ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"DETERMINACION DE LA VARIACION EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE LA PASTA DE CEMENTO TIPO I MEDIANTE LA ADICION DE 20% DE ZEOLITA I Y CURADO EN AIRE"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Titulo de:

INGENIERA MECANICA

Presentada por:

PAULINA MERCEDES CABEZAS TORO

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mi madre, a mis hermanos, a mi Director de Tesis Ing. Mauricio Cornejo y a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi madre, a mis hermanos, y a todos aquellos maestros y maestras que aportaron con sus consejos y enseñanzas a mi formación.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

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

Ing. Mauricio Cornejo M.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Rodrigo Perugachi B.
VOCAL

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
ESPOL
BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS G."
F. I. M. C. P.

DECLARACION EXPRESA

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

Paulina Mercedes Cabezas Toro.

RESUMEN

El mejoramiento de las propiedades del cemento es un tema que se ha ido desarrollando dadas las difíciles condiciones ambientales que hoy en día reducen la vida útil de este tipo de estructuras y encarecen el costo de mantener las mismas. Actualmente las investigaciones se están enfocando a determinar las mejoras que se obtienen al combinar el cemento con este tipo de aditivos, ya que el cemento Portland ; es por ello que se estudia el desarrollo de los aditivos y los efectos que producen estos en las distinta mezclas.

Este estudio se enfoca en Determinar la variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo I, mediante la adición de 20% de Zeolita I y curado al aire. Para este estudio específicamente se elaboraron probetas de pasta de cemento con un porcentaje de20% Zeolita .Las muestras de Zeolita tipo I , fueron extraídas ,específicamente del Sector de Casas Viejas, los cuales fueron caracterizados, en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Tierra (FICT-ESPOL), Luego de elaboradas las probetas se les realizo los ensayos de

compresión de acuerdo al test de ensayos de compresión dado en la norma ASTM C-109, para los diferentes días de curado en los distintos porcentajes de adición de Zeolita.

Los resultados obtenidos fueron introducidos en una herramienta técnico informática para establecer una comparación entre curvas esfuerzo deformación teóricas y curvas esfuerzo deformación experimentales, para determinar los rangos de los correctores plásticos para cada uno de los porcentajes además de los intervalos de deformación máxima con respecto al modulo de fluencia , los mismos que son valores característicos del material. De acuerdo a los resultados de esta investigación, se fijo que no siempre se cumple que a mas porcentaje de adición de zeolita la pasta de cemento adquiere una mejor resistencia, al contrario el comportamiento analizado en esta investigación denota que al comparar entre la adición de 20% y 22.5% de Zeolita , la mayor resistencia a la compresión se registro en las probetas de 20% de adición de Zeolita.

Los análisis realizados para las comparaciones entre (5,10,15,20%),(7.5,12.5,17.5,22.5%) de adición de Zeolita, usando el software de

STATISTICA ,mediante contraste , confirmaron nuevamente que el porcentaje optimo de adición , no siempre es la mayor proporción ,sino lo contrario ; para este caso la adición optima es de 20%

