

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Estudio y Simulación de la Resistencia a la Compresión
del Cemento Curado en Agua, con una Adición al 25% de
Zeolita.”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Luis Abelardo Aguirre Tinitana

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a la Virgen del Cisne, a la Dra. Cecilia Paredes, al Ing. Juan Pindo, a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo, y especialmente a mis padres por darme la oportunidad de poder estudiar y apoyarme en todo.

DEDICATORIA

ESTE TRABAJO HECHO
CON ESFUERZO POR
VARIOS MESES, ESTA
DEDICADO A MIS
AMADOS PADRES,
ABUELOS (+), A MI HIJA
BRISSA, A MI HIJO
ENZO, A MI MUJER
PAOLA, A MIS
HERMANOS, SOBRINAS,
FAMILIARES Y AMIGOS.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

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

Ing. Rodrigo Perugachi B.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Juan Pindo M.

VOCAL

Ing. Mauricio Cornejo M.

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Luis Abelardo Aguirre Tinitana

RESUMEN

El presente estudio investigó el comportamiento de la pasta de cemento pórtland 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 + 25% zeolita y la segunda el cemento tipo I + agua + 27,5% zeolita; ambas con relación agua/cemento de 0.3 y cantidad suficiente para llenar 12 probetas por cada porcentaje (20 y 27,5%) 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 días 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 comparó 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 que es característica del material en mención; la misma que se ajustó 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
ÍNDICE DE PLANOS.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodología.....	4
1.4. Planteamiento y justificación.....	6
1.5. Estructura de la tesis.....	6

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Generalidades del cemento.....	9
2.2. Generalidades de la puzolana.....	12
2.3. Métodos de curado del cemento.....	14
2.4. Diseño experimental.....	22
2.5. Otras investigaciones.....	24

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA.....	25
3.1. Diseño del experimento recolección de datos.....	25
3.2. Experimentación.....	31
3.2.1. Preparación de muestras.....	31
3.2.2. Ensayos.....	42
3.3. Modelo matemático.....	45

CAPÍTULO 4

4.RESULTADOS.....	51
4.1. Tabulación de datos y resultados.....	51
4.2. Análisis estadístico.....	57

4.3. Diseño del modelo matemático y simulación.....	71
---	----

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
--	----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ASTM	:	American Society of Testing and Materials
A	:	Área de sección.
Fig.	:	Figura.
g	:	Gramos.
g/cm ³	:	Gramos sobre centímetros cúbicos.
Hr	:	Horas.
HR	:	Humedad Relativa.
Kg	:	Kilogramos.
Lb/pulg ²	:	Libras sobre pulgadas cuadradas
m	:	Metro.
m ³	:	Metros cúbicos
MPa	:	Mega pascales
mm	:	Milímetros
Min	:	Minutos
E	:	Módulo de Elasticidad.
N	:	Newton
N/ mm ²	:	Newton sobre milímetros cuadrados.
TON	:	Toneladas

SIMBOLOGÍA

Al	:	Aluminio.
Ca	:	Calcio.
σ	:	Esfuerzo.
σ_f	:	Esfuerzo de fluencia.
$\sigma_{\text{máx.}}$:	Esfuerzo máximo.
P	:	Fósforo.
C-S-H	:	Hidrosilicatos de calcio.
Mn	:	Manganeso.
O	:	Oxígeno.
SO	:	Óxido de azufre.
CaO	:	Óxido de calcio.
SrO	:	Óxido de estroncio.
FeO	:	Óxido de hierro.
MgO	:	Óxido de magnesio.
SiO	:	Óxido de sílice.
TiO	:	Óxido de titanio.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Metodología.....	5
Figura 3.1 Molino de mandíbulas	33
Figura 3.2 Cuarteo.....	33
Figura 3.3 Molino de discos.....	33
Figura 3.4 Molino de bolas.....	34
Figura 3.5 Tamaño de partículas de zeolita.....	34
Figura 3.6 Mezcladora Habart.....	35
Figura 3.7 Balanza Santorius.....	36
Figura 3.8 Pesando zeolita.....	36
Figura 3.9 Homogenizando mezcla.....	36
Figura 3.10 Mezclando cemento + zeolita + agua.....	36
Figura 3.11 Orden de apisonamiento de muestras.....	38
Figura 3.12 Moldes	39
Figura 3.13 Limpieza de moldes	39
Figura 3.14 Moldes listos	39
Figura 3.15 Mezcla en moldes	39
Figura 3.16 Vaciado en moldes.....	40
Figura 3.17 Llenado de moldes.....	40
Figura 3.18 Apisonado de moldes	40
Figura 3.19 Golpeteo de moldes	41
Figura 3.20 Moldes llenos.....	41

Figura 3.21	Desmolde...	41
Figura 3.22	Desmolde 1.....	42
Figura 3.23	Moldes en tina de agua.....	42
Figura 3.24	Sensor de temperatura y humedad relativa.....	43
Figura 3.25	Muestra en máquina.....	43
Figura 3.26	Muestra sometida a carga.....	44
Figura 3.27	Máquina funcionando	44
Figura 3.28	Ruptura de muestra	44
Figura 3.29	Gráfica esfuerzo vs deformación.....	50
Figura 4.1	Valores de esfuerzo de ruptura vs días de curado.....	59
Figura 4.2	Curva de esfuerzo de ruptura promedio.....	60
Figura 4.3	Esfuerzo de ruptura promedio vs días de curado.....	64
Figura 4.4	Esfuerzo de ruptura promedio vs % de zeolita.....	64
Figura 4.5	Grupal, esfuerzo de ruptura vs días de curado.....	65
Figura 4.6	Grupal, esfuerzo de ruptura vs % de zeolita.	65
Figura 4.7	Grupal, días de curado vs % de zeolita a nivel de superficies.....	66
Figura 4.8	Valores medios del esfuerzo vs % de zeolita, cemento tipo I y tipo IV.....	68

Figura 4.9	Valores medios del esfuerzo vs días de curado basado en% de zeolita, cemento tipo I y IV.....	68
Figura 4.10	Valores medios del esfuerzo vs % de zeolita, cemento tipo I y IV basados en días de curado.....	69
Figura 4.11	Probabilidades % de zeolita vs días de curado (cemento tipo I y IV, 7, 14, 21,28) a nivel de superficie.	70
Figura 4.12	Esfuerzo de ruptura vs deformación a los 7 días de curado (Matlab).....	72
Figura 4.13	Esfuerzo de ruptura vs deformación a los 14 días de curado (Matlab).....	73
Figura 4.14	Esfuerzo de ruptura vs deformación a los 21 días de curado (Matlab).....	73
Figura 4.15	Esfuerzo de ruptura vs deformación a los 28 días de curado (Matlab).....	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Características generales de la zeolita..... 13
Tabla 2	Relación agua-cemento máximas permisibles..... 22
Tabla 3	Datos de esfuerzo a la compresión de muestras..... 26
Tabla 4	Tamaño de partículas por tamiz..... 32
Tabla 5	Cantidad de zeolita y cemento..... 34
Tabla 6	Variaciones permisibles de moldes de especímenes..... 37
Tabla 7	Datos de ensayo, 25% de zeolita, día 7 de curado, muestras 1-2-3..... 52
Tabla 8	Datos de ensayo, 25% de zeolita, día 14 de curado, muestras 1-2-3..... 52
Tabla 9	Datos de ensayo, 25% de zeolita, día 21 de curado, muestras 1-2-3..... 53
Tabla 10	Datos de ensayo, 25% de zeolita, día 28 de curado, muestras 1-2-3..... 53
Tabla 11	Datos de ensayo, 27,5 % de zeolita, día 4 de curado, muestras 1-2-3..... 54
Tabla 12	Datos de ensayo, 27,5 % de zeolita, día 11 de curado, muestras1-2-3..... 54
Tabla 13	Datos de ensayo, 27,5 % de zeolita, día 18 de curado, muestras 1-2-3..... 55
Tabla 14	Datos de ensayo, 27,5 % de zeolita, día 25 de curado, muestras 1-2-3..... 55

Tabla 15	Valores de esfuerzo, con 25% de zeolita en 7, 14, 21 y 28 días de curado.....	56
Tabla 16	Valores de esfuerzo, con 27.5% de zeolita en 4, 11, 18 y 25 días de curado.....	57
Tabla 17	Valores de media de los esfuerzo de ruptura promedio, error, valor p, para muestras de cemento+25% de Zeolita en 7, 14, 21 y 28 días de curado.....	58
Tabla 18	Valores de probabilidades aplicando Duncan, para muestras de cemento + 25% de zeolita en 7, 14, 21 y 28 días de curado.....	58
Tabla 19	Valores de probabilidades aplicando Dunnet, para muestras de cemento + 25% de Zeolita en 7, 14, 21 y 28 días de curado.....	59
Tabla 20	Esfuerzo de ruptura promedio, para muestras de cemento + porcentaje de zeolita en 7, 14, 21 y 28 días de curado....	61
Tabla 21	Medias de esfuerzos de ruptura en base a los días de curado.....	61
Tabla 22	Medias de esfuerzos de ruptura en base a los Porcentaje de zeolita.....	62
Tabla 23	Probabilidades de días de curado vs % de zeolita para 7, 14, 21 y 28 días de curado.....	62
Tabla 24	Probabilidades porcentaje de zeolita vs días de curado.....	62
Tabla 25	Probabilidades porcentaje de zeolita vs días de curado (7, 14, 21 y 28 días), aplicando Duncan.....	63
Tabla 26	Valores de medias de los esfuerzos de acuerdo al Material usado (muestras de cemento tipo I +% de zeolita e incluye cemento tipo I y IV sin zeolita.....	67

Tabla 27	Valores de respuestas del material bajo la adición de 25% de zeolita.....	72
----------	---	----

ÍNDICE DE PLANOS

Plano G1. Ubicación geográfica de yacimientos.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento continuo de las propiedades del cemento ha sido estudio de múltiples investigaciones, el uso de materiales locales para la elaboración del mismo posee el propósito primordial de disminuir valores agregados a la manufactura, para poder competir a nivel nacional con un producto de iguales o mejores propiedades mecánicas que los demás del medio.

El cemento pórtland o cemento tipo IV que se usa actualmente, adquiere sus propiedades mecánicas de los diferentes materiales puzolánicos que lo conforman.

El material puzolánico que se usó en esta investigación es la zeolita natural ecuatoriana, así que se intenta demostrar que se alcanza las mismas o mejores propiedades mecánicas en el cemento, con el uso de esta zeolita en particular, y se pueda competir con un producto de menor costo y de buena calidad.

La zeolita ecuatoriana con la que se trabajó, fue extraída de yacimientos existentes en la provincia del Guayas, la cual se adiciona a la pasta de cemento en diferentes concentraciones y posteriormente se le hizo un curado al agua, luego se observó cómo es afectada la resistencia a la

compresión uniaxial de ésta mezcla a lo largo de los 28 días de experimentación.

El uso de análisis estadísticos en las medidas tomadas, ayudó a establecer un modelo matemático, el cual se validó con los datos obtenidos experimentalmente y así se determinó el porcentaje de error del experimento.

Finalmente, se realizó la comparación de los resultados de esfuerzos de compresión de las muestras que contienen zeolita y con los especímenes de control, para este caso el cemento tipo I y IV, es decir, que además con el análisis comparativo de la medición obtenida y haciendo uso del software estadístico, se pudo indicar cuál es la mejor concentración de zeolita adicionada al cemento pórtland tipo I, esto se califica según sea su función de respuesta.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema.

Siendo la industria cementera, un sector que ha crecido un 61% entre el 2000 y el 2007; y seguirá creciendo debido a la gran demanda de infraestructura comercial y privada, es de suma importancia encontrar un material puzolánico que permita tenerlo como materia prima alternativa para elaborar el cemento. Y si es posible tener un material puzolánico natural que mejore las propiedades mecánicas del cemento.

Adicionalmente, un gran problema ambiental se genera al producirse el clinker, la materia prima base del cemento comercial utilizado actualmente, que se puede disminuir al reducir la concentración de este componente y en su reemplazo utilizar una mayor cantidad de material puzolánico natural, dando como resultado menos contaminación por CO₂.

1.2. Objetivos.

El objetivo general de la presente tesis fue, obtener un modelo que permita simular el comportamiento de la pasta de cemento tipo I, en presencia de zeolita ecuatoriana en diferentes porcentajes de adición, a varios tiempos de curado, teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Así mismo los objetivos específicos fueron:

Estudiar el efecto que tiene la adición de zeolita a diferentes porcentajes en la pasta de cemento.

Estudiar el comportamiento de la pasta de cemento en diferentes tiempos de curado al agua (7, 14, 21 y 28 días).

Medir la resistencia a la compresión de las probetas y analizar estos resultados estadísticamente respecto al cemento tipo I y IV.

1.3. Metodología.

En la figura 1.1, se muestra la metodología planteada para lograr el objetivo del presente estudio.

Dada la necesidad de crear un estudio objetivo se define que se adicionó 25% zeolita natural ecuatoriana, para formar una pasta de

cemento con curado en agua, estos resultados obtenidos serán comparados con otras combinaciones específicas realizadas en investigaciones paralelas.

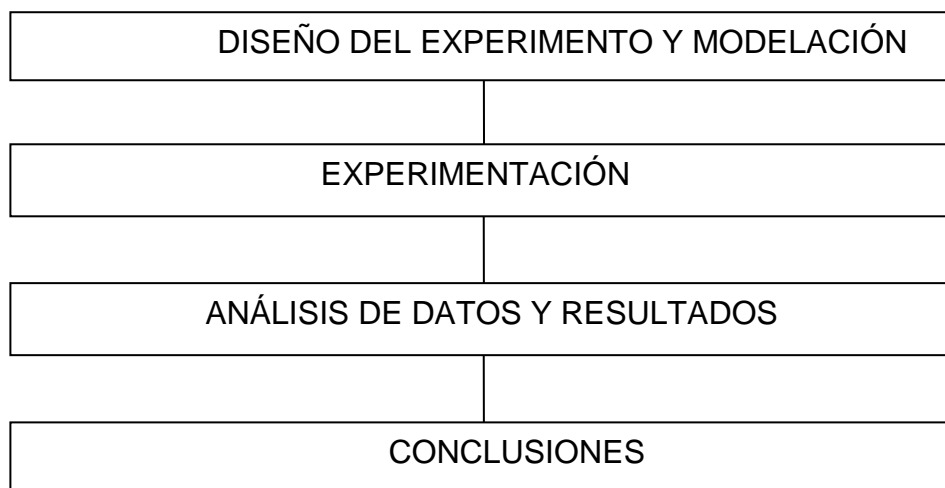


Figura.1.1 METODOLOGÍA

Se creó unidades experimentales normalizadas, en las cuales se variaron los porcentajes de sus componentes y se aplicó el método de curado en agua, para al final registrar los esfuerzos de compresión midiéndolos a los 7, 14, 21 y 28 días después de su fraguado.

Esto generó datos experimentales a los cuales se le aplicó un análisis estadístico, que con la ayuda con análisis numéricos y de simulación; se pudo predecir el comportamiento de las propiedades mecánicas del material no metálico en mención.

1.4. Planteamiento y justificación.

Estudiar el efecto que se produce en el cemento, al agregar un porcentaje dado de zeolita ecuatoriana, con un curado al agua; efectos como la resistencia a la compresión en el tipo I y tipo IV.

Es decir, se comparó los resultados de los ensayos de compresión de las muestras que contienen zeolita, con los especímenes de control, que para este caso son el cemento tipo I y IV, es decir, que mediante un análisis comparativo de la medición obtenida y haciendo uso del software Statistica 7, se pudo indicar cuáles son los mejores resultados.

Para el modelamiento matemático, se recopiló varios factores, y se han implementado en el algoritmo que permitió la modelación del comportamiento de la pasta de cemento, que al ser sometida a cargas puntuales que aumentan progresivamente, la muestra llegó a su punto máximo de resistencia a la compresión y se produjo su ruptura.

1.5. Estructura de la tesis.

En el capítulo 1 de generalidades, se explica el planteamiento del problema y los objetivos de esta tesis; también se menciona la

metodología que se siguió, así como las justificaciones de este trabajo.

El capítulo 2, incluye una breve historia del cemento, los tipos que existen, así como también definiciones de la puzolana, sus características, los métodos de curado existentes. Se menciona otras investigaciones en las cuales se basó algún parámetro durante este proyecto investigativo-experimental y definido como diseño experimental.

El capítulo 3, integra la metodología que se siguió y plantea el diseño experimental, es decir, el cronograma que se cumplió para la obtención de materiales y luego los procesos que se hicieron para preparar y elaborar las muestras. Se indica también, que en este capítulo se incluyen los ensayos mecánicos a los que fueron sometidas las probetas, de acuerdo al tiempo de curado establecido, se aplicó también el modelo matemático más adecuado a seguir, para obtener los resultados.

En el capítulo 4 denominado de resultados, se menciona los datos obtenidos en la experimentación, es decir, los resultados de los ensayos de compresión que se realizaron a las muestras; también se menciona el análisis estadístico que fue aplicado a esta experimentación, las hipótesis planteadas con su debida validación,

aquí se confirmó que los datos obtenidos en las pruebas son realmente significantes y valederos para aprobar o rechazar la hipótesis nula con respecto a la alterna.

En este capítulo, se aplicó el modelo matemático planteado y se simuló mediante un programa computacional Matlab, la curva de esfuerzo deformación que se obtuvo basada en los datos experimentales.

En el capítulo 5, están las conclusiones y recomendaciones que se obtuvo a lo largo de la investigación; se dan recomendaciones para mejorar las condiciones de preparación de las probetas y del ensayo, para obtener mejores resultados disminuyendo el margen de error, que se dan en los experimentos; tratando siempre de ir en mejoría para lograr desarrollos tecnológicos que sirvan para el bien de nuestra sociedad.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades del cemento

El cemento fue inventado 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 descarboxilar 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. El secreto del tiempo de vida útil del cemento se perdió y en la edad media tan solo fue posible fabricar cemento de moderada resistencia a la compresión. En 1756, Smeaton descubrió que los mejores cementos se obtenían al mezclar caliza con un 20-25% de materia arcillosa. En 1845, Johnson fijó las proporciones de materias primas a utilizar, así como la temperatura de cocción, con lo que se

asistió al inicio de la industria de cemento pórtland. Actualmente, hay tres procesos de fabricación de cemento que utilizan hornos rotativos desarrollados en Inglaterra en 1855: que fueron vía seca, vía seca con precalentamiento / pre calcinación y vía húmeda [2].

Además de los componentes principales (Ca y SiO₂) y de los secundarios (Al₂O₃, FeO, SO₃, Ca, 2H₂O-yeso-) en el cemento, hay otras sustancias en pequeña proporción, como son: álcalis, que suelen provenir de las impurezas feldespáticas de las arcillas; MgO, aportado por arcilla o la caliza, y peligroso por encima de cierto límite (legalmente un 5%), por la lentitud con que se hidrata la magnesia calcinada y la dilatación que la acompaña; CaO libre, por exceso en la dosificación, o defecto de cocción o enfriamiento lento de clínker, que también hace expansivo al cemento [13].

