consistente de una mezcla uniforme e íntima de cemento pórtland o cemento pórtland de escoria de altos hornos y puzolana fina producida por molido conjunto de clinker de cemento pórtland y puzolana, mezclando cemento pórtland o cemento pórtland de escoria de altos hornos y puzolana finamente molida o una combinación de molido conjunto y mezclado en el cual, la cantidad de puzolana esta dentro de límites especificados [4].

Pasta de cemento. Mezcla endurecida o no de material cementante hidráulico finamente molido y agua [5].

Mortero. Mezcla de material cementante hidráulico finamente molido, árido fino y agua, en estado endurecido o plástico. Término relacionado con mortero hidráulico [6].

Reseña histórica del cemento:

El origen del cemento es tan antiguo, como la humanidad ya que la necesidad que ha tenido el hombre de construir su propio hábitat, así

como las estructuras necesarias para su progreso, ha constituido el factor principal en la búsqueda de materiales para esta finalidad.

El cemento se inventó hace aproximadamente 2000 años por los romanos, de forma totalmente fortuita, como ha ocurrido con otros inventos. Al hacer fuego en un agujero recubierto de piedras, consiguieron deshidratar y descarbonatar parcialmente las piedras calcáreas o el yeso, convirtiéndolas en polvo que se depositó entre las piedras. Al llover, dicho polvo unió las piedras entre sí. Los egipcios utilizaron un cemento fabricado con yeso impuro calcinado, que sirvió para unir los bloques de piedra en la construcción de las pirámides. En la edad media hubo una disminución general en la calidad y uso del cemento por lo que con el pasar del tiempo el secreto de la durabilidad del mismo se perdió y tan solo fue posible fabricar cemento de mediana calidad. En 1756, Jhon Smeaton descubrió que los mejores morteros se obtenían al mezclar caliza con un 20-25% de materia arcillosa. Posteriormente en 1824, Josep Aspin conoció los estudios de Smeaton y continuó las investigaciones llegando a obtener un material que al mezclarlo con el agua reaccionaba dando lugar al endurecimiento de la pasta producida. Este material endurecido presentaba un aspecto similar al de unas piedras de construcción extraídas en Inglaterra, en la localidad de Pórtland. El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por Isaac Johnson quien

quemando una mezcla de arcilla y caliza hasta la formación del clinker, es decir, pudo fijar las proporciones de materias primas a utilizar, así como la temperatura de cocción, con lo que se asistió al inicio la industria de cemento pórtland. Actualmente, se sabe que obtenemos el clinker quemando una mezcla minuciosa no solo de calcáreos y arcillas sino que se añade otros materiales que contienen sílice y alúmina básicamente; además, que hay tres procesos de fabricación de cemento que utilizan hornos rotativos desarrollados en Inglaterra en 1855: vía seca, vía seca con precalentamiento / pre calcinación y vía húmeda [7].

La palabra cemento puzolánico, proviene del nombre de Puzzuoli, ciudad que queda en el golfo de Nápoles, Italia, en este sitio los romanos extraían el material volcánico que mezclaban con la cal, estos utilizaron éste cemento para construir el coliseo de Roma. Los griegos obtenían estos materiales en la Isla Santorin.

Tipos de cemento pórtland

Como antes se mencionó, los cementos hidráulicos pórtland es el término generoso para describir cementos que se sedimentan y se endurecen reaccionando químicamente con agua. Los cementos pórtland son usados en todos los aspectos de construcciones de concreto. Diferentes tipos de cementos pórtland son fabricados para

los diversos requerimientos físicos y químicos de variadas aplicaciones o propósitos puntuales. Para esto se cuenta con algunas especificaciones de la ASTM (American Society for Testing and Materials); que para el cemento pórtland tiene la norma ASTM C150, la misma que clasifica y denota con números romanos cinco tipos de cemento diferentes mostrados a continuación:

- Tipo I Normal, no da propiedades específicas.
- Tipo II Moderada resistencia a sulfatos.
- Tipo III Alta resistencia temprana.
- Tipo IV Bajo calor de hidratación.
- Tipo V Alta resistencia a los Sulfatos.

Los cementos pórtland especiales se obtienen agregando al cemento pórtland normal otros componentes como la puzolana. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características que lo diferencian del pórtland normal, existen varias denominaciones entre ellas:

- Pórtland férrico
- Cemento blanco
- Cemento puzolánico
- Cemento siderúrgico
- Cementos de fraguado rápido

Cemento aluminoso

Cemento pórtland adicionado

Resistencia mecánica:

Es la propiedad más importante del cemento endurecido en cuanto a los requisitos estructurales, la resistencia mecánica debe ser a la tracción, flexión y compresión. Es un requisito que debe cumplir todo cemento, todo se mide a la compresión y mide la calidad del cemento. La resistencia se hace sobre la pasta de cemento = agua + cemento, sobre cubos de 2"x2"x2", además la mezcla que se utiliza para estos cubos debe ser de proporción 1:3 en volumen y a los 28 días que es cuando el cemento adquiere la una resistencia cercana al 100% [8].

La resistencia mecánica del cemento es la propiedad más importante para el estudio del cemento desde el punto de vista estructural e ingenieril, existen dos teorías sobre el desarrollo:

Le Chatelier (1882): Se basa en que los productos de hidratación tienen solubilidad más baja que los compuestos originales, por lo tanto, después del fenómeno de hidratación se forman cristales alargados y entrelazados, que le dan la propiedad de adhesión y cohesión a la pasta.

Michaelis (1893): El agua saturada de cal, ataca a los silicatos, produciendo silicatos hidratados de calcio (masa gelatinosa), debido a

la pérdida del agua, posteriormente se produce entonces un endurecimiento gradual, el cual le da la propiedad de cohesión a la pasta [8].

2.2. Tipos de curado

El curado es el mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el cemento a edades tempranas, de manera que este pueda desarrollar las propiedades para la cual fue diseñada la mezcla. El curado comienza inmediatamente después de vertido la pasta en el molde, de manera que el cemento pueda reaccionar y desarrollar las propiedades deseadas.

Sin humedad necesaria, los materiales cementantes en la mezcla, no pueden reaccionar para formar un producto con la propiedad mecánica deseada. El secado puede eliminar el agua necesaria para esta reacción química denominada hidratación y por lo cual el cemento no alcanzará sus propiedades potenciales [7].

Tanto en terreno como en laboratorio, se ha comprobado que un curado deficiente disminuye la resistencia del cemento. Varios estudios demuestran que probetas sin curar, pueden registrar disminuciones de resistencia a compresión a 28 días, de hasta un 40% con respecto a probetas curadas adecuadamente. También se ha determinado que mientras mayor es el retraso en el inicio del curado,

mayor será la pérdida de resistencia, observándose por ejemplo, que probetas curadas a partir del tercer día de edad alcanzan sólo un 85% de su resistencia nominal. Aunque aún no existe una conclusión clara al respecto, la pérdida de resistencia a 28 días de edad por efecto del curado parece estar relacionada directamente con las condiciones de humedad de los tres primeros días y en menor medida con la temperatura. Se debe tener presente que la resistencia a la flexotracción es mucho más sensible a las condiciones de curado y contenido de humedad de las probetas al momento del ensayo que en el caso de la compresión [9].

Los métodos para el proceso de curado pueden ser divididos en tres grupos:

Métodos que mantiene la humedad en el cemento por cortos periodos de endurecimientos. Estos pueden ser estancamiento o inmersión, roseado y revestimientos mojados; el cual fue usado por este estudio.

Métodos que reducen la pérdida de humedad para la superficie del cemento y estos pueden ser recubrimiento de papel o plástico y la aplicación de membranas.

Métodos que aceleran la ganancia de resistencia suministrando calor y esto se lo puede realizar mediante vapor de caldera, serpentín calefactor o eléctricamente calentadas.

2.3 Aditivos

De manera general se denota que son productos que se adiciona al cemento o al mortero antes o durante su mezcla.

El objetivo de utilizar un aditivo es producir mejoras en la mezcla, según sea la necesidad que no se puede obtener mediante el ajuste de la proporción de la mezcla básica, sin producir un efecto adverso en cualquier otra característica del cemento; se empezó a usar mediados siglo XX y se adiciona al agua o a la mezcla siempre en un porcentaje al peso del cemento [10].

Clasificación de los Aditivos:

- **Acelerante:** rápido fraguado y obtención de resistencia a temprana edad (túneles y puentes).
- **Permeabilizantes:** se adiciona a la mezcla para disminuir el paso de agua a través de los elementos fabricados (tanques, piscinas, baños, etc.).
- **Retardantes:** se utiliza en las centrales de mezclado de cemento, para reducir el tiempo de fraguado y permitir el transporte y bombeo.
- **Plastificantes:** cuando hay necesidad de reducir el agua de mezclado.

- Incorporadores de aire: disminuyen la porosidad en el momento del fraguado y adicionan manejabilidad.

Puzolanas.

"Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos quienes por sí solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes"[11].

La puzolana es una piedra de naturaleza ácida, muy reactiva, muy porosa y puede obtenerse a bajo precio. Un cemento puzolánico estándar contiene aproximadamente:

55-70% de clinker pórtland.

30-45% de puzolana.

2-4% de yeso.

Puesto que la puzolana se combina con la cal (Ca(OH)_2), se tendrá una menor cantidad de esta última. Pero justamente porque la cal es el componente atacado por las aguas agresivas, el cemento puzolánico será más resistente al ataque de éstas. Por otro lado, como el $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ está presente solamente en el componente constituido clinker, la colada de cemento puzolánico desarrollará un menor calor

de reacción durante el fraguado. Este cemento es por lo tanto adecuado para ser usado en climas particularmente calurosos o para coladas de grandes dimensiones [11].

Tipos De Pozolana.

Las pozolanas se dividen en dos grandes grupos: las pozolanas naturales y las pozolanas artificiales, las mismas que se describen a continuación.

Pozolanas Naturales.

Son principalmente rocas tobáceas, volcánicas vítreas de naturaleza traquítica alcalina o pumítica. También son pozolanas naturales las harinas fósiles de naturaleza silícica como la diatomita.

Pozolanas Artificiales.

Son determinados subproductos silíceos vítreos, como las cenizas volantes. También pueden serlo ciertas arcillas térmicamente activadas denominadas escorias metalúrgicas.

Ventajas de la Pozolana.

Las ventajas específicas más importantes que la mayoría de las pozolanas ofrecen al cemento sobre el resto de aditivos, se detallan a continuación:

- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia al agua de mar.
- Aumento de impermeabilidad por la reducción de grietas.
- Reducción del calor de hidratación.
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la abrasión.
- Aumento en la durabilidad del cemento.
- Disminuye la necesidad de agua en la mezcla.

2.3.1 Zeolitas

La zeolita es un tipo puzolana natural, también se las conoce con el nombre de tobas volcánicas y se forman por las erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo.

Las zeolitas comprenden un grupo de aluminosilicatos cristalinos hidratados de aluminio, cationes alcalinos y alcalino-térreos; con ordenación tridimensional (tectosilicatos). Se caracterizan por poseer una estructura abierta y por su capacidad para incorporar y ceder agua y cationes en su estructura, sin alteraciones importantes en la misma. Esta propiedad es la que da origen a su

nombre, que se deriva de las palabras griegas, **zeo**: que ebulle, y **lithos**: piedra [10].

En esta armazón el Al sustituye al Si en el centro de los tetraedros estructurales, y los cationes de intercambio se sitúan en diversas posiciones equilibrando las cargas eléctricas; ocasionalmente otros cationes pueden ocupar posiciones estructurales o de intercambio.

Constituyen el grupo mineral más variado y extenso de los que forman la corteza terrestre [10].

Al deshidratarse desarrollan, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimos de 3 a 10 Å, que forman cavidades ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento, lo que permite el intercambio iónico y la deshidratación reversible.

La capacidad de intercambio iónico de las zeolitas, combinada con su alta reactividad puzolánica, ejerce una influencia favorable en sus mezclas con cemento pórtland, cuyas características y evoluciones han sido estudiadas a diferentes edades, por varios autores (Costafreda, J. L., Calvo, B. y Estévez, E., 2007). El estudio del comportamiento del sistema de reacción cemento-zeolita natural se ha llevado a cabo por medio de los datos

obtenidos de los ensayos físicos-mecánicos, difracción de rayos x, fluorescencia de rayos x y microscopía electrónica de barrido en otras investigaciones [10].

Características

Mineralógicamente, la zeolita se describe desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, hábitos y tamaño de cristal o grano, densidad, color, resistencia a la corrosión y abrasión. Otro punto de vista, sería su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta también el efecto que causa su color, viscosidad, área superficial, dureza, etc., en la mezcla que esta se incluya.

La aplicación de zeolitas naturales hace uso importante de sus propiedades químicas, que generalmente son intercambio iónico, absorción, deshidratación y rehidratación. Estas propiedades dependen de la estructura del cristal de cada especie y su composición catiónica, por tal motivo se la puede utilizar en diferentes áreas como las que se mencionan a continuación:

- La agricultura.
- La acuicultura.

- Nutrición animal.
- Intercambiadores iónicos.
- Como catalizador en la industria química.
- En la construcción.

Las zeolitas, se clasifican de manera general en nueve principales grupos, las mismas que surgen en las rocas sedimentarias y son [10]:

- Chabazita
- Clinoptilolita
- Erionita
- Mordenita
- Estilbita
- Ferrierita
- Filipsita
- Huelandita
- Laumantita

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO

3.1. Diseño experimental.

En primera instancia, la recolección o extracción de rocas de zeolita en estado natural se lo hizo en el sector Casas Viejas, vía Guayaquil-Progreso, Provincia del Guayas. Aproximadamente 25 Kg, de los cuales se tomó una tercera parte para su estudio.

El estudio experimental se realizó basándose en la Norma ASTM C-109/C 109M, con ciertas variantes. La principal adaptación de la mencionada norma es que en lugar de morteros (Cemento + arena), lo que se hace es una pasta de cemento compuesto (Cemento + H₂O + Aditivos).



FIGURA 3.1 ZEOLITA EN ESTADO NATURAL

Equipos utilizados para preparación y ensayo de las probetas.

Dispositivos para medir el peso; este aparato se basó en especificaciones según la norma ASTM/**C105**. La balanza electrónica fue evaluada para la exactitud e inclinación en una carga total de 2000g., de marca SARTORIUS y certificada ISO 9001.

Vaso graduado; de apropiada capacidad (lo suficientemente largo para medir el agua a utilizar en la mezcla), para entregar el volumen indicado. La variación permisible fue de ± 2 ml., para vasos de 5mL, 250mL y 500mL., en los que las líneas de graduación eran circulares y numeradas.

Moldes de las muestras; son moldes (aleación de cobre) resistentes al ataque químico del cemento, que tuvieron 3 compartimientos para cubos de 50 mm. con ajuste apropiado, además el acople de las mitades de cada molde se unieron exactamente para evitar derrames y al final rebabas. Los lados de los moldes eran suficientemente rígidos para prevenir la propagación de fisuras; además las caras interiores del molde son superficies planas y se ajustaron a las tolerancias de la tabla siguiente:

TABLA 1.
TOLERANCIA DE LOS MOLDES UTILIZADOS.

Parámetros	Moldes de los cubos.			
	Nuevos		Usados	
Superficies de los lados	<0,025mm		<0,05mm	
Distancia entre lados opuestos	50	±0,13mm	50	± 0,50mm
Altura de los compartimientos	50	+0,25mm	50	+ 0,25mm
		-0,13mm		- 0,38mm
Ángulo entre caras adyacentes	90	± 0,5°	90	± 0,5°

SEGÚN DISEÑO ORIGINAL: NORMA ASTM. C109/C 109M-02

Mezclador, tazón y paleta; el mezclador funciona con corriente eléctrica y está provisto de una paleta y un tazón para el mezclado de los materiales de las muestras. Marca Hobart

Mesa de flujo y flujo en los moldes; esta secuencia fue rigurosa para así cumplir los requerimientos especificados en la ASTM C 230.

Paleta manual; tiene una hoja de acero de 100 a 150 mm. en longitud, y con filos rectos.

Máquina de pruebas; la usada fue una máquina de ensayos de compresión universal, con suficiente abertura entre las caras superior e inferior para poder utilizar aparatos de verificación; se usaron dos máquinas hidráulicas, la primera para los ensayos de las muestras a los 4 y 7 días de curado, con capacidad hasta 60.000 Kg. y la segunda con capacidad hasta 300.000 Lbs., para los demás ensayos.

Materiales para la preparación de las muestras.

El material a utilizarse para la preparación de la pasta de cemento compuesto incluyó:

- Cemento pórtland tipo I.
- Zeolita natural ecuatoriana.
- Agua.

Temperatura y humedad.

- La temperatura ambiente del lugar, del material seco, moldes, embases y el tazón para mezclar, se mantuvo entre 24.0 ± 1 °C. La temperatura del agua a mezclarse fue de 23.0 ± 2 °C.
- La humedad relativa del laboratorio se mantuvo alrededor del 75%.

El Experimento desarrollado consta en general de tres procesos o etapas detallados a continuación: proceso de molienda, mezclado con elaboración de probetas y proceso de ruptura de especímenes.

Proceso de molienda.

El objetivo de esta etapa es lograr un tamaño de partícula de 45 micras, para ello las muestra de Zeolita en bruto primero fueron reducidas con golpe de martillo a trozos de aproximadamente 5 cm. Luego, estas fueron conducidas poco a poco a un triturador de mandíbulas (primera máquina del proceso), por un periodo de tiempo

de 2 min., esto era llenado y triturado en porciones hasta obtener la aproximada cantidad requerida.



FIGURA 3.2 MOLINO DE MANDÍBULAS

Se pesó y se usó la cantidad requerida de zeolita, es decir, el total para el grupo respectivo.



FIGURA 3.3 BALANZA DE CARÁTULA

En la trituradora de mandíbula los fragmentos de roca salieron a un tamaño aproximado de 1cm y fueron cuarteados antes de pasar al molino de disco donde proceso que tarda aproximadamente de 5min.

**FIGURA 3.4 CUARTEO****FIGURA 3.5 MOLINO DE DISCOS**

La muestra una vez salida del molino de disco, el último paso para reducir más el tamaño de grano, era introducirla al Molino de Bolas durante un periodo de 40 min, para posteriormente volverlo a cuartear e introducir en el molino de bolas nuevamente.

**FIGURA 3.6 MOLINO DE BOLAS**

Una vez terminado todo este proceso se pesó 100gr de zeolita y se tamizó en los tamices de (14, 18, 20, 40, 50, y fondo) durante 15 min, y se obtuvo los siguientes tamaños de partícula como se muestra en la figura 3.7.



FIGURA 3.7 TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE MUESTREO



FIGURA 3.8 TAMICES # 14, 18, 40, 50 Y FONDO



FIGURA 3.9 EQUIPO CON TAMIZ 325 Y DE FONDO

De los 100 g. pesados, el 60% de la muestra pasó al fondo del equipo de tamizado, por lo que se dio por terminada la molienda. Si no hubiese sido así, se debía haber repetido todos los pasos anteriores.



FIGURA 3.10 ZEOLITA CON GRANULOMETRÍA FINAL 45 µm

Sin embargo, se realizó una última pasada del material por el molino de bolas y se volvió a pasar por los tamices 50, 100, 200, 325 y fondo cuyo material pasante presenta los siguientes tamaños de grano para cada uno de ellos como se muestra:

TABLA 2

TABLA DE TAMICES Y TAMAÑO DE PARTÍCULAS

TAMIZ N°	TAMAÑO DE PARTÍCULA
14	1,4cm
18	40mm
40	425µm
50	300µm
100	150µm
200	75µm
325	45µm

FUENTE: NORMA ASTM C109

Modelos estadísticos

Un modelo importante usado en este estudio es el modelo estadístico; simbólicamente se expresa en forma de ecuación o igualdad, que se emplea en todos los diseños experimentales y en la regresión para indicar los diferentes factores que modifican la variable de respuesta. En los modelos estadísticos se usó ciertos conceptos mencionados a continuación:

1. Tratamientos: son el conjunto de circunstancias creadas para el experimento, en respuesta a la hipótesis de investigación.
2. Factores: es un grupo específico de tratamientos, las diversas categorías de un factor se denominan niveles del factor.
3. Réplicas: es la repetición independiente del experimento básico. De tal manera que cada tratamiento se aplica de manera independiente a dos o más unidades experimentales.
4. Error experimental: es la diferencia en las respuestas entre unidades experimentales, atribuibles sólo al error experimental.
5. Análisis de varianza: considera el problema de decidir si las diferencias observadas entre más de dos medias muestrales se puede atribuir al azar o si hay diferencias reales entre las medias de las poblaciones muestreadas

6. Hipótesis estadística: es una afirmación o conjetura acerca de la distribución de una o más variables aleatorias.
7. Unidad observacional: es la unidad más pequeña del material de estudio en el cual se realizan las mediciones, se conoce también como unidades de muestreo.
8. Unidad experimental: es unidad más pequeña del material de estudio que comparte un tratamiento común.
9. Diseño aleatorio: cuando todas las variaciones causadas por factores ajenos no controlados pueden incluirse como casos fortuitos [13].

Análisis de varianza de un sentido.

Es llamado también modelo estadístico lineal, resulta de analizar la varianza de un factor, donde una sola variable independiente está representada por más de dos tratamientos; aquí la función de respuesta se expresa de la siguiente manera:

$$X = \mu + \alpha + e$$

Donde:

μ , es la media

α , representa el efecto del tratamiento

e , incluye variables aleatorias independientes con media cero y varianza común σ^2

El ajuste lineal o regresión lineal modela la relación entre una variable dependiente **X**, variables independientes **Y** y una parte aleatoria, la secuencia se la denota así:

$$X = \beta_0 + \beta_1 Y_1 + \beta_2 Y_2 + \dots + \beta_p Y_p + \epsilon$$

Donde:

β_0 , es el término constante o la intersección; β_i son parámetros de cada variable independiente; **p** es número total de parámetros independientes de la regresión; ϵ término de parte aleatoria.

Es decir, el modelo lineal relaciona la dependiente X con n variables explicativas X_n de cualquier forma, que generan un campo de parámetros β_n desconocidos, además de que ϵ incluye todo factor aleatorio de la realidad no controlable y tal vez ni observable que se asocia con el azar, lo que da al modelo el tono estocástico. Un campo simple de dos variables sería la ecuación de una recta.

Se define la condición de la hipótesis alterna (H_a) cuando solo existen algunas diferencias entre las medias de los tratamientos es lo que llaman modelo completo, sería $H_a: \alpha_i \neq 0$ por lo menos para un valor i.

Se establece la condición de hipótesis nula cuando todas las observaciones pertenecen a la misma población con media μ , esto sería $H_0: \alpha_i = 0$ para todo valor de i hasta t.

La ventaja importante de este modelo es que el investigador realiza un análisis en relación a las diferencias observadas considerando todos los tratamientos en un solo cálculo.

La desventaja de este método es que solo considera a un factor como el responsable de la diferencia entre las medias entonces de alguna manera se debe asegurar que los demás factores no intervienen en el fenómeno observado.

Diseño Factorial.

Es un diseño experimental completo, en el que se utilizan todas las combinaciones posibles de los valores seleccionados de las variables independientes. Los diseños factoriales se utilizan para manipular las variables independientes simultáneamente y permiten evaluar por separado los efectos de cada variable independiente al igual que la interacción entre ellas. Una realización de un experimento está conformada por $b_1 * b_2 * \dots * b_r * \dots * b_p$ combinaciones de tratamientos.

Un diseño factorial puede utilizar dos o más variables independientes con cualquier cantidad de niveles o valores para determinar estadísticamente sus efectos. Por lo general los diseños factoriales se representan como diseños 2X2, 2X3X4, 2X4X8X5, o también AxB, AxBxC, etc [13].

Cada dígito representa una variable independiente y su valor representa la cantidad de niveles o valores que posee cada variable independiente, así en un diseño factorial 2X2 existen dos variables independientes con dos niveles cada una de ellas. A mayor cantidad de variables independientes y niveles, existe mayor dificultad para desarrollar y controlar el experimento.

Las ventajas de los diseños factoriales es que analizan la interacción entre las variables, analiza simultáneamente dos o más variables independientes en un solo experimento y permite una mejor comprobación de hipótesis.