INDICE GENERAL

RESUMEN……VI

INDICE GENERAL……..IX

ABREVIATURAS……XV

SIMBOLOGIA……..XVI

INDICE DE FIGURAS……...XVII

INDICE DE PLANOS……XX

CAPITULO 1

1 Generalidades……1

1.1 Planteamiento del problema……3

1.1.1 Justificación……5

1.2 Objetivos……..7

1.2.1 Objetivos Generales……7

1.2.2 Objetivos Específicos……7

1.3 Metodología……9

1.4 Estructura de tesis……12

CAPITULO2

2 MARCO TEÓRICO……14

2.1 Tipos de cementos……..14

2.1.1 Cemento Portland……..15

2.1.1.1 Cemento Portland Especial……..16

2.1.1.2 Cemento blancos……16

2.1.1.3 Norma ASTM……..17

2.1.2 Cemento de Mezcla……18

2.1.2.1 Cemento Puzolanica……..18

2.2 Zeolita……19

2.2.1 Propiedades Físicas……19

2.2.2 Propiedades Química……..20

2.3 Curado del cemento ……21

2.3.1 Curado con Agua……24

2.3.2 Materiales utilizados en el curado para retener la humedad……25

2.4 Diseño Lineal……27

2.4.1 Modelos Estadísticos Lineales……28

2.4.1.1 Modelo Completo……30

2.4.1.2 Modelo Alterno……30

2.5 Diseño Factorial……33

2.5.1 Clasificación del Diseño Factorial……35

2.6 Estado del Arte……37

CAPITULO 3

3 METODOLOGIA……39

3.1 Recolección de Datos……39

3.2 Diseño del experimento……41

3.3 Experimentación…..……..46

CAPITULO 4

4 RESULTADOS Y ANALISIS……59

4.1 Tabulación de Datos y resultados……59

4.2 Análisis de Resultados……..65

4.3 Modelado y Valoración de resultados……74

CAPITULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES……98

5.1 Conclusiones..……..98

5.2 Recomendaciones……..100

APENDICE

BIBLIOGRAFIA

ABREVIATURAS

gr	Gramos
Kg	Kilogramos
Lb	Libras
Mpa	Mega Pascales
Mm	Milimetros
Min	minutos
N	Newtom
P	Probabilidad
Ho	Hipótesis Nula
Ha	Hipotesis Alterna
a	Deflexion Maxima Antes de la Fluencia
m	Corrector Plastico

SIMBOLOGIA

ε Deformación

μ Media Aritmética

λ Corrector Elástico

$r(\mu)$ Residual de Newton Raphson

Δ Tensor

ÍNDICE DE FIGURAS

Pag.

Figura 1.1. Metodología de la investigación.....9
Figura 2.1. Losas cubiertas con láminas de plástico.....26
Figura 3.1. Zeolita en estado bruto.....46
Figura 3.2. Trituradora de mandíbulas.....47
Figura 3.3. Cuarteo.....48
Figura 3.4. Molino de discos.....48
Figura 3.5. Molino de bolas.....49
Figura 3.6. Tamaño de partícula de muestreo.....49
Figura 3.7. Mezclador mecánico.....52
Figura 3.8. Preparación de moldes.....53
Figura 3.9. Elaboración de la mezcla con agua 54
Figura 3.10. Llenado de primera capa de mezcla.....55
Figura 3.11. Orden de apisonamiento de especímenes 55
Figura 3.12. Llenado de segunda capa de mezcla.....56
Figura 3.13. Tolerancia permisible en los ensayos 57
Figura 3.14. Probeta deformada en ensayo de ruptura 58
Figura 4.1. Curvas esfuerzo deformación promedio con 22.5% de Zeolita al 4 día de curado 66
Figura 4.2. Curvas esfuerzo deformación promedio con 22.5% de Zeolita a 11 días de curado.....67
Figura 4.3. Curvas esfuerzo deformación promedio con 22.5% de Zeolita a 18 días de curado.....67
Figura 4.4. Curvas esfuerzo deformación promedio con 22.5% de Zeolita a 25 días de curado.....68
Figura 4.5. Curvas esfuerzo deformación promedio con 20 % de Zeolita a 7 días de curado.....68
Figura 4.6. Curvas esfuerzo deformación promedio con 20% de Zeolita a 14 días de curado.....69
Figura 4.7. Curvas esfuerzo deformación promedio con 20% de Zeolita a 21 días de curado.....69
Figura 4.8. Curvas esfuerzo deformación promedio con 20% de Zeolita a 28 días de curado.....70
Figura 4.9. Curvas esfuerzo deformación promedio con 22.5% de Zeolita a diferentes días de curado.....70
Figura 4.10. Curvas esfuerzo deformación promedio con 20% de Zeolita a diferentes días de curado.....71
Figura 4.11. Ventana Estadística del Método de Dunnett.....77
Figura 4.12. Cuadro de Análisis de Dunnett.....77

Figura 4.13. Valores de medias estándar para Esfuerzos mediante el Análisis de Dunnett.....78
Figura 4.14. Gráfico de Intervalos de Confianza para los Diferentes Días de curado.....79
Figura 4.15. Cuadro Demostrativo del nivel de confiabilidad del Experimento.....80
Figura 4.16. Curvas esfuerzo deformación promedio para diferentes porcentajes de Zeolita y 7 días de curado.....81
Figura 4.17. Curvas esfuerzo deformación promedio para diferentes porcentajes de Zeolita y 14 días de curado.....81
Figura 4.18. Curvas esfuerzo deformación para diferentes porcentajes de Zeolita y 21 días de curado.....82
Figura 4.19. Curvas esfuerzo deformación para diferentes porcentajes de Zeolita y 28 días de curado.....82
Figura 4.20. Curvas de Comparaciones Múltiples de esfuerzos de ruptura para 7 días de curado.....86
Figura 4.21. Curvas de Comparaciones Múltiples de esfuerzos de ruptura para 14 días de curado.....86
Figura 4.22. Curvas de Comparaciones Múltiples de esfuerzos de ruptura para 21 días de curado.....87
Figura 4.23. Curvas de Comparaciones Múltiples de esfuerzos de ruptura para 28 días de curado.....88
Figura 4.24. Graficas demostrativas del rango de confianza para los diferentes días de curado.....91
Figura 4.25. Graficas demostrativas del rango de confianza para los diferentes porcentajes de Zeolita.....92
Figura 4.26. Diagrama de Caja de los esfuerzos de compresión....93
Figura 4.27. Datos estadísticos de significancia en el análisis de Dunnett.....94
Figura 4.28. Gráficos de intervalos de confianza para los diferentes porcentajes de zeolita I.....95
Figura 4.29. Curva de Superficie para el comportamiento de la pasta de cemento a diferentes días de curado.....96