Otros componentes menores son TiO₂ y PO₂, que el análisis da como Al₂O₃; SrO que se da como CaO y MnO, que se valora con el FeO [3].

El cemento pórtland, es llamado así puesto que tiene un parecido con una piedra natural que se encuentra en Inglaterra, precisamente en la ciudad de Pórtland, se le denomina aglomerante hidráulico ya que es capaz de desarrollar todas sus propiedades en presencia del agua, como son el fraguado y endurecimiento. La definición es la misma que tiene el cemento actual [9].

Tipos de cemento pórtland

Todos los pórtland y todos los cementos mezclados son cementos hidráulicos. Los cementos hidráulicos 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 civiles. Diferentes tipos de cementos pórtland son fabricados, por los diversos requisitos físicos y químicos necesitados para propósitos específicos, para esto se cuenta con algunas especificaciones ASTM C 150, standard specification for portland cement. La norma ASTM C 150 divide en cuatro tipos principales al cemento pórtland, usando números romanos para designarlos que son los siguientes [11]:

Tipo I	Normal
Tipo II	Moderada resistencia a sulfatos
Tipo III	Alta resistencia temprana
Tipo IV	Bajo calor de hidratación

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, entre ellos:

Pórtland férrico
Cemento blanco
Cemento puzolánico
Cemento siderúrgico
Cementos de fraguado rápido
Cemento aluminoso
Cemento pórtland adicionado

2.2. Generalidades de la puzolana.

Las puzolanas son “materiales silíceos o aluminosos” que por sí mismos poseen poca o ninguna actividad aglomerante, pero que finamente divididos y en presencia de agua pueden reaccionar con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes” (ASTM 618-78). Precisamente estos materiales son incorporados como adiciones activas al cemento pórtland y al hormigón, para que reaccionen con el hidróxido de calcio originado durante la hidratación del cemento. El resultado de esta incorporación es la formación de compuestos estables e insolubles, principalmente los hidrosilicatos de calcio de variados tipos (conocidos genéricamente como C-S-H), y en menor medida los aluminatos de calcio hidratados [1], debido a la reacción química de la sílice amorfa presente en las puzolanas con la cal.

La posibilidad de una puzolana de reaccionar en presencia de agua para formar compuestos hidráulicos estables depende de varios factores. El conocimiento de esta propiedad (actividad puzolánica) es fundamental a la hora de fabricar los cementos compuestos.

Las zeolitas, que son aluminio silicatos hidratados, están más relacionadas a medios de depositario volcanogénicos o a actividad hidrotermal tardía. En consideración de lo anterior, es posible entonces, también relacionar genéticamente, parte de las sales minerales zeolitas y litologías con materiales volcanoclásticos.

Algunas características de la zeolita se muestran en la TABLA 1[5].

TABLA 1.
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZEOLITA.

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

FUENTE: María T. Olguín G, Zeolitas características y propiedades

2.3. Métodos de curado del cemento.

El curado consiste, en propiciar y mantener un ambiente de apropiada temperatura y contenido de humedad en el cemento recién moldeado, de modo que éste desarrolle el potencial de las propiedades que se esperan de él. Un cemento curado adecuadamente alcanza su máxima resistencia y tiempo de vida útil, será más impermeable y tendrá menor riesgo de fisuración.

Las principales características que debe tener un adecuado curado son básicamente tres:

- a) Contenido suficiente de humedad, para evitar retracción por secado y permitir una adecuada hidratación del cemento.
- b) Temperatura favorable (cercana a 20°C), de modo que la hidratación del cemento se desarrolle a una tasa adecuada.
- c) Prontitud, dado que el curado del hormigón es fundamental en edades tempranas, se debe comenzar en cuanto sea moldeado.

El curado debe comenzar lo antes posible, es decir, tan pronto como el procedimiento elegido de curado no dañe al cemento. Con otros métodos, como el uso de películas de polietileno, será necesario esperar el desarrollo de cierta resistencia de modo de no dañar la superficie del cemento.

Tanto en terreno como en laboratorio, se ha comprobado que un curado deficiente disminuye la resistencia y la vida útil del cemento. Varios estudios muestran que probetas sin curar, pueden registrar disminuciones de resistencia a compresión a 28 días de edad, 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 potencial. 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 flexo-tracción 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.

Un curado inadecuado favorece la formación de fisuras y disminuye la impermeabilidad, la resistencia a la intemperie, al desgaste y al ataque de químicos. No siempre es posible determinar el grado de eficiencia del curado en tiempo de vida útil, puesto que las condiciones atmosféricas juegan un papel muy importante en dicho proceso. Mientras que en épocas lluviosas o húmedas se requiere

relativamente poco esfuerzo para obtener un buen curado, en condiciones de poca humedad y alta temperatura se deben tomar medidas especiales para evitar pérdidas excesivas de agua en el hormigón [6].

Garantizar un contenido mínimo de humedad en el cemento durante el período de curado, es fundamental en el desarrollo de su estructura. Algunas investigaciones han comprobado que, por ejemplo, la resistencia se ve seriamente comprometida cuando la humedad relativa del cemento es inferior a 80%. Por ello, el curado debe prevenir durante las primeras edades la evaporación del agua superficial, manteniendo el hormigón en una condición saturada o cercana a ella [6].

Sin embargo, en ciertos casos mantener el contenido de humedad en el cemento no es suficiente. Se ha comprobado que en cementos de baja relación agua-cemento (menor a 0.40) no sólo se debe evitar la evaporación de agua superficial, sino se requiere además proveer cantidades adicionales de agua de modo de asegurar la hidratación del cemento [6].

Es fundamental tener presente que el curado afectará especialmente la primera capa del elemento, probablemente los primeros centímetros de profundidad. Su importancia radica en que

justamente, esta parte del elemento es la expuesta a evaporación y cambios de humedad, fisuración por retracción plástica, acción de la intemperie, abrasión (desgaste), ataque de químicos y carbonatación, y a su vez esta misma zona es la que debe proveer de impermeabilidad al hormigón y protección a sus armaduras.

Hoy en día existen diversos métodos, procedimientos y materiales para el curado, sin embargo, el principio es el mismo: garantizar un contenido satisfactorio de humedad y temperatura para que se desarrollen las propiedades deseadas en el cemento. Los sistemas de curado se pueden dividir en dos grandes grupos:

a) Curado con agua: continua o frecuente aplicación de agua por inundación, nebulización, vapor o materiales saturados (como sacos de arena húmeda, etc.).

b) Materiales sellantes: evitan la pérdida excesiva de agua superficial mediante películas protectoras como polietileno o papel, o bien, mediante la aplicación de compuestos de curado, formadores de membrana sobre el cemento recién colocado.

A. Curado con agua:

El agua sigue siendo el método más efectivo de curado. Sin embargo, cuando se opta por este método deben considerarse los aspectos económicos del procedimiento, puesto que la disponibilidad

de agua, mano de obra y materiales influirán en los costos. Cualquiera sea el método elegido de curado con agua, éste debe proporcionar una cubierta completa y continua de agua libre de componentes que puedan dañar la pasta de cemento. Si el aspecto del cemento es un factor relevante, el agua además debe estar libre de materiales que manchen o decoloren el hormigón. Se deben evitar los choques térmicos o fuertes gradientes de temperatura por el empleo de agua fría sobre el hormigón.

A.1. Inundación o inmersión.

Cada vez menos frecuente; el método más eficiente de curado con agua es la inundación o inmersión total del hormigón. La inundación se puede emplear en losas de piso, pavimentos, techos planos, y en cualquier superficie donde es posible retener el agua o donde exista una corriente continua de agua. Además, si el agua de curado está muy fría respecto del cemento se puede producir un choque térmico, que puede generar agrietamiento. Para evitar esto, el agua no debe estar más fría que el hormigón en 10° C.

A.2. Nebulización o rocío.

En general, la nebulización es un buen método de curado cuando la temperatura ambiente es superior a unos 10°C. El rociado debe ser continuo y debe evitarse la intermitencia.

A.3. Cubiertas de material absorbente.

Sacos, mantas de algodón, alfombras y otras cubiertas absorbentes también resultan útiles en la retención del agua superficial del cemento. Estos materiales deben estar libres de sustancias que dañen y decoloren el hormigón, como azúcar o fertilizantes (se recomienda lavarlos antes de su uso, haciéndolos además más absorbentes). Es conveniente colocar los sacos traslapados, proporcionando mejor retención de humedad y estabilidad contra el viento y lluvia.

A.4. Arena y aserrín.

Aunque prácticamente ya no se utilizan, la arena, el aserrín e incluso tierra húmeda se han usado con éxito en el curado de losas y pisos de obras pequeñas. La arena y el aserrín son especialmente útiles para proteger además las superficies contra la erosión y manchas cuando el personal de obra debe trabajar sobre ellas.

B. Materiales sellantes.

Los materiales sellantes son hojas o membranas colocadas sobre el cemento que reducen la pérdida de agua por evaporación. Su uso tiene ventajas que los hacen preferibles en una gran cantidad de casos, siendo una de las principales el menor riesgo que el cemento se seque por un descuido en el mantenimiento de la humedad.

B.1. Películas plásticas.

Como la mayoría de los sistemas de curado, bien utilizadas las películas plásticas son un buen método de curado. Tienen la ventaja de ser livianas y fáciles de colocar. La película debe poseer un espesor superior a 0.10 mm. En climas soleados es recomendable el uso de películas que reflejen los rayos solares (blancas), mientras en climas fríos o espacios interiores son recomendables películas de color negro (deben evitarse en climas cálidos). El plástico debe ser colocado en forma plana y sin arrugas sobre la superficie.

B.2. Compuestos líquidos formadores de membrana de curado.

Estos productos actúan sobre el hormigón formando una membrana o película destinada a evitar la evaporación superficial, proporcionando condiciones adecuadas de curado. Los compuestos consisten principalmente en ceras, resinas naturales o sintéticas y solventes de gran volatilidad, y no deben ser dañinos a la pasta de cemento. Usualmente, los compuestos formadores de membrana se aplican en dosis que varían de 0.20 a 0.25 litros/m² (rendimiento de 4.0 a 5.0 m²/litro). Idealmente, el compuesto se debe aplicar en capas perpendiculares sobre la superficie para asegurar una cobertura total. Al igual que las películas plásticas, cualquier filtración que tenga lugar en los bordes o a través de pequeños

agujeros reducirá la eficiencia de la membrana de curado. Las pruebas realizadas en los laboratorios demuestran que, dentro de los límites razonables, cuanto menos agua haya por saco de cemento, mayor será la resistencia del concreto; sin embargo, debemos recordar que el concreto debe tener tal consistencia, que permita su fácil colocación dentro de las cimbras. Cuando ya se ha establecido la relación agua-cemento deseada, en función del grado de exposición y de la resistencia requerida se selecciona la mejor combinación de agregados para producir un concreto económico y estable. Recuérdese que para un material dado, lo que determina principalmente la resistencia es la relación del volumen de agua al cemento. La TABLA 2 puede usarse como una guía para mezclas de concreto de distintas resistencias. [2]

TABLA 2.
RELACIÓN AGUA-CEMENTO MÁXIMAS PERMISIBLES PARA
CEMENTO

		Cemento sin inclusión de aire		Cemento con inclusión de aire
Resistencia mínima de compresión especificada a los 28 días, kg/cm ²	Relación en litros de agua por saco de 50 kg	Relación absoluta por peso	Relación en litros de agua por saco de 50 kg	Relación absoluta por peso
175	32.1	0.642	27.8	0.554
210	28.9	0.576	28.3	0.465
245	25.6	0.51	20.1	0.399
280	22.2	0.443	17.8	0.354

2.4. Diseño experimental.

Se planificó y organizó los experimentos con la finalidad de obtener la mayor cantidad de información con menor número de experimentos, lo que ayudó a disminuir los costos de estos experimentos, para lo cual se elaboró un plan de trabajo. Es preciso mencionar que se debieron tomar en cuenta los siguientes pasos:

Análisis del problema.

Planificación de los experimentos.

Ejecución de los experimentos.

Tratamiento estadístico de los datos y simulación.

Análisis de los resultados estadísticos.

Fue necesario encontrar ciertos conceptos básicos de modelos estadísticos, que permitieron entender mejor el estudio y el proceso del experimento que se hizo.

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.

Unidad experimental.- Es la unidad más pequeña del material de estudio que comparte un tratamiento común.

Los tratamientos.- Son el conjunto de circunstancias creadas para el experimento, en respuesta a la hipótesis de investigación.

Factor.- Es un grupo específico de tratamientos, las diversas categorías de un factor se denominan niveles del factor.

La réplica.- Es la repetición independiente del experimento básico. De tal manera que cada tratamiento se aplica de manera independiente a dos o más unidades experimentales.

Error experimental.- Es la diferencia en las respuestas entre unidades experimentales, atribuibles sólo al error experimental.

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.

Hipótesis estadística.- Es una afirmación o conjetura acerca de la distribución de una o más variables aleatorias.

Diseño completamente aleatorizado.- Cuando todas las variaciones causadas por factores ajenos no controlados pueden incluirse así bajo el encabezado de variación fortuita.

2.5. Otras Investigaciones.

Fueron varios los trabajos que se han realizado con materiales puzolánicos pero con enfoques diferentes, entre los que se puede mencionar: algoritmos usados para determinar la fuerza de compresión de materiales heterogéneos, mediante la discretización de elementos finitos.

Otro documento menciona los estudios realizados el efecto que tiene la adición de puzolana en el hormigón, el cual mejora la durabilidad, vale destacar que esto depende de la cantidad de puzolana, del tipo de puzolana que se esté agregando y al volumen de la mezcla de hormigón.

Otro estudio, realizado en Cuba menciona sobre el uso de zeolita como material filtrante, e indica que las propiedades pueden variar de acuerdo a la región donde se encuentran estas zeolitas, incluso, en dicho país se usó como material alternativo para el proceso de potabilización del agua.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño del experimento recolección de datos.

Los experimentos se basaron según lo que especifica la norma ASTM C109/C109M, (Standard Test “Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in) haciendo ciertas variaciones debido a que la norma es para morteros (cemento+arena), mientras que para este experimento se hizo una pasta de cemento (cemento + aditivo + agua), la experimentación se la llevó a cabo en la máquina de ensayos de compresión de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, se tomó la resistencia a la compresión de las muestras, que es la media de tres especímenes por cada día establecido de curado. A continuación, se muestra la TABLA 3 en la cual se indica la forma como se recolectó la información de resistencia a la compresión, con respecto a los días de curado, para el porcentaje de zeolita (25% y 27.5%) y la forma de curado (agua) asignada.

TABLA 3.
DATOS DE ESFUERZO A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS

	Resistencia a la compresión (MPa)			
	7 Días	14 Días	21 Días	28 Días
muestra 1	R1	R4	R7	R10
muestra 2	R2	R5	R8	R11
muestra 3	R3	R6	R9	R12

La zeolita en estado natural (rocas) fue recolectada en los yacimientos existentes en la vía Guayaquil-Progreso, sector Casas Viejas, una cantidad aproximada de 25 Kg. De esta cantidad se usó 10 Kg aproximadamente para todos los integrantes del grupo 1 del tópico de graduación, para el porcentaje asignado se usó las siguientes cantidades; 1890 g de zeolita y 5310 g de cemento pórtland tipo I y 1080 g de Agua.

La relación agua / cemento es de 0.3 para la mezcla.

Una vez elaboradas las muestras, estas son analizadas mecánicamente en los días de curado establecidos (7, 14 ,21 y 28 días para el 25% de zeolita adicionada, así mismo 4, 11, 18 y 25 días para el 27.5 % de zeolita natural).

Con estas pruebas realizadas se pudo hacer un estudio y ver cómo afecta el adicionar un porcentaje de este aditivo puzolánico (zeolita natural) a la resistencia a la compresión, a medida que aumenta el tiempo de curado.

El esfuerzo a la compresión se lo determinó mediante la ecuación que relaciona la fuerza máxima aplicada sobre el área de contacto de la muestra.

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

Para el desarrollo del experimento se planteó hipótesis estadísticas las cuales se tuvieron que validar. Es decir, aceptarlas o rechazarlas de acuerdo como se definió su enunciado y a los resultados obtenidos. Adicionalmente, se usó los valores promedios del esfuerzo, para ingresarlos en el algoritmo desarrollado para esta investigación y obtener resultados que fueron considerados valores característicos del material.

La teoría de mecánica del continuo, permitió realizar relaciones unidimensionales, que luego se las llevó a tres dimensiones mediante un lenguaje tensorial y conociendo las condiciones de borde. Vale indicar que las pruebas no son lineales, por tanto se desarrolló una ecuación iterativa, la misma que se implementa en un

programa computacional que ayudó a encontrar la solución de este tipo de problemas.

Entonces, se indicó que la deformación es el gradiente del desplazamiento, y como se sabe todo tensor tiene una parte simétrica y otra anti simétrica, del cual se pudo incluir estas ecuaciones:

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

Por tanto se usó la siguiente definición para estas relaciones

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

Mediante el método de Newton Rapson se implementó un esquema no lineal en tres dimensiones, definido por un residual, el cual está dado por la siguiente ecuación

$$r(\boldsymbol{\mu}^*) = 0$$

Donde $(\boldsymbol{\mu}^*)$ es la solución deseada y depende del material.

Por tanto se usó el siguiente algoritmo de Newton Rapson:

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

```
clear all;

E= ingrese valor experimental

m=indicador característico del material;

a=indicador de característico del material;

de= delta de deformación

epsilon= rango de deformaciones

ntotal= ultimo valor de deformación/de

sigma=zeros(ntotal,1);

sigma(1,1)=0;

sigmay=zeros(ntotal,1);

sigmay(1,1)= valor experimental

tol=1e-15;

L(1,1)=0;

for n=1:ntotal

st(n,1)=sigma(n,1)+E*de;

Ft(n,1)=abs(st(n,1))-sigmay(n,1);

if Ft(n,1)>0; %DEFORMACIÓN PLÁSTICA%

    kdl(1,1)=tol;

    for k=1:20

        KL(k,1)=kdl(k,1)+L(n,1);
```



```

H(n,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/KL(k,1))*((m-
KL(k,1))/(m+KL(k,1))^2);
r(k,1)=Ft(n,1)-kdl(k,1)*(E+H(n,1));
nr(k,1)=norm(r(k,1));

if nr(k,1)<tol*nr(1,1)
    break
end

A=-
1/2*(2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^2*kdl(k,1)+6
*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)^2+
12*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*L(
n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1
)^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1))^(
3/2)*L(n,1)^3+kdl(k,1)*m^4*a*sigmay(1,1)+2*m^4*a*sigmay(1,1)*L(n,1
)-3*kdl(k,1)*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^2-
2*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^3-6*kdl(k,1)^2*m^3*a*sigmay(1,1)-
6*kdl(k,1)*m^3*a*sigmay(1,1)*L(n,1)+kdl(k,1)^3*m^2*a*sigmay(1,1))/(
m+kdl(k,1)+L(n,1))^3/(m*KL(k,1))^(3/2);

rdl(k+1,1)=-(r(k,1)/A);
kdl(k+1,1)=kdl(k,1)+rdl(k+1,1);

```

```
end

dl(n+1,1)=kdl(k,1);

L(n+1,1)=KL(k,1);

sigma(n+1,1)=st(n,1)-E*dl(n+1,1)*sign(st(n,1));

sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1)+H(n)*dl(n+1,1);

else

L(n+1,1)=0;

sigma(n+1,1)=st(n,1);

sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1);

end

end

a=size(sigma)

b=size(epsilon)

plot(epsilon',sigma,'b')
```

3.2. Experimentación.

3.2.1 Preparación de muestras.

Para realizar la experimentación se implementó varios procesos, los que se menciona a continuación:

MOLIENDA: Este proceso consistió en triturar las rocas de zeolitas natural, para dejarlas al tamaño de grano requerido,

para esto se debió pasar por varios molinos (trituradora de mandíbulas aprox. 2 min.), luego de esto pasaron los fragmentos a ser cuarteados, para después pasar al molino de disco (aprox. 5 min.) y pasan al molino de bolas por un lapso de 40 min. Luego de esto, se repite el proceso pasando nuevamente para ser cuarteado y otra vez al molino de bolas, una vez terminado estos pasos se pesó 100 g de zeolita y se tamizó en las siguientes medidas (14, 18, 20, 40, 50 y fondo), esto en un tiempo de 15 minutos, posteriormente se pasa nuevamente por el molino de bolas y se pasa otra vez por tamices de mayor numeración (50, 100, 200, 325), esto garantizó el tamaño de grano requerido. A continuación, se incluye la TABLA 4, en la cual se menciona los tamaños de las partículas y los números de tamices, también más adelante se muestran figuras del proceso.