Las desventajas son que incrementan en el número de unidades experimentales necesarias para llevar a cabo el estudio completo y luego que al incrementarse el número de niveles de algunos factores o el número de factores es grande, puede ser difícil la detección de efectos significativos en el experimento.

Principios de simulación.

La inelasticidad computacional trata con los componentes básicos de elasto-plásticos y los modelos constitutivos para el desarrollo de materiales. En particular, la teoría de plasticidad necesitada cubre lo clásico y la plasticidad avanzada; esta última por lo que se planea la implementación numérica de estos modelos. Se desarrolló una

comprensión de los componentes básicos que se involucraron en la teoría de plasticidad en el régimen de tensión infinitesimal, para ser capaz de desarrollar algoritmos de integración eficaces y robustos para avanzados modelos de plasticidad, que serán usados dentro de los procedimientos de elemento finito.

3.2. Preparación y ensayos de probetas.

Composición de la mezcla.

Como unidades experimentales se crean dos mezclas, con diferentes porcentajes cada una; para este caso particular se realizó una mezcla de 10% y otra con 12.5% de zeolita natural; porcentajes en relación del peso total de 300 gramos de cada probeta experimental.

La proporción del 10% de zeolita en masa para la primera mezcla, corresponde a 30 g, entonces la cantidad de cemento usado para esta mezcla es de 270 g. Así mismo la segunda mezcla del 12.5% de zeolita en porcentaje de masa, lo que corresponde a 37,5 g. Por lo que la cantidad de cemento para esta mezcla fue de 262,5 g. Como parámetro fijo se usó una relación de agua/cemento de 0.3 para ambas mezclas.

Estos valores mencionados corresponden para una probeta, unidad experimental de cada mezcla antes descrita, pero debido a que las

pruebas de ruptura para el caso de la mezcla al 10% se hicieron en periodos de 7,14,21,28 días después del desmolde, la norma afirma que se debía tener tres datos por día, entonces se necesita crear un total de 12 cubos normalizados, lo mismo se aplicó para la mezcla del 12,5%, cuyos periodos de tiempo para ruptura cambiaron a 4, 11, 18, 25 días de curado, las cantidades individuales y totales se definen en la siguiente tabla:

TABLA 3
PORCENTAJES DE MEZCLA PARA ESPECÍMENES

Mezcla	Cantidad de Unidades Experimentales	Concentración de Zeolita (%)	Cantidad de Zeolita (gramos)	Cantidad de Cemento (gramos)	Peso total (g.)	Relación agua/ cemento	Cantidad de Agua (gramos)
1	12	10	360	3240	3600	0.3	1080
2	12	12,5	450	3150			1080

Preparación de moldes.

Los moldes usados son normalizados y poseen 3 compartimientos cúbicos. El material de los moldes es de una aleación de cobre dura, resistente al ataque de la pasta de cemento, y con lados lo suficientemente rígidos para prevenir extensiones y ondulamientos.

La preparación de los moldes se siguió según lo establecido en la norma internacional ASTM C-109 [12], una vez colocado el molde

sobre su placa base, se aplicó una fina capa de aceite usando una pequeña estopa, luego se removi6 cuidadosamente con un pa6o seco el exceso de aceite o grasa de la superficie del molde y de la placa base.

Se sell6 las superficies donde se unen las mitades del molde aplicando una capa de grasa ligera como “petrolatun”. La cantidad era suficiente para extruirse ligeramente cuando las dos mitades se ajustaron.



FIGURAS 3.11 PREPARACI6N DE MOLDES

Procedimiento para la mezcla de pasta de cemento.

Una vez ya definidas las cantidades exactas de componentes de las mezclas (cantidades descritas en la tabla anterior), siguiendo la norma que restringe a cierto protocolo, se procedi6 como se muestra a continuaci6n:

Se procedió a encerar la balanza electrónica tomando en cuenta el peso del recipiente.



FIGURA 3.12 BALANZA ELECTRÓNICA ENCERADA

Se pesó en la Balanza electrónica el cemento en la cantidad indicada, dependiendo del porcentaje que se esté realizando.



FIGURA 3.13 PESADO DEL MATERIAL

De la misma manera se pesó la cantidad necesaria de zeolita para el tipo de mezcla que se realice. Se pesó también el agua requerida.

Antes de proceder a hacer la mezcla, se registró los datos de temperatura y humedad relativa del laboratorio, esto es muy importante por ser factores externos que pueden afectarla.



FIGURA 3.14 MEDIDOR DIGITAL DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.

Se colocó en la mezcladora el cemento y la zeolita por cerca de 10 minutos a velocidad baja para homogeneizar la mezcla.



FIGURA 3.15 MEZCLA HOMOGÉNEA CEMENTO-ZEOLITA EN SECO

Se apagó la mezcladora, se puso en velocidad uno, se encendió y agregó poco a poco el agua; una vez que le adicionó totalmente el material, se mantuvo la mezcladora a esta misma velocidad por 45 segundos.

Luego se detuvo la mezcladora para ponerla en velocidad dos y se encendió nuevamente para mezclar por 2 min, incluyendo los 45 segundos anteriores.



FIGURA 3.16 CEMENTO-ZEOLITA-AGUA EN LA MEZCLADORA

Los moldes se llenaron y apisonaron en capas simultáneamente. El apisonado fue lo suficiente para evitar burbujas en la probeta y el correcto llenado del molde. Las 4 rondas de apisonado de los moldes fueron completadas en un cubo antes de seguir con otro. Cuando el apisonado de la primera capa en todos los compartimentos esta completada, se llenó los compartimentos con el mortero sobrante y se volvió a apisonar de la misma forma. Además, mientras se llenaron los moldes, no se dejó de mover la mezcla.

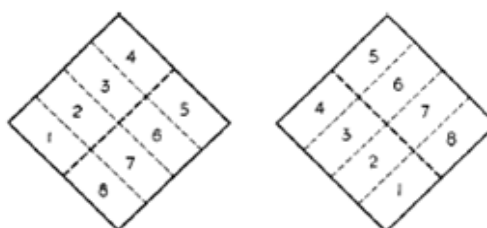


FIGURA 3.17 ORDEN DE APISONAMIENTO DE ESPECÍMENES



FIGURA 3.18 LLENADO DE MOLDES CON LA PASTA

Se compactó las probetas, dando pequeños golpes en la base y lados de la misma, para que salgan las burbujas que se podían haber formado en el interior al adicionar la mezcla.



FIGURA 3.19 COMPACTADO DE PROBETAS

Se dejó reposar las probetas por unos minutos, para luego retirar el exceso de mezcla de los moldes, esto para mejorar el acabado de la cara superior de los especímenes.



FIGURA 3.20 RETIRO DE EXCESO DE CEMENTO EN MOLDE.

Se cubrió las probetas con láminas de plástico para evitar que pierdan agua en exceso y se las dejó por 24 horas.



FIGURA 3.21 PROBETAS CUBIERTAS POR LÁMINAS DE PLÁSTICO

Procedimiento para desmolde.

- Se retiró el plástico colocado en los moldes el día anterior.
- Se eliminó el exceso de mezcla de la cara superior, para definir los bordes de la probeta.



FIGURA 3.22 RETIRO DE EXCESO DE MEZCLA SECA

- Se abrió los moldes cuidadosamente.



FIGURA 3.23 DESMOLDE

- Las caras superiores de las probetas se marcaron con etiquetas que incluyen el código establecido (G1/10%/x día) por el coordinador de tópico.
- Se pesó cada una de las probetas, para luego
- Sumergirlas en agua.

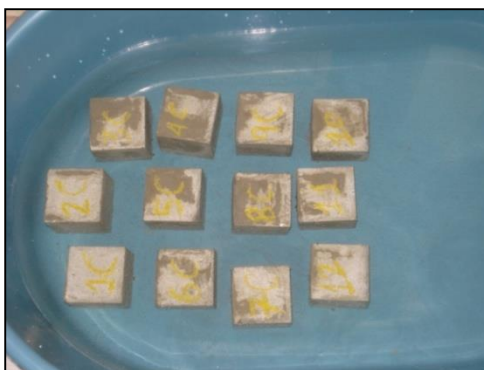


FIGURA 3.24 PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA

Ensayos y rupturas de probetas.

Una vez realizado todo el procedimiento para elaborar las unidades experimentales, se implementó el cronograma de ensayos de compresión definido en la norma que se ha venido usando; en consecuencia para la adición del 10% de zeolita se aplicó periodos estándares, mientras que para la validación del 12,5% se aplicó periodos intermedios de tiempo para su ruptura. A continuación se tabula un esquema para tiempos de curado:

TABLA 4

TABLA DE PORCENTAJES Y DÍAS DE CURADO

Porcentaje de Zeolita	Días de Curado
10 %	7
	14
	21
	28
12.5 %	4
	11
	18
	25

Procedimiento para compresión.

- El día correspondiente se eliminó el exceso de agua de las probetas para pesarlas y proseguir con el ensayo.
- Se encendió y enceró el equipo de ensayo universal.
- Se enceró el medidor de deformación también.
- Luego se midió las dimensiones de las probetas
- La probeta fue colocada en el equipo de tal forma que las caras lisas del mismo estén en contacto con las cara superior e inferior de la prensa respectivamente.

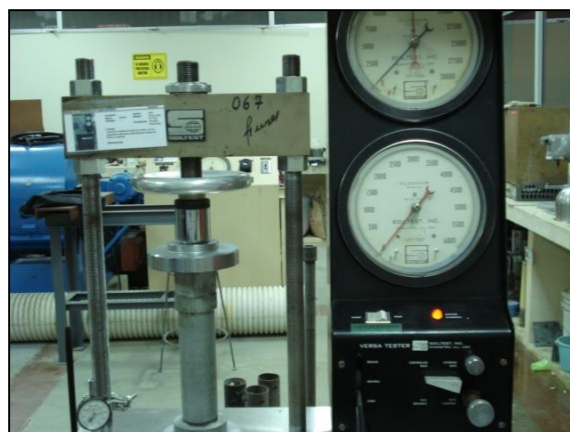


FIGURA 3.25 MÁQUINA PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Se aplicó la carga y se llevó nota de los valores que resulten a cada intervalo indicado de deformación.



FIGURA 3.26 INDICADOR DE FUERZA TIPO CARÁTULA

El hecho importante fue el tabular el valor más exacto de la carga que produce la ruptura de cada una de las probetas.



FIGURA 3.27 RUPTURA DE PROBETAS

3.3. Simulación computacional

El propósito principal de esta tesis es simular un comportamiento desarrollado espontáneamente, que responde solo a las características artificiales o naturales de sus componentes, entonces es importante explicar los parámetros necesarios y que a su vez generaron la curva esfuerzo-deformación.

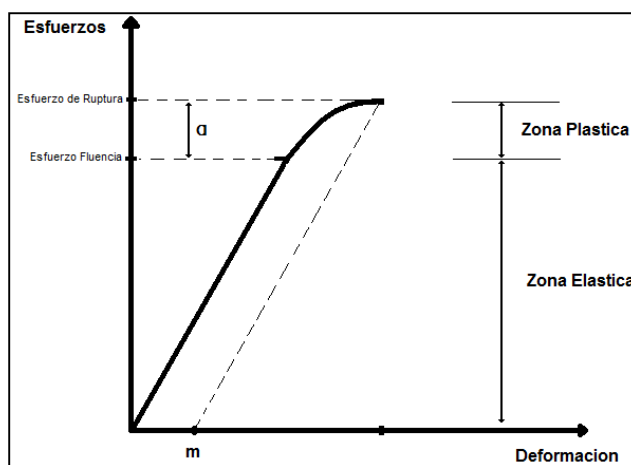


FIGURA 3.28 ESQUEMA ESFUERZO-DEFORMACIÓN

De manera general, la figura 3.28 expresa cómo reacciona un material sometido a una carga, para este caso la probeta no está confinada y la fuerza aplicada es axial. Entonces a medida que aumenta la carga se produce cierta deformación, la misma que por cuestiones de estudio fue marcada a ciertos valores equidistantes; para que a través de la ecuación sencilla **Esfuerzo = carga / deformación**, se obtenga la función de respuesta que es el esfuerzo graficado para cada punto de deformación alcanzado. Pero en una investigación de este nivel son necesarios más conceptos y herramientas que nos hagan llegar a una conclusión confiable, por este motivo, todos los resultados serán generados mediante la aplicación de la teoría de Inelasticidad que por su parte incluye teoremas de la mecánica del continuo.

Mediante la teoría de mecánica del continuo se desarrollan relaciones unidimensionales, las que fueron llevadas a tres dimensiones usando un lenguaje tensorial, más las condiciones de borde apropiadas.

La deformación se define como el gradiente simétrico del desplazamiento, teniendo en cuenta que todo tensor tiene una parte simétrica y una parte anti simétrica.

Entonces la definición que se usó para estas relaciones es de la forma:

$$\sigma_{ij} = \phi_{ijkl}^{ex} : \varepsilon_{kl}$$

Este método se pudo considerar como un esquema iterativo que ayudará a desarrollar un esquema no lineal en tres dimensiones definiendo un residual que siempre está regido por una relación dada.

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

Donde (μ^*) es la solución y va a depender estrictamente del material.

El siguiente algoritmo implementado en Matlab, fue realizado bajo el método de Deformation Driven, debido a que básicamente solo se toma en cuenta las propiedades del material en un modelo no lineal, esto porque solo se debe a la respuesta del material bajo la influencia del aditivo (zeolita natural ecuatoriana) en los porcentajes requeridos.

En síntesis, el método implementa una herramienta matemática que ayuda a obtener representaciones gráficas del diagrama esfuerzo-deformación de la mezcla de cemento pórtland tipo1 adicionado con zeolita natural. Donde se detalla su comportamiento tanto en la zona elástica como plástica, delimitadas por el esfuerzo de fluencia indicado también en estas curvas.

El método matemático utilizado es el algoritmo Return Mapping (para endurecimiento Isotrópico) que al igual que ciertas funciones necesarias para su desarrollo, estuvo implementado en el utilitario Matlab.

Una parte fundamental es el uso del método de Newton-Raphson desarrollado en el algoritmo para la determinación de raíces no lineales o implícitas.

Para efectos de calcular los valores de corrección característicos del material se aplica las relaciones dadas mediante la teoría de inelasticidad que establecen que el valor del corrector plástico “m” puede ser determinado trazando una paralela a la curva de linealidad que corte con el eje x, este puede ser determinado teóricamente mediante la siguiente expresión :

$$m = \left[\frac{\text{Deformacion} * E_{\text{promedio}} - \sigma u}{E_{\text{promedio}}} \right]$$

El valor del intervalo de deformación máxima con respecto al módulo de fluencia “**a**”, es decir **a** es cuantas veces el esfuerzo máximo es más grande que el esfuerzo de fluencia; puede ser determinado con la siguiente correlación:

$$a = \left[\frac{\sigma_{maximo}}{\sigma_{fluencia}} \right] - 1$$

Algoritmo implementado en Matlab

```
%c$NEWTON RAPHSON NON-LINEAR HARDENING%
%Método de Newton-Raphson( José Camacho Palacios)%

clc;
clear all;
warning off

%Declaracion de variables y Constantes%
m=0.006406;
E=2804.6347;
a=0.21265;
tol=1e-15;
L(1,1)=0;

deltaepsilon=0.000006;
epsilon=0:deltaepsilon:0.03742633;
irango=0.03742633/deltaepsilon;

sigma=zeros(irango,1);
sigma(1,1)=0;
sigmay=zeros(irango,1);
sigmay(1,1)=71.7433;

%Estructura del Algoritmo%

for i=1:irango;

%PASO 1%
```

```
sigmatr(i,1)=sigma(i,1)+E*deltaepsilon;
```

```
%PASO 2%
```

```
Ftrial(i,1)=abs(sigmatr(i,1))-sigmay(i,1);
```

```
%Deformacion Plastica%
```

```
if Ftrial(i,1)>0;
```

```
    sql(1,1)=tol;
```

```
    for s=1:20
```

```
        SF(s,1)=sql(s,1)+L(i,1);
```

```
        H(i,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/SF(s,1))*((m-  
SF(s,1))/(m+SF(s,1))^2);
```

```
        r(s,1)=Ftrial(i,1)-sql(s,1)*(E+H(i,1));
```

```
        ir(s,1)=norm(r(s,1));
```

```
        if ir(s,1)<tol*ir(1,1)
```

```
            break
```

```
        end
```

```
%PASO 3%
```

```
    W=-
```

```
    1/2*(2*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*m^3+6*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*m^2*sql(s,1)+6  
*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*m^2*L(i,1)+6*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*m*sql(s,1)^2+1  
2*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*m*sql(s,1)*L(i,1)+6*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*m*L(i,1)  
^2+2*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*sql(s,1)^3+6*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*sql(s,1)^2*  
L(i,1)+6*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*sql(s,1)*L(i,1)^2+2*E*(m*SF(s,1))^(3/2)*L(  
i,1)^3+sql(s,1)*m^4*a*sigmay(1,1)+2*m^4*a*sigmay(1,1)*L(i,1)-  
3*sql(s,1)*m^2*a*sigmay(1,1)*L(i,1)^2-2*m^2*a*sigmay(1,1)*L(i,1)^3-  
6*sql(s,1)^2*m^3*a*sigmay(1,1)-  
6*sql(s,1)*m^3*a*sigmay(1,1)*L(i,1)+sql(s,1)^3*m^2*a*sigmay(1,1))/(m  
+sql(s,1)+L(i,1))^3/(m*SF(s,1))^(3/2);
```

```
    rdl(s+1,1)=-(r(s,1)/W);
```

```
    sql(s+1,1)=sql(s,1)+rdl(s+1,1);
```

```
end
```

```
dl(i+1,1)=sql(s,1);
```

```
L(i+1,1)=SF(s,1);
```

```
%PASO 4%
```

```
sigma(i+1,1)=sigmatr(i,1)-E*dl(i+1,1)*sign(sigmatr(i,1));
```

```

        sigmay(i+1,1)=sigmay(i,1)+H(i)*dl(i+1,1);
    else
        L(i+1,1)=0;
        sigma(i+1,1)=sigmatrinal(i,1);
        sigmay(i+1,1)=sigmay(i,1);

    end
end

%MUESTRA RESULTADOS%

%Muestra el Máximo Valor de Ruptura Teórico%
fprintf('El valor del Esfuerzo Máximo o Ruptura Teórico alcanzado es:
\n')
d=max(sigma)

%Muestra el Épsilon donde el Esfuerzo Teórico es Máximo%
fprintf('El valor de Epsilon correspondiente al Esfuerzo Máximo es:\n')
e=epsilon(find(sigma==max(sigma)))

%Ingreso de Valores de Deformación y Esfuerzo Experimental de la
Muestra en mención%
hold on

epsi=[0
0.00249509
0.00499018
0.00748527
0.00998035
0.01247544
0.01497053
0.01746562
0.01996071
0.02245580
0.02495088
0.02744597
0.02994106
0.03243615
0.03493124
0.03742633

];
esf=[0
0.996085

```

```

2.496517
6.367378
10.616500
15.886923
23.956472
31.962977
40.473829
48.480334
56.171622
63.043347
71.743329
77.228100
80.853092
86.999819
];

```

```

%Muestra la curva esfuerzo deformación teórica%
plot(epsilon+0.005',sigma,' b')
xlabel('EJE DE LAS DEFORMACIONES José Camacho P. ');
ylabel('ESFUERZOS ALCANZADOS');
title('CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN DE
G1/10%ZEOLITA/CURADO EN AGUA/7 DÍAS');
grid

```

```

%Muestra en la grafica los datos experimentales del día en mención%
plot(eps,esf,'*r');

```

```

%Muestra los Valores Interpolados en la Curva de Esfuerzos%
fprintf('Los Valores Teóricos Interpolados en la curva son: \n')
interp1(epsilon,sigma,eps)

```

Simbologías utilizadas en el programa.

m=0.0X.....Constante del material

E=XXXX.....Módulo de Young

a=0,X.....Constante del material

tol=1e-20.....Tolerancia

L(1,1)=0.....Inicialización de landa

Deltaepsilon.....Incrementos usados de épsilon
 épsilon.....Épsilon (deformación)
 irango.....Rango tomado (0 hasta eps max)
 sigma(1,1)=0.....Inicialización del esfuerzo normal
 sigmay=zeros(irango,1).....Inicio del esfuerzo de fluencia
 sigmay(1,1)=100.....Esfuerzo de fluencia inicial (100)
 sigmatrial.....Esfuerzo trial
 ftrial.....Fuerza trial

Descripción del proceso iterativo.

En el paso 1, se calculó el esfuerzo de prueba trial que es el resultado de sumar el esfuerzo previo más un incremento que esta dado por el producto de E (Módulo de Young) por deltaepsilon.

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

Luego, en el paso 2 se evaluó la condición que expresa que si el esfuerzo trial es mayor que el esfuerzo de fluencia, entonces se está en la zona plástica, por lo tanto se procede con la aplicación del método de Newton –Raphson, caso contrario pertenece a la zona elástica que es una configuración lineal.

$$\sigma_{n+1}^{tr} - \sigma_{y,n} > 0$$

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}, \sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n}$$

En el paso 3, una vez confirmada la necesidad de simplificar el desarrollo de la solución, se inicia el método de Newton Raphson para determinar los valores de delta Lambda.

$$\Delta\lambda = \frac{|\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{y,n}}{E + H'}$$

Paso 4, utiliza los datos obtenidos en cada una de las iteraciones del paso 3, generando los nuevos valores de sigma para cada punto en particular (es decir se aplica el corrector $E\Delta\lambda * \text{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr})$). Este paso cada que toma un valor realiza un ciclo y vuelve al inicio por otro valor nuevo de lambda.

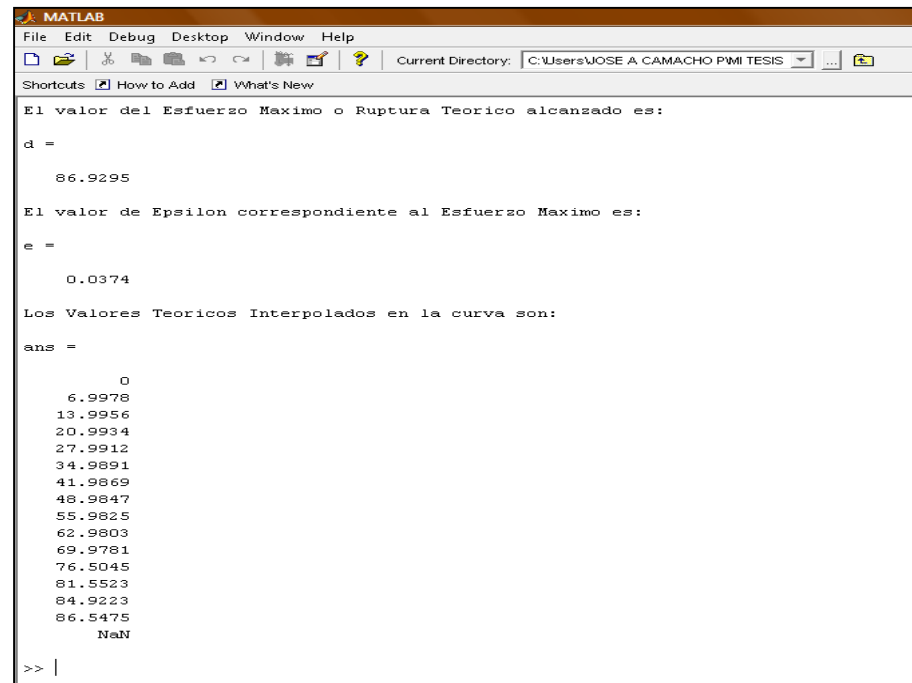
$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E * \Delta\lambda * \text{Sgn}(\sigma_{n+1}^{tr})$$

$$\sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n} + H' * \Delta\lambda$$

Adicionalmente, es necesario ingresar los datos experimentales de deformación y esfuerzos promedio por día para que sean incluidos en la gráfica; además de que el esfuerzo teórico será interpolado en la curva a partir de los mismos valores de deformación ingresados.