ÍNDICE DE TABLAS

Pag.

Tabla 1 Periodo mínimo de Curado 23
Tabla 2 Tabla Anova 32
Tabla 3 Tamaño de Partícula por Tamiz 50
Tabla 4 Porcentajes de Mezcla por unidad de especímenes.....51
Tabla 5 Porcentajes de Mezcla para doce especímenes 52
Tabla 6 Datos de ruptura 22.5% Zeolita 4 día de ruptura 59
Tabla 7 Datos de ruptura 22.5% Zeolita 11 días de ruptura.....60
Tabla 8 Datos de ruptura 22.5% Zeolita 18 días de ruptura 60
Tabla 9 Datos de ruptura 22.5% Zeolita 25 días de ruptura 61
Tabla 10 Datos de ruptura 20% Zeolita 7 día de ruptura 61
Tabla 11 Datos de ruptura 20% Zeolita 14 días de ruptura.....62
Tabla 12 Datos de ruptura 20% Zeolita 21 días de ruptura 62
Tabla 13 Datos de ruptura 20% Zeolita 28 día de ruptura 63
Tabla 14 Valores de esfuerzos Promedios con 20% de zeolita en (7, 14, 21,28) días de curado 64
Tabla 15 Valores de esfuerzos Promedios con 22.5% de zeolita en (4, 11, 18,25) días de curado 64
Tabla 16 Valores de respuestas del material bajo la adición de 22.5% de Zeolita 71
Tabla 17 Valores de respuestas del material bajo la adición de 20% de Zeolita.....72
Tabla 18 Valores de respuestas del material bajo la adición de (5, 10, 15,20, 25) % de Zeolita.....73
Tabla 19 Valores de respuestas del material bajo la adición de (5, 10, 15,20, 25) % de Zeolita.....76
Tabla 20 Esfuerzos Últimos de Ruptura para distintos porcentajes de Zeolita y días de Curado.....80
Tabla 21 Medias Aritméticas de los distintos porcentajes calculadas para el 7 día de curad 84
Tabla 22 Medias Aritméticas de los distintos porcentajes calculadas para 14 días de curado.....85
Tabla 23 Medias Aritméticas de los distintos porcentajes calculadas para 21 días de curado.....85
Tabla 24 Medias Aritméticas de los distintos porcentajes calculadas para 28 días de curado.....86
Tabla 25 Respuestas del Test de Dunnett para cada porcentaje por días de curado.....88
Tabla 26 Variables estadísticas del método de dunnett para diferentes porcentajes y días de curado.....88

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Máquina de Ensayos para Ruptura ……..

INTRODUCCION

El mejoramiento de las propiedades del cemento es un tema que se ha ido desarrollando dadas las difíciles condiciones ambientales que hoy en día reducen la vida útil de los prefabricados de Cemento y encarecen el costo de mantener las construcciones realizadas con los mismos.

Actualmente las investigaciones se están enfocando a determinar las mejoras que se obtienen al combinar el concreto con este tipo de aditivos, ya que el concreto Portland a llegado a ser un el material industrializado de mayor consumo para efectos de construcciones de orden civil; por ende las propiedades mecánicas son de gran importancia; es por ello que se estudia el desarrollo de los aditivos y los efectos que producen estos en las distinta mezclas.

Este trabajo surge como un medio de investigación para poder establecer el comportamiento y cambios en las propiedades de los prefabricados de cemento al contener en su mezcla una cierta cantidad de aditivo, que en este caso será Zeolita Tipo 1, específicamente para este trabajo se le adicionara 20% de Zeolita en porcentaje de masa.