TABLA 4.

TAMAÑO DE PARTÍCULA POR TAMIZ

TAMIZ Nº	TAMAÑO DE PARTÍCULA
14	1,4cm
18	40mm
40	425µm
50	300µm
100	150µm
200	75µm
325	45µm

PROCESO:

FIGURA 3.1. MOLINO DE MANDÍBULAS



FIGURA 3.2. CUARTEO



FIGURA 3.3. MOLINO DE DISCOS



FIGURA 3.4. MOLINO DE BOLAS



FIGURA 3.5. TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE ZEOLITA

MEZCLA:

Se realizó 2 mezclas con porcentajes de zeolita diferentes (25% y 27.5%), para esto se usó las siguientes cantidades:

TABLA 5.

CANTIDAD DE ZEOLITA Y CEMENTO

% de Zeolita	Cantidad de muestras	g. Zeolita	g Cemento	relación agua/cemento	Cantidad de agua g.
25	12	900	2700	0.3	1080
27.5	12	990	2610	0.3	1080

Como se obtuvo las cantidades necesarias, se procedió a pesar las cantidades en una balanza electrónica, es decir, primero para el 25% la zeolita, el cemento y el agua necesaria, luego se hizo el mismo procedimiento para la mezcla de 27.5% de zeolita. Se colocó en un recipiente el cemento con la zeolita y luego se colocó en una mezcladora por un tiempo de 10 minutos aproximadamente, esto se hace para homogeneizar la mezcla a una velocidad media (el equipo tiene 3 velocidades), luego de esto se apaga la mezcladora y se enciende otra vez a velocidad 1 (alta velocidad), y fue cuando se añadió el agua al recipiente, este proceso tarda entre 35-45 segundos vale indicar que la balanza Sartorius cumple con normas de calidad ISO 9001, al igual que la mezcladora marca Hobart.



FIGURA 3.6. MEZCLADORA HOBART



FIGURA 3.7. BALANZA SARTORIUS

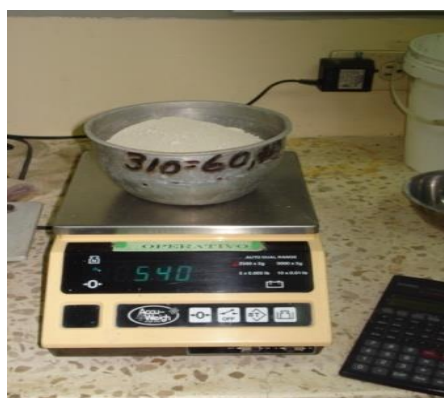


FIGURA 3.8. PESANDO ZEOLITA



FIGURA 3.9. MEZCLA



FIGURA 3.10. MEZCLANDO CEMENTO+ZEOLITA+AGUA

Esta mezcla tuvo que ser vaciada en los moldes, los mismos que se tuvo que limpiar efectivamente antes de su uso. Estos moldes eran de tres compartimientos cúbicos, de aleación de cobre muy resistente al ataque químico de la pasta de cemento, estos eran rígidos en sus lados para evitar extensiones u ondulamiento, mientras que las caras internas de los moldes eran planas y cumplieron con ciertas tolerancias indicadas en la siguiente tabla:

TABLA 6.
VARIACIONES PERMISIBLES DE MOLDES DE
ESPECÍMENES

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°

FUENTE: NORMA ASTM. C109/C 109M-02

A continuación, se muestra varias fotos del proceso de preparación de los moldes, del vaciado de la mezcla, su debido llenado en los moldes con las paletas, además vale indicar que se apisonó la mezcla en cada compartimento

cúbico unas 32 veces durante aproximadamente 10 s en 4 rondas, cada ronda fue perpendicular con respecto a la otra y consistió de ocho golpes contiguos sobre la superficie del espécimen; la secuencia se muestra en la figura 3.11.

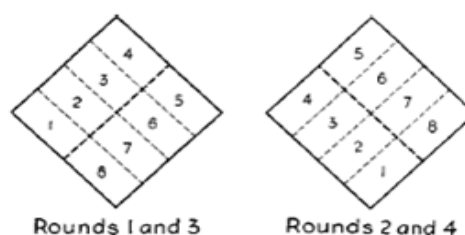


FIGURA 3.11. ORDEN DE APISONAMIENTO DE MUESTRAS

La presión de apisonado aplicada fue la suficiente para asegurar el correcto llenado del molde. Después se aplicó la segunda capa de la mezcla, llenando los compartimentos y se repitió el método de apisonado hasta que la mezcla cubrió el borde superior del molde, esto se complementó dándole pequeños golpeteos con un martillo de goma para una mejor compactación dentro de los moldes, luego de esto se los cubrió con una lámina de plástico y se los dejó por 24 horas. Se procedió con el desmolde de las muestras para luego marcarlas, pesarlas y colocarlas en la bandeja con agua para su curado por inmersión, en lo posterior se sacó cada probeta en el día señalado del ensayo de ruptura, es decir, a los 7, 14,

21 y 28 días para la mezcla con 25% de zeolita y a los días 4, 11, 18 y 25, para la mezcla con 27.5% de zeolita.

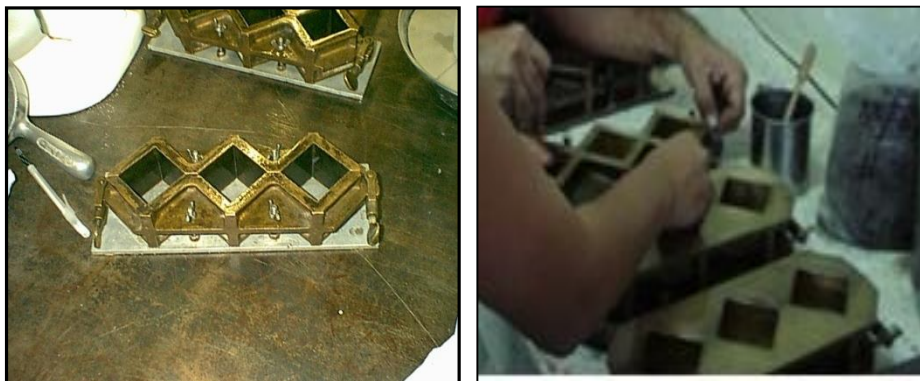


FIGURA 3.12. MOLDES FIGURA 3.13. LIMPIEZA DE MOLDES



FIGURA 3.14. MOLDES LISTOS



FIGURA 3.15. MEZCLA EN MOLDES



FIGURA 3.16 VACIADO EN MOLDE



FIGURA 3.17 LLENADO DE MOLDES



FIGURA 3.18 APISONADO DE MOLDES



FIGURA 3.19 COMPACTADO DE MOLDES



FIGURA 3.20. MOLDES LLENOS



FIGURA 3.21. DESMOLDE



FIGURA 3.22. DESMOLDE 1



FIGURA 3.23. PROBETAS SUMERGIDAS EN AGUA

3.2.2. Ensayos.

Antes de la comenzar con los ensayos, se sacó del agua las probetas que corresponden al día de ruptura, se las limpió, se removi6 cualquier incrustaci6n en las caras y cercior6ndose de que no tengan curvaturas, se escogi6 la mejor superficie de la muestra. Tambi6n se tom6 datos de humedad relativa del laboratorio y de temperatura, ya que son datos externos que influyen en el experimento.

Luego se procedió a aplicar la carga a la muestra, a una velocidad de movimiento relativo entre las mordazas superior e inferior correspondiente a una velocidad de carga (900-1800 N/s), cada deformación de cinco milésimas de pulgada se tomó las lecturas de la carga ejercida (fuerza aplicada), hasta alcanzar el límite de ruptura.

A continuación, se muestra figuras que indican este proceso que se ha descrito.



FIGURA 3.24 MEDIDOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA



FIGURA 3.25 MUESTRA MONTADA EN MÁQUINA



FIGURA 3.26 MUESTRA SOMETIDA A CARGA

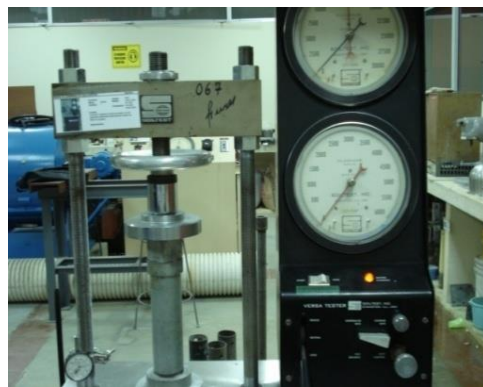


FIGURA 3.27. MÁQUINA FUNCIONANDO



FIGURA 3.28. RUPTURA DE MUESTRA

3.3. Modelo matemático.

Antes de ingresar los datos en el algoritmo implementado en Matlab, se realizó los análisis para encontrar la curva de esfuerzo vs deformación, la cual indica si el material esta en zona elástica o plástica y cuál fue su convergencia con los datos iniciales. Vale indicar que para ecuaciones no lineales, se usó el método numérico de Newton Raphson, el cual dio las raíces de dichas ecuaciones y esto ocurre en una subrutina del algoritmo la función testnewton2 del programa, encontrando la segunda derivada de H prima en función de delta landa.

```
function nolineal()
```

```
%Luis Aguirre Tinitana;
```

```
% Realiza la Gráfica Esfuerzo - Deformación para un determinado
```

```
% material con los siguientes parámetros:
```

```
% Módulo de Elasticidad E=2000;
```

```
% Esfuerzo de Fluencia Sigmay0=100;
```

```
% Incrementos de Deformación deltae=0.005;
```

```
%=====
```

```
% Condición de esfuerzo uniaxial
```

```
% Para la obtención de los valores en las ecuaciones no lineales, se
```

```
% usa la función de Newton Raphson para determinar raíces
```

```
deltae=0.005;
```



```
epsilon=0:deltae:0.075;
E=2000;
sigmay0=100;
n=length(epsilon);
tol=1e-15;
warning off
sigman(1:n)=0;
sigmatr(1:n)=0;
landa(1:n)=0;
sigmayn(1:n)=0;
sigmayn(1)=sigmay0;
for i=1:n
    sigmatr(i)=sigman(i)+E*deltae;
    Fntr=abs(sigmatr(i))-sigmayn(i);
    if Fntr<=0
        sigman(i+1)=sigmatr(i);
        sigmayn(i+1)=sigmayn(i);
        landa(i+1)=landa(i);
        result2(i+1)=sigman(i+1);
    else
        [deltalanda,H]=testnewton2(landa(i),Fntr,sigmayn(i));
        landa(i)=deltalanda;
```

```

    sigman(i+1)=sigmatr(i)-E*landa(i)*sign(sigmatr(i));
    sigmayn(i+1)=sigmayn(i)+H*landa(i);
    landa(i+1)=landa(i)+deltalanda;
    result2(i)=sigmayn(i+1);
    %landa(i+1)
    %pause
end
end
result=[sigmatr(1:n)',sigman(1:n)',sigmayn(1:n)]
plot(epsilon,result2(1:n))%,epsilon,sigmatr(1:n),epsilon,sigmayn(1:n))
grid
xlabel('Epsilon','FontSize',14);
ylabel('Sigma_n','FontSize',14);
title('Curva Esfuerzo - Deformación','FontSize',14);
text(sigmay0/E-8*deltae,sigmay0/2,'Zona Elástica','FontSize',13);
%=====
function [y,z]=testnewton2(landa,sigma_tr,sigmay0)
% Aplicación para determinar raíces de una ecuación mediante el
% método de Newton Raphson para función de dos variables
% ESPOL - FIMCP - Junio/2008
E=2000;
m=0.03;

```

```

a=1;

tol=1e-10;

deltalanda=0;

if (landa==0)

    landa=tol;

end

%Esfuerzo de prueba para el punto n

Fext=sigma_tr;

%Función que depende de deltalanda, necesario para calcular Fint

H_prima=sigmay0*a*(m/(landa))^(1/2)*(m-landa)/(m+landa)^2;

Fint=deltalanda*(E+H_prima);

%Cálculo del error

r0=sigma_tr-Fint;

r=r0;

%Segunda derivada de H, H_prima2

H_prima2=(1/2)*sigmay0*a*m^2*(-4*(landa)-

m^2+(landa)^2)/((m+landa)^2*(m*(landa))^(1/2)*(landa)^2);

% Derivada del error r(k)'

r_prima=-E-H_prima;

i=1;

while (norm(r)>tol*norm(r0))&(i<50)

    d_deltalanda=-inv(r_prima)*r;

```

```

deltalanda=deltalanda+d_deltalanda;

H_prima=sigmay0*a*(m/deltalanda)^(1/2)*(m-
deltalanda)/(m+deltalanda)^2;

Fint=deltalanda*(E+H_prima);

%Segunda derivada de H, H_prima2

H_prima2=(1/2)*sigmay0*a*m^2*(-4*(deltalanda)-
m^2+(deltalanda)^2)/((m+deltalanda)^2*(m*(deltalanda))^(1/2)*(deltala
nda)^2);

% Derivada del error r(k)'

r_prima=-E-H_prima-deltalanda*H_prima2;

r=sigma_tr-Fint;

i=i+1;

end

%Variables de salida

y=deltalanda;

z=H_prima;

%=====
===

```

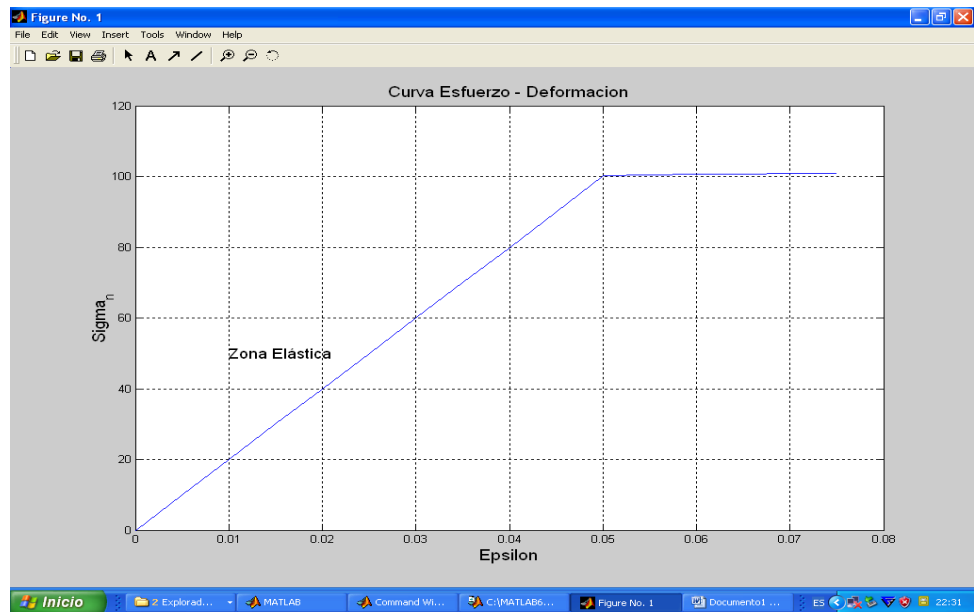


FIGURA 3.29. GRÁFICA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Tabulación de datos y resultados

De acuerdo al cronograma de experimentación para los días de curado, las muestras con su respectivo porcentaje de zeolita adicionada para este caso 25% y 27.5%, se tomó los valores de fuerza aplicada a las muestras, cada vez que se deformaba cinco milésimas de pulgada, lo cual se observa en las tablas siguientes:

TABLA 7.
 DATOS DE ENSAYO, 25% DE ZEOLITA, DÍA 7 DE CURADO,
 MUESTRAS 1-2-3

ZEOLITA 25% DÍA 7			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	2450	2940	1960
10	0,254	0,0049	6370	7840	3724
15	0,381	0,0074	12250	15680	13230
20	0,508	0,0099	21560	27930	28224
25	0,635	0,0124	32144	42630	46550
30	0,762	0,0149	45374	56350	63700
35	0,889	0,017	58800	71050	81144
40	1,016	0,0199	71050	87220	98000
45	1,143	0,0224	85750	102900	112700
50	1,27	0,0249	103880	116620	129654
55	1,397	0,0274	115150	129850	136710
60	1,524	0,0299	127400	137200	
65	1,651	0,0324	137200		

TABLA 8.
 DATOS DE ENSAYO, 25% DE ZEOLITA, DÍA 14 DE CURADO,
 MUESTRAS 1-2-3

ZEOLITA 25% DÍA 14			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	23608,20	52563,67	7572,72
10	0,254	0,0049	98000,00	111809,08	35190,90
15	0,381	0,0074	155909,08	167045,41	89981,81
20	0,508	0,0099	211590,92	224954,59	144772,72
25	0,635	0,0124	245000,00	247227,24	189318,18
30	0,762	0,0149			216045,45

TABLA 9.
 DATOS DE ENSAYO, 25% DE ZEOLITA, DÍA 21 DE CURADO,
 MUESTRA 1-2-3

ZEOLITA 25% DÍA 21			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	33854,55	12472,73	22718,18
10	0,254	0,0049	97554,55	33409,09	58800,00
15	0,381	0,0074	151454,55	56572,73	78400,00
20	0,508	0,0099	173727,27	85527,27	118045,45
25	0,635	0,0124		118045,45	140318,18
30	0,762	0,0149		133636,36	