Luego, se muestra el esfuerzo máximo de ruptura, su correspondiente épsilon, valores teóricos de esfuerzos interpolados y la gráfica de la curva esfuerzo deformación; en ciertos casos para ajustar la curva teórica a la tendencia de los datos experimentales es necesario desplazar lateralmente la curva hasta que el error observado sea

mínimo, a continuación se muestra la figura 3.29, donde se representa como esta versión del Matlab mostró los resultados del algoritmo implementado, este ejemplo es del 10% de zeolita a 7 días de curado:



```
MATLAB
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: C:\Users\JOSE A. CAMACHO PMI TESIS
Shortcuts How to Add What's New

El valor del Esfuerzo Maximo o Ruptura Teorico alcanzado es:

d =
    86.9295

El valor de Epsilon correspondiente al Esfuerzo Maximo es:

e =
    0.0374

Los Valores Teoricos Interpolados en la curva son:

ans =
     0
    6.9978
   13.9956
   20.9934
   27.9912
   34.9891
   41.9869
   48.9847
   55.9825
   62.9803
   69.9781
   76.5045
   81.5523
   84.9223
   86.5475
   NaN

>> |
```

FIGURA 3.29 PANTALLA DE RESPUESTA DEL PROGRAMA

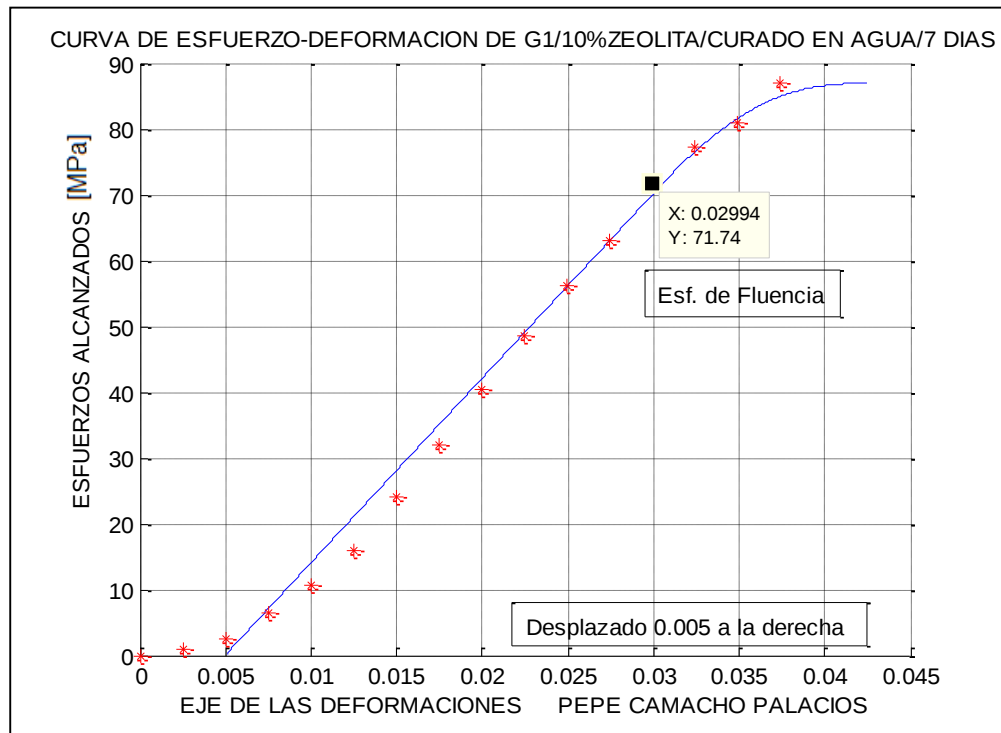


FIGURA 3.30 CURVA ESFUERZO – DEFORMACIÓN EN MATLAB

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados.

Cumpliendo con el cronograma de los diferentes procesos de experimentación, explicado para cada una de las probetas con los distintos porcentajes de adición de zeolita (10% y 12.5%), y sus respectivos días de curado; se obtuvieron los datos de la carga aplicada a cada uno de los especímenes, para las distintas deformaciones que correspondían a amplitudes de cinco milésimas de pulgada, como se muestra en las tablas a continuación:

TABLA 5.

TABLAS DE ESFUERZOS POR DÍA DEL 10% DE ZEOLITA.

G1/10%/día7	ESFUERZOS (Mpa)		
MARCA (x0,005pulg)	M1	M2	M3
0	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.9078	1.7022	0.3783
10	2.6478	3.7826	1.0591
15	6.6196	10.5913	1.8913
20	11.3478	17.2865	3.2152
25	17.4756	24.2086	5.9765
30	24.0195	31.2065	16.6434
35	31.5847	38.7717	25.5326
40	40.6630	45.7695	34.9891
45	48.7956	52.5782	44.0673
50	57.3064	59.5760	51.6325
55	65.2499	65.6281	58.2521
60	76.5977	73.3825	65.2499
65	80.3803	79.4346	71.8694
70		85.1085	76.5977
75		86.9998	

[illegible]

G1/10%/día21	ESFUERZOS (Mpa)		
MARCA (x0,005pulg)	M1	M2	M3
0	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.5158	4.9862	8.4249
10	1.2036	15.9901	24.9308
15	1.8913	26.6501	49.5177
20	2.4071	44.1877	70.4939
25	6.1897	54.1600	79.0907
30	20.8043	65.3358	87.6876
35	37.1383	79.9504	100.5828
40	57.5987	90.2666	
45	77.3714		
50	97.1441		
55	116.0571		

G1/10%/día28	ESFUERZOS (Mpa)		
MARCA (x0,005pulg)	M1	M2	M3
0	0.0000	0.0000	0.0000
5	9.2846	4.2984	4.1265
10	19.4288	16.5059	10.8320
15	28.1976	30.2608	17.5375
20	42.4683	47.9703	28.1976
25	67.0552	71.3536	49.1738
30	81.6698	94.5650	73.9327
35	92.8457	114.3377	97.1441
40	96.5689	127.2329	111.7587

TABLA 6. TABLAS DE ESFUERZOS POR DÍA DEL 12.5% DE ZEOLITA.

G1/12.5%/día4	ESFUERZOS (Mpa)		
MARCA (x0,005pulg)	M1	M2	M3
0	0.0000	0.0000	0.0000
5	2.9126	6.7055	2.2352
10	5.9009	22.3517	6.5336
15	11.8017	39.2015	16.5059
20	17.4756	61.8971	32.1521
25	23.2630	67.0552	46.4228
30	30.8282		62.7568
35	37.2586		72.2133
40	43.8782		76.5117
45	50.8760		
50	56.7390		
55	64.1151		
60	69.4107		
65	74.1390		
70	80.1911		
75	83.7846		

G1/12.5%/día11	ESFUERZOS (Mpa)		
MARCA (x0,005pulg)	M1	M2	M3
0	0.0000	0.0000	0.0000
5	7.0494	0.1719	13.2391
10	23.5553	7.0494	33.1837
15	39.8892	24.0711	54.1600
20	62.7568	42.8122	72.2133
25	84.2488	57.5987	91.9860
30	89.4069	79.9504	95.4247
35		85.1085	

G1/12.5%/día18	ESFUERZOS(Mpa)		
MARCA (x0,005pulg)	M1	M2	M3
0	0	0	0
5	2.2351	1.0316	1.5474
10	6.7055	6.0177	6.7055
15	17.5375	21.835	19.772
20	31.1204	41.9524	36.106
25	50.7212	61.0374	54.159
30	73.0729	85.968	80.810
35	90.2666	104.88	91.126
40	103.161		

G1/12.5%/día25	ESFUERZOS (Mpa)		
MARCA (x0,005pulg)	M1	M2	M3
0	0	0	0
5	1.7193	4.2984	6.8774
10	10.1442	18.9130	20.9762
15	26.1343	42.9841	38.169
20	42.9841	61.8971	53.300
25	68.7745	87.6875	70.493
30	91.1262	101.442	79.950
35	104.88	107.460	92.845
40	111.75		

Para cada marca de deformación los valores de los esfuerzos a la compresión, se obtuvieron dividiendo la fuerza de compresión aplicada entre el área de contacto de la probeta con la máquina, como se explicó en el capítulo anterior. Los datos completos utilizados para estos cálculos, así como otros no usados se hallarán en el apéndice A.

A continuación, se muestran los valores del esfuerzo promedio para cada día de ruptura, tanto para la adición de 10%, como para la adición del 12.5% de zeolita natural ecuatoriana.

TABLA 7. ESFUERZOS PROMEDIOS POR DÍA DEL 10% DE ZEOLITA

G1/10% ZEOLITA			ESFUERZO DE COMPRESIÓN PROMEDIO (MPa)			
Marca	Delta Longitud	Deformación	7 días	14 días	21 días	28 días
0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.127	0.0025	0.9961	1.9486	4.6423	5.9031
10	0.254	0.0050	2.4965	7.7371	14.0415	15.5889
15	0.381	0.0075	6.3674	19.3715	26.0197	25.3320
20	0.508	0.0100	10.6165	31.5790	39.0296	39.5454
25	0.635	0.0125	15.8869	44.8181	46.4801	62.5275
30	0.762	0.0149	23.9565	57.3694	57.9426	83.3892
35	0.889	0.0174	31.9630	74.7923	72.5572	101.4425
40	1.016	0.0199	40.4738	84.2488	73.9327	111.8535
45	1.143	0.0224	48.4803	91.9860	77.3714	
50	1.27	0.0249	56.1716		97.1441	
55	1.397	0.0274	63.0433		116.0571	
60	1.524	0.0299	71.7433			
65	1.651	0.0324	77.2281			
70	1.778	0.0349	80.8531			
75	1.905	0.0374	86.9998			

TABLA 8. ESFUERZOS PROMEDIOS POR DÍA DEL 12,5% DE ZEOLITA

G1/12,5% ZEOLITA			ESFUERZO DE COMPRESIÓN PROMEDIO (MPa)			
Marca	Delta Longitud	Deformación	4 días	11 días	18 días	25 días
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.1270	0.0025	3.9511	6.8201	1.6047	4.2984
10	0.2540	0.0050	11.5954	21.2628	6.4763	16.6778
15	0.3810	0.0075	22.5030	39.3734	19.7154	35.7628
20	0.5080	0.0100	37.1749	59.2607	36.3932	52.7272
25	0.6350	0.0125	45.5803	77.9445	55.3062	75.6520
30	0.7620	0.0149	46.7925	88.2607	79.9504	90.8397
35	0.8890	0.0174	54.7360	89.1085	95.4247	101.7290
40	1.0160	0.0199	60.1949		103.1618	111.7587
45	1.1430	0.0224	50.8760			
50	1.2700	0.0249	56.7390			
55	1.3970	0.0274	64.1151			
60	1.5240	0.0299	69.4107			
65	1.6510	0.0324	74.1390			
70	1.7780	0.0349	80.1911			
75	1.9050	0.0374	83.7846			

Los valores de esfuerzos obtenidos, permitieron graficar con el programa Microsoft Excel las curvas de esfuerzo–deformación, las mismas que detallan explícitamente el comportamiento del material tanto en la zona elástica como en la zona inelástica, estas gráficas tanto individuales como promedios diarios, se hallan en los apéndices B y C. Como se sabe, en la zona elástica el comportamiento o respuesta del material es lineal y por conocimientos teóricos la pendiente de esta línea (en la zona elástica) es el valor del módulo de Young (E), entonces de los datos experimentales de esfuerzo y deformación punto a punto se hicieron los cálculos para **E** con:

$$E_n = \frac{Esfuerzo_n - Esfuerzo_{n-1}}{Deform_n - Deform_{n-1}}$$

4.2. Análisis estadístico.

Una vez realizadas las gráficas para las tres muestras de cada día de ensayo, por inspección se observó que ciertas curvas tienen un desplazamiento, es decir, su tendencia, pendiente y curvatura resultaron diferentes en las tres gráficas con relación a la parte lineal elástica teórica de un mismo día. Por lo que se promedió el esfuerzo y el módulo de elasticidad (**E**) y así se obtuvo una sola lista de valores que describieron el día en particular tanto para el esfuerzo y para **E**. Como sabemos, **E** en teoría debería ser el mismo en toda la zona elástica, entonces, con el software estadístico se implementó un análisis de frecuencia por día de curado, para los valores del módulo Young obtenidos por cada deformación y esfuerzo puntual. Este histograma generó esquemáticamente una curva de distribución normal (Campana de Gauss), que definió la media y el intervalo de confianza (95%), permitiendo excluir los valores sesgados en la recta que corresponderían a la zona elástica, para que se cumpla la tendencia lineal teórica. Este procedimiento se detalla mas adelante con un ejemplo.

TABLA 9.
TABLA DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE E PROMEDIO, 10%

PARA EL MÓDULO DE YOUNG PROMEDIO DE CADA DÍA					
10%					
		MEDIA	DESVIACIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO
DÍA 7	M1	2252.9723	1063.6295	1189.3428	3316.6018
DÍA 14	M1	3962.3217	1954.1029	2008.2188	5916.4246
DÍA 21	M1	5334.2561	2007.8665	3326.3896	7342.1226
DÍA 28	M1	5603.6845	2439.8108	3163.8737	8043.4953

TABLA 10.
TABLA DE INTERVALOS DE CONFIANZA DE E PROMEDIO, 12.5%

PARA EL MÓDULO DE YOUNG PROMEDIO DE CADA DÍA					
12,5%					
		MEDIA	DESVIACIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO
DÍA 4	M1	3004.9023	1263.1717	1741.7306	4268.074
DÍA 11	M1	5348.7242	2393.5274	2955.1968	7742.2516
DÍA 18	M1	5426.658	2967.9123	2458.7457	8394.5703
DÍA 25	M1	5441.0143	2495.6551	2945.3592	7936.6694

Para describir el criterio que excluye valores de **E** por diferencias en la media aritmética y varianza se escoge como ejemplo los datos del

10% de zeolita en el día 7. Los histogramas para los demás días de curado y para el 12,5%, están en los apéndices D y E

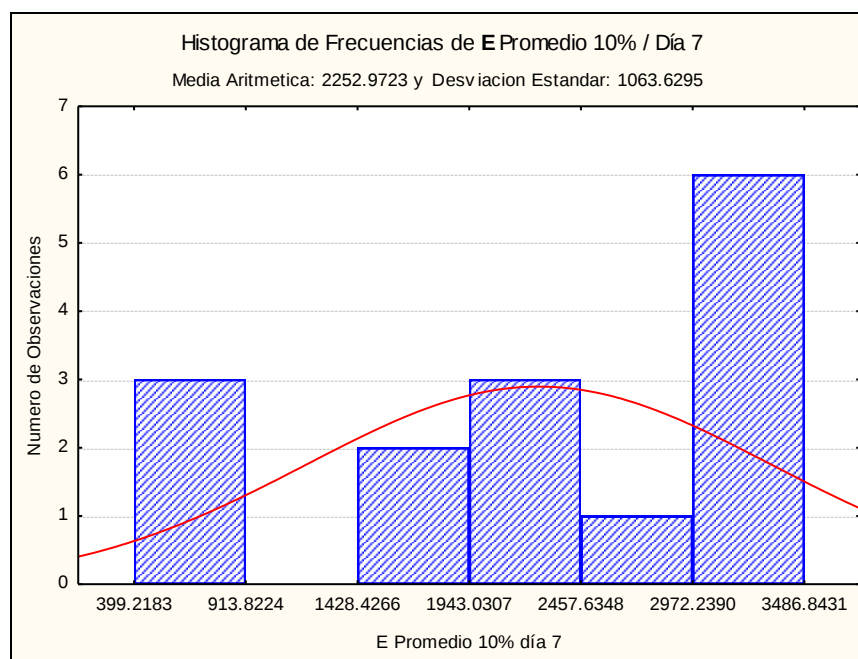


FIGURA 4.1 HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE **E** PARA EL 10%, DÍA7

Con este intervalo se puede sustentar el hecho de excluir valores de la lista de **E** promedio de cada día. Esto se realiza para todos los periodos de curado y para el porcentaje de validación (12.5%) también; de ahí que en las tablas 9 y 10 se incluyen todos los valores de media aritmética e intervalos de confianza. Es muy importante anotar que el nivel del máximo valor de **E** que se incluye, describe también el esfuerzo de fluencia; criterio de conocimiento básico porque desde aquí se inicia la zona de deformación plástica. Todo esto con un porcentaje de confianza del 95% de que se cumple.

El criterio implementado por este intervalo resultó de gran validez porque depura los valores de **E** a un estado que satisface la forma de la curva teórica esfuerzo-deformación, permitiendo generar parámetros aceptables (**m** y **a**) que incluyen o describen características propias del material, los mismos que se necesitan para ingresarlos a la simulación por computadora. Los datos de **E** no excluidos también se muestran en el apéndice A.

Análisis estadístico individual. Casos 10% y 12,5% de zeolita.

Por investigaciones teóricas anteriores, se conoce que el esfuerzo último o de ruptura aumenta en función que aumentan los periodos de tiempo de curado y que el módulo de Young debe ser aproximadamente el mismo en las tres muestras de un mismo periodo de tiempo; primeramente para validar lo último es necesario implementar artificios estadísticos que conlleven a reconocer la cercanía a los datos teóricos a los experimentales y que tendencia mantiene el **E**. Ejecutando este modelo estadístico es necesario definir las hipótesis nula y alterna, que serán aceptadas o rechazadas según como se definan y que resultados se obtengan. Los cálculos estadísticos se realizaron con un programa de estadística computacional, en el mismo que para el estudio individual se ingresan

los datos de esfuerzo de ruptura del 10% de zeolita a los 7, 14, 21, 28 días de curado y por separado del 12,5% a los 4, 11, 18, 25 días.

Definición de hipótesis:

Las hipótesis deben definir dos campos o criterios diferentes y puntuales, para así, según el resultado aceptar absolutamente uno y rechazar totalmente el otro. Para el 10% las hipótesis relacionan las medias μ y serán denotadas así:

Hipótesis nula.- **Ho:** $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$

Hipótesis alterna.- **Ha:** $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq 0$

TABLA 11.
DATOS INGRESADOS AL PROGRAMA ESTADÍSTICO, 10%

ORDEN DE MUESTRAS	1 DIAS DE CURADO	2 PORCENTAJE (%)	3 ESFUERZO MAXIMO (MPa)	4 Var3
1	7	10	80.3803	
2	7	10	86.9998	
3	7	10	76.5977	
4	14	10	95.4247	
5	14	10	78.2311	
6	14	10	88.5472	
7	21	10	116.0571	
8	21	10	90.2666	
9	21	10	100.5828	
10	28	10	96.5689	
11	28	10	127.2329	
12	28	10	111.7587	
13				

Con los datos ingresados, se halló los indicadores estadísticos básicos: medias aritméticas, desviación estándar, valor de p, etc. Mostrados en la siguiente tabla:

TABLA 12.

TABLA DE INDICADORES ESTADÍSTICOS BÁSICOS, 10%.

DIAS DE CURADO; Unweighted Means (EL 10% CON DATOS DEPURADOS) Current effect: F(3, 8)=4.5833, p=.03781 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	DIAS DE CURADO	ESFUERZO MAXIMO (MPa) Mean	ESFUERZO MAXIMO (MPa) Std.Err.	ESFUERZO MAXIMO (MPa) -95.00%	ESFUERZO MAXIMO (MPa) +95.00%	N
1	7	81.3259	6.494828	66.34883	96.3030	3
2	14	87.4010	6.494828	72.42390	102.3781	3
3	21	102.3022	6.494828	87.32507	117.2793	3
4	28	111.8535	6.494828	96.87640	126.8306	3

Aquí, se denota la variación ascendente que tiene la media de los esfuerzos de ruptura, y además se destaca que las correspondientes desviaciones estándares de estos esfuerzos son las mismas para cada día de curado (el valor en la tabla es 6.494828).

Adicionalmente, con el método de Duncan para anova lineal se creó la tabla de significancia de medias a través de la cual se pudo validar las hipótesis, es decir, este test muestra que tan significativamente afecta el factor días de curado a la variable de respuesta esfuerzo máximo o de ruptura. Observando la tabla 13, es notorio que el día 28 comparado con los días 14 y 21 o viceversa revela diferencias significativas importantes (valores en color rojo); esto quiere decir que en estos niveles, la media aritmética no mantuvo su igualdad por lo

que la hipótesis nula quedó rechazada. La figura 4.2 mostrada más adelante permite observar puntualmente estos efectos.

TABLA 13.

TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DUNCAN, 10%

Duncan test; variable ESFUERZO MAXIMO (MPa) (EL 10% C)					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = 126.55, df = 8.0000					
Cell No.	DIAS DE CURADO	{1}	{2}	{3}	{4}
		81.326	87.401	102.30	111.85
1	7		0.527122	0.059871	0.014298
2	14	0.527122		0.143564	0.033957
3	21	0.059871	0.143564		0.328974
4	28	0.014298	0.033957	0.328974	

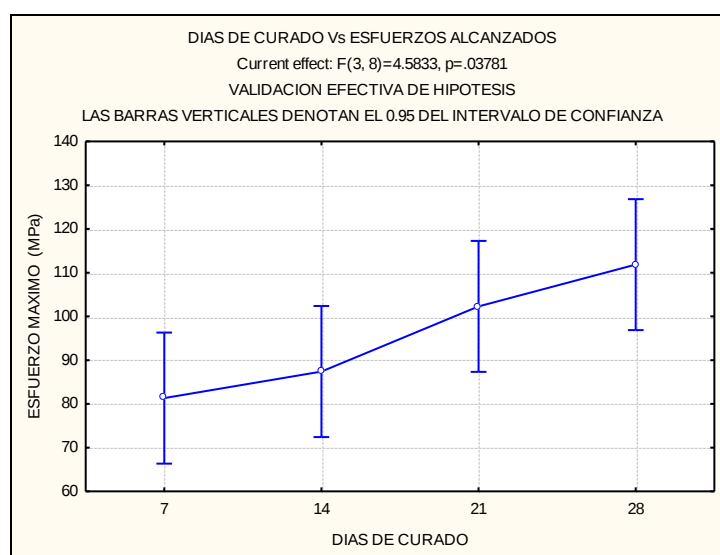


FIGURA 4.2 INTERVALOS DE CONFIANZA PARA CURADO, 10%

La figura 4.2, muestra verticalmente los intervalos de confianza y que la curva pasa por la media aritmética, para cada uno de los periodos de curado. Se puede notar que se cumple lo anticipado por los fundamentos teóricos del comportamiento del cemento, pues el valor

de la media aumenta a medida que avanzan los periodos de tiempo; el tramo donde se aprecia un mayor aumento es desde el día 21 hasta el 28; esto cumple con la norma ASTM C109 que dice que a los 28 días el cemento alcanza una resistencia mecánica cercana al 100%.