El objeto perseguido es poder modelar y simular el comportamiento de las propiedades mecánicas del Cemento bajo estos parámetros usando herramientas informáticas para determinar las simulaciones

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento de Problemas.

El estudio de las Zeolitas en los últimos años ha despertado noble interés en la comunidad científica, debido a sus diversas aplicaciones especialmente por sus extraordinarias propiedades como Adsorción, Intercambio Iónico, hidratación, reactividad biológica, y su resistencia mecánica. Este estudio se enfoca en aprovechar todas estas propiedades de las zeolitas para que combinadas con cemento PORTLAND TIPO I producir prefabricados de cemento con altas propiedades mecánicas y mucho mayor rendimiento.

El mejoramiento de las propiedades del cemento es un tema que se ha ido desarrollando dadas las difíciles condiciones ambientales que hoy en día reducen la vida útil de este tipo de estructuras y encarecen el costo de mantener las mismas. Actualmente las

investigaciones se están enfocando a determinar las mejoras que se obtienen al combinar el concreto con este tipo de aditivos, ya que el concreto Portland a llegado a ser un el material industrializado de mayor consumo para efectos de construcciones de orden civil; por ende las propiedades mecánicas son de gran importancia; es por ello que se estudia el desarrollo de los aditivos y los efectos que producen estos en las distinta mezclas.

Para efectos de determinar las distintas propiedades que se pueden mejorar con la agregación de aditivos como la Zeolita en este caso habrá que realizar probetas o muestras con diferentes porcentajes de Zeolita tomando como base o referencia probetas sin aditivos y así poder comparar estas muestras, La experimentación será el punto base para definir este comportamiento y determinar las características que nos indiquen cual será el punto optimo para mejorar las propiedades.

Otro de las características relevantes de las Zeolitas es su bajo costo en comparación con otros tipos de Zeolita lo que hará que se pueda competir a nivel nacional con un producto de menor costo e igual propiedades, fomentando el desarrollo o crecimiento como campo tanto investigativo y económico. Este análisis que se realizara

pretende aportar con una fuente de investigación y comprobación de lo antes mencionado, para así aportar evidencia real y confiable de la mejora que se puede obtener, de añadir Zeolita Tipo I al cemento portland para obtener mejor propiedades mecánicas en los prefabricados de Cemento.

Los ensayos experimentales se realizaran en base a revisiones bibliográficas y material de estudio existente. Además nos basaremos en normas Especificas para hacer de los resultados los más acertados posibles; los valores que se mantendrán constantes a lo largo del experimento como la relación agua- cemento y la granulometría del material usado esto lo estableceremos así para reducir en lo mas posible variaciones en el resultado.

1.1.1. Justificación

Actualmente, la investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales ha traspasado las fronteras de los países Industrializados, alcanzando países en vías de desarrollo como el nuestro, y además proyectándose a ser un puntal para su desarrollo. Encuadrados en esta realidad el mejoramiento constituye un reto dentro del marco de la competitividad global,

En el marco de las acciones investigativas este trabajo constituye un gran avance debido a la influencia en, los ámbitos del progreso urbanístico y del bienestar común, por ello la investigación propuesta se justifica plenamente si se considera que los resultados, encontrados a lo largo del experimento, aumentan la dureza del cemento.

Para este estudio se usaran recursos propios de la provincia los cuales se posee muestras en el Laboratorio de Materiales de la FIMCP, con los resultados que se obtengan en esta investigación, contribuiremos al conocimiento del comportamiento de un x% Zeolita Tipo 1 y un curado al aire en la dureza del cemento.

De acuerdo a los resultados de esta investigación, una vez finalizada y determinados las variables en cuestión se puede extender el campo de estudio hacia otros tipos de puzolanas u aditivos y así comprobar si se pueden mejorar mucho más las propiedades de los prefabricados de cemento. Los ensayos experimentales impulsados por la inclusión de una metodología científico técnica nos proporcionara herramientas técnico-informáticas; las mismas que nos permitirán predecir

los comportamiento de las distintas probetas con adición de aditivos; con esta modelación obtendremos modelos matemáticos que nos pueden facilitar la comprensión de los resultados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo I curado al ambiente cuando se le adiciona 20% de Zeolita Tipo 1, a través de la simulación matemática de la relación esfuerzo deformación y datos experimentales.

1.2.2. Objetivos Específicos.

- Identificar la resistencia a la compresión del Cemento Tipo I para establecer como variará ésta propiedad con la adición de un x% porcentaje de zeolita y un curado al ambiente en la pasta de cemento.