TABLA 10.
 DATOS DE ENSAYO, 25% DE ZEOLITA, DÍA 28 DE CURADO,
 MUESTRAS 1-2-3

ZEOLITA 25% DÍA 28			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	12027,25	21381,82	19600,00
10	0,254	0,0049	54345,41	77954,55	60136,36
15	0,381	0,0074	104681,84	162590,91	109136,36
20	0,508	0,0099	162590,92	202681,82	155909,09
25	0,635	0,0124	224954,59	240545,45	218272,73
30	0,762	0,0149	265045,41	251681,82	253909,09

TABLA 11.
DATOS DE ENSAYO, 27.5% DE ZEOLITA, DÍA 4 DE CURADO,
MUESTRAS 1-2-3

ZEOLITA 27.5% DÍA 4			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza (N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	1960	3430	2254
10	0,254	0,0049	10290	11956	9800
15	0,381	0,0074	22050	25774	23226
20	0,508	0,0099	38710	42630	39690
25	0,635	0,0124	56350	62230	56350
30	0,762	0,0149	73500	80850	73500
35	0,889	0,0174	92120	100450	92120
40	1,016	0,0199	110250	117600	107800
45	1,143	0,0224	125440	133770	122500
50	1,27	0,0249	140630	138670	134750
55	1,397	0,0274	151900	150430	139650
60	1,524	0,0299	161700	160230	147000
65	1,651	0,0324			153370

TABLA 12.
DATOS DE ENSAYO, 27.5% DE ZEOLITA, DÍA 11 DE CURADO,
MUESTRAS 1-2-3

ZEOLITA 27.5% DÍA 11			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza (N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	4214,00	10486	3332
10	0,254	0,0049	8036,00	24304	10094
15	0,381	0,0074	32046,00	39690	21462
20	0,508	0,0099	45864,00	54390	33320
25	0,635	0,0124	63210,00	73500	48412
30	0,762	0,0149	80850,00	90650	61740
35	0,889	0,0174	98490,00	102900	77910
40	1,016	0,0199	116620,00	117110	92120
45	1,143	0,0224	129360,00	131810	104860
50	1,27	0,0249	142100,00	145040	120050
55	1,397	0,0274	154840,00	158270	129360
60	1,524	0,0299	166110,00	168560	141610
65	1,651	0,0324	178360,00	180320	153860
70	1,778	0,0349	185710,00		162190

TABLA 13.
 DATOS DE ENSAYO, 27.5% DE ZEOLITA, DÍA 18 DE
 CURADO, MUESTRAS 1-2-3

ZEOLITA 27.5% DÍA 18			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	12918,18	18709,09	18709,09
10	0,254	0,0049	57463,64	58354,55	57463,64
15	0,381	0,0074	98890,91	106909,09	107800,00
20	0,508	0,0099	149227,27	158136,36	151454,55
25	0,635	0,0124	200454,55	193772,73	198227,27
30	0,762	0,0149	231636,36	196000,00	207136,36

TABLA 14.
 DATOS DE ENSAYO, 27.5% DE ZEOLITA, DÍA 25 DE
 CURADO, MUESTRAS 1-2-3

ZEOLITA 27.5% DÍA 25			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud	Deformación	Fuerza (N)	Fuerza (N)	Fuerza (N)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024	6236,36	8463,64	7572,73
10	0,254	0,0049	20936,36	64145,45	28063,64
15	0,381	0,0074	58354,55	109581,82	73500,00
20	0,508	0,0099	107354,55	178181,2	120272,73
25	0,635	0,0124	169272,73	229409,09	182636,36
30	0,762	0,0149	229409,09	253909,09	227181,82
35	0,889	0,0174	249454,55		238318,18

Para cada muestra, se obtuvo el esfuerzo de resistencia a la compresión aplicando la siguiente ecuación:

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

Donde:

f_m =fuerza de compresión en[Mpa.]

P=máxima fuerza aplicada [N].

A= Área en contacto de la probeta

En las tablas siguientes, se indica los valores de esfuerzos promedios de las muestras para los días de curado establecidos, para los porcentajes de zeolita asignados (25% y 27.5%).

TABLA 15.

VALORES DE ESFUERZOS, CON 25% DE ZEOLITA A 7, 14, 21 Y 28 DÍAS DE CURADO.

PORCENTAJE			DÍAS DE CURADO			
ZEOLITA 25%			Día 7	Día 14	Día 21	Día 28
Marca	Delta longitud	Deformación	Esfuerzo promedio (Mpa)	Esfuerzo promedio (Mpa)	Esfuerzo promedio (Mpa)	Esfuerzo promedio (Mpa)
0	0	0	0	0	0	0
5	0,1270	0,0025	0,9457	10,77457	8,8834	6,8201
10	0,2540	0,0050	2,3074	31,52167	24,4150	24,7588
15	0,3810	0,0075	5,2956	53,12834	36,8517	48,4288
20	0,5080	0,0100	9,9987	74,79234	48,5434	67,0552
25	0,6350	0,0125	15,6095	87,68756	33,2410	87,9741
30	0,7620	0,0150	21,2834	27,79638	17,1936	99,1500
35	0,8890	0,0175	27,1465			
40	1,0160	0,0200	32,9717			
45	1,1430	0,0225	38,7717			
50	1,2700	0,0250	45,0508			
55	1,3970	0,0274	49,1108			
60	1,5240	0,0299	34,0434			
65	1,6510	0,0324	17,6521			

TABLA 16.
VALORES DE ESFUERZOS, CON 27.5% DE ZEOLITA A 4, 11,
18 Y 25 DÍAS DE CURADO

PORCENTAJE			DÍAS DE CURADO			
ZEOLITA 27.5%			Día 4	Día 11	Día 18	Día 25
Marca	Delta longitud	Deformación	Esfuerzo promedio (Mpa)	Esfuerzo promedio (Mpa)	Esfuerzo promedio (Mpa)	Esfuerzo promedio (Mpa)
0	0	0	0	0	0	0
5	0,1270	0,0025	0,9835	2,3200	6,4762	2,8656
10	0,2540	0,0050	4,1230	5,4596	22,2944	14,5573
15	0,3810	0,0075	9,1413	11,9908	40,3477	31,0632
20	0,5080	0,0100	15,5717	17,1856	59,0314	52,2114
25	0,6350	0,0125	22,5065	23,8178	76,2251	74,7923
30	0,7620	0,0150	29,3152	30,0086	81,6697	91,4129
35	0,8890	0,0175	36,6282	35,9347		62,7568
40	1,0160	0,0200	43,1847	41,9238		
45	1,1430	0,0225	49,1108	47,0934		
50	1,2700	0,0250	53,2716	52,3890		
55	1,3970	0,0274	56,8651	56,9281		
60	1,5240	0,0299	60,3325	61,2781		
65	1,6510	0,0324	59,1977	65,9433		
70	1,7780	0,0349		44,7608		

4.2. Análisis estadístico

Análisis individual.

Usando el programa Statistica 7, se analizó los datos que se obtuvo de los ensayos hechos a las muestras y se encontró las medias aritméticas, probabilidades de los esfuerzos a la ruptura entre las variables: días de curado, porcentajes de zeolita y esfuerzos a la ruptura; con estos resultados se pudo validar la hipótesis que se

planteo, los valores se los indica en la TABLA 17, mostrada más adelante:

Definición de Hipótesis:

Ho: Todos los valores de la media aritmética son menores o iguales que las del control (día 7).

Ha: Existe por lo menos un valor de media aritmética mayor que la del control.

TABLA 17.
VALORES DE INDICADORES ESTADÍSTICOS BÁSICOS, PARA MUESTRAS DE CEMENTO + 25% DE ZEOLITA A 7, 14, 21 Y 28 DÍAS DE CURADO.

DIAS DE CURADO; Unweighted Means (Spreadsheet4)						
Current effect: F(3, 8)=53.832, p=.00001						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	DIAS DE CURADO	ESFUERZO DE RUPTURA MPa Mean	ESFUERZO DE RUPTURA MPa Std.Err.	ESFUERZO DE RUPTURA MPa -95.00%	ESFUERZO DE RUPTURA MPa +95.00%	N
1	7	52.89337	3.181495	45.55683	60.2299	3
2	14	91.12629	3.181495	83.78975	98.4628	3
3	21	57.59869	3.181495	50.26215	64.9352	3
4	28	99.14999	3.181495	91.81345	106.4865	3

TABLA 18.
VALORES DE PROBABILIDADES, APLICANDO DUNCAN PARA MUESTRAS DE CEMENTO + 25% DE ZEOLITA A 7, 14, 21 Y 28 DÍAS DE CURADO.

Duncan test; variable ESFUERZO DE RUPTURA MPa (Spreadsheet4)						
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests						
Error: Between MS = 30.366, df = 8.0000						
Cell No.	DIAS DE CURADO	{1}	{2}	{3}	{4}	
		52.893	91.126	57.599	99.150	
1	7		0.000128	0.326398	0.000081	
2	14	0.000128		0.000272	0.112538	
3	21	0.326398	0.000272		0.000115	
4	28	0.000081	0.112538	0.000115		

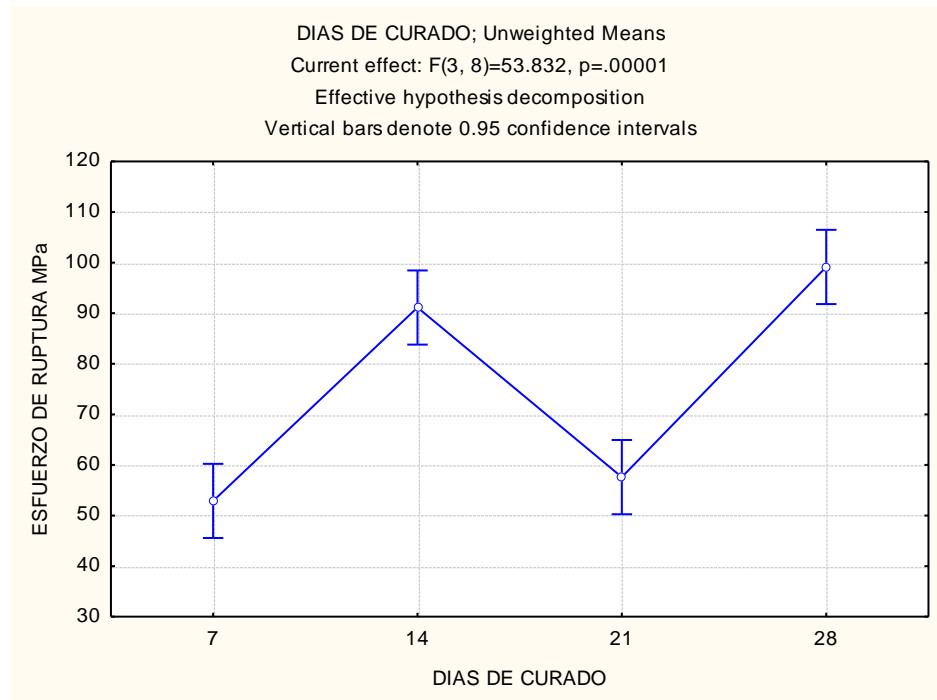


FIGURA 4.1. ESFUERZOS DE RUPTURA VS DÍAS DE CURADO

TABLA 19.

VALORES DE PROBABILIDADES, APLICANDO DUNNETT PARA MUESTRAS DE CEMENTO + 25% DE ZEOLITA A 7, 14, 21 Y 28 DÍAS DE CURADO.

Dunnnett test; variable ESFUERZO DE RUPTURA MPa (Spreadsheet4)		Probabilities for Post Hoc Tests (2-sided)	
Error: Between MS = 30.366, df = 8.0000			
Cell No.	DIAS DE CURADO	{1}	
1	7	52.893	
2	14	0.000084	
3	21	0.615170	
4	28	0.000028	

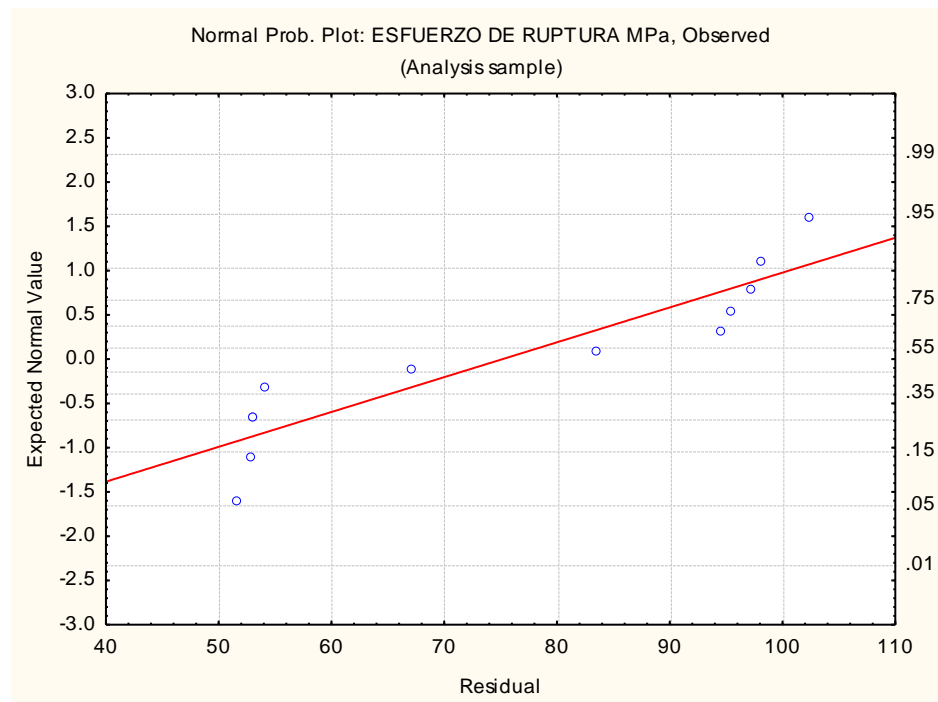


FIGURA 4.2. CURVA DE ESFUERZOS DE RUPTURA PROMEDIO PARA MUESTRAS DE CEMENTO + 25% DE ZEOLITA A 7, 14, 21 y 28 DÍAS DE CURADO

Analizando las tablas anteriores se pudo concluir que la hipótesis nula es rechazada, es decir, se aceptó la hipótesis alterna.

Análisis grupal

Usando el programa STATISTICA 7, se analizó los datos que se obtuvo de los ensayos hechos a las muestras de todos los integrantes del grupo y se encontró las medias aritméticas, probabilidades de los esfuerzos a la ruptura entre las variables: días de curado, porcentaje de zeolita y esfuerzos a la ruptura, con estos

resultados se pudo validar la hipótesis que planteadas; los valores son incluidos en la TABLA 20, mostrada a continuación:

TABLA 20.
ESFUERZOS DE RUPTURA PROMEDIO PARA MUESTRAS DE CEMENTO + PORCENTAJE DE ZEOLITA A 7, 14, 21 Y 28 DÍAS DE CURADO.

Días de curado*% de zeolita; Unweighted Means (análisis grupal)							
Current effect: F(15, 48)=4,2898, p=.00006							
Effective hypothesis decomposition							
Cell No.	Días de curado	% de zeolita	Esfuerzo a la ruptura Mean	Esfuerzo a la ruptura Std.Err.	Esfuerzo a la ruptura -95.00%	Esfuerzo a la ruptura +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

TABLA 21.
MEDIAS ARITMÉTICAS DEL ESFUERZO EN BASE A LOS DÍAS DE CURADO.

Días de curado; Unweighted Means (FINAL GRUPAL)						
Current effect: F(3, 48)=32.849, p=.00000						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Días de curado	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95.00%	Esfuerzo de ruptura +95.00%	N
1	7	74.3044	2.367942	69.5434	79.0655	18
2	14	85.0930	2.367942	80.3319	89.8540	18
3	21	91.8967	2.367942	87.1357	96.6578	18
4	28	106.7191	2.367942	101.9580	111.4801	18

TABLA 22.
MEDIAS ARITMÉTICAS DEL ESFUERZO EN BASE A LOS
PORCENTAJES DE ZEOLITA.

Porcentaje de zeolita; Unweighted Means (FINAL GRUPAL) Current effect: F(5, 48)=9.6842, p=.00000 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Porcentaje de zeolita	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95.00%	Esfuerzo de ruptura +95.00%	N
1	0	94.13208	2.900125	88.30099	99.9632	12
2	5	92.94000	2.900125	87.10891	98.7711	12
3	10	95.41037	2.900125	89.57928	101.2415	12
4	15	97.86584	2.900125	92.03474	103.6969	12
5	20	81.47942	2.900125	75.64832	87.3105	12
6	25	75.19208	2.900125	69.36099	81.0232	12

TABLA 23.
VALORES DE PROBABILIDAD DE DÍAS DE CURADO VS
PORCENTAJE DE ZEOLITA PARA 7, 14, 21 Y 28 DÍAS DE
CURADO

Custom Univariate Tests of Significance for Esfuerzo a la ruptura (análisis grupal) Error based on: Dias de curado*% de zeolita Effective hypothesis decomposition						
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p	
Días de curado	9946,225	3	3315,408	7,657422	0,002467	
Dias de curado*% de zeolita	6494,499	15	432,967			

TABLA 24.
PROBABILIDADES PORCENTAJE DE ZEOLITA VS DÍAS DE
CURADO.