Para los datos de las muestras con el 12,5% de zeolita natural ecuatoriana adicionada se obtuvieron las siguientes tablas de análisis:

TABLA 14.
DATOS INGRESADOS AL PROGRAMA ESTADÍSTICO, 12,5%

ORDEN DE MUESTRAS			
	1 PORCENTAJE (%)	2 DIAS DE CURADO	3 ESFUERZO MAXIMO MPa
1	12.5	4	83.7846
2	12.5	4	67.0552
3	12.5	4	76.5117
4	12.5	11	89.4069
5	12.5	11	89.1085
6	12.5	11	95.4247
7	12.5	18	103.1618
8	12.5	18	104.8812
9	12.5	18	91.1263
10	12.5	25	111.7587
11	12.5	25	107.4602
12	12.5	25	92.8456

TABLA 15.
TABLA DE INDICADORES ESTADÍSTICOS BÁSICOS, 12,5%

DIAS DE CURADO; Unweighted Means (TABLA DEL INDIVIDUAL DEL 12,5% CON DAT						
Current effect: F(3, 8)=7.8404, p=.00911						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	DIAS DE CURADO	ESFUERZO MAXIMO MPa Mean	ESFUERZO MAXIMO MPa Std.Err.	ESFUERZO MAXIMO MPa -95.00%	ESFUERZO MAXIMO MPa +95.00%	N
1	4	75.7838	4.449042	65.52432	86.0433	3
2	11	91.3134	4.449042	81.05386	101.5729	3
3	18	99.7231	4.449042	89.46359	109.9826	3
4	25	104.0215	4.449042	93.76199	114.2810	3

TABLA 16.
TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DUNCAN

Duncan test; variable ESFUERZO MAXIMO MPa (TABLA DEL Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 59.382, df = 8.0000					
Cell No.	DIAS DE CURADO	{1}	{2}	{3}	{4}
		75.784	91.313	99.723	104.02
1	4		0.038982	0.006488	0.002977
2	11	0.038982		0.218270	0.088729
3	18	0.006488	0.218270		0.513979
4	25	0.002977	0.088729	0.513979	

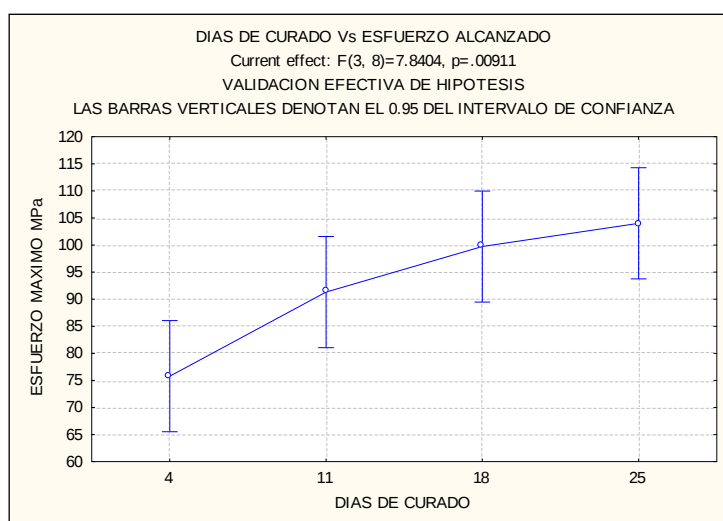


FIGURA 4.3 INTERVALOS DE CONFIANZA PARA CURADO 12,5%

Para el análisis del 12,5%, se plantean las mismas hipótesis y se puede observar que la mayor diferencia significativa la presenta el nivel 4 con todos los niveles del factor días de curado, es decir con todos los demás periodos de tiempo; razón suficiente para rechazar la hipótesis nula.

Análisis estadístico grupal. (Todos los % de zeolita del G1).

Este estudio se realizó usando el método estadístico de Duncan de tipo Anova Factorial, además, las hipótesis nula y alterna que se plantearon fueron también utilizadas aquí; sin embargo ahora se obtuvo dos variables independientes, es decir, que se tuvo dos factores; el día de curado con sus cuatro niveles (7, 14, 21, 28 días) y el porcentaje de concentración también con cuatro niveles (5, 10, 15, 20, 25 %). Mientras que la variable de respuesta como antes será el esfuerzo máximo o ruptura por compresión.

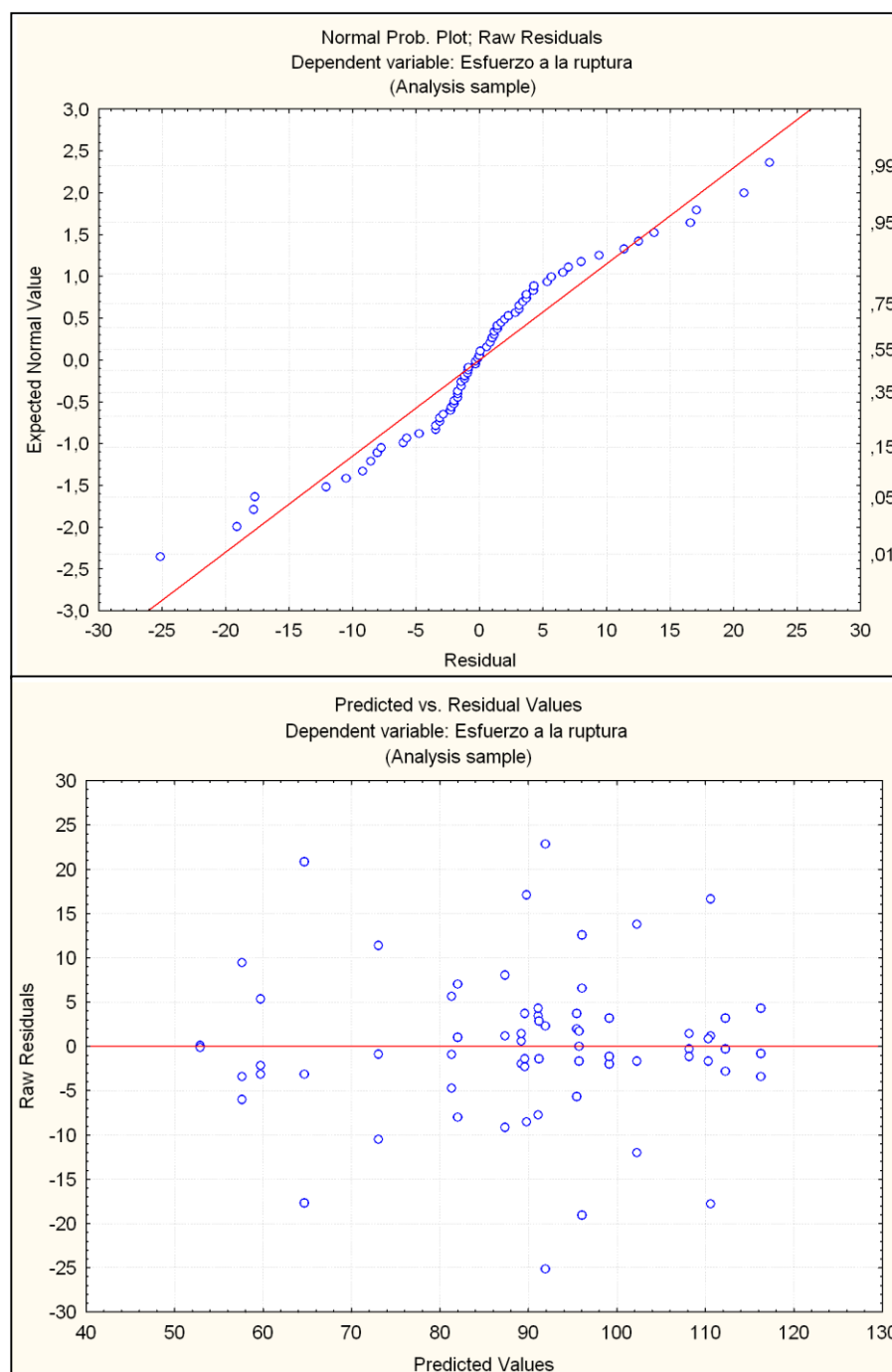
Es importante resaltar, que para este análisis se usa la totalidad de las muestras obtenidas en el laboratorio por todos los tesisas del tópico de graduación. (Grupo 1, zeolita natural, curado en agua). Los cuales se muestran a continuación en la siguiente tabla:

TABLA 17.
TABLA DE DATOS DEL GRUPO ZEOLITA NATURAL / CURADO EN AGUA.

NÚMERO DE MUESTRAS	DÍAS DE CURADO	PORCENTAJES DE ZEOLITA (%)	ESFUERZO MÁXIMO O DE RUPTURA (Mpa)
1	7	0	89.7853
2	7	0	90.6404
3	7	0	87.2200
4	7	5	93.3000
5	7	5	87.3400
6	7	5	88.2000
7	7	10	80.3803
8	7	10	86.9998
9	7	10	76.5977
10	7	15	84.4556
11	7	15	62.5876
12	7	15	72.2020
13	7	20	57.4977
14	7	20	56.5551
15	7	20	65.0383
16	7	25	52.9564
17	7	25	52.9564
18	7	25	52.7673
19	14	0	99.1914
20	14	0	97.4812
21	14	0	89.7853
22	14	5	83.0600
23	14	5	74.0500
24	14	5	89.0600
25	14	10	95.4247
26	14	10	78.2311
27	14	10	88.5472
28	14	15	106.8873
29	14	15	81.2343
30	14	15	81.2343
31	14	20	47.0304
32	14	20	61.5671
33	14	20	85.5098
34	14	25	94.5650
35	14	25	95.4247
36	14	25	83.3892
37	21	0	102.6118

NÚMERO DE MUESTRAS	DÍAS DE CURADO	PORCENTAJES DE ZEOLITA (%)	ESFUERZO MÁXIMO O DE RUPTURA (Mpa)
38	21	0	108.5975
39	21	0	76.9589
40	21	5	66.7900
41	21	5	114.7500
42	21	5	94.1900
43	21	10	116.0571
44	21	10	90.2666
45	21	10	100.5828
46	21	15	112.0179
47	21	15	109.4526
48	21	15	115.4383
49	21	20	89.7853
50	21	20	94.0608
51	21	20	89.7853
52	21	25	67.0552
53	21	25	51.5809
54	21	25	54.1600
55	28	0	95.7710
56	28	0	97.4812
57	28	0	94.0608
58	28	5	107.8900
59	28	5	107.0400
60	28	5	109.6100
61	28	10	92.8457
62	28	10	127.2329
63	28	10	111.7587
64	28	15	120.5689
65	28	15	112.8730
66	28	15	115.4383
67	28	20	111.1628
68	28	20	111.1628
69	28	20	108.5975
70	28	25	102.3021
71	28	25	97.1441
72	28	25	98.0037

Seguido se muestra las condiciones de Normalidad y Aleatoriedad.



Entonces, las hipótesis definidas anteriormente también se validan con los resultados del análisis grupal y son las siguientes:

Hipótesis nula.- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$

Hipótesis alterna.- $H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq 0$

La tabla de diferencias significativas de las medias aritméticas generadas por el método, a través del programa estadístico, se encuentran adjuntas en el apéndice G. Observando el contenido de la tabla 18, se nota que para cada factor día de curado la media aritmética en la mayoría de los casos, aumenta hasta llegar al porcentaje del 15% para luego descender. Esto ya indica preliminarmente, cual podría ser el porcentaje de zeolita ecuatoriana más favorable para el objetivo fijado.

TABLA 18.
TABLA DE MEDIAS, DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL GRUPAL GENERADA POR EL MÉTODO DE DUNCAN

DIAS*PORCENTAJES; Unweighted Means (Spreadsheet2)							
Current effect: F(15, 48)=4.2898, p=.00006							
Effective hypothesis decomposition							
Cell No.	DIAS	PORCENTAJES	ESFUERZOS Mean	ESFUERZOS Std.Err.	ESFUERZOS -95.00%	ESFUERZOS +95.00%	N
1	7	0	89.2153	5.800250	77.5531	100.8775	3
2	7	5	89.6133	5.800250	77.9511	101.2755	3
3	7	10	81.3259	5.800250	69.6637	92.9881	3
4	7	15	73.0817	5.800250	61.4195	84.7439	3
5	7	20	59.6970	5.800250	48.0348	71.3592	3
6	7	25	52.8934	5.800250	41.2312	64.5556	3
7	14	0	95.4860	5.800250	83.8238	107.1482	3
8	14	5	82.0567	5.800250	70.3945	93.7189	3
9	14	10	87.4010	5.800250	75.7388	99.0632	3
10	14	15	89.7853	5.800250	78.1231	101.4475	3
11	14	20	64.7024	5.800250	53.0403	76.3646	3
12	14	25	91.1263	5.800250	79.4641	102.7885	3
13	21	0	96.0561	5.800250	84.3939	107.7182	3
14	21	5	91.9100	5.800250	80.2478	103.5722	3
15	21	10	102.3022	5.800250	90.6400	113.9643	3
16	21	15	112.3029	5.800250	100.6407	123.9651	3
17	21	20	91.2105	5.800250	79.5483	102.8727	3
18	21	25	57.5987	5.800250	45.9365	69.2609	3
19	28	0	95.7710	5.800250	84.1088	107.4332	3
20	28	5	108.1800	5.800250	96.5178	119.8422	3
21	28	10	110.6124	5.800250	98.9502	122.2746	3
22	28	15	116.2934	5.800250	104.6312	127.9556	3
23	28	20	110.3077	5.800250	98.6455	121.9699	3
24	28	25	99.1500	5.800250	87.4878	110.8122	3

De la gráfica porcentajes de zeolita vs esfuerzos alcanzados, se puede destacar que dos curvas (día 7 y 21) presentan una disminución de la media aritmética con su respectivo intervalo de confianza, la del día 14 también tiende a bajar, pero al final se sube abruptamente; de manera general de la variación de 0% con relación al 25% tiene dos tendencias, la una es mantener aproximadamente constantes las mencionadas medias, pero la otra es disminuir estos valores con mucha irregularidad; esto último es suficiente para rechazar la hipótesis nula. Cabe destacar que se está analizando el comportamiento provocado solo por el factor porcentaje de zeolita.

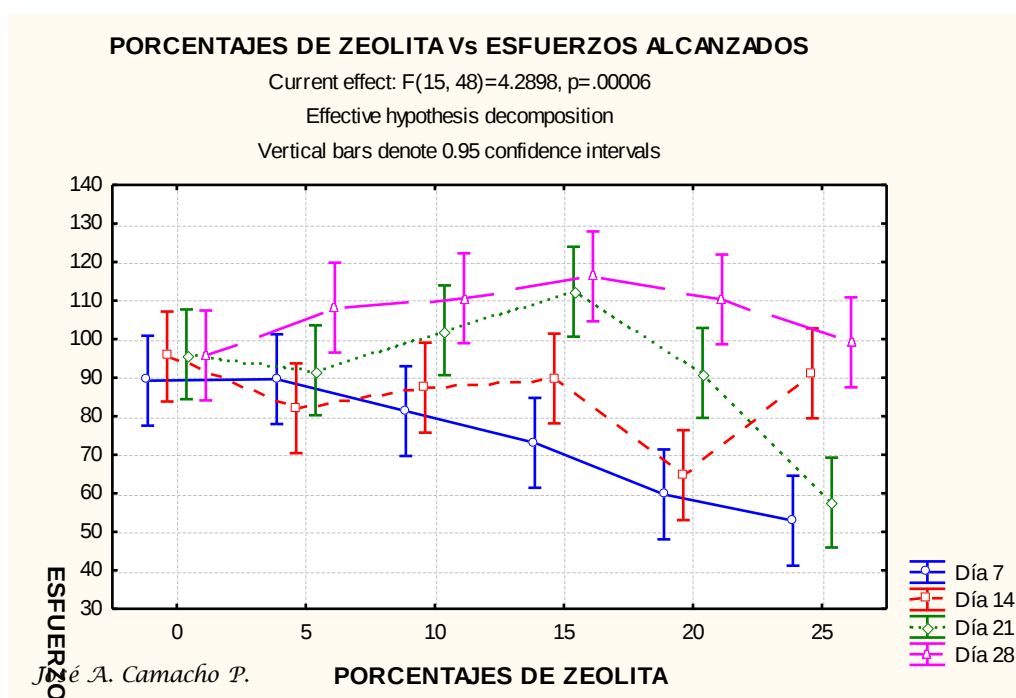


FIGURA 4.4 VARIACIÓN DE LA MEDIA SEGÚN EL FACTOR PORCENTAJE DE ZEOLITA

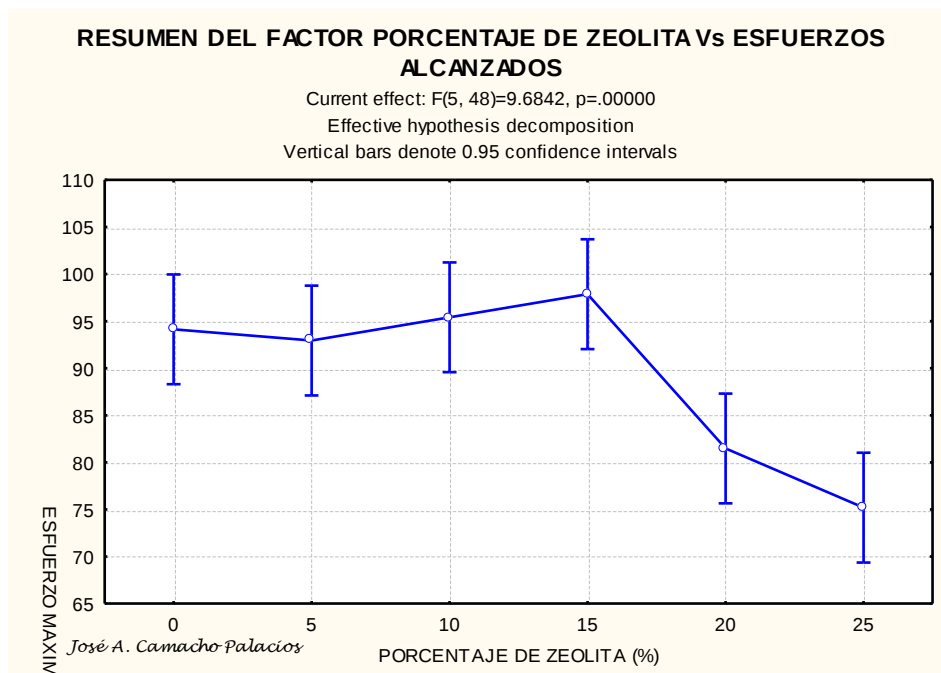


FIGURA 4.5 RESUMEN DEL EFECTO DEL FACTOR PORCENTAJE DE ZEOLITA

A diferencia de las tendencias anteriores, en la gráfica días de curado Vs esfuerzos alcanzados, se puede observar que todas las medias de las concentraciones tienden relativamente a aumentar; con ciertos sesgos puntuales como el 25% que inicialmente sube, luego baja casi hasta el mismo punto y al final se eleva bruscamente hasta niveles de respuesta similares a los demás. Aquí, solo la media del porcentaje 0% se puede considerar que se mantiene, con relación entre 7 y 28 días, pero el resto aumenta paulatinamente eliminando la igualdad de medias, por tanto la hipótesis nula se rechaza para el factor días de curado.

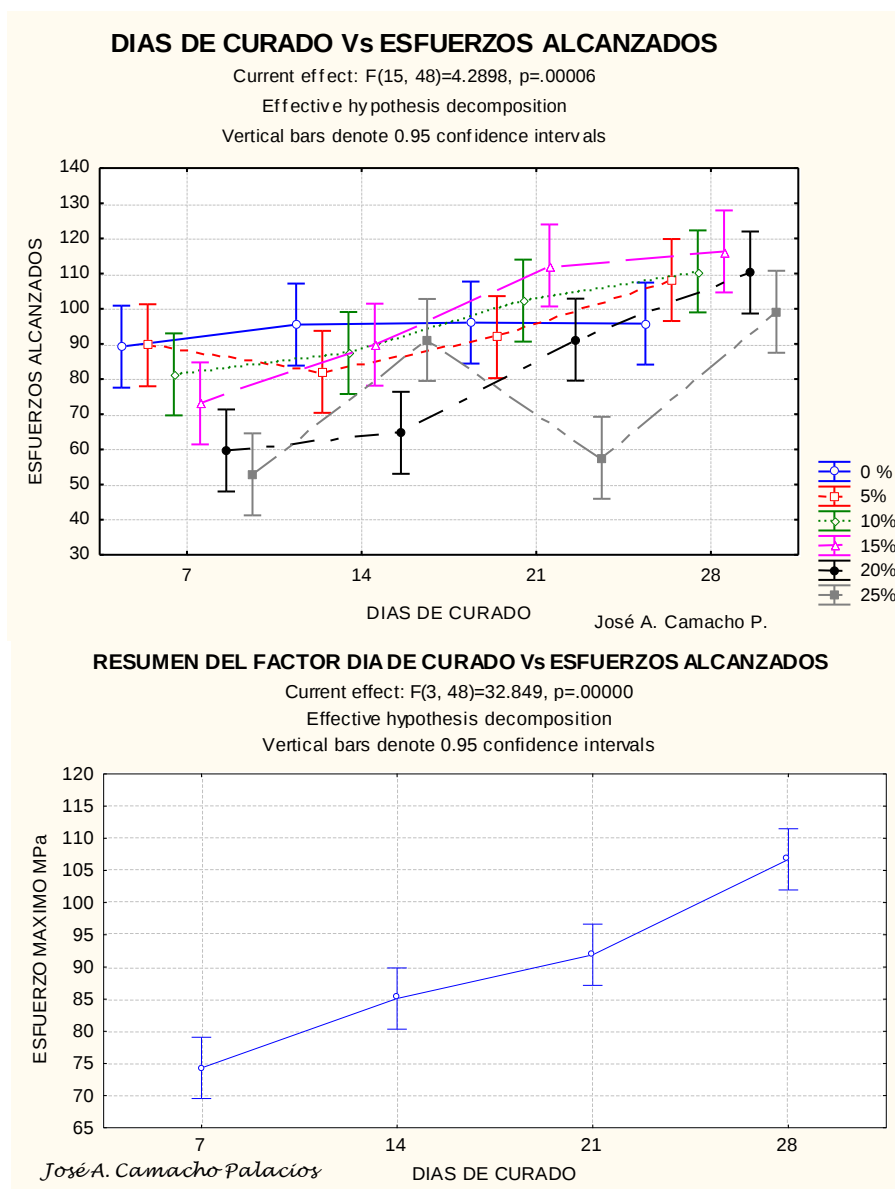


FIGURA 4.6 VARIACIÓN DE LA MEDIAS Y RESUMEN SEGÚN EL FACTOR DÍAS DE CURADO

A continuación, la gráfica de superficie representa las tendencias en conjunto del efecto que provocan los factores aquí involucrados; la tonalidad rojo fuerte, está indicando altos esfuerzos a periodos de tiempo también elevados, mientras que los colores verde claro (alto % de zeolita)

hasta amarillo verdoso (bajo % de zeolita) son relativamente bajos esfuerzos, en periodos cortos de curado.

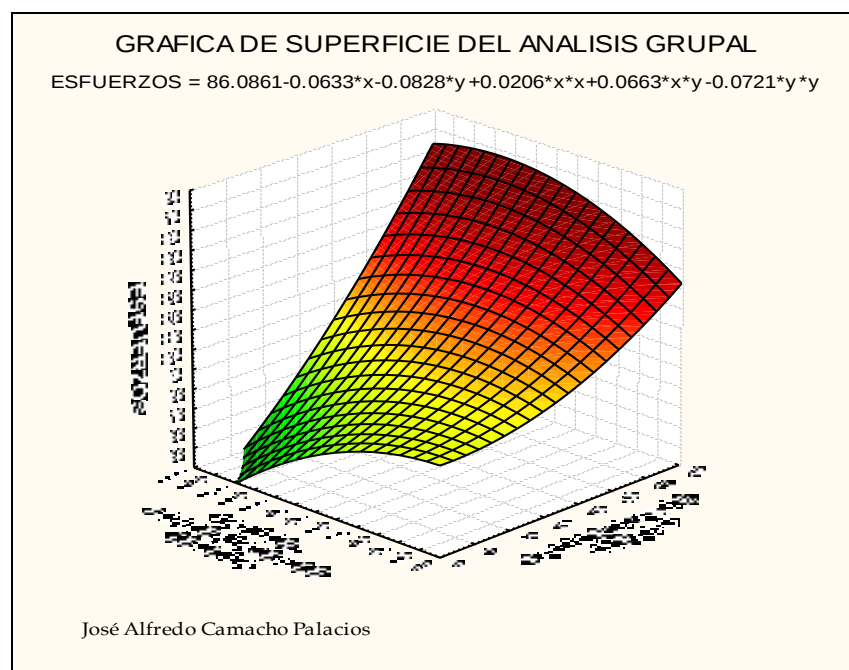


FIGURA 4.7 GRÁFICA DE SUPERFICIE DEL ANÁLISIS GRUPAL

4.3. Simulación del modelo matemático.

TABLA 19.