- Implementar la metodología experimental establecida en la Norma ASTM C109 a excepción de la inclusión de agregado fino.
- Implementar un algoritmo en MATLAB que mediante el ingreso del módulo de Young y del esfuerzo de fluencia obtenidos experimentalmente, nos permita aproximar la gráfica esfuerzo vs deformación, para posteriormente proceder a determinar el error entre los resultados teóricos y los experimentales de la resistencia a la compresión.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente de los diferentes porcentajes de zeolita incluido el control, haciendo uso del software "ESTADISTICA" para determinar cuál es el tratamiento que presenta la mayor resistencia a la compresión.

1.3. Metodología.

La metodología para realizar el presente tópico es la siguiente:

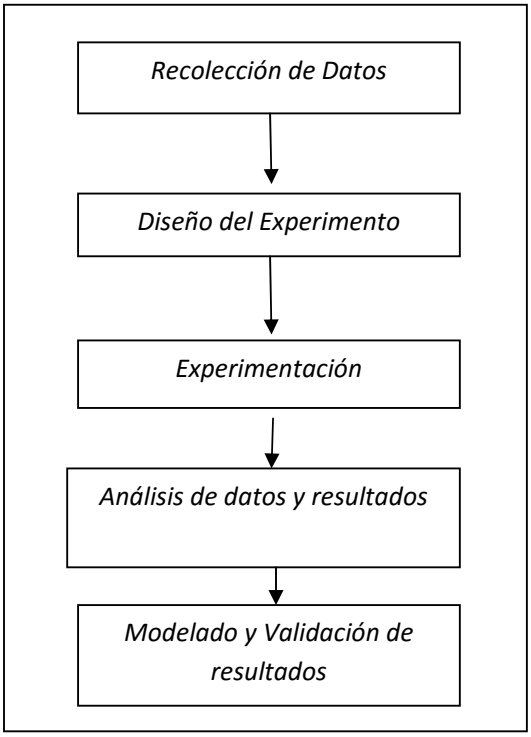


FIGURA. 1.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

- Recolección de Datos
- Diseño del experimento
- Experimentación
- Análisis de datos y resultados
- Modelado y Validación de resultados

La recolección de datos para la identificación de las propiedades del Cemento Tipo 1 bajo la adición de zeolita tipo 1, en especial la

capacidad para soportar fuerzas de compresión, son valores que nos permitirán al final de la investigación cuantificar como afecta la inclusión de Zeolita Tipo 1 y un curado al aire a la dureza del cemento. Estos serán tomados en base a la experimentación realizada bajo la norma ASTM C-119

El diseño del experimento se efectuara en dos partes, la primera que consiste en la experimentación experimental , y la segunda corresponde a la elaboración de un software que nos permita aproximarnos a los datos experimentales para poder establecer los correctores plásticos que son propios y característicos del material.

La experimentación se la desarrollara para un porcentaje de adición de Zeolita de 20% y un porcentaje de 22.5% en probetas de 51x51x51 mm3, para cada uno de estos porcentajes, efectuado esto, se realizara 1 ensayo de Dureza a cada una de estas probetas los días 3 ,7 ,14 ,28 de la investigación para el caso de la adición de 20% y de 4, 11, 18,25 días para la adición de 22.5%. De esta forma se asegura que las mediciones se realizaran en valores equidistantes, tanto para él un caso como para el otro.

Para el análisis de datos y resultados experimentales, emplearemos el software de Inelasticidad aplicado mediante Matlab, con la ayuda del cual se obtiene los datos de los correctores plásticos

característicos del material. Mientras que para determinar el cambio de las propiedades bajo los distintos porcentajes de zeolita proporcionados por los otros estudios se aplica STATISTICA , para mediante un modelo de contraste comparar todos los resultados y determinar cuál de ellos es el más optimo de acuerdo a los días de curado y a los porcentajes de adición de Zeolita tipo .

1.4. Estructura de la Tesis.

El capitulo 1 se llama Generalidades, este explicara los diferentes subtemas tales como el Planteamiento del Problema, La Justificación, Los Objetivos tanto Generales como Específicos. El planteamiento del problema es el punto de partida para explicar la importancia de esta investigación. Aquí podremos apreciar el problema que tenemos y que deseamos responder, la Justificación detalla la importancia que tiene el desarrollo de este trabajo, cual es el motivo que hace que sea importante investigar este campo, los objetivos tanto específicos como generales también se incluyen en este capitulo, además se explica en la sección de Metodología la forma en que se va a llevar esta investigación.