Custom Univariate Tests of Significance for Esfuerzo a la ruptura (análisis grupal) Error based on: Dias de curado*% de zeolita Effective hypothesis decomposition						
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p	
% de zeolita	4887,069	5	977,4138	2,257481	0,101788	
Dias de curado*% de zeolita	6494,499	15	432,9666			

TABLA 25.
PROBABILIDADES, PORCENTAJES DE ZEOLITA VS DÍAS DE CURADO, APLICANDO DUNCAN

Duncan test; variable Esfuerzo a la ruptura (análisis grupal)																										
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests																										
Error: Between MS = 100,93, df = 48,000																										
Cell No	Días curado	% zeolita	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)
1	7	0		0,9616	0,3888	0,0845	0,0021	0,0002	0,5170	0,4169	0,8260	0,9491	0,0097	0,8356	0,4869	0,7817	0,1887	0,0226	0,8352	0,0011	0,5022	0,0582	0,0340	0,0076	0,0359	0,3155
2	7	5	0,9616		0,3771	0,0823	0,0020	0,0002	0,5388	0,4091	0,8021	0,9835	0,0094	0,8640	0,5097	0,8092	0,2001	0,0245	0,8628	0,0010	0,5245	0,0623	0,0367	0,0083	0,0386	0,3323
3	7	10	0,3888	0,3771		0,3200	0,0180	0,0027	0,1529	0,9295	0,4908	0,3756	0,0603	0,3107	0,1411	0,2820	0,0377	0,0024	0,3113	0,0110	0,1470	0,0079	0,0039	0,0006	0,0042	0,0763
4	7	15	0,0845	0,0823	0,3200		0,1296	0,0306	0,0241	0,3089	0,1172	0,0832	0,3122	0,0639	0,0221	0,0571	0,0038	0,0001	0,0650	0,0902	0,0232	0,0005	0,0002	0,0000	0,0002	0,0096
5	7	20	0,0021	0,0020	0,0180	0,1296		0,4404	0,0003	0,0166	0,0035	0,0021	0,5447	0,0014	0,0003	0,0012	0,0000	0,0000	0,0014	0,7993	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
6	7	25	0,0002	0,0002	0,0027	0,0306	0,4404		0,0000	0,0024	0,0004	0,0002	0,1966	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,5690	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	14	0	0,5170	0,5388	0,1529	0,0241	0,0003	0,0000		0,1723	0,4077	0,5438	0,0020	0,6342	0,9491	0,6650	0,4677	0,0872	0,6278	0,0002	0,9725	0,1830	0,1209	0,0353	0,1247	0,6893
8	14	5	0,4169	0,4091	0,9295	0,3089	0,0166	0,0024	0,1723		0,5179	0,4102	0,0575	0,3420	0,1599	0,3129	0,0440	0,0029	0,3438	0,0099	0,1662	0,0094	0,0048	0,0008	0,0051	0,0878
9	14	10	0,8260	0,8021	0,4908	0,1172	0,0035	0,0004	0,4077	0,5179		0,7952	0,0160	0,6921	0,3817	0,6423	0,1365	0,0142	0,6909	0,0019	0,3948	0,0387	0,0219	0,0045	0,0231	0,2378
10	14	15	0,9491	0,9835	0,3756	0,0832	0,0021	0,0002	0,5438	0,4102	0,7952		0,0097	0,8709	0,5170	0,8173	0,2034	0,0250	0,8719	0,0011	0,5310	0,0631	0,0373	0,0084	0,0391	0,3375
11	14	20	0,0097	0,0094	0,0603	0,3122	0,5447	0,1966	0,0020	0,0575	0,0150	0,0097		0,0068	0,0018	0,0060	0,0002	0,0000	0,0071	0,4205	0,0019	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006
12	14	25	0,8356	0,8640	0,3107	0,0639	0,0014	0,0001	0,6342	0,3420	0,6921	0,8709	0,0068		0,6062	0,9297	0,2523	0,0342	0,9920	0,0007	0,6210	0,0828	0,0503	0,0121	0,0525	0,4067
13	21	0	0,4869	0,5097	0,1411	0,0221	0,0003	0,0000	0,9491	0,1599	0,3817	0,5170	0,0018	0,6062		0,6510	0,4787	0,0921	0,6060	0,0002	0,9725	0,1849	0,1265	0,0374	0,1279	0,7078
14	21	5	0,7817	0,8092	0,2820	0,0571	0,0012	0,0001	0,6650	0,3129	0,6423	0,8173	0,0060	0,9297	0,6510		0,2761	0,0391	0,9325	0,0006	0,6615	0,0916	0,0589	0,0140	0,0588	0,4405
15	21	10	0,1887	0,2001	0,0377	0,0038	0,0000	0,0000	0,4677	0,0440	0,1365	0,2034	0,0002	0,2523	0,4787	0,2761		0,2862	0,2512	0,0000	0,4757	0,4772	0,3639	0,1420	0,3640	0,7026
16	21	15	0,0226	0,0245	0,0024	0,0001	0,0000	0,0000	0,0872	0,0029	0,0142	0,0250	0,0000	0,0342	0,0921	0,0391	0,2862		0,0339	0,0000	0,0899	0,6528	0,8377	0,6290	0,8212	0,1676
17	21	20	0,8352	0,8628	0,3113	0,0650	0,0014	0,0001	0,6278	0,3438	0,6909	0,8719	0,0071	0,9920	0,6060	0,9325	0,2512	0,0339		0,0007	0,6187	0,0916	0,0498	0,0119	0,0518	0,4057
18	21	25	0,0011	0,0010	0,0110	0,0902	0,7993	0,5690	0,0002	0,0099	0,0019	0,0011	0,4205	0,0007	0,0002	0,0006	0,0000	0,0000	0,0007		0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
19	28	0	0,5022	0,5245	0,1470	0,0232	0,0003	0,0000	0,9725	0,1662	0,3948	0,5310	0,0019	0,6210	0,9725	0,6615	0,4757	0,0899	0,6187	0,0002		0,1853	0,1241	0,0364	0,1270	0,7016
20	28	5	0,0582	0,0623	0,0079	0,0005	0,0000	0,0000	0,1830	0,0094	0,0387	0,0631	0,0000	0,0828	0,1849	0,0916	0,4772	0,6528	0,0816	0,0000	0,1853		0,7828	0,3872	0,7966	0,3059
21	28	10	0,0340	0,0367	0,0039	0,0002	0,0000	0,0000	0,1209	0,0048	0,0219	0,0373	0,0000	0,0503	0,1265	0,0569	0,3639	0,8377	0,0498	0,0000	0,1241	0,7828		0,5194	0,9706	0,2213
22	28	15	0,0076	0,0083	0,0006	0,0000	0,0000	0,0000	0,0353	0,0008	0,0045	0,0084	0,0000	0,0121	0,0374	0,0140	0,1420	0,6290	0,0119	0,0000	0,0364	0,3872	0,5194		0,5134	0,0754
23	28	20	0,0359	0,0386	0,0042	0,0002	0,0000	0,0000	0,1247	0,0051	0,0231	0,0391	0,0000	0,0525	0,1279	0,0588	0,3640	0,8212	0,0518	0,0000	0,1270	0,7966	0,9706	0,5134		0,2225
24	28	25	0,3155	0,3323	0,0763	0,0096	0,0001	0,0000	0,6893	0,0878	0,2378	0,3375	0,0006	0,4067	0,7078	0,4405	0,7026	0,1676	0,4057	0,0001	0,7016	0,3059	0,2213	0,0754	0,2225	

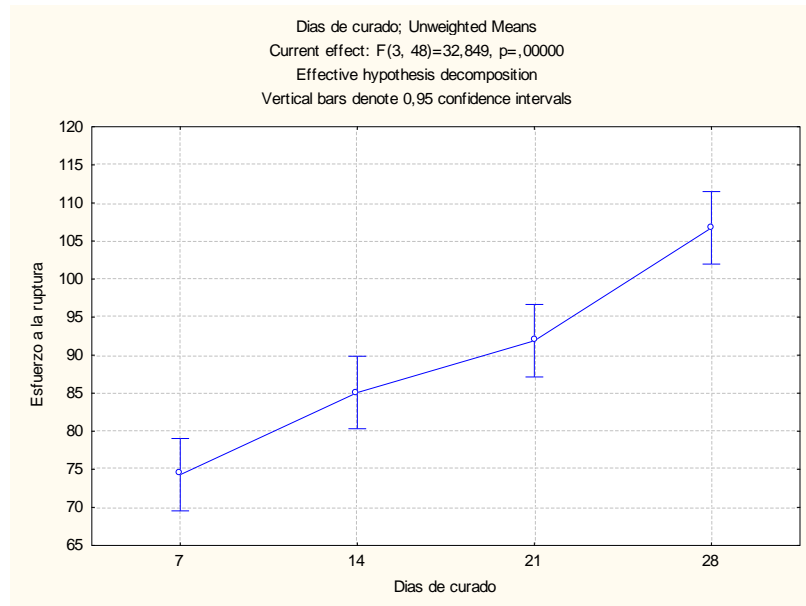


FIGURA 4.3. ESFUERZOS DE RUPTURAS PROMEDIOS VS DÍAS DE CURADO

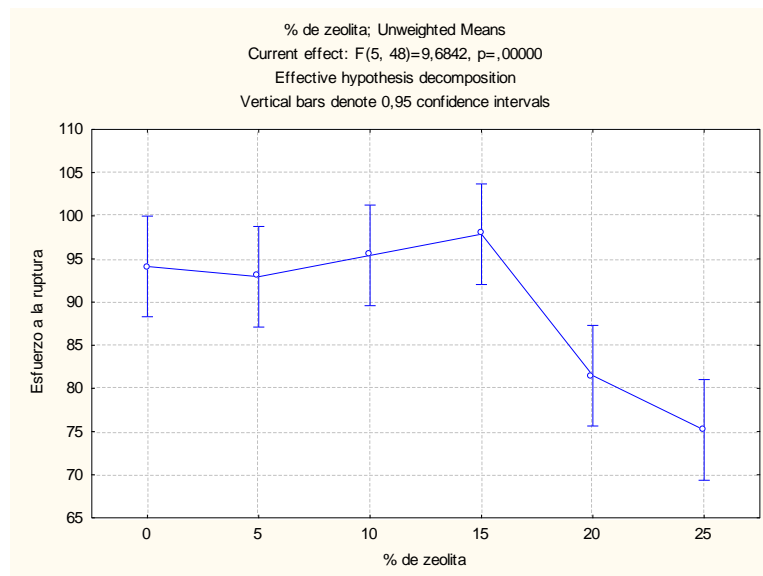


FIGURA 4.4. ESFUERZOS DE RUPTURAS PROMEDIOS VS % DE ZEOLITA

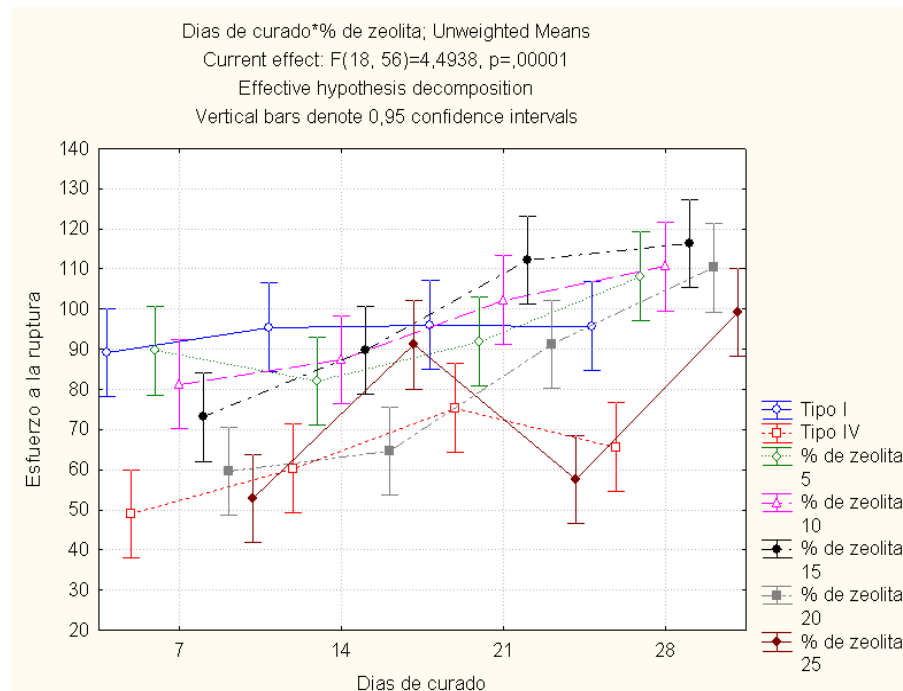


FIGURA 4.5. GRUPAL, ESFUERZOS PROMEDIOS VS DÍAS DE CURADO

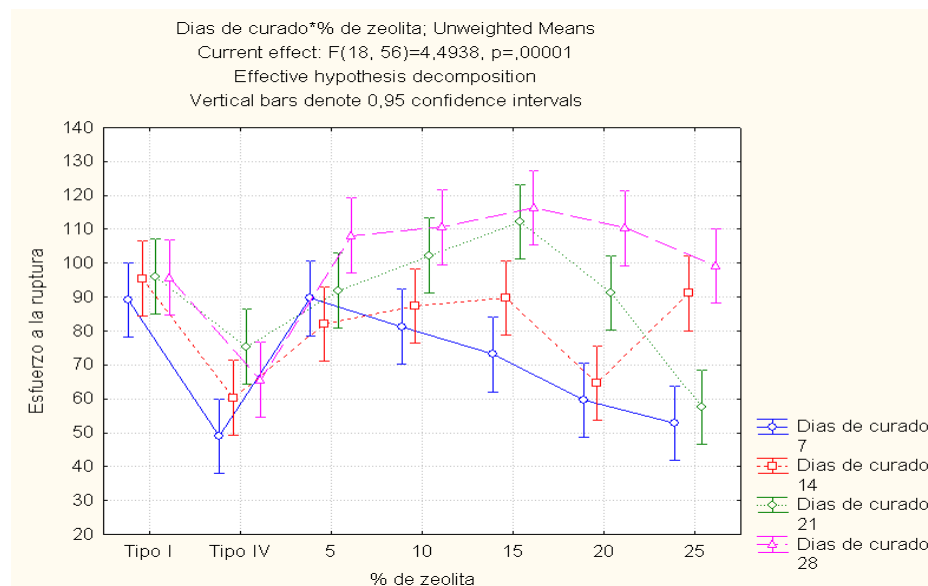


FIGURA 4.6. GRUPAL, ESFUERZOS PROMEDIOS VS PORCENTAJE DE ZEOLITA

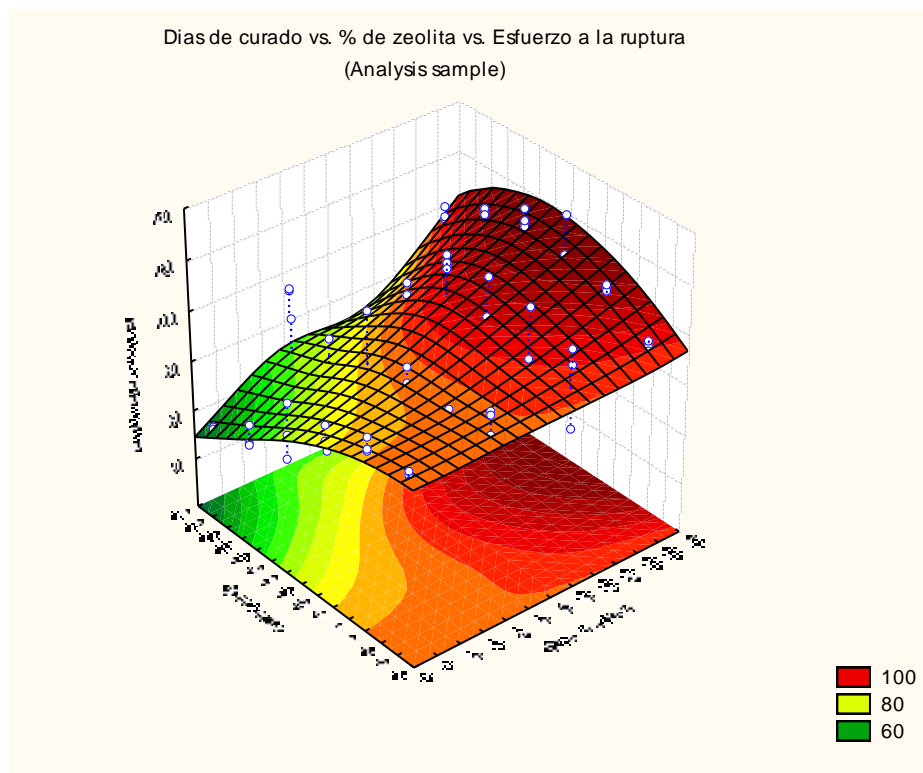


FIGURA 4.7. PROBABILIDADES, PORCENTAJE DE ZEOLITA VS
DÍAS DE CURADO A NIVEL DE SUPERFICIE

Comparación con el cemento tipo IV.

Se analizó con el programa estadístico, la comparación de las muestras grupales con el cemento tipo I con 0% de zeolita y el cemento tipo IV de uso comercial, para observar las diferencias en los valores de esfuerzo de compresión y poder afirmar, si es recomendable usar este aditivo puzolánico natural para mejorar la resistencia a la compresión del cemento tipo I.

La TABLA 26, muestra los valores de las medias aritméticas de los esfuerzos para los 7, 14, 21 y 28 días de curado en agua.

TABLA 26.

VALORES DE MEDIAS DE LOS ESFUERZOS DE RUPTURA DE ACUERDO AL MATERIAL USADO (MUESTRAS DE CEMENTO TIPO I + % DE ZEOLITA E INCLUYE CEMENTO TIPO I Y IV SIN ZEOLITA

Cell No.	Dias de curado*% de zeolita; Unweighted Means (análisis grupal) Current effect: F(18, 56)=4,4938, p=.00001 Effective hypothesis decomposition						N
	Dias de curado	% de zeolita	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	Tipo I	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	Tipo I	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	Tipo I	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	Tipo I	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