INDICADORES CARACTERÍSTICOS DE MUESTRAS EXPERIMENTALES

	Días de Curado	Deformación de 0 hasta	Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo de Ruptura	Módulo de Young (E)	m	a
G1/10%	7	0.0374	40.4738	86.9998	2536.8047	0.003131	1.149533
	14	0.0225	74.7923	91.9860	4865.8077	0.003551	0.229885
	21	0.0274	73.9327	116.0571	4769.5525	0.003113	0.569767
	28	0.01996	62.5275	111.8535	5673.5853	0.000246	0.788868

	Días de Curado	Deformación de 0 hasta	Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo de Ruptura	Módulo de Young	m	a
G1/12,5%	4	0.03743	37.1749	83.7846	4438.5660	0.018550	1.253793
	11	0.01747	59.2607	89.1085	7005.8442	0.004746	0.503669
	18	0.01996	79.9504	103.1618	7129.8821	0.005492	0.290323
	25	0.01996	75.6520	111.7587	7149.4066	0.004329	0.477273

Una vez establecidos estos valores, se ejecuta el algoritmo de simulación implementado, y se obtiene la curva teórica que describe el comportamiento del material y estableciendo la diferencia entre las gráficas teóricas y los puntos de datos experimentales incluidos en la misma figura. Es necesario indicar que estas curvas teóricas resultan relativamente coincidentes con la secuencia de puntos experimentales; esto se debe al pre ajustamiento de los valores de E realizado a los datos experimentales. La ejecución del programa en Matlab, se la realiza para cada uno de los porcentajes de zeolita a los diferentes días de curado, para ilustrarlo se adjuntan gráficas en los apéndices H e I. Se muestra la siguiente figura solo como ejemplo:

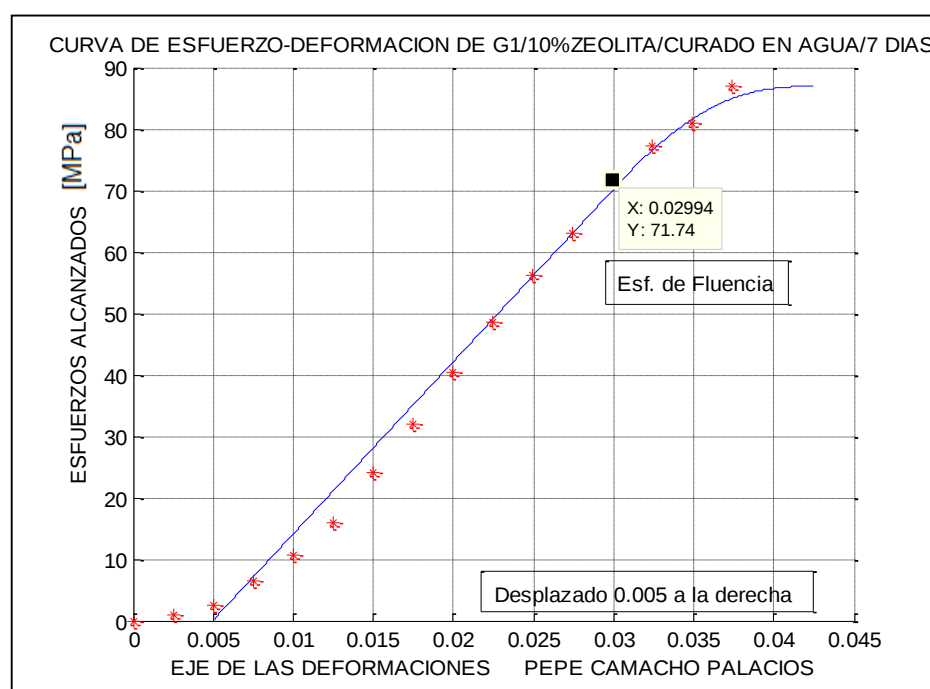


FIGURA 4.8 ESFUERZO-DEFORMACIÓN, G1/ 10%/ DÍA7, MATLAB

4.3.1 Ajuste y verificación del modelo.

El ajuste fue desplazar la curva desde el origen cartesiano hasta la cercanía posible que coincida la parte recta, con la mayor cantidad de puntos reales. En general, no hubo un gran ajuste por la depuración realizada, la misma que recoge datos no sesgados disminuyendo la posibilidad de error.

Análisis de error entre datos generados por la curva del programa y datos experimentales.

A continuación se incluye los esfuerzo máximos o de ruptura, es decir, los datos teóricos generados por el programa y los datos experimentales obtenidos en el laboratorio:

TABLA 20.
TABLA DE ERRORES DIRECTOS FINALES

G1 - 10% ZEOLITA	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA EXPERIMENTAL	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA TEÓRICO	ERROR PARA RUPTURA %
DÍA 7	86.9998	86.9109	0.102
DÍA 14	91.9860	91.87	0.126
DÍA 21	116.0570	115.84	0.187
DÍA 28	111.8535	111.70	0.137

G1-12,5% ZEOLITA	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA EXPERIMENTAL	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA TEÓRICO	ERROR PARA RUPTURA %
DÍA 4	83.7846	83.6684	0.139
DÍA 11	89.1085	89.0032	0.118
DÍA 18	103.1618	102.9635	0.193
DÍA 25	111.7587	111.5761	0.164

La mayoría de los ensayos y procedimientos realizados para este proyecto, se restringen a seguir normas estandarizadas para cada

proceso, situación que se refleja en los resultados con errores relativamente bajos. Adicionalmente, se compara los valores teóricos y experimentales punto a punto para la misma deformación correspondiente, cuyos errores resultantes se detallan en los apéndices J y K.

Comparación del cemento tipo 1 con zeolita y el cemento pórtland tipo IV comercial de uso común.

Como análisis final y como medida de validación de este proyecto, es necesario comparar la mejor condición de respuesta alcanzada con la adición de zeolita ecuatoriana al cemento pórtland tipo 1, y con el cemento puzolánico pórtland tipo IV de mayor y común uso en la construcción civil e industrial; esto revelaría incondicionalmente la aplicación práctica de este estudio; para esto se incluye con los datos obtenidos, mas los valores que proporcionó otro tesista que trabajó con el cemento tipo I, como unidad de referencia pero sin adición de zeolita. A continuación en la tabla 21, se muestra la secuencia usada para intercalar los mencionados datos con los del cemento tipo 1 que posee zeolita ecuatoriana, para luego realizar su análisis en el programa estadístico ya mencionado. Es necesario explicar que el cemento tipo IV posee puzolanas naturales o artificiales diferentes a la zeolita, por lo que en este paso estadístico se analizó solo su función

de respuesta (resistencia mecánica a la compresión), a través de los mismo periodos de tiempo ya definidos por la experimentación. La conclusión preliminar es que el mejor porcentaje adicionado de zeolita al tipo 1 es el 15%.

TABLA 21.
TABLA DE DATOS QUE INCLUYEN AL CEMENTO TIPO IV

Cell No.	Dias de curado*Porcentaje de Zeolita y Cemento Tipo IV; Unweighted Means (análisis grupal IV) Current effect: F(18, 56)=4.4938, p=.00001 Effective hypothesis decomposition						N
	Dias de curado	Porcentaje de Zeolita y Cemento Tipo IV	Esfuerzo a la ruptura Mean	Esfuerzo a la ruptura Std.Err.	Esfuerzo a la ruptura -95.00%	Esfuerzo a la ruptura +95.00%	
1	7	0	89.2153	5.487216	78.2231	100.2075	3
2	7	Tipo IV	49.0144	5.487216	38.0222	60.0066	3
3	7	5	89.6133	5.487216	78.6211	100.6055	3
4	7	10	81.3259	5.487216	70.3337	92.3181	3
5	7	15	73.0817	5.487216	62.0895	84.0739	3
6	7	20	59.6970	5.487216	48.7048	70.6892	3
7	7	25	52.8934	5.487216	41.9012	63.8856	3
8	14	0	95.4860	5.487216	84.4938	106.4782	3
9	14	Tipo IV	60.3254	5.487216	49.3332	71.3176	3
10	14	5	82.0567	5.487216	71.0645	93.0489	3
11	14	10	87.4010	5.487216	76.4088	98.3932	3
12	14	15	89.7853	5.487216	78.7931	100.7775	3
13	14	20	64.7024	5.487216	53.7102	75.6947	3
14	14	25	91.1263	5.487216	80.1341	102.1185	3
15	21	0	96.0561	5.487216	85.0638	107.0483	3
16	21	Tipo IV	75.4068	5.487216	64.4146	86.3990	3
17	21	5	91.9100	5.487216	80.9178	102.9022	3
18	21	10	102.3022	5.487216	91.3099	113.2944	3
19	21	15	112.3029	5.487216	101.3107	123.2951	3
20	21	20	91.2105	5.487216	80.2183	102.2027	3
21	21	25	57.5987	5.487216	46.6065	68.5909	3
22	28	0	95.7710	5.487216	84.7788	106.7632	3
23	28	Tipo IV	65.6667	5.487216	54.6745	76.6589	3
24	28	5	108.1800	5.487216	97.1878	119.1722	3
25	28	10	110.6124	5.487216	99.6202	121.6046	3
26	28	15	116.2934	5.487216	105.3012	127.2856	3
27	28	20	110.3077	5.487216	99.3155	121.2999	3
28	28	25	99.1500	5.487216	88.1578	110.1422	3

La gráfica anterior muestra que el cemento tipo IV, ni para el periodo máximo estudiado, donde la norma afirma que ya se obtiene una considerable resistencia mecánica, no supera a los demás especímenes analizados.

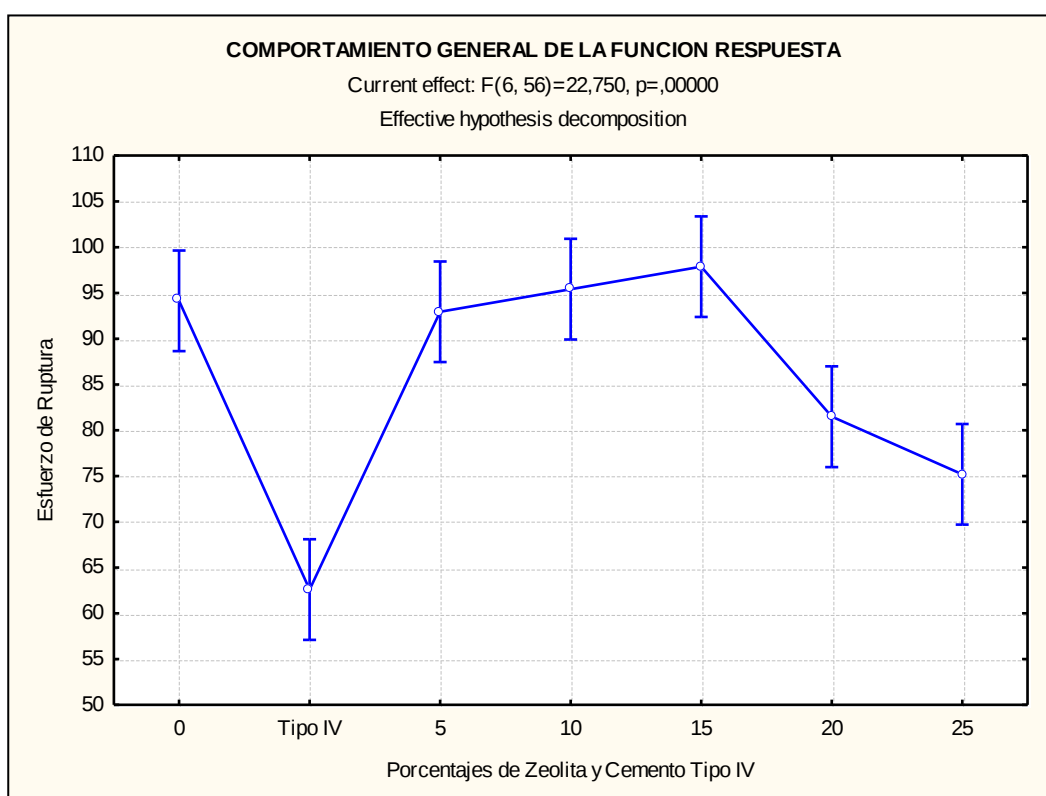


FIGURA 4.10 GRÁFICA DE LA FUNCIÓN DE RESPUESTA GENERAL INCLUIDO EL CEMENTO PÓRTLAND TIPO I (0 % ZEOLITA) Y EL TIPO IV COMERCIAL

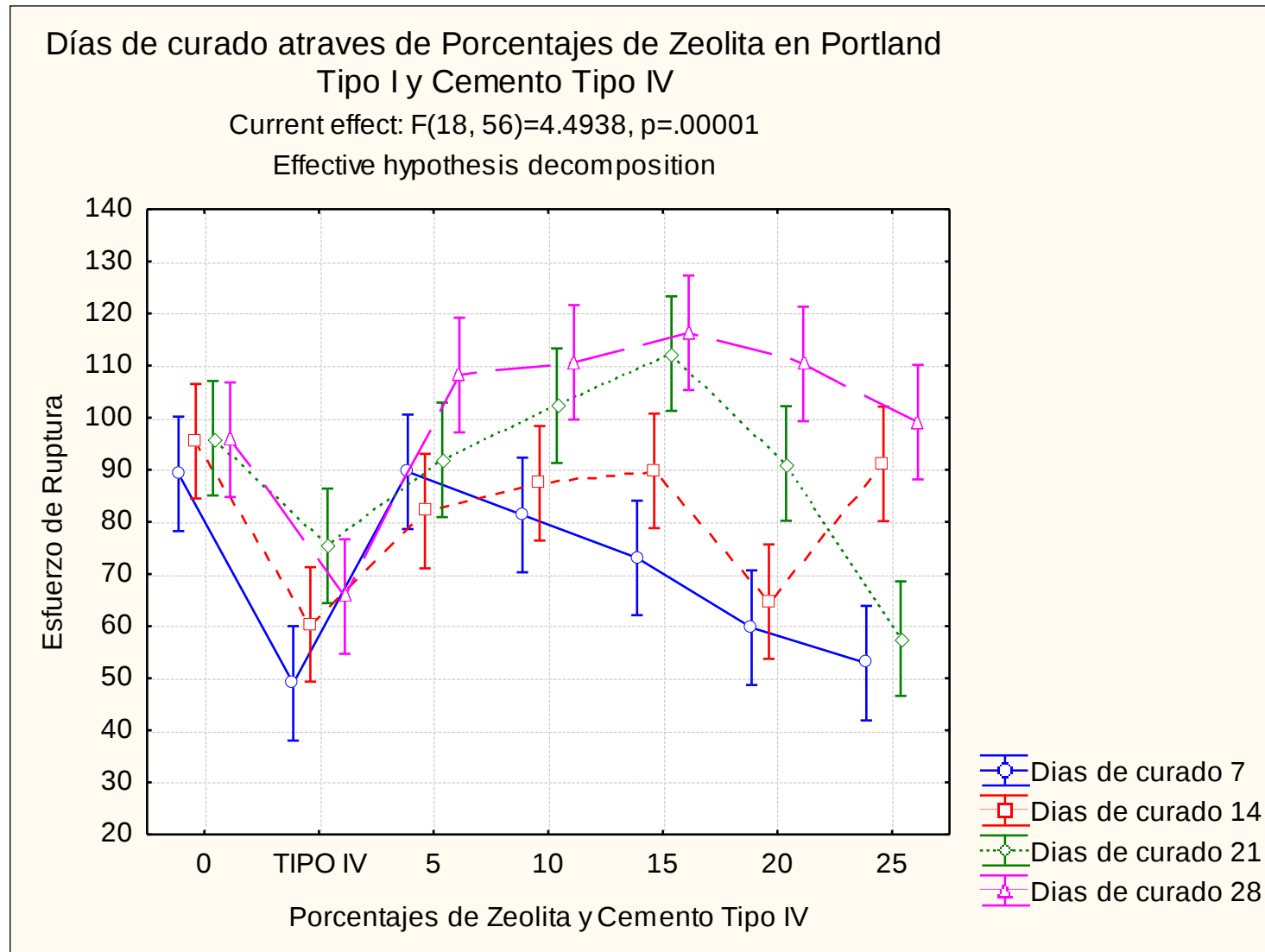


FIGURA 4.9 GRÁFICA DE LA FUNCIÓN DE RESPUESTA, INCLUIDO EL CEMENTO TIPO I (0%) y TIPO IV

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La simulación del comportamiento de la pasta de cemento tipo I, obtuvo una buena aproximación a los datos experimentales.
- La adición de zeolita natural ecuatoriana, en diferentes concentraciones generó un crecimiento gradual de la resistencia a la compresión, hasta llegar a un máximo cuando dicha concentración era del 15%, para luego disminuir.
- Se comprobó que la resistencia a la compresión aumenta conforme pasan los días de curado, hasta llegar a un máximo asintótico en el día 28.
- La resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo I con adición del 15% de zeolita fue máxima en comparación al esfuerzo a la

compresión dado por el mismo cemento sin aditivo y que el cemento tipo IV (comercialmente usado).

- Todos los resultados de resistencia a la compresión con diferente concentración de aditivos fueron mayores comparados con el cemento tipo I con 0% de aditivo y que el cemento tipo IV.
- La zeolita puede ser usada en la pasta de cemento para aumentar su resistencia a la compresión, en caso de faltar un aditivo utilizado actualmente.
- De los errores obtenidos entre los datos experimentales y el modelo matemático de la mezcla al 10 y 12,5% de zeolita, se obtuvo un error promedio del 26% y 25.1% respectivamente. Estos valores me indican que el modelo matemático posee en promedio un 25.55% de error con respecto a los datos experimentales. En conclusión el modelo matemático captura un 74.45% los datos experimentales.
- La resistencia a la compresión máxima se concluyó que fue al 15% de zeolita, con curado en agua de 28 días y con 116,29 MPa.
- Se comprobó que el cemento tipo IV aunque comercialmente cumple con las normas y estándares de uso, posee una resistencia a la compresión inferior al tipo I de menor función de respuesta alcanzado por esta investigación, que es el adicionado con el 25% de zeolita.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda tener cuidado en el apisonamiento de los especímenes de prueba, ya que un mal apisonamiento llevará a la permanencia de aire dentro del cubo el cual debilitarán su estructura y por ende su resistencia a la compresión.
- Se recomienda examinar otras propiedades de la pasta de cemento con la adición de zeolita, para saber si puede o no ser un producto sustituto en la industria cementera.
- Realizar un estudio de impacto ambiental, para el caso en que la mezcla estudiada sea un producto sustituto o se use en la industria del cemento, saber qué impacto tuviere en el medio ambiente.
- Realizar otras pruebas dentro de las cuales se extienda el tiempo de curado para conocer su comportamiento o tendencia largo plazo.
- En el momento de colocar los bloques ya desmoldados, hacerlo en un recipiente que permita que todas las caras del cubo se humedezcan de forma uniforme, caso contrario no se obtiene un curado homogéneo y eso puede producir fallas impredecibles en el ensayo.
- Se recomienda realizar las pruebas en una máquina de ensayos digital en lugar de la análoga, para disminuir el error por toma de mediciones.

APÉNDICE A

TABLA A1. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 10%, DÍA 7

[illegible]

TABLA A2. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 10%, DÍA 14

[illegible]

TABLA A3. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 10%, DÍA 21

[illegible]

TABLA A4. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 10%, DÍA 28

[illegible]

TABLA A5. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 12.5%, DÍA 4

[illegible]

TABLA A6. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 12,5%, DÍA 11

[illegible]

TABLA A7. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 12,5%, DÍA 18

[illegible]

TABLA A8. ESFUERZOS Y MÓDULOS DE YOUNG, 12,5%, DÍA 25

[illegible]