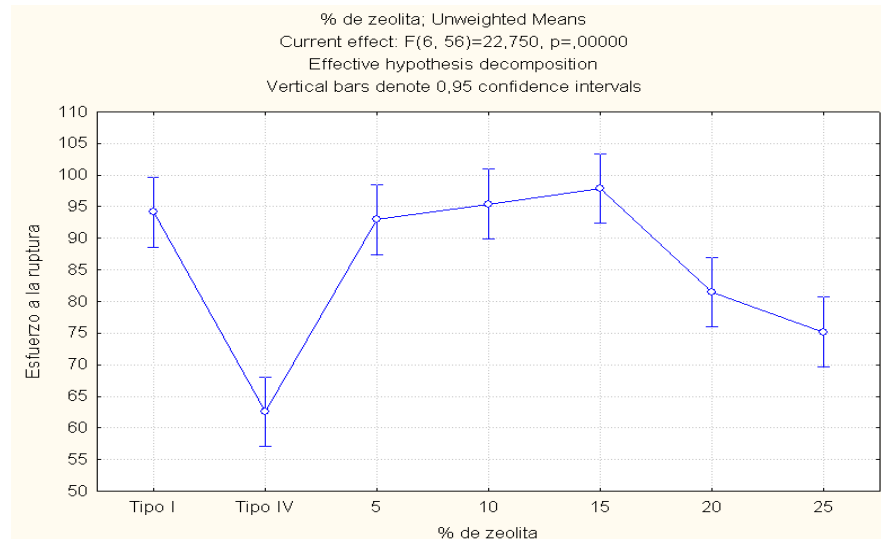


FIGURA 4.8 VALORES MEDIOS DEL ESFUERZO VS PORCENTAJE DE ZEOLITA, CEMENTO TIPO I Y IV

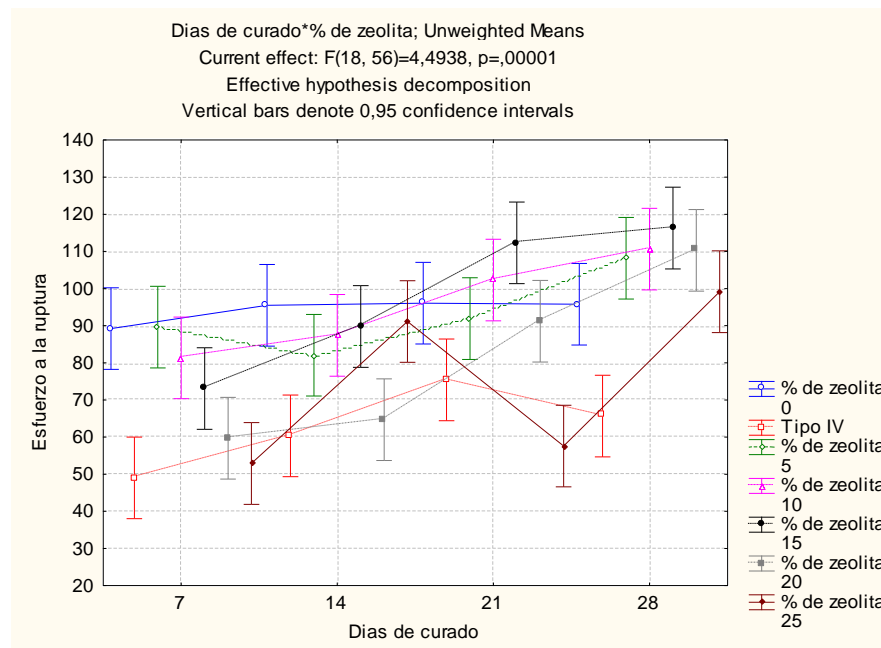


FIGURA 4.9. VALORES MEDIOS DEL ESFUERZO VS DÍAS DE CURADO BASADO EN PORCENTAJE DE ZEOLITA, CEMENTO TIPO I Y IV

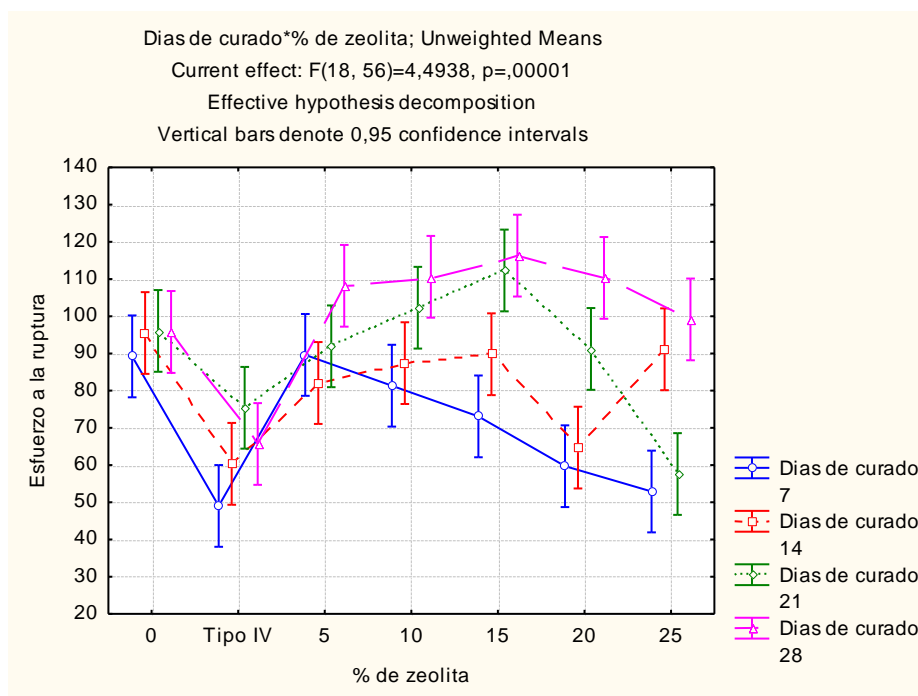


FIGURA 4.10. VALORES MEDIOS DEL ESFUERZO VS PORCENTAJE DE ZEOLITA, CEMENTO TIPO I Y IV BASADO EN DÍAS DE CURADO.

Como se pudo observar los valores de la tabla y las gráficas anteriores, indicaron que la adición de un porcentaje de zeolita al cemento tipo I generó como resultado un mayor valor de esfuerzo a la ruptura a los 28 días de curado, comparado contra el cemento tipo I con 0% de zeolita y contra el cemento tipo IV para el mismo tiempo de curado, es decir que, si es recomendable usar este aditivo puzolánico al cemento tipo I, obviamente que solo se ha estudiado el comportamiento del esfuerzo,

es decir, que se desconoce si es viable, ya que se debe hacer un estudio más completo para ver si es conveniente para la industria cementera usar esta zeolita natural. Lo que se puede asegurar, es que es una alternativa sustentada para en un futuro no muy lejano, luego que se realicen los estudios de factibilidad.

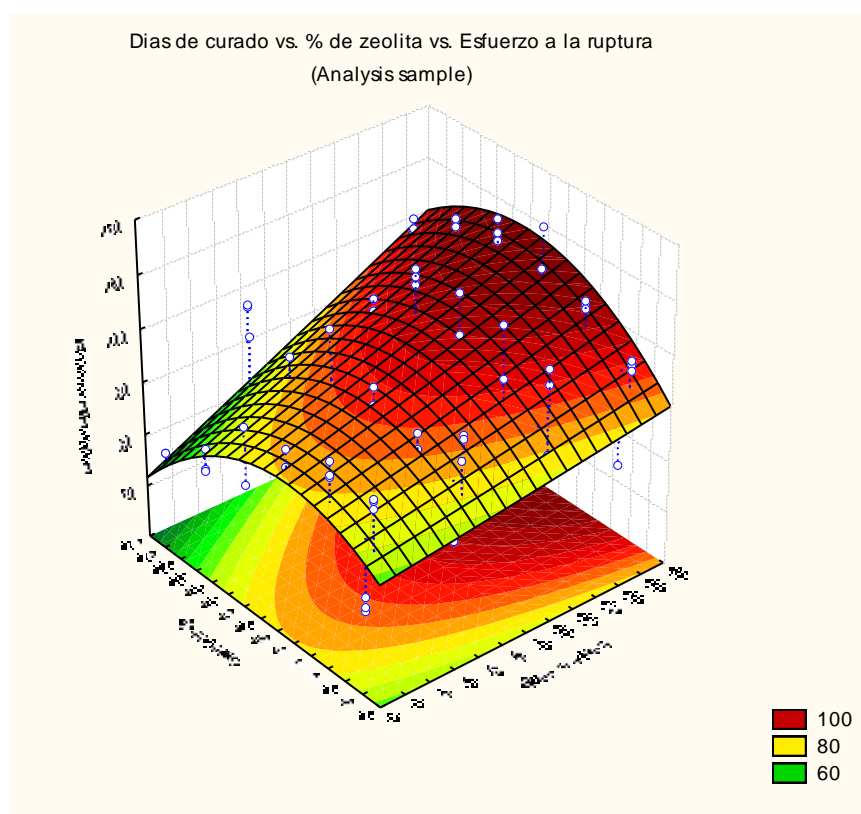


FIGURA 4.11. PROBABILIDADES, PORCENTAJE DE ZEOLITA VS DÍAS DE CURADO (CEMENTO TIPO I, IV, 7, 14, 21 Y 28 DÍAS) A NIVEL DE SUPERFICIE

4.3. Diseño del modelo matemático y simulación

Para calcular los valores de los tensores característicos del material se usó las relaciones dadas mediante la teoría de Inelasticidad, que indica que el valor del corrector plástico “**m**”, es determinado trazando una paralela a la curva de linealidad, la cual corta con el eje x, esto se pudo determinar teóricamente basándose en la siguiente ecuación :

$$m = \frac{((\text{def } f) * (E_{\text{prom}})) - \sigma_u}{E_{\text{prom}}}$$

El correspondiente valor del intervalo de deformación máxima que sufre el material (en este caso la muestra), con respecto al módulo de fluencia “**a**”, es decir, **a** significa cuantas veces el valor del esfuerzo máximo es más grande que el valor del esfuerzo de fluencia; este valor también pudo ser hallado con la siguiente relación:

$$a = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} - 1$$

Luego de encontrar estos valores, se pudo ejecutar el algoritmo elaborado en Matlab de modelaje y así se obtuvo la curva experimental que simuló el comportamiento y se estableció la diferencia entre las gráficas, de valores experimentales y de valores teóricos para cada uno de los porcentajes de adición de zeolita y para los diferentes días de curado.

A continuación, se muestra las curvas de Matlab que se obtuvo:

TABLA 27.
VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN
DEL 25% DE ZEOLITA

DÍAS DE CURADO	E	σ_U [MPa]	σ_Y [MPa]	m	a
7	2081,99	52,89	30.61	0,004257	0,738606
14	8653,94	91,12	74.79	0,002784	0,249737
21	4315,48	52,87	49.86	0,001853	0,155938
28	7761,94	99,15	59,03	0,002196	0,345053

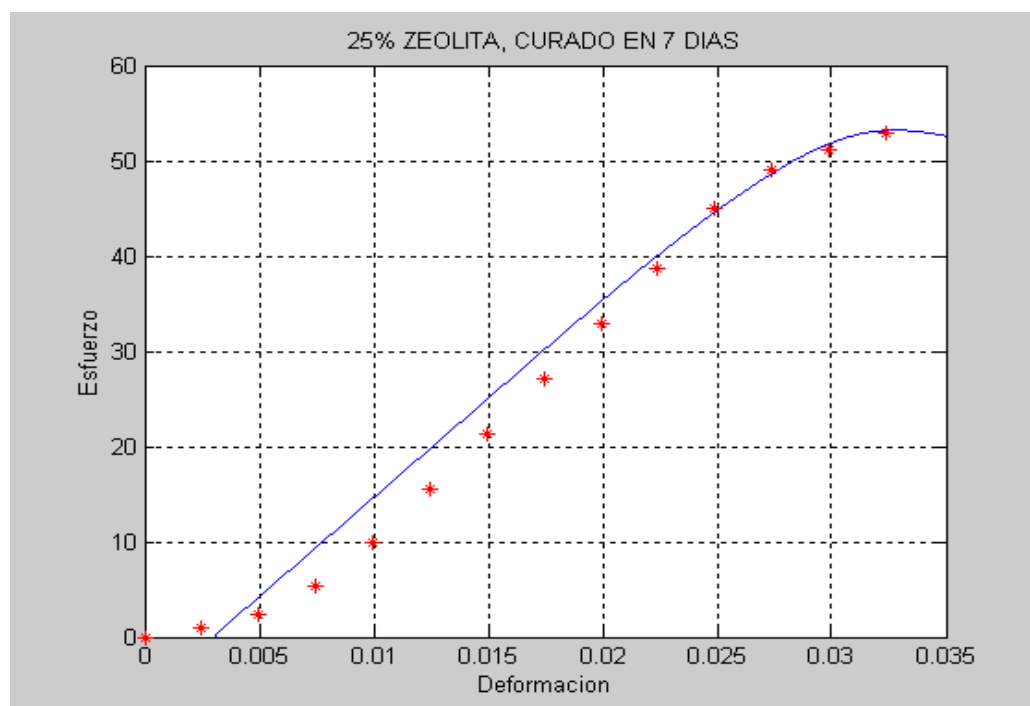


FIGURA 4.12 ESFUERZO VS DEFORMACIÓN A LOS 7 DÍAS DE CURADO (MATLAB)

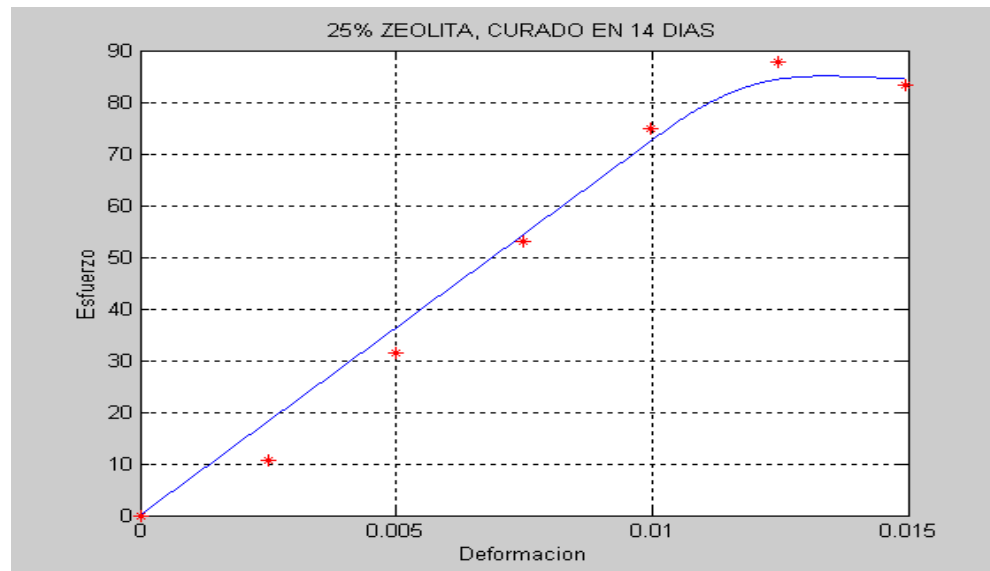


FIGURA 4.13 ESFUERZO VS DEFORMACIÓN A LOS 14 DÍAS DE CURADO (MATLAB)

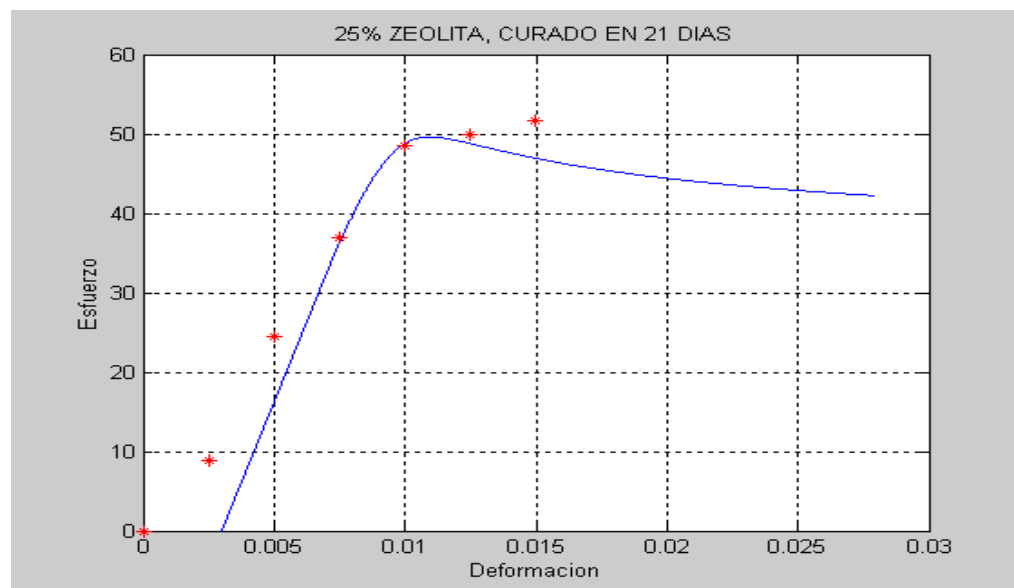


FIGURA 4.14. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN A LOS 21 DÍAS DE CURADO (MATLAB)

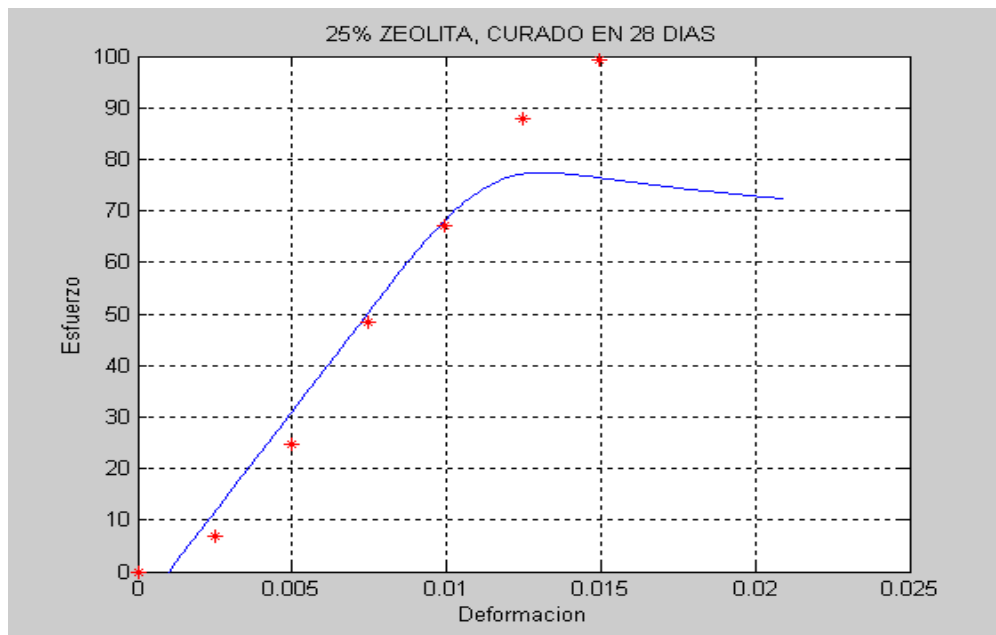


FIGURA 4.15. ESFUERZO VS DEFORMACIÓN A LOS 28 DÍAS DE CURADO (MATLAB)

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- La simulación del comportamiento de la pasta de cemento tipo I, tuvo una buena aproximación a los datos experimentales.
- La adición de zeolita en diferentes concentraciones tuvo un crecimiento gradual hasta llegar al 15% de aditivo, luego la resistencia a la compresión disminuyó.
- Se comprobó que la resistencia a la compresión aumenta a medida que 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 de uso comercial.

- La resistencia a la compresión de la pasta de cemento fue máxima al 15% de zeolita (116,29 MPa), en el día 28 de curado en agua.
- 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 comercial.
- Con la adición del 15% al 25% de zeolita disminuye la resistencia a la compresión, pero es necesario recalcar que a pesar de esto, dichos valores son mayores a las muestras de control de cemento tipo I y 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.
- Se recomienda examinar otras propiedades de la pasta de cemento con la adición de zeolita ecuatoriana para definir si puede o no ser un producto sustituto en la industria cementera.
- Se recomienda hacer un estudio de impacto ambiental, para que de darse el caso en que se encuentre que la mezcla estudiada fuese usada en la industria del cemento, que impacto significativo tuviere dentro del ámbito ambiental.

- Extender el tiempo de curado de las muestras para realizar otras pruebas y así poder conocer su comportamiento en un periodo largo.
- Para una mejor precisión respecto a los valores del modulo de Young es importante utilizar medidores como los extensómetros para obtener una mejor precisión en la deformación y por ende una mejor precisión en el calculo de los módulos de Young.

APÉNDICE A
GRÁFICA DE ESFUERZO VS DÍAS DE CURADO (25% DE ZEOLITA)

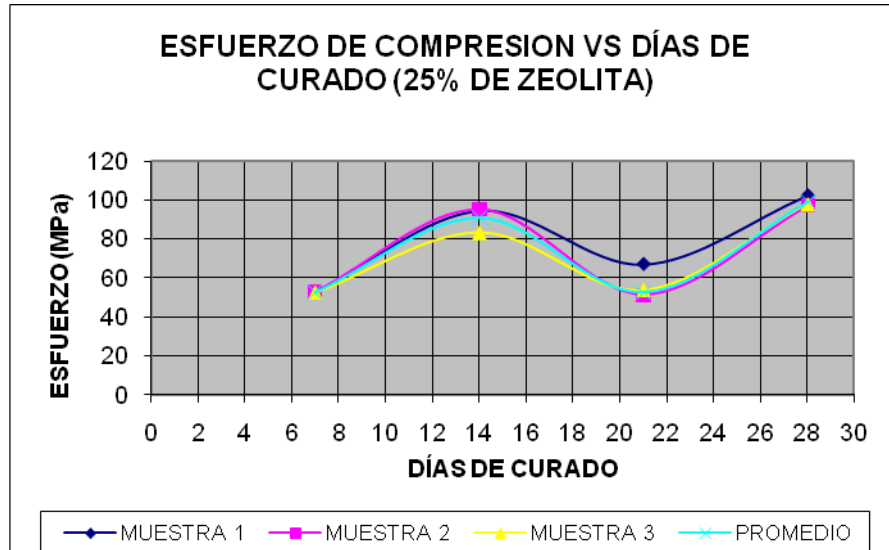


FIGURA A1. GRÁFICA, ESFUERZO/DÍAS DE CURADO, 25%

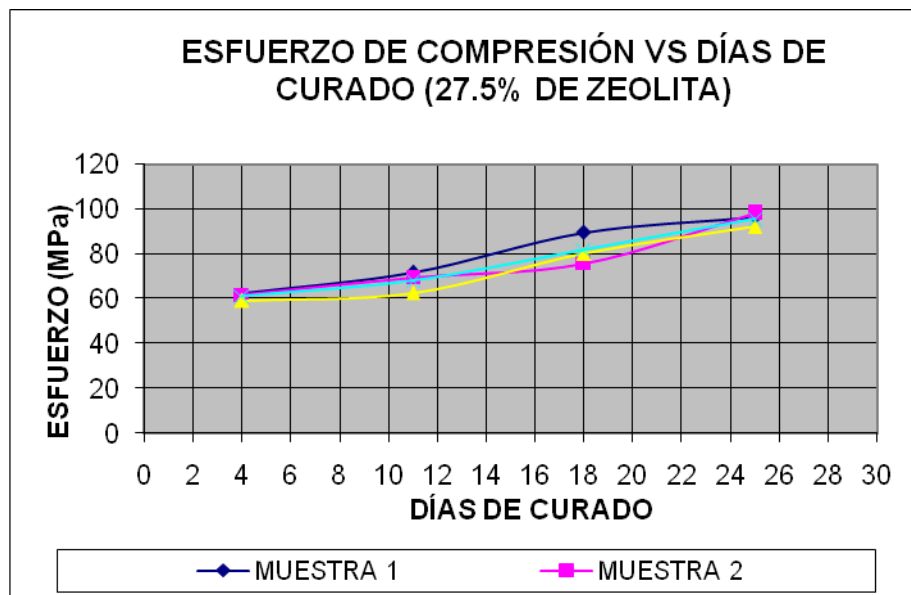


FIGURA A2. GRÁFICA, ESFUERZO/DÍAS DE CURADO, 27,5%

APÉNDICE B
GRÁFICA DE MÓDULO DE YOUNG VS DÍAS DE CURADO
(25% DE ZEOLITA)

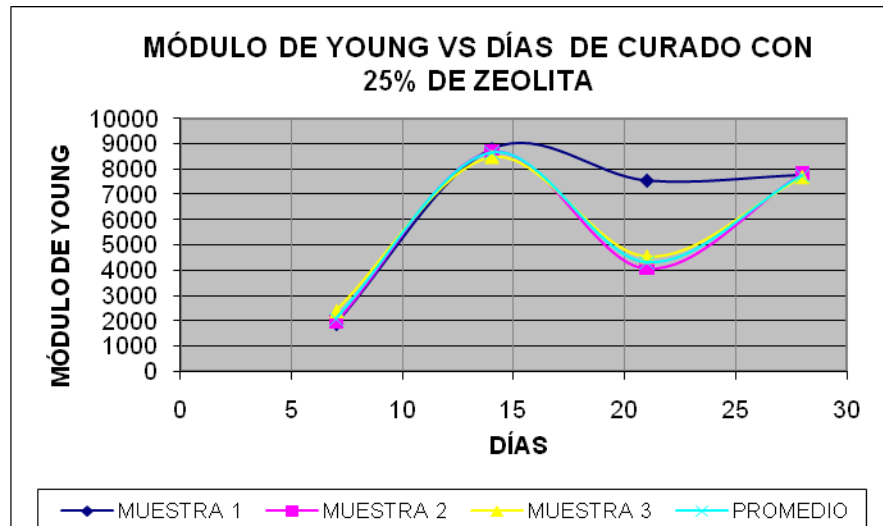


FIGURA B1. GRÁFICA, MÓDULO / DÍAS DE CURADO, 25%

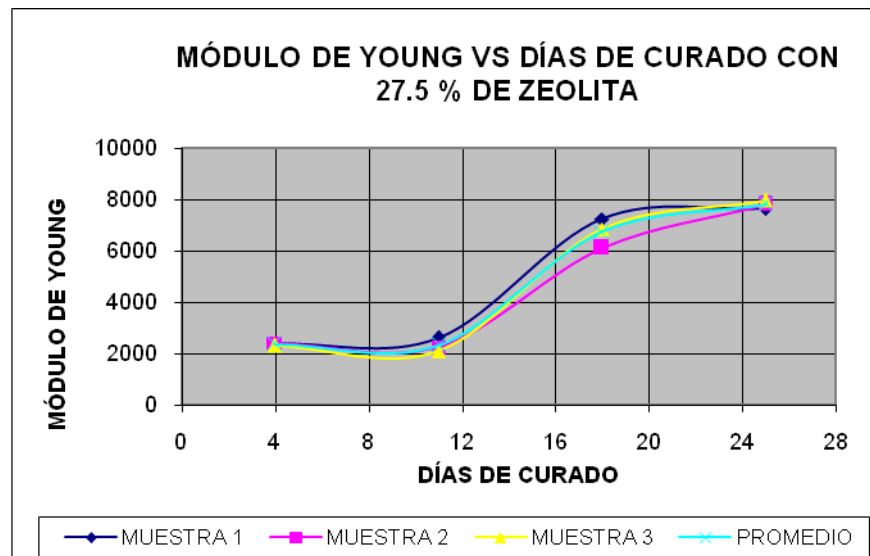


FIGURA B2. GRÁFICA, MÓDULO / DÍAS DE CURADO, 27,5%

APÉNDICE C
GRÁFICAS, INTERVALO DE CONFIANZA PARA ANALIZAR EL MÓDULO
DE YOUNG PROMEDIO (20 % DE ZEOLITA)

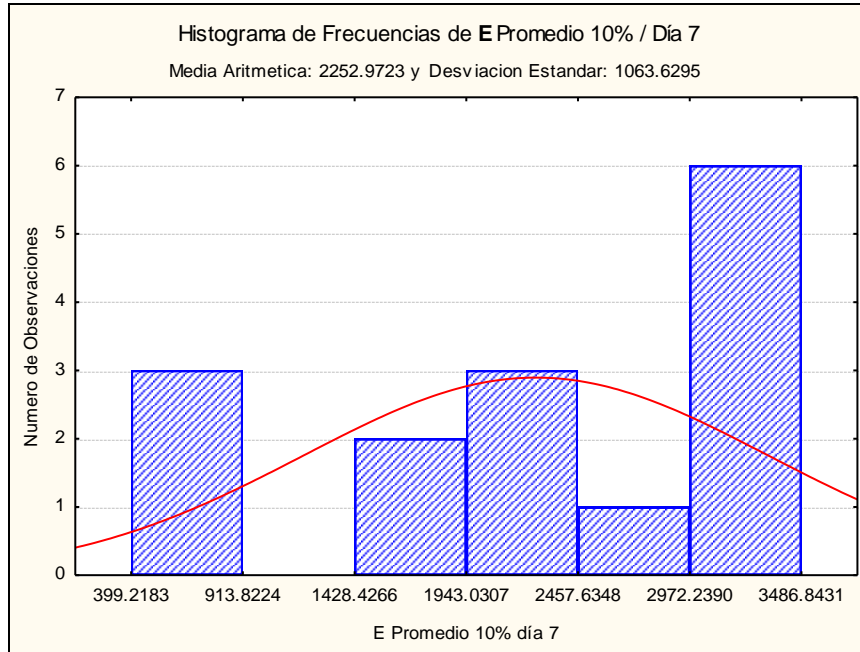


FIGURA C1. E PROMEDIO, DÍA 7 DE CURADO

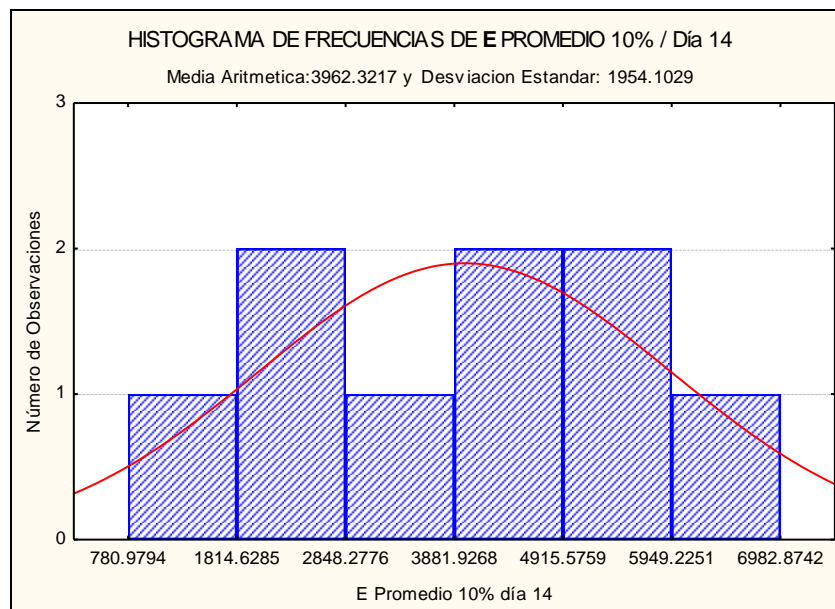


FIGURA C2. E PROMEDIO, DÍA 14 DE CURADO

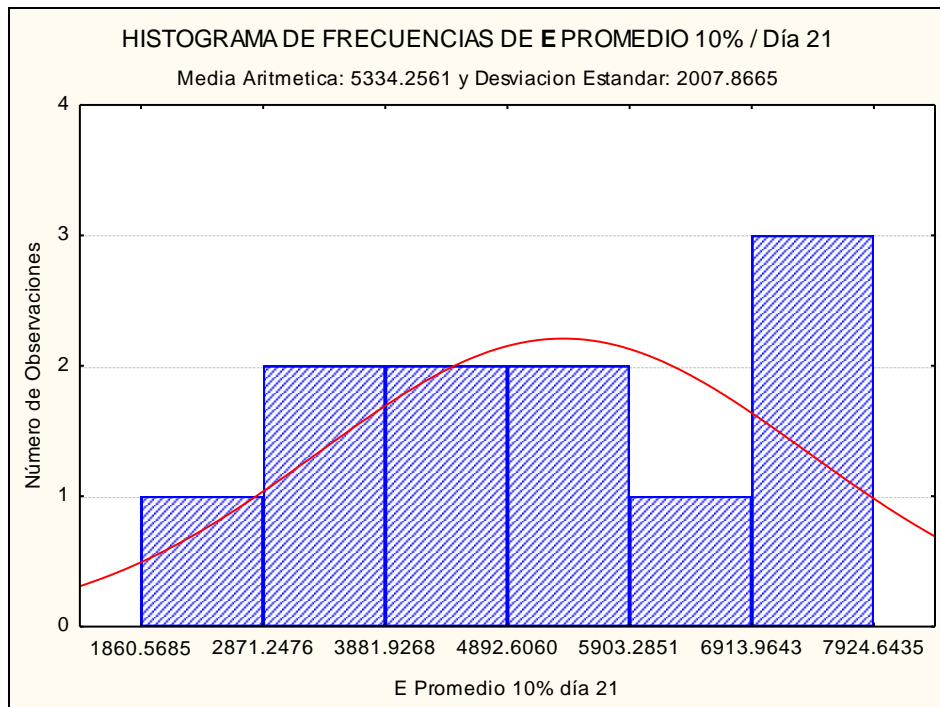


FIGURA C3. E PROMEDIO, DÍA 21 DE CURADO

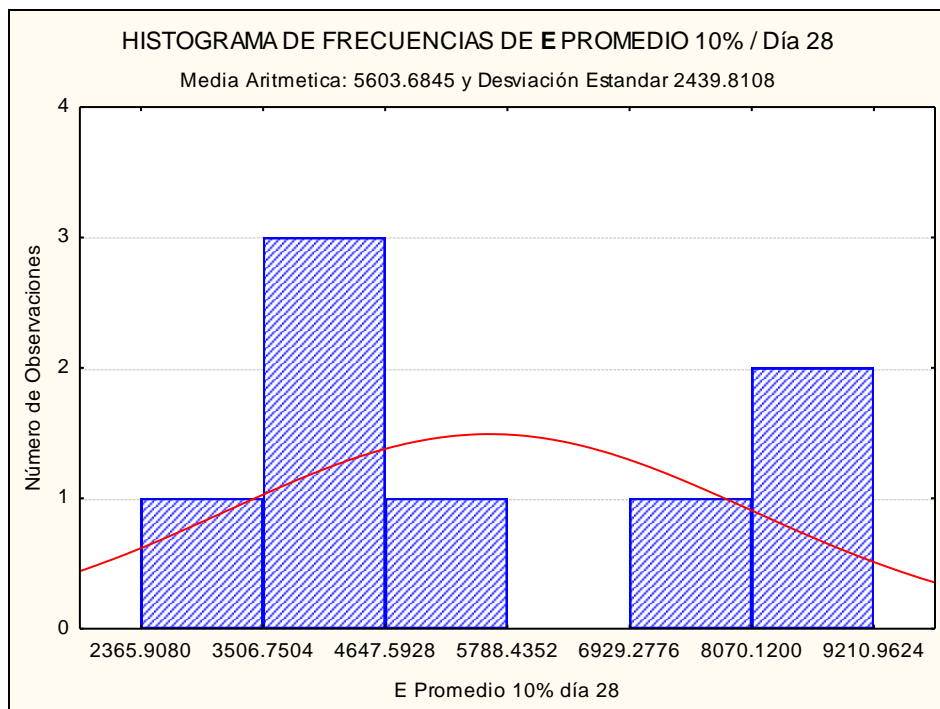


FIGURA C4. E PROMEDIO, DÍA 28 DE CURADO

APÉNDICE D
GRÁFICAS, INTERVALO DE CONFIANZA PARA ANALIZAR EL MÓDULO
DE YOUNG PROMEDIO (27,5 % DE ZEOLITA)