APÉNDICE B

CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EXPERIMENTALES, 10%

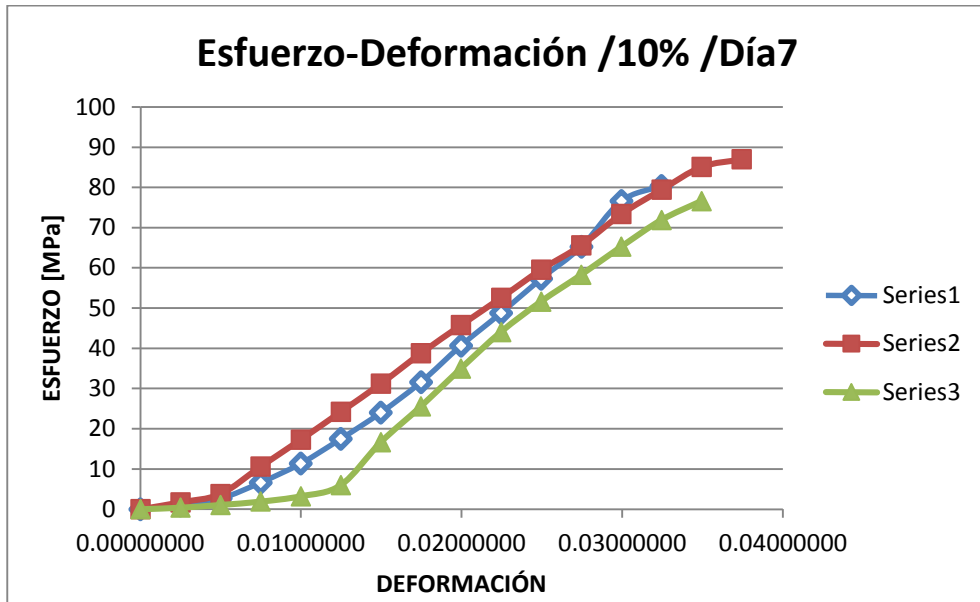


FIGURA B1. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 7, 10%

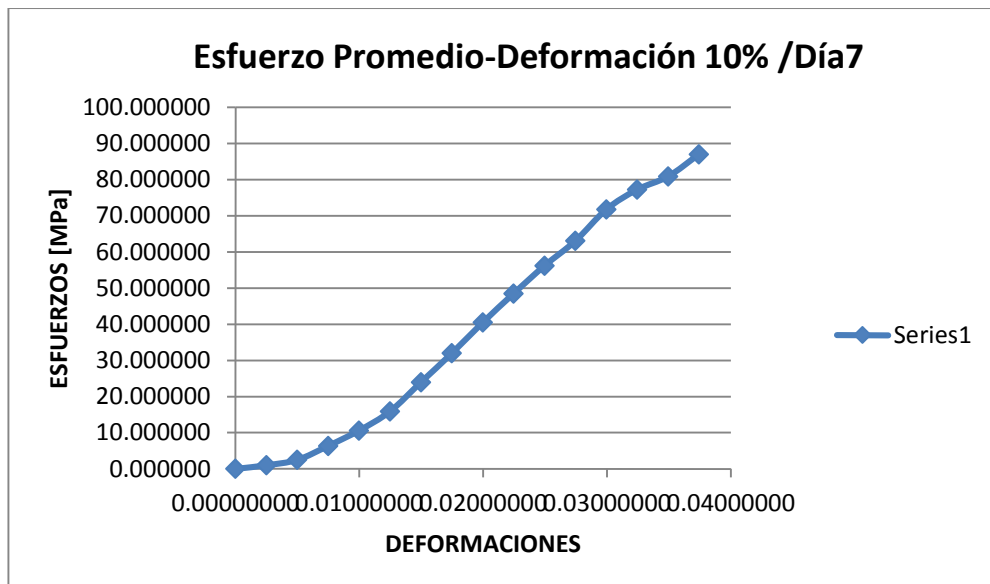


FIGURA B2. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 7, 10%

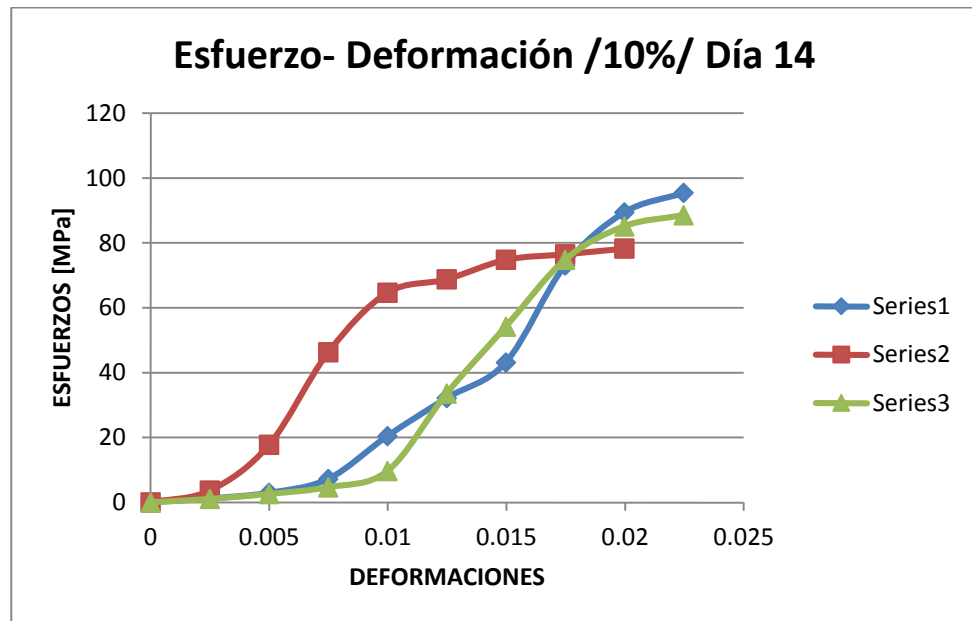


FIGURA B3. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 14, 10%

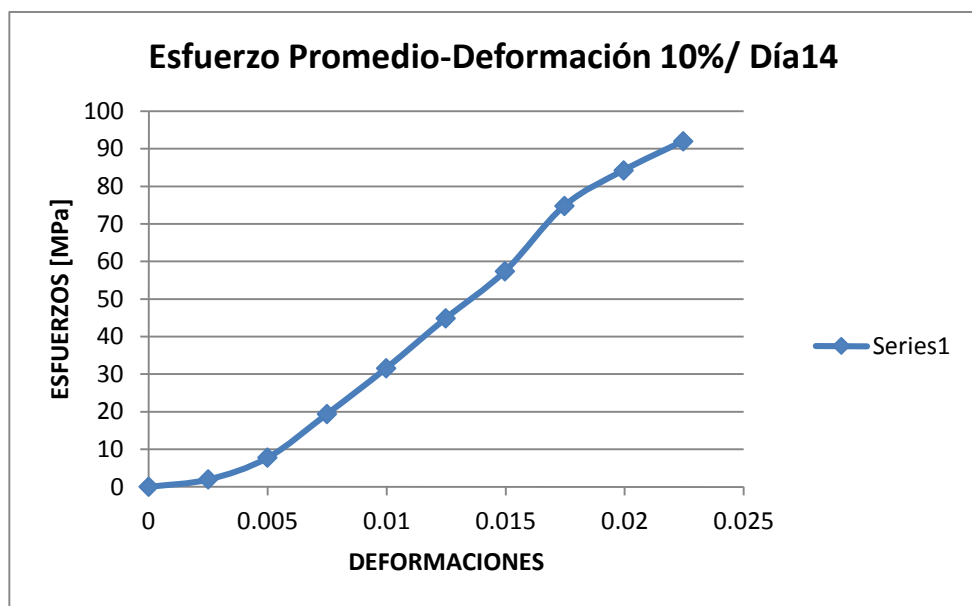


FIGURA B4. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 14, 10%

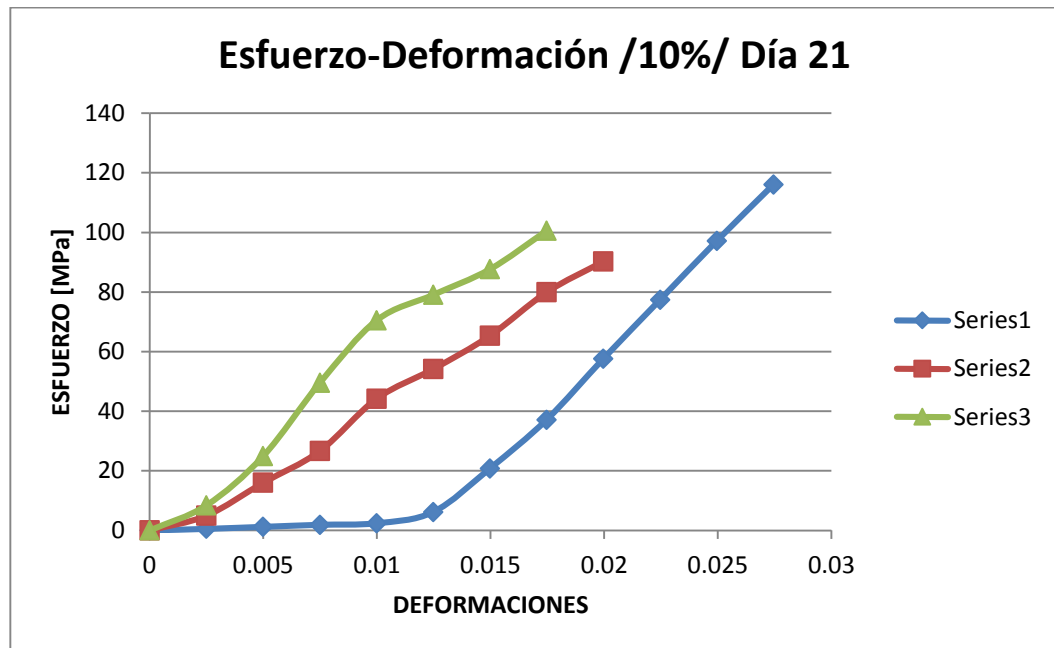


FIGURA B5. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 21, 10%

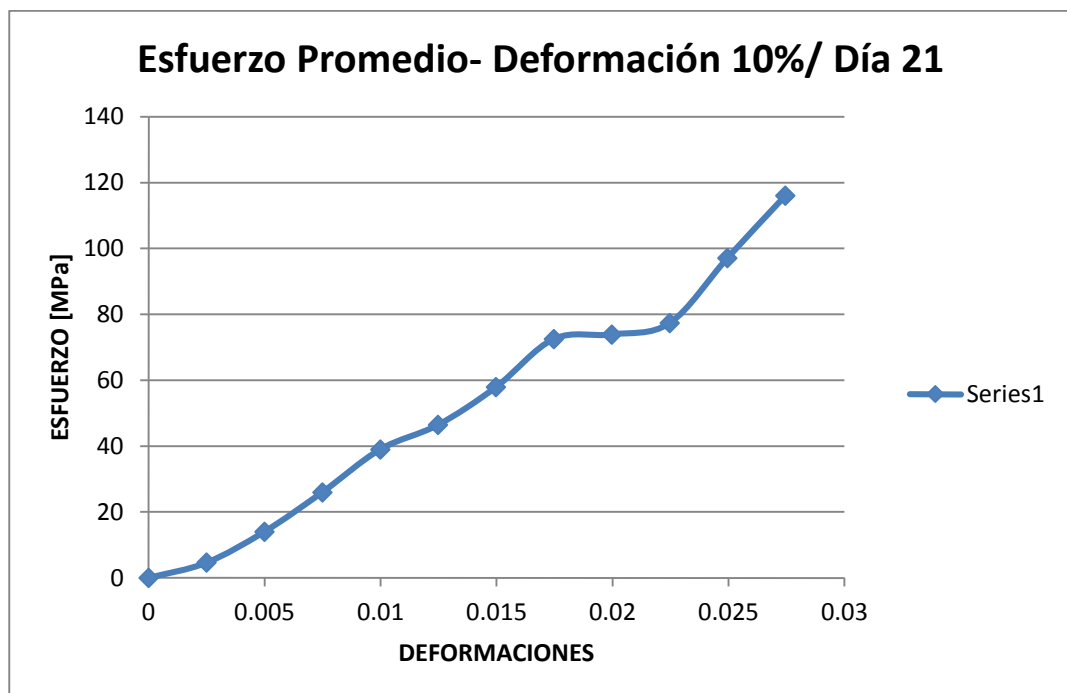


FIGURA B6. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 21, 10%

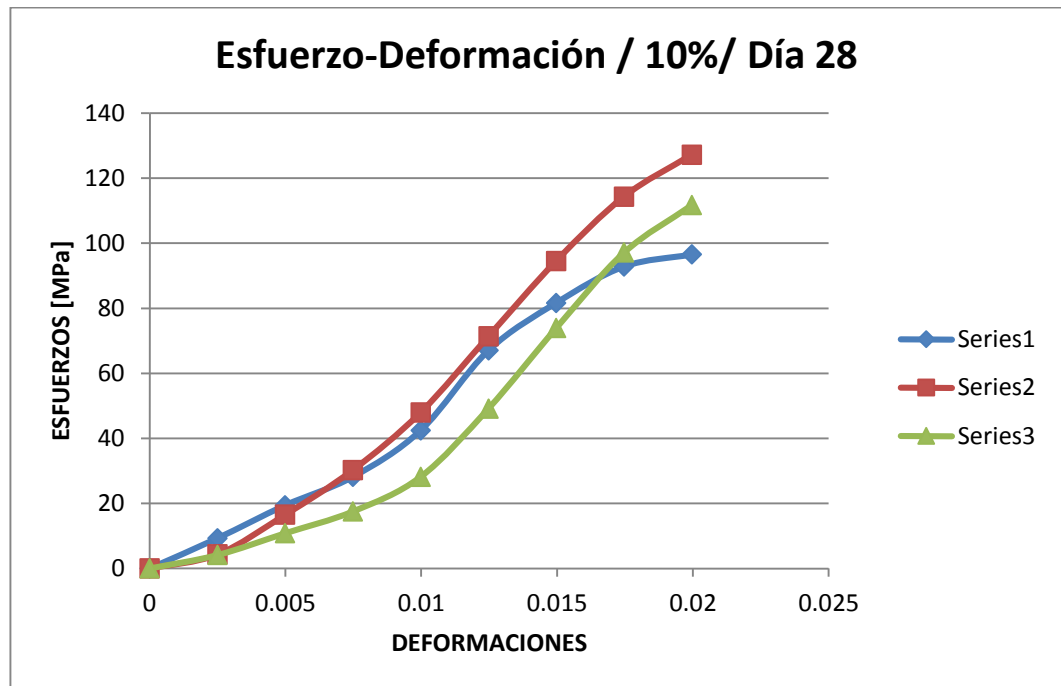


FIGURA B7. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 28, 10%

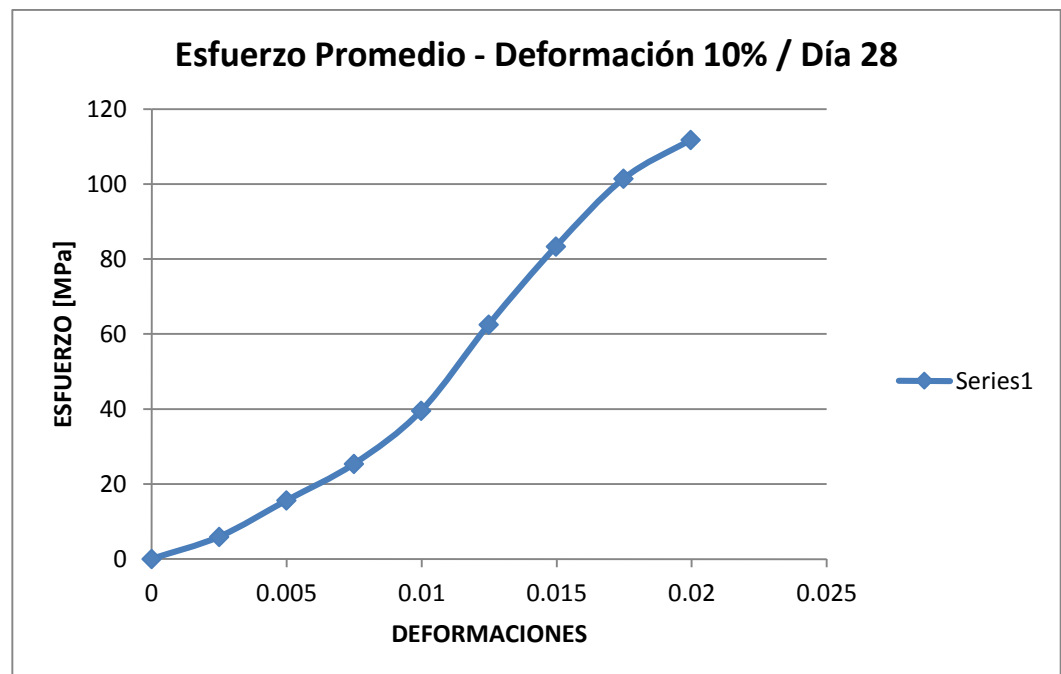


FIGURA B8. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 28, 10%

APÉNDICE C

CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN EXPERIMENTAL, 12.5%

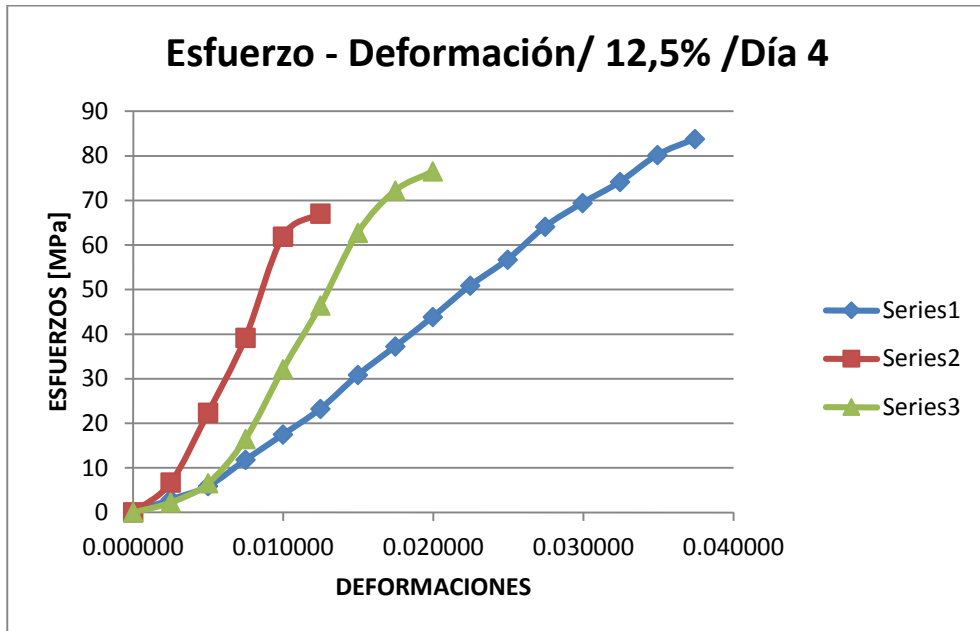


FIGURA C1. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 4, 12,5%

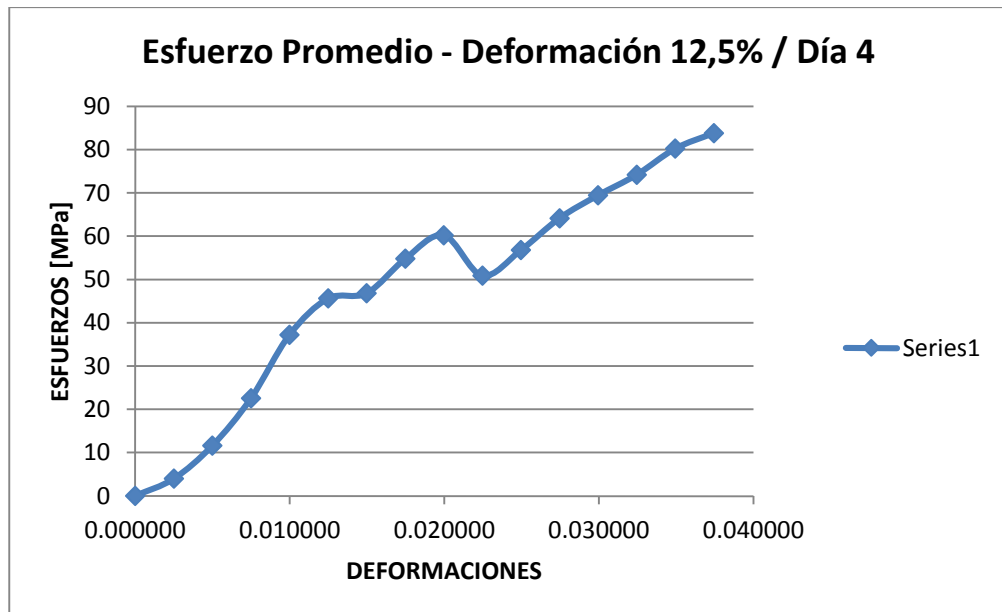


FIGURA C2. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 4, 12,5%

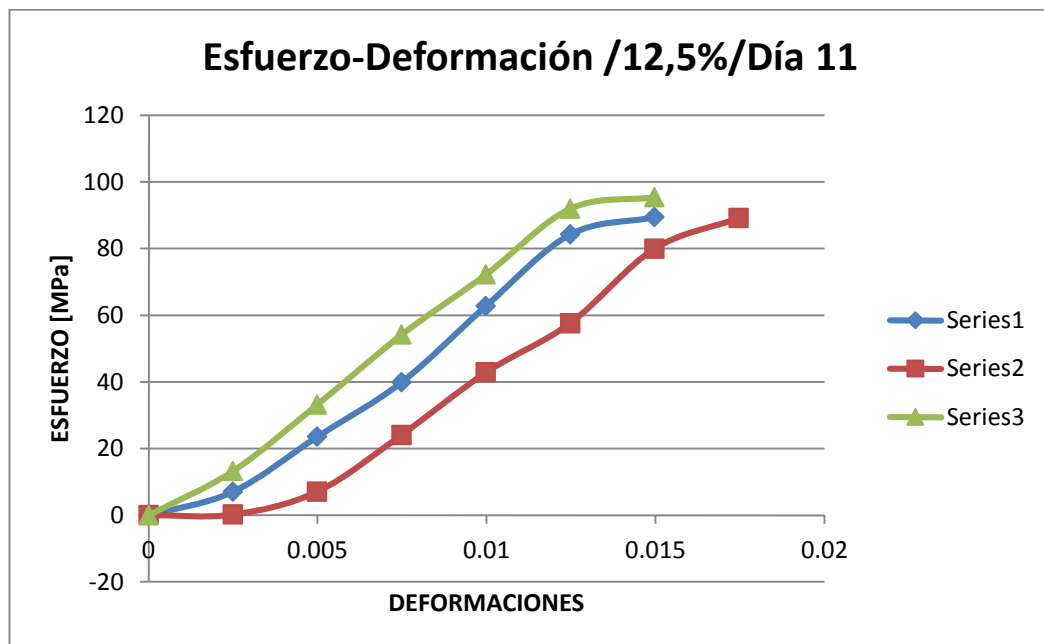


FIGURA C3. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 11, 12,5%