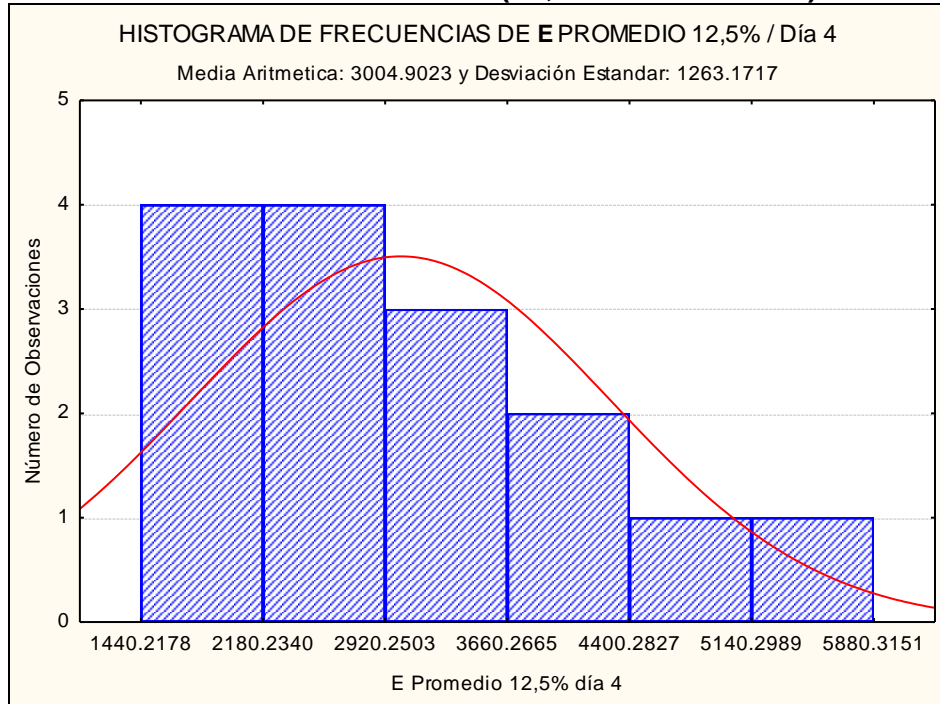


FIGURA D1. E PROMEDIO, DÍA 4 DE CURADO

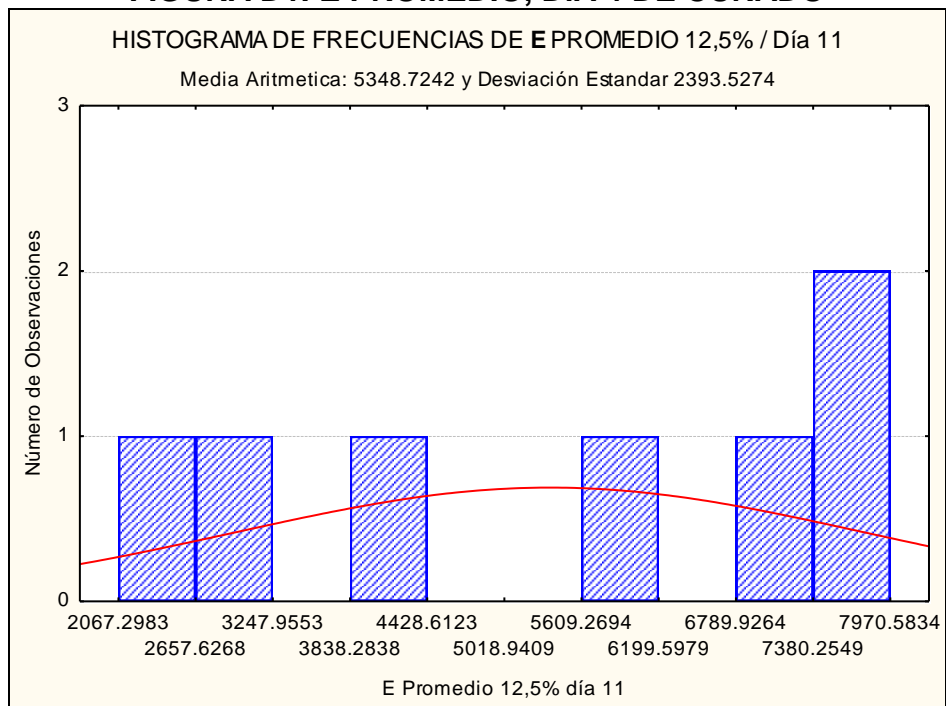


FIGURA D2. E PROMEDIO, DÍA 11 DE CURADO

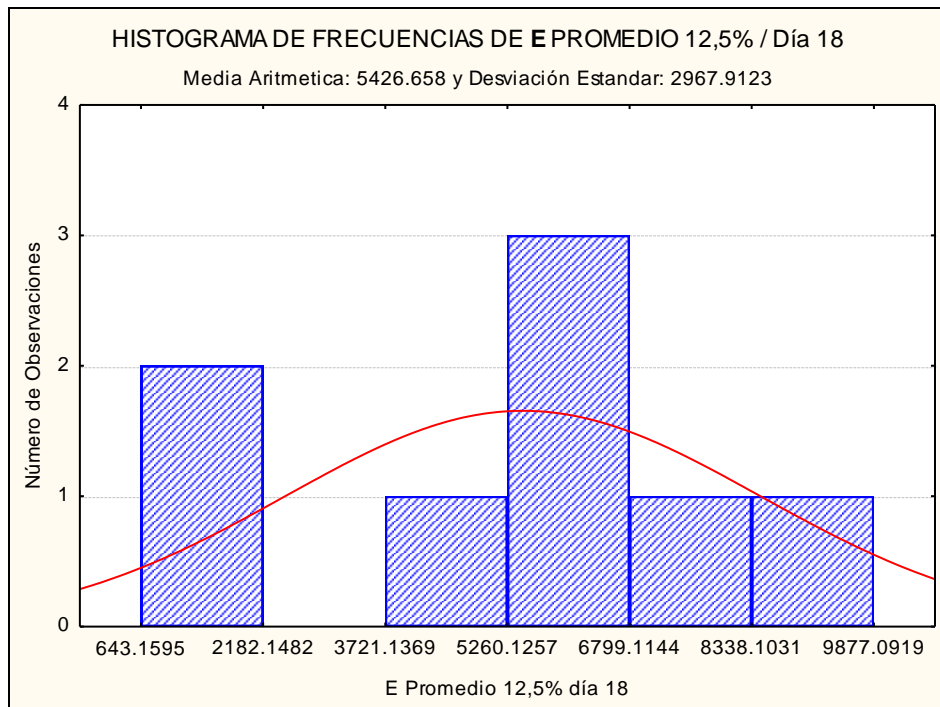


FIGURA D3. E PROMEDIO, DÍA 18 DE CURADO

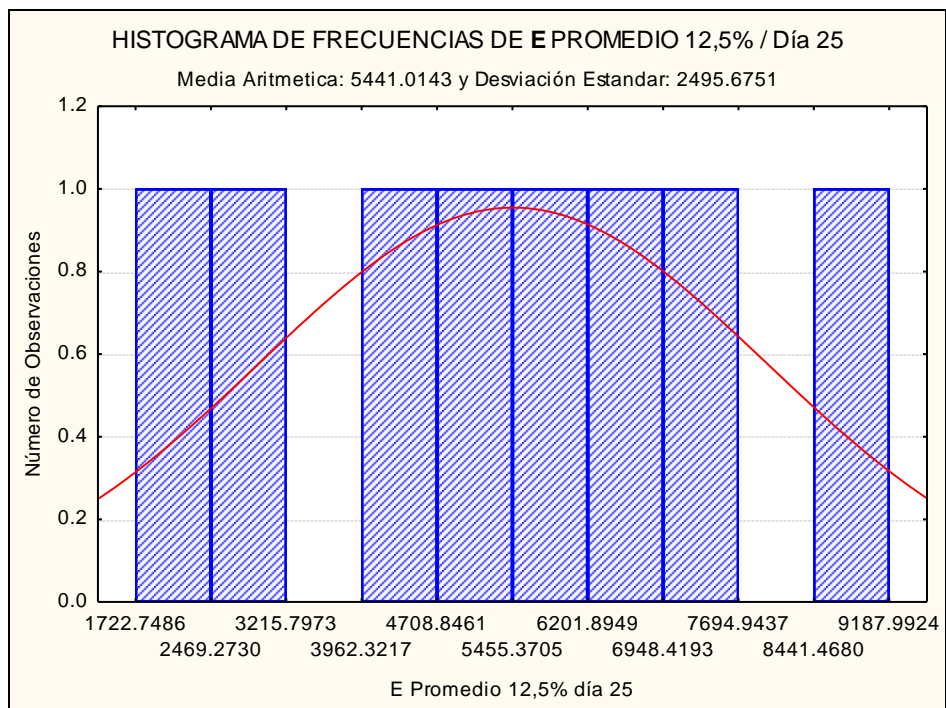


FIGURA D4. E PROMEDIO, DÍA 25 DE CURADO

APÉNDICE E GRÁFICAS ESTADÍSTICAS INDICATIVAS BÁSICAS

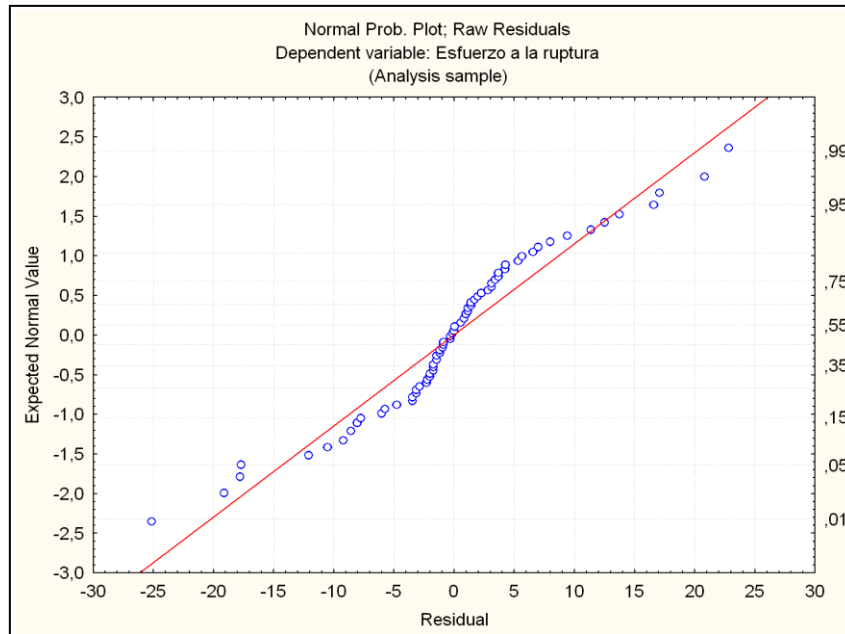


FIGURA E1. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA NORMALIDAD DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

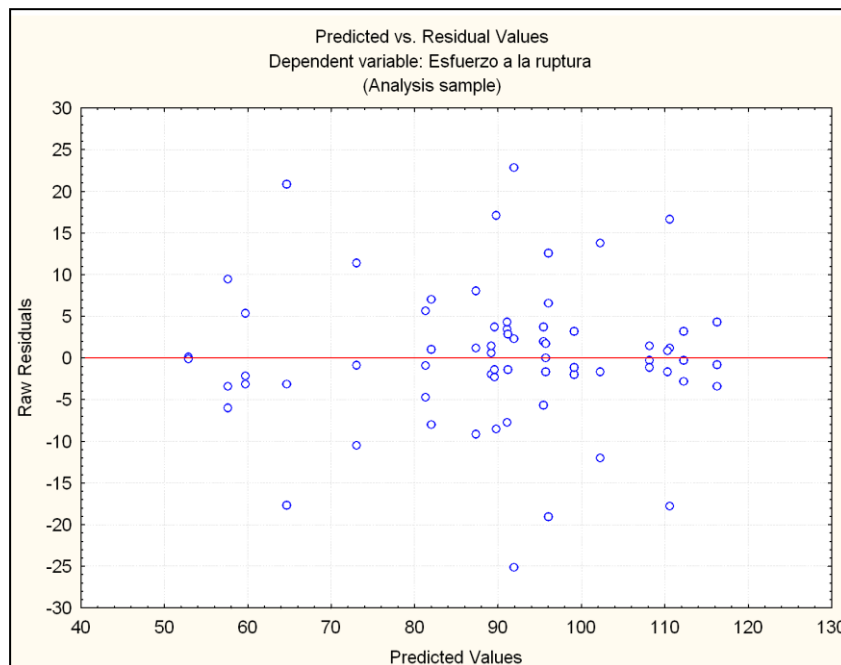


FIGURA E2. GRÁFICA QUE REPRESENTA LA ALEATORIEDAD DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.

APÉNDICE F
GRÁFICAS DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

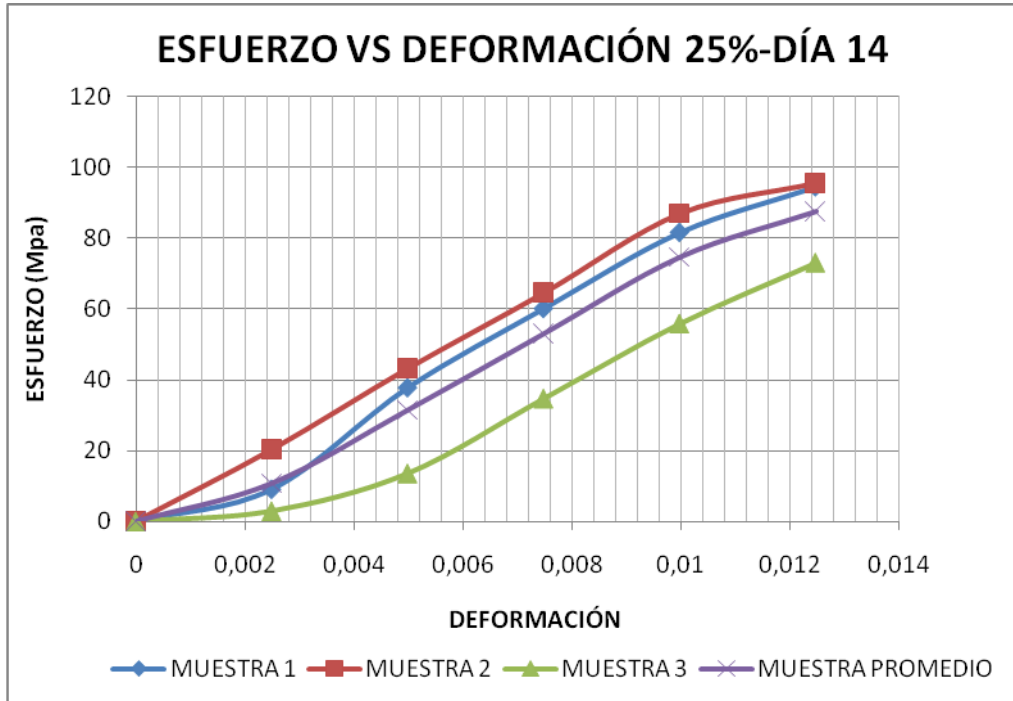


FIGURA F1. GRÁFICAS ESFUERZO/DEFORMACIÓN, DÍA 14, 25%

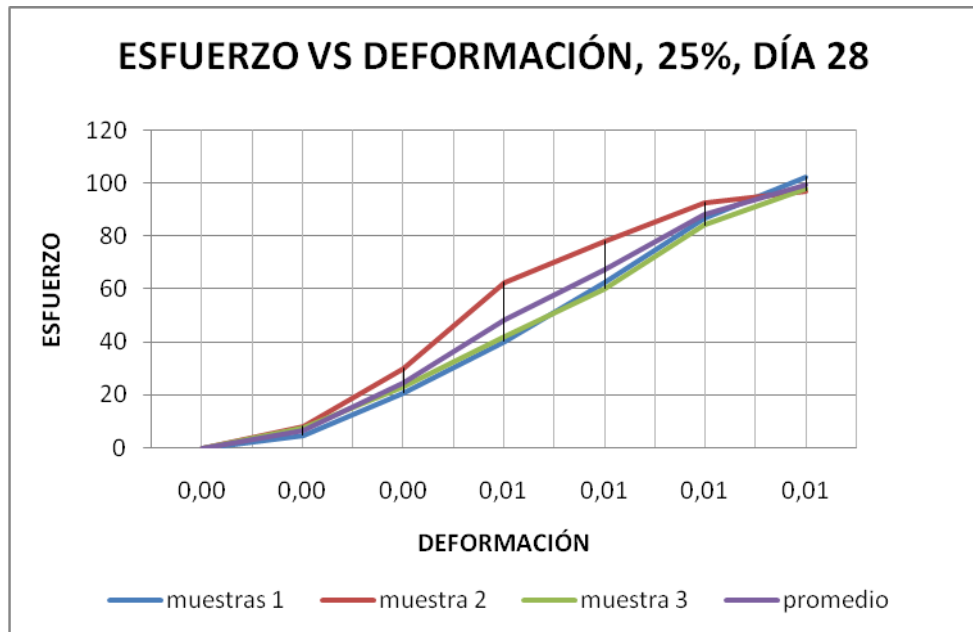
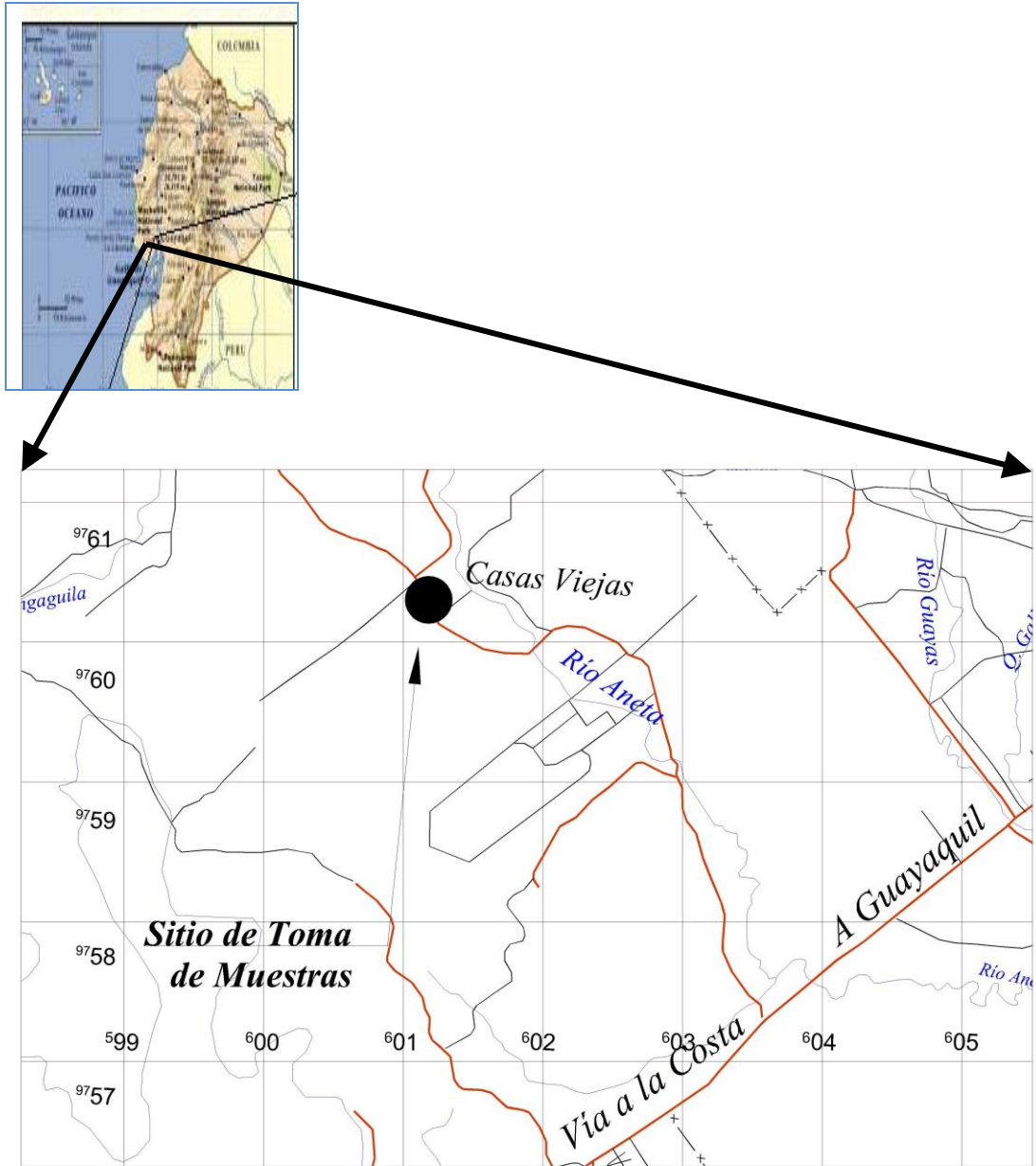


FIGURA F2. GRÁFICAS ESFUERZO/DEFORMACIÓN, DÍA 28, 25%

**APÉNDICE G.
PLANOS RELACIONADOS**



PLANO G1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE YACIMIENTOS.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jiménez."TECNOLOGÍA DEL CONCRETO". UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA DEL PERÚ". www.fic.uni.edu.pe. Febrero, 2008.
- [2] Servin, Jimmy S, "METALURGIA DE MINERALES NO METÁLICOS", www.monografias.com. Marzo, 2008.
- [3] Reyes, Oswaldo Dr, "MANUFACTURA DEL CEMENTO PORTLAND", Marzo, 2008.
- [4] Gutiérrez, Marco. "ZEOLITAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES", Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares , Marzo, 2008.
- [5] ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, Mayo 2008.
- [6] "CEMENTO", www.bvindicopi.gob.pe/nortec.html. , Marzo, 2008
- [7] O. Hernández–Castañeda y C.J. Mendoza–Escobedo. 'Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico
- [8] Manual del Ingeniero Civil, Sección 5 y 8 Editorial Mac. Graw Hill.

- [9] B.Y. Pekmezi, S. Akyuz “Optimum usage of natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete”.
- [10] F Amahjour; J. Paya; P. Pardo ; M. V. Borrachero. “Propiedades de lechadas de cemento fabricadas con cemento tipo I y mezclas con cenizas volantes (CV) y humo de sílice (HS),
- [11] “TIPOS DE CEMENTOS Y SUS USOS” ICCYC (Instituto Costarricense del cemento y del concreto)
- [12] Richard A, Livingston and Walairat Bumrongjaroen. “Optimization of silica fume, fly ash and cement mixes for high performance concrete”.
- [13] Nagore Gilisagasti Pérez, Eri Elorza Uria, “CEMENTO”
- [14] Begliardo Hugo F., “CEMENTO CON ADICIONES”, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Departamento de Ingeniería Civil, www.frrau.utn.edu.ar
- [15] F.P. Ganneau, F.J. Ulm, J. Gondzio, E. J. Garboczi . “An algorithm for computing the compressive strength of heterogeneous cohesive-frictional materials application to cement past”,
- [16] P. Robalino, F. Morante; V. Ramos; H. Eguez, “Caracterización básica de las zeolitas par su aplicación como material puzolánico”. ESPOL.
- [17] Morante F., “Las zeolitas naturales de la costa del Ecuador (Guayaquil) Geología, caracterización y aplicaciones”, Tesis de grado ESPOL
- [18] Robalino P., “El uso de la zeolita como adición mineral para producir cemento puzolánico”, Tesis de grado ESPOL-2004