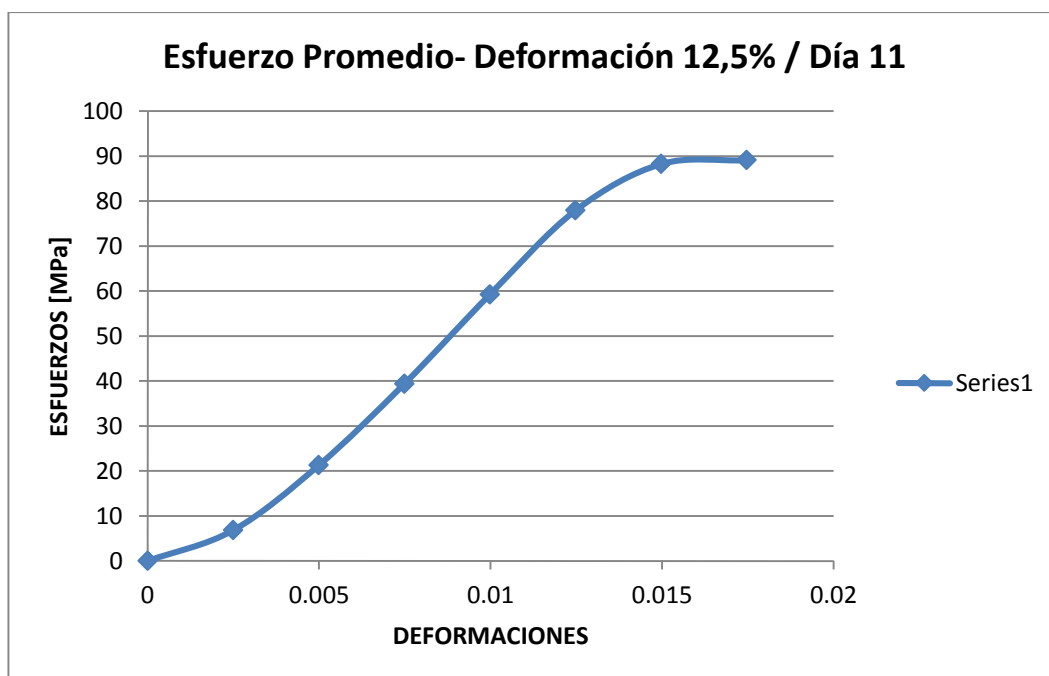


FIGURA C4. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 11, 12,5%

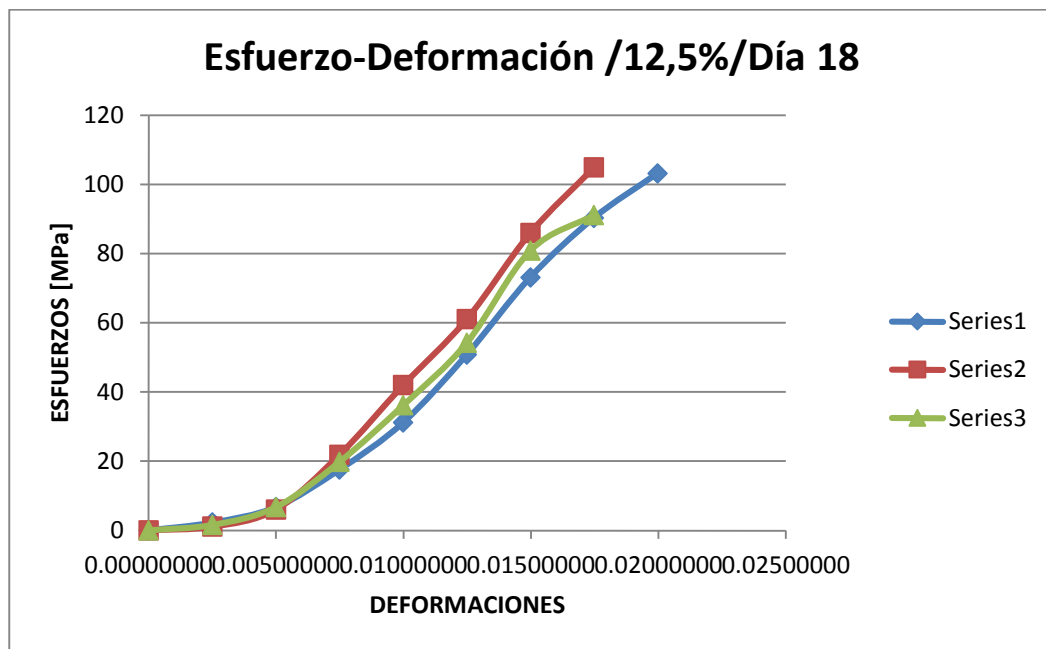


FIGURA C5. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 18, 12,5%

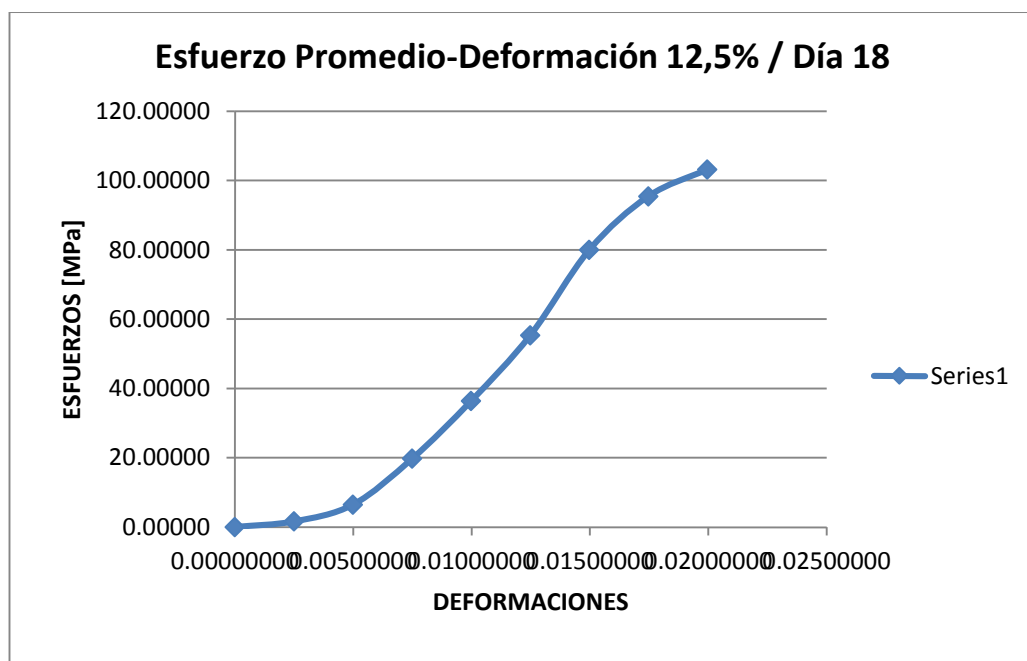


FIGURA C6. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 18, 12,5%

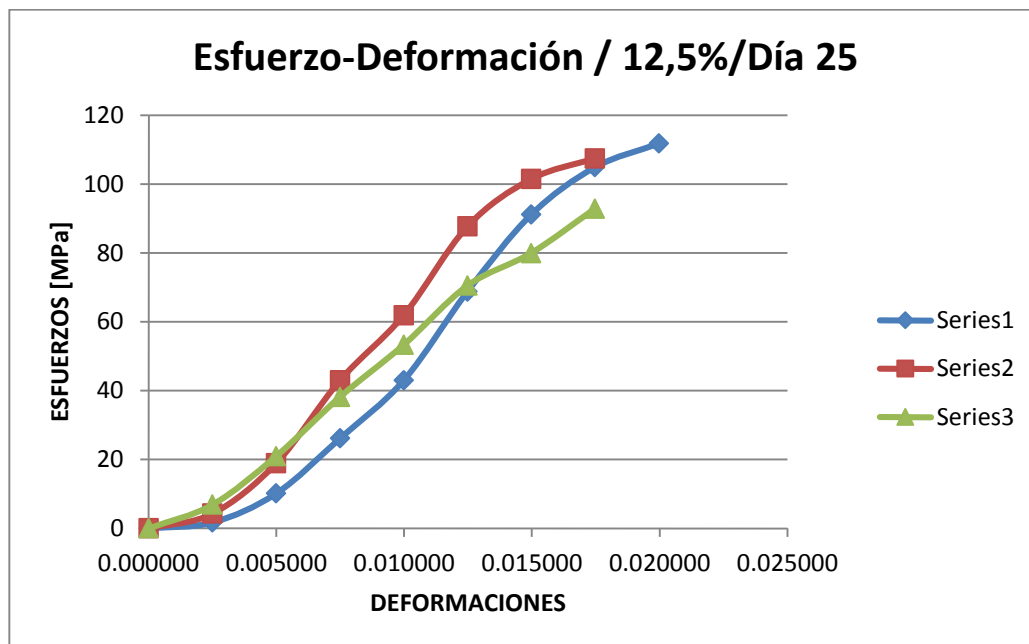


FIGURA C7. GRÁFICA DE MUESTRAS 1, 2, 3; DÍA 25, 12,5%

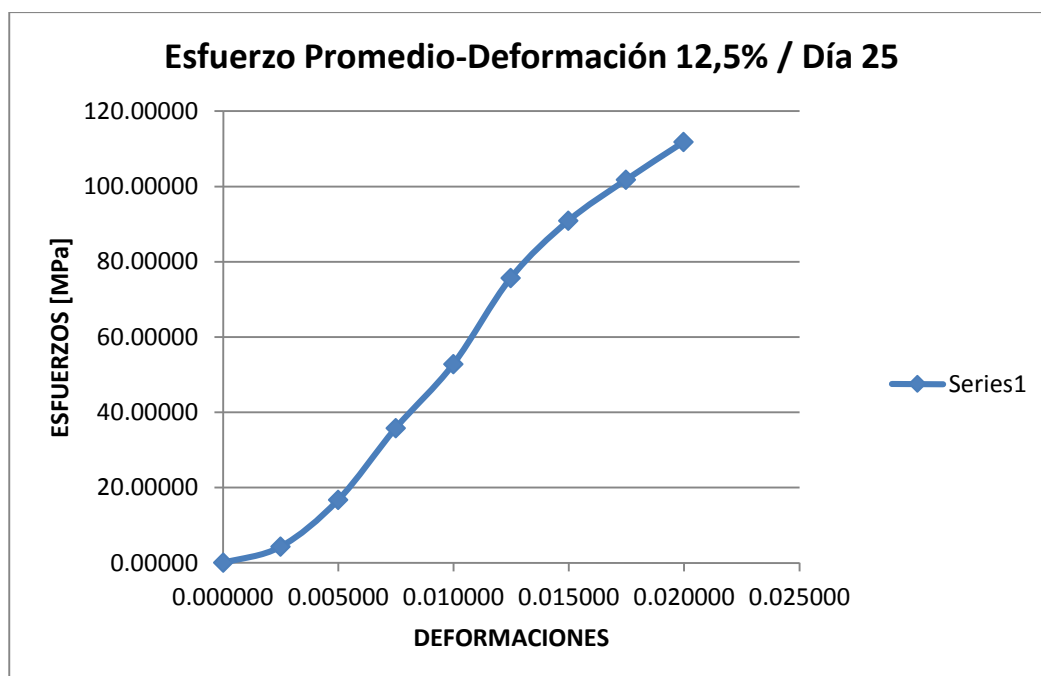


FIGURA C8. GRÁFICA DE ESFUERZO PROMEDIO; DÍA 25, 12,5%

APÉNDICE D

HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE E PROMEDIO, 10% DE ZEOLITA

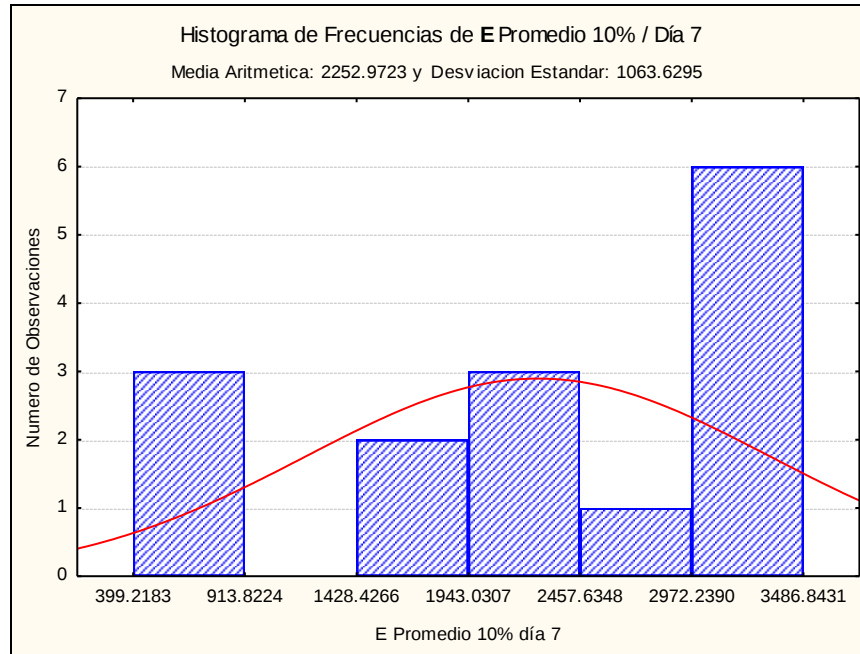


FIGURA D1. E PROMEDIO, DÍA 7 DE CURADO

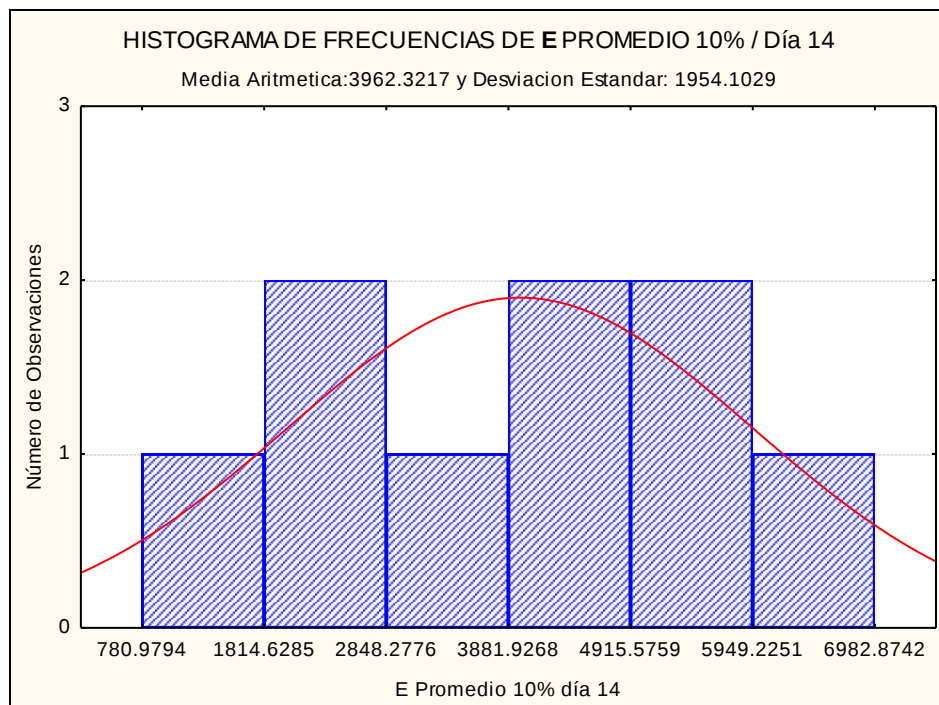


FIGURA D2. E PROMEDIO, DÍA 14 DE CURADO

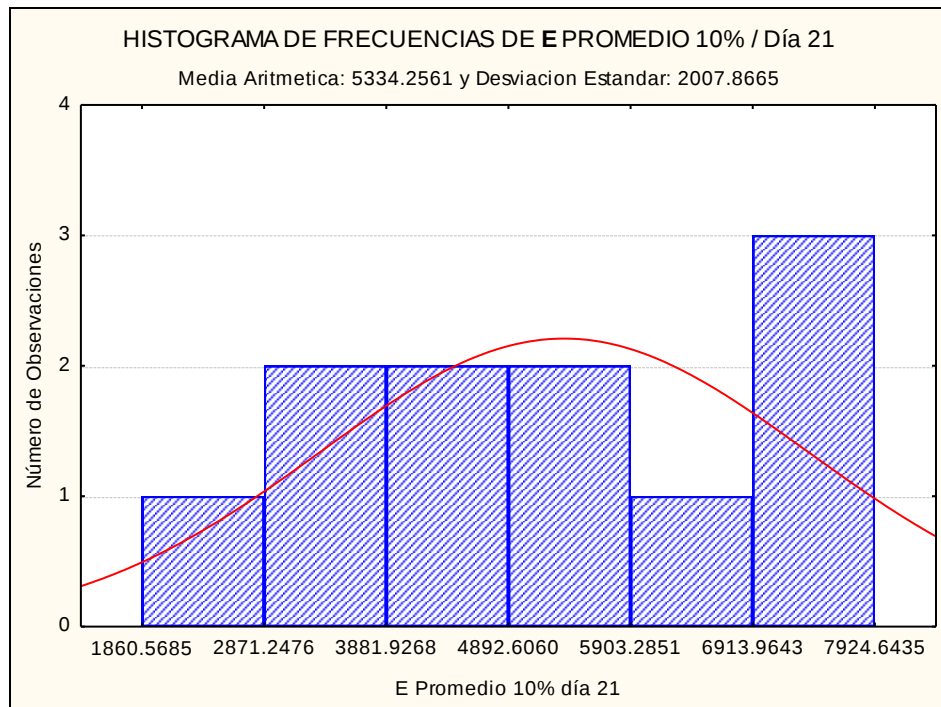


FIGURA D3. E PROMEDIO, DÍA 21 DE CURADO

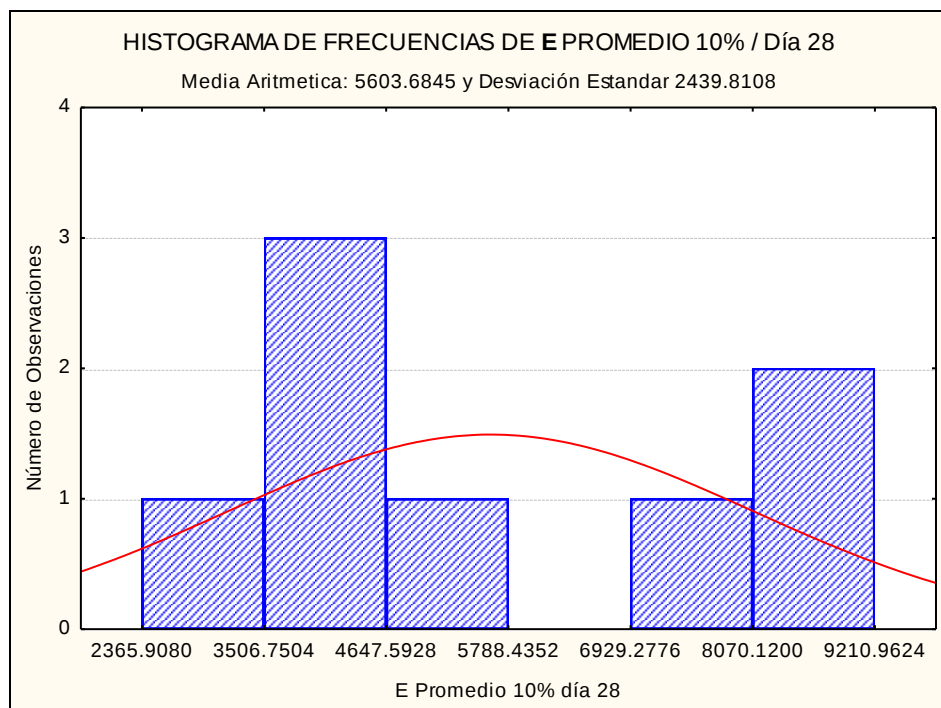


FIGURA D4. E PROMEDIO, DÍA 28 DE CURADO

APÉNDICE E
HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE E PROMEDIO, 12,5% DE ZEOLITA

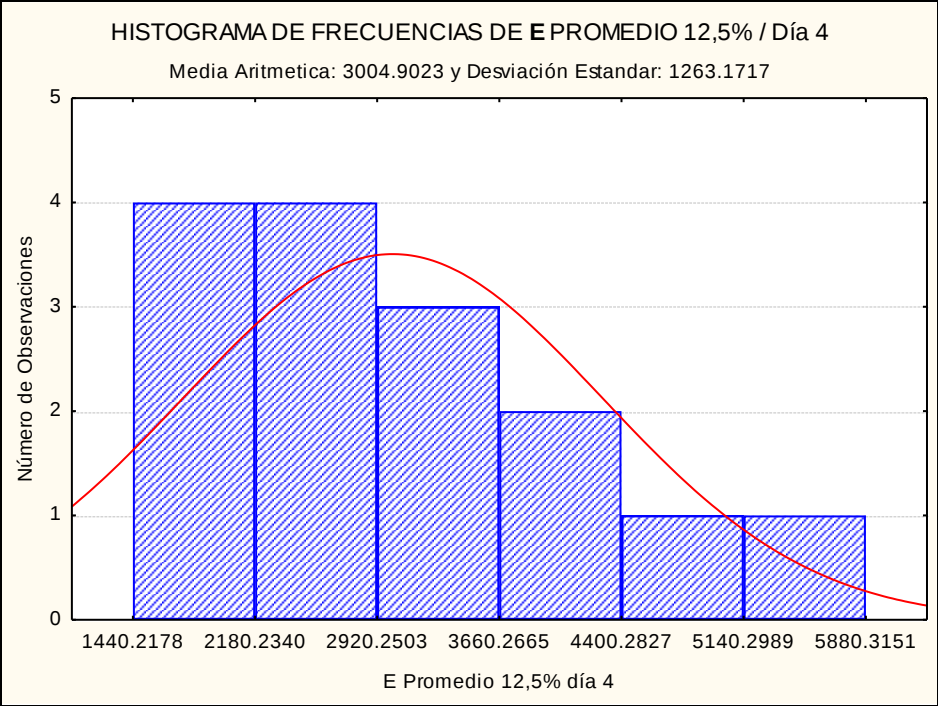


FIGURA E1. E PROMEDIO, DÍA 4 DE CURADO

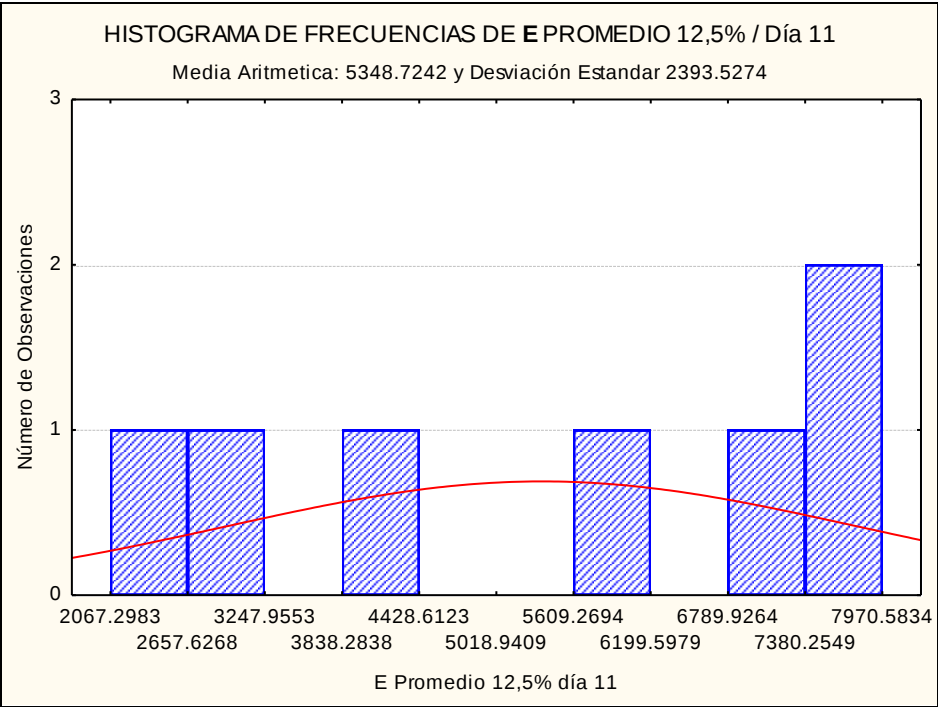


FIGURA E2. E PROMEDIO, DÍA 11 DE CURADO

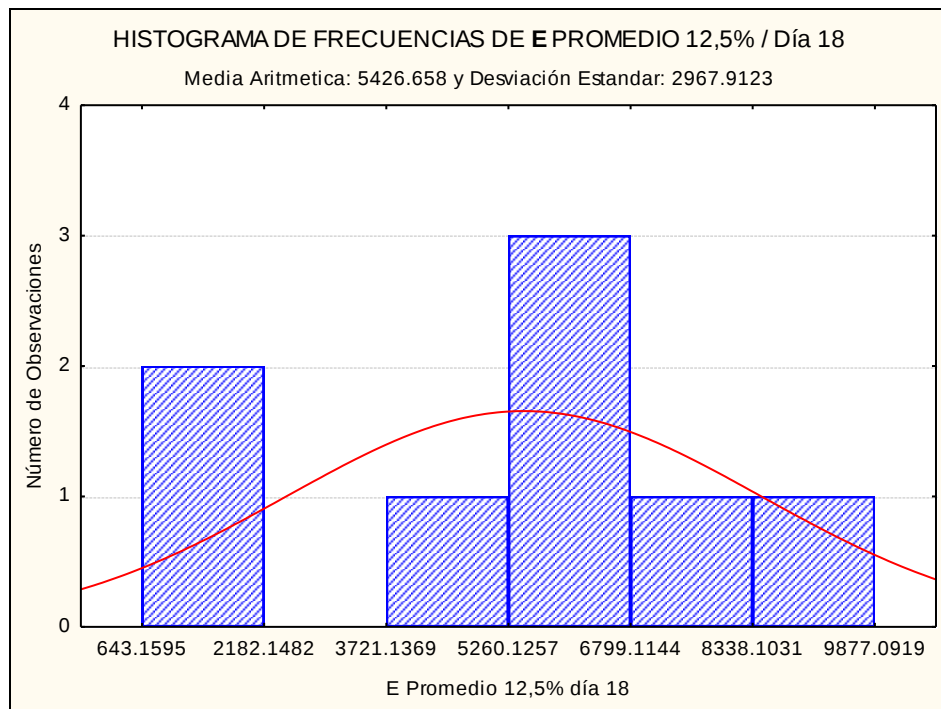


FIGURA E3. E PROMEDIO, DÍA 18 DE CURADO

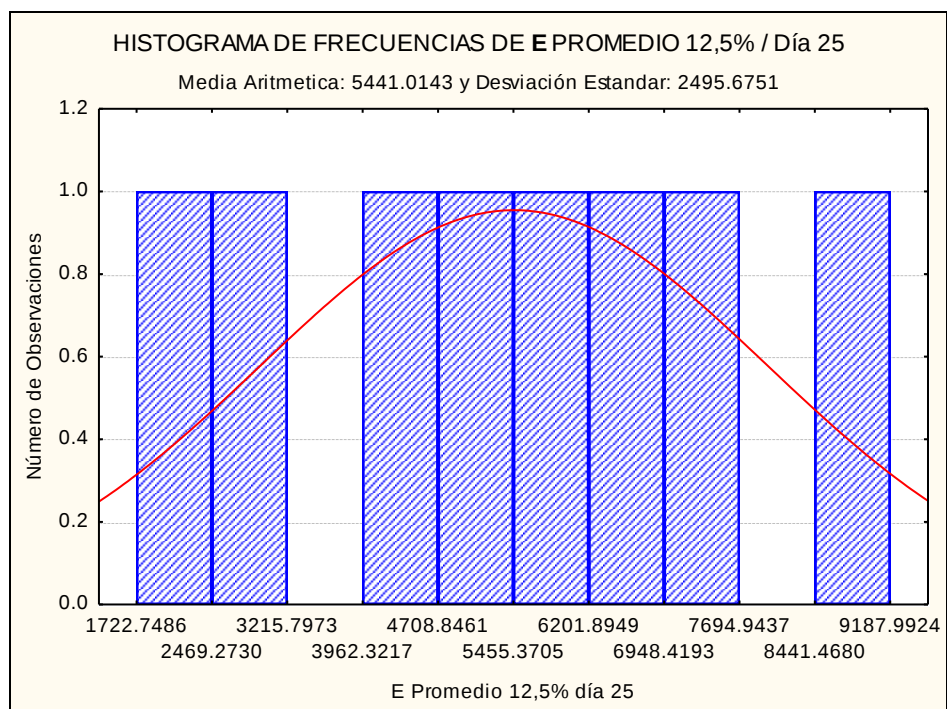


FIGURA E4. E PROMEDIO, DÍA 25 DE CURADO

APÉNDICE F

TABLA F1.

DATOS EXPERIMENTALES COMPLEMENTARIOS

DATOS Y MEDICIONES TOMADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN						
MUESTRAS	Lo (mm)	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA	ÁREA LATERAL (mm²)	FECHA DE MEZCLA	FECHA DE ENSAYO
G1/10%/D7	50.9	25.4	73.3	2590.81	29-jul-08	05-ago-08
G1/10%/D14		24.5	73.3			12-ago-08
G1/10%/D21		25.4	72.5			19-ago-08
G1/10%/D28		25.1	76.2			26-ago-08
G1/12,5%/D4	50.9	25.4	73.33	2590.81	08-ago-08	12-ago-08
G1/12,5%/D11		25.4	72.5			19-ago-08
G1/12,5%/D18		25.1	75.5			26-ago-08
G1/12,5%/D25		25.1	76.2			02-sep-08

APÉNDICE H

GRÁFICAS EN MATLAB AJUSTADAS DEL 10% DE ZEOLITA

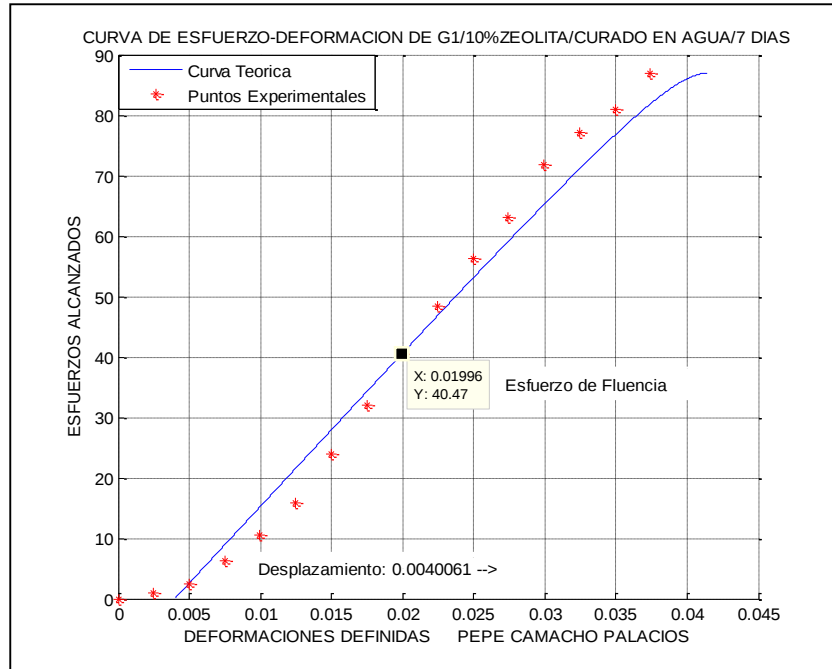


FIGURA H1. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA 7

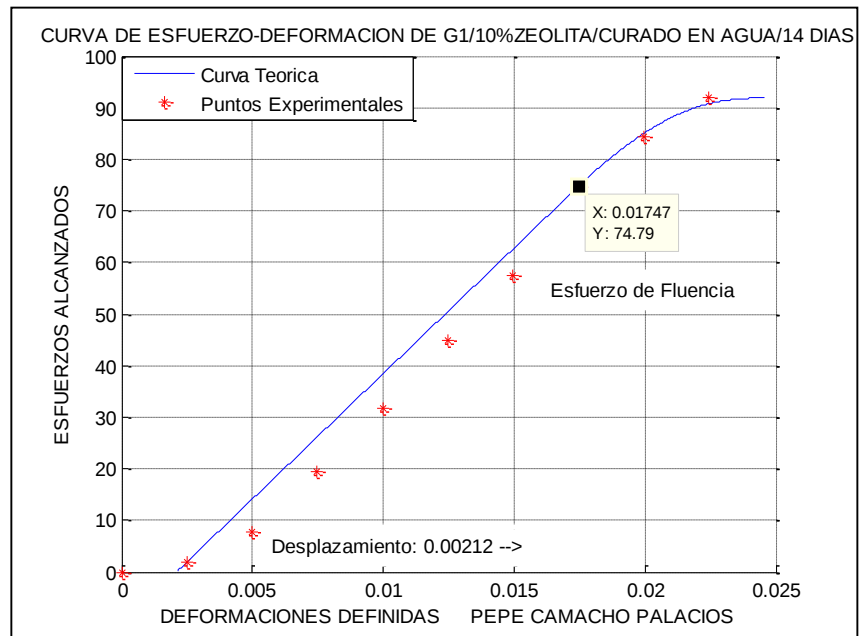


FIGURA H2. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA 14

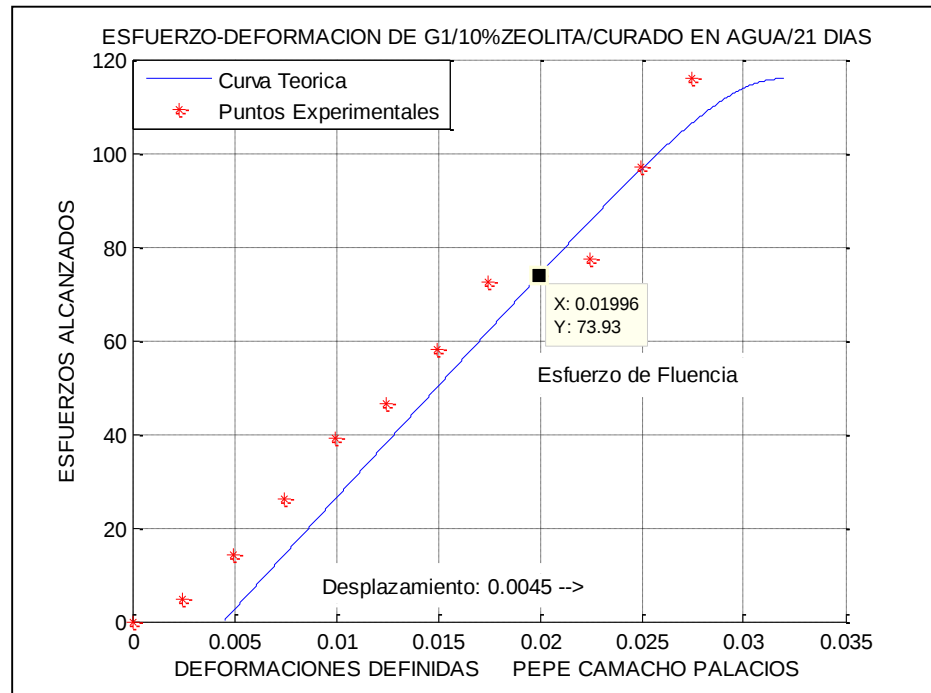


FIGURA H3. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA 21

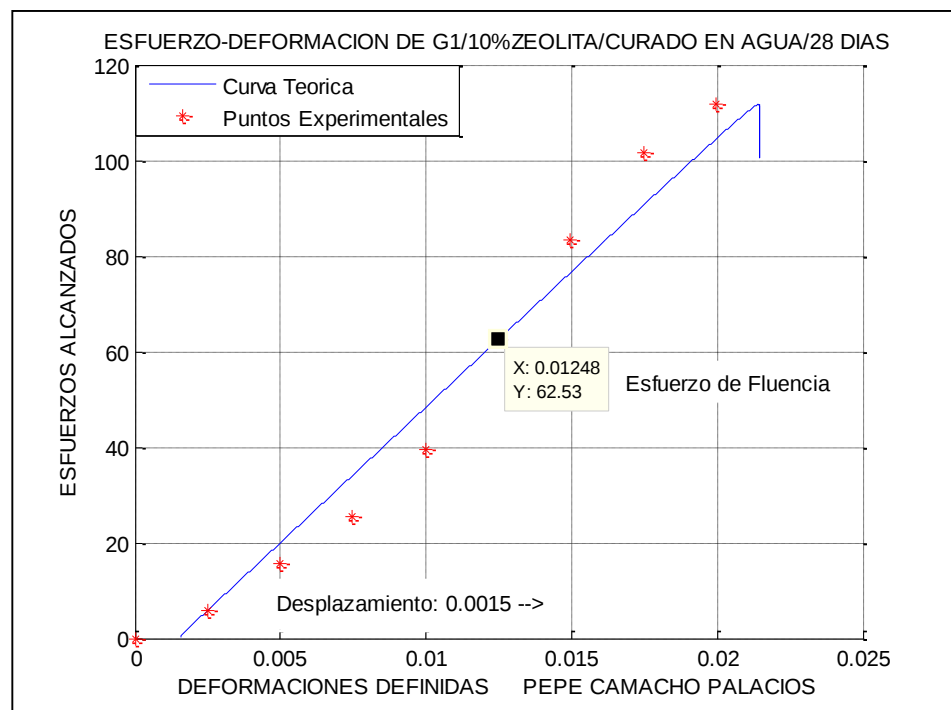


FIGURA H4. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA28

APÉNDICE I

GRÁFICAS EN MATLAB AJUSTADAS DEL 12.5% DE ZEOLITA

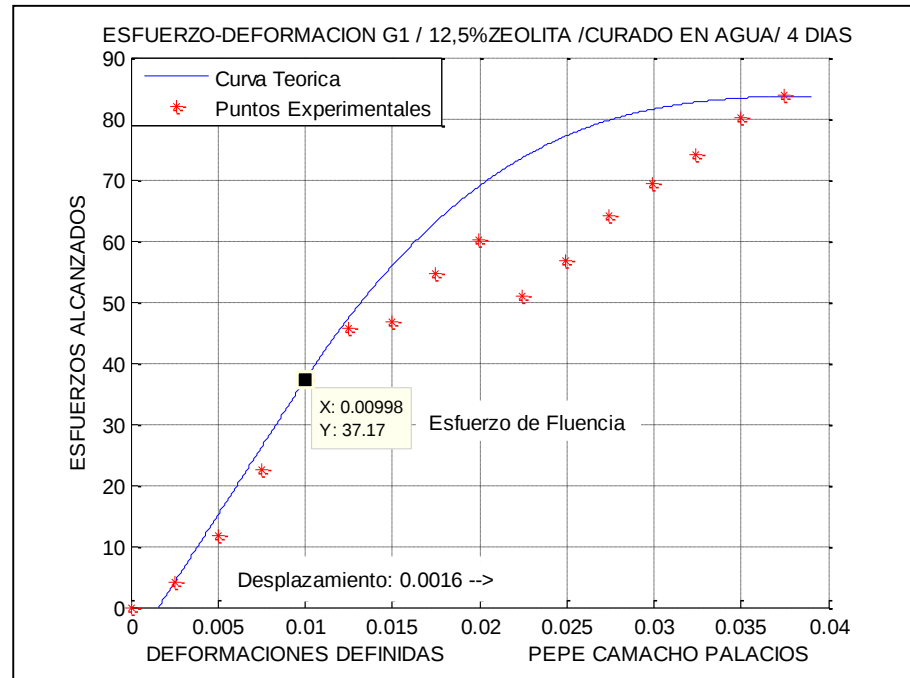


FIGURA I1. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA 4

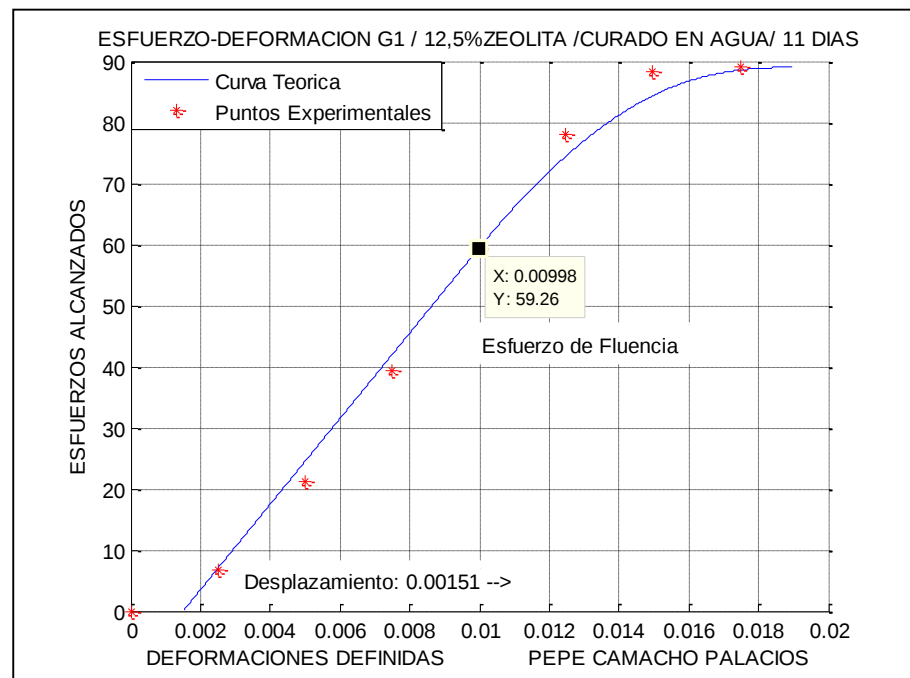


FIGURA I2. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA 11

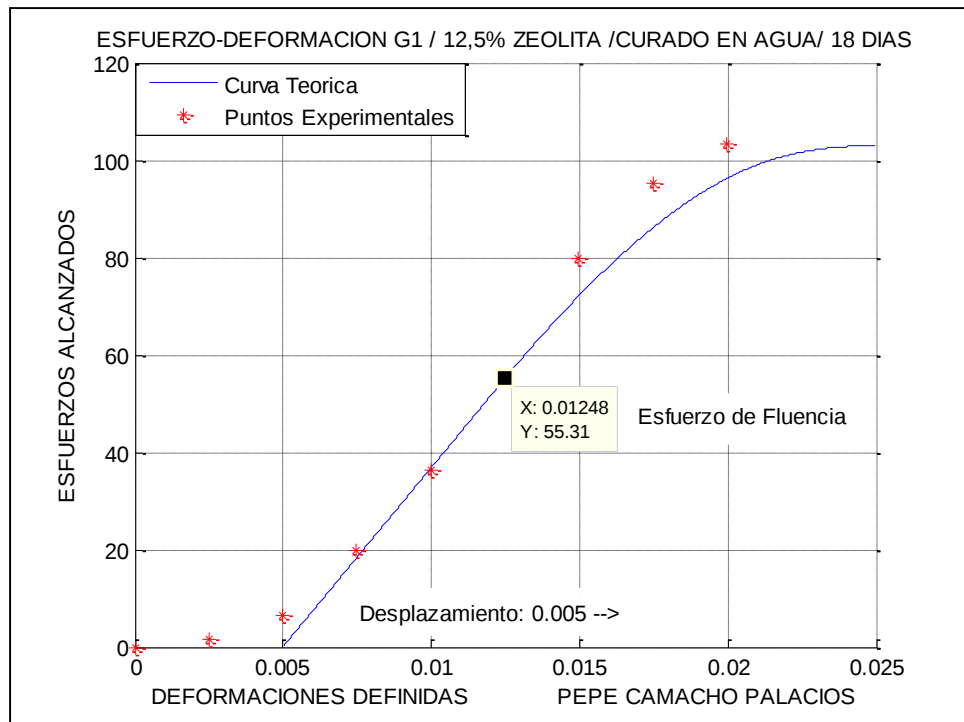


FIGURA I3. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA 18

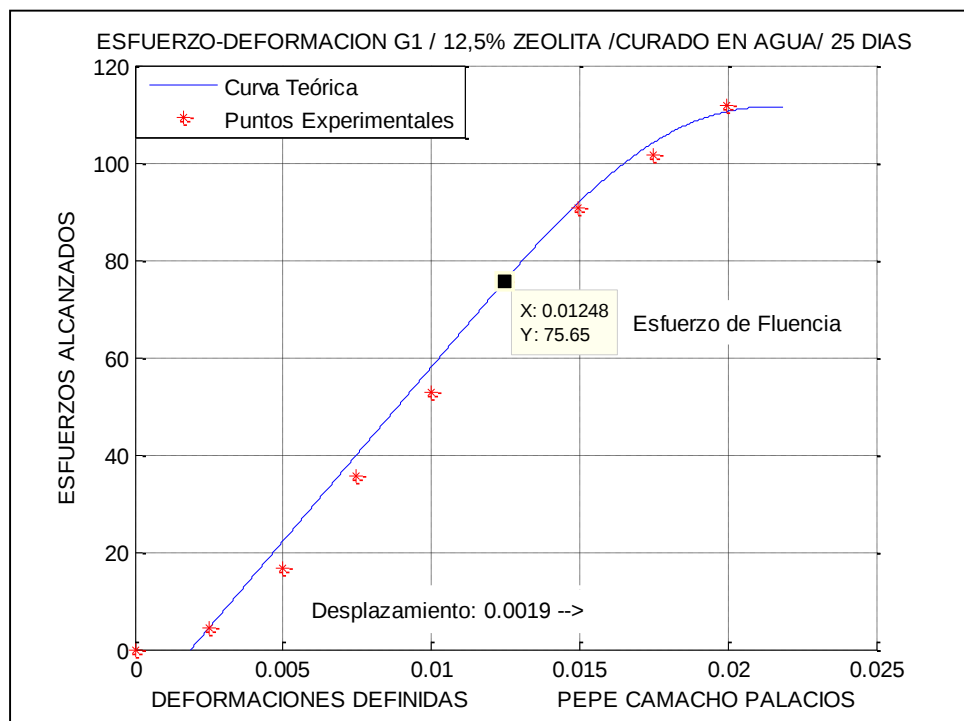


FIGURA I4. GRÁFICA ESFUERZO DEFORMACIÓN, DÍA 25

APÉNDICE J

TABLA J1.

ERRORES DE DATOS EXPERIMENTALES Vs DATOS TEÓRICOS GENERADOS POR LA SIMULACIÓN POR COMPUTADORA, 10% ZEOLITA.

G1 - 10%	DEFORMACIÓN	ESFUERZO EXPERIMENTAL [Mpa]	ESFUERZO TEÓRICO [Mpa]	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA EXPERIMENTAL	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA TEÓRICO	ERROR PARA CADA PUNTO	ERROR PARA RUPTURA
DÍA 7	0.000000	0.000000	0.000000	86.999819	86.91	0%	0.0010
	0.002495	0.996085	6.329600			84%	
	0.004990	2.496517	12.659100			80%	
	0.007485	6.367378	18.988700			66%	
	0.009980	10.616500	25.318200			58%	
	0.012475	15.886923	31.647800			50%	
	0.014971	23.956472	37.977300			37%	
	0.017466	31.962977	44.293100			28%	
	0.019961	40.473829	50.540100			20%	
	0.022456	48.480334	56.706200			15%	
	0.024951	56.171622	62.774400			11%	
	0.027446	63.043347	68.711200			8%	
	0.029941	71.743329	74.450100			4%	
	0.032436	77.228100	79.845600			3%	
	0.034931	80.853092	84.503600			4%	
	0.037426	86.999819	86.910900			0%	

DÍA 14	0.000000	0.000000	0.000000	91.985974	91.87	0%	0.0013
	0.002495	1.948613	12.140600			84%	
	0.004990	7.737138	24.281300			68%	
	0.007485	19.371501	36.421900			47%	
	0.009980	31.578986	48.562500			35%	
	0.012475	44.818088	60.703100			26%	
	0.014971	57.369446	72.843700			21%	
	0.017466	74.792334	83.627600			11%	
	0.019961	84.248836	90.213900			7%	
	0.022456	91.985974	91.867600			0%	
DÍA 21	0.000000	0.000000	0.000000	116.0570	115.8408	0%	0.0019
	0.002495	4.642283	11.900500			61%	
	0.004990	14.041473	23.800900			41%	
	0.007485	26.019709	35.701400			27%	
	0.009980	39.029563	47.601800			18%	
	0.012475	46.480140	59.502300			22%	
	0.014971	57.942567	71.402700			19%	
	0.017466	72.557161	83.117800			13%	
	0.019961	73.932652	94.210500			22%	
	0.022456	77.371380	104.353400			26%	
	0.024951	97.144066	112.504000			14%	
	0.027446	116.057070	115.840800			0%	
DÍA 28	0.000000	0.000000	0.000000	111.853507	111.70	0%	0.0014
	0.002495	5.903150	14.156100			58%	
	0.004990	15.588900	28.312200			45%	
	0.007485	25.331963	42.468300			40%	
	0.009980	39.545372	56.624400			30%	
	0.012475	62.527538	70.770300			12%	
	0.014971	83.389154	84.855600			2%	
	0.017466	101.442476	98.820900			-3%	
	0.019961	111.853507	111.697900			0%	

APÉNDICE K

TABLA K1. (1/2)

ERRORES DE DATOS EXPERIMENTALES Vs DATOS TEÓRICOS GENERADOS POR LA SIMULACIÓN POR COMPUTADORA, 12,5% ZEOLITA

G1-12,5%	DEFORMACIÓN	ESFUERZO EXPERIMENTAL [MPa]	ESFUERZO TEÓRICO [MPa]	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA EXPERIMENTAL	ESFUERZO MÁXIMO RUPTURA TEÓRICO	ERROR PARA CADA PUNTO	ERROR PARA RUPTURA
DÍA 4	0.000000	0.0000	0.0000	83.7846	83.6684	0.00%	0.0014
	0.002495	3.9511	11.0746			64.32%	
	0.004990	11.5954	22.1492			47.65%	
	0.007485	22.5030	33.2239			32.27%	
	0.009980	37.1749	43.8593			15.24%	
	0.012475	45.5803	52.8653			13.78%	
	0.014971	46.7925	60.4773			22.63%	
	0.017466	54.7360	66.8157			18.08%	
	0.019961	60.1949	71.9401			16.33%	
	0.022456	50.8760	75.9217			32.99%	
	0.024951	56.7390	78.8750			28.06%	
	0.027446	64.1151	80.9515			20.80%	
	0.029941	69.4107	82.3195			15.68%	
	0.032436	74.1390	83.1403			10.83%	
	0.034931	80.1911	83.5527			4.02%	
	0.037426	83.7846	83.6684			-0.14%	

TABLA K1. (2/2)

DÍA 11	0.000000	0.0000	0.0000	89.1085	89.0032	0.00%	0.0012
	0.002495	6.8201	17.4802			60.98%	
	0.004990	21.2628	34.9604			39.18%	
	0.007485	39.3734	52.4406			24.92%	
	0.009980	59.2607	68.9735			14.08%	
	0.012475	77.9445	81.0591			3.84%	
	0.014971	88.2607	87.5014			-0.87%	
	0.017466	89.1085	89.0032			-0.12%	
DÍA 18	0.000000	0.0000	0.0000	103.1618	102.9635	0.00%	0.0019
	0.002495	1.6047	18.3686			91.26%	
	0.004990	6.4763	36.7371			82.37%	
	0.007485	19.7154	55.1057			64.22%	
	0.009980	36.3932	72.0216			49.47%	
	0.012475	55.3062	85.9929			35.69%	
	0.014971	79.9504	96.1640			16.86%	
	0.017466	95.4247	101.5987			6.08%	
	0.019961	103.1618	102.9635			-0.19%	
DÍA 25	0.000000	0.0000	0.0000	111.7587	111.5761	0.00%	0.0016
	0.002495	4.2984	17.8384			75.90%	
	0.004990	16.6778	35.6768			53.25%	
	0.007485	35.7628	53.5152			33.17%	
	0.009980	52.7272	71.3536			26.10%	
	0.012475	75.6520	88.1764			14.20%	
	0.014971	90.8397	101.4576			10.47%	
	0.017466	101.7290	109.4847			7.08%	
	0.019961	111.7587	111.5761			-0.16%	

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 151:2005, Quito, agosto 2006, sección 3.20 y 3.29

- [2] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 151:2005, Quito, agosto 2006, sección 3.33

- [3] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 151:2005, Quito, agosto 2006, sección 3.34

- [4] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 151:2005, Quito, agosto 2006, sección 3.35

- [5] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 151:2005, Quito, agosto 2006, sección 3.11

- [6] Instituto Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 151:2005, Quito, agosto 2006, sección 3.27

- [7] Mosquera C. Aurelio Dr., “EL CEMENTO Historia, Fabricación y Usos”, Limusa, México. 1986, pág. 42.

- [8] McMILLAN F.R., Cartilla del concreto, IMCYC, México 1968, 68 pág.
Traducción autorizada del Concrete Primer del American Concrete Institute.

- [9] Peter C Hewlett, "LEAS Chemistry of Cement and Concrete", 4th Edition
- [10] ROBALINO ESPINOZA PAOLA ALEXANDRA, El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Pozolánico, Tesis Facultad en Ciencias de la Tierra, ESPOL.
- [11] ASTM C618-01, (Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete), 1992.
- [12] ASTM C109/C109M, Esfuerzos de Compresión en Morteros de cementos hidráulico, 1992
- [13] Joan Ferré, El diseño factorial completo, Grupo de Quimiometría y Cualimetría, Departamento de Química Analítica y Química Orgánica, Universidad Rovira i Virgili (Tarragona)