El Capitulo 2 se llama Marco Teórico. Esta sección procura ampliar el horizonte técnico para realizar conclusiones con una buena referencia. Cada sección de esta parte ayudara a interpretar los resultados de una manera mas clara. Aquí se incluye hasta el principio de funcionamiento del software a utilizar en esta investigación.

El capitulo 3 se llama Análisis Estadístico. En esta sección se explicara el diseño del experimento y la experimentación,

sustentando cada punto, de modo que se pueda en cualquier momento saber que datos se obtuvieron y con que secuencia y procedimientos para cada día de recolección de datos.

El capitulo 4 se llama Comparación de cambio de Propiedades, como su nombre lo indica, en esta sección, se explicara de forma detallada como las propiedades mecánicas tales como la resistencia a la Compresión, varían con respecto a los diferentes porcentajes de zeolita agregados.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Tipos de Cementos

Antes de entrar a conocer los tipos de cementos que hay, se va a dar un concepto básico de lo que es cemento y como esta compuesto. Cemento es una sustancia en polvo compuesta de silicato de aluminio y calcio, que mezclada con agua forma una argamasa que se seca muy rápidamente [1]. Los cementos son conglomerantes hidráulicos, es decir son productos que al mezclarse con agua forman pastas que fraguan y endurecen, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto en el aire, como bajo agua.

Podemos encontrar diferentes tipos de cementos pero los básicos son los obtenidos de origen arcilloso y de origen puzolánico. Por lo general la extracción de los minerales para la fabricación del cemento se los hace en canteras que están cerca de las fábricas. De los cementos mas utilizados esta el cemento Portland, el cemento

blanco, cementos de mezclas, cemento puzolánico, cemento siderúrgico, entre otros.

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos [2].

1) de origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente;
2) de origen puzolánico: la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Existen algunos tipos diferentes de cemento, por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos.

2.1.1. Cemento Pórtland

El cemento de Pórtland, es el cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto, es un cemento hidráulico producido al pulverizar clinker, que es obtenido de un horno especial y una o más formas de sulfato de calcio como adición de molienda.

2.1.1.1. Cemento Portland Férrico

El Pórtland férrico está caracterizado por un módulo de fundentes de 0.64. Esto significa que este cemento es muy rico en hierro [2]. Es decir se obtiene introduciendo cenizas de pirita o minerales de hierro en polvo. Este tipo de composición tiene una mayor presencia de Fe_2O_3 y una menor presencia de $3CaOAl_2O_3$ cuya hidratación es la que desarrolla más calor. Por este motivo estos cementos son particularmente apropiados para ser utilizados en climas cálidos

2.1.1.2. Cemento Blancos

Contrariamente a los cementos férricos, estos tienen un módulo de fundentes muy alto, aproximadamente 10. Estos contienen por lo tanto un porcentaje bajísimo de Fe_2O_3. El color blanco es debido a la falta del hierro que le da una tonalidad grisácea al Portland normal y un gris más obscuro al cemento férrico. La reducción del Fe_2O_3 es compensada con el agregado de fluorita (CaF_2) y de criolita (Na_3AlF_6), necesarios en la fase de fabricación en el horno, para bajar la calidad del tipo de cemento, que hoy en día hay 4: que son tipo I 52,5, tipo II 52,5, tipo II

42,5 y tipo II 32,5; se le suele añadir una adición extra de caliza que se le llama clinkerita para rebajar el tipo, ya que normalmente el clinker molido con yeso sería tipo I.

2.1.1.3. Norma ASTM

Los cementos deben ajustarse a las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), para el cemento Pórtland es que es el que se va a utilizar la norma requerida es la ASTM C 150.[2]

La norma ASTM C 150 especifica cinco tipos de cemento:

1) El Tipo I, el más fácil de conseguir, se usa cuando no se requieren las propiedades especiales de los demás tipos.
2) El Tipo II se destina a uso general, pero en particular cuando se requiere resistencia moderada a los sulfatos o calor moderado de hidratación. Algunos cementos reúnen los requisitos correspondientes a ambos tipos y se denominan TipoI/II.

3) El cemento Tipo III se usa para obtener alta resistencia temprana.
4) El Tipo IV se usa cuando se requiere bajo calor de hidratación.
5) El Tipo V se usa para obtener alta resistencia a los sulfatos.

2.1.2. Cementos de Mezcla

Los cementos de mezclas se obtienen agregando al cemento Portland normal otros componentes como la puzolana. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características que lo diferencian del Portland normal. Entre estos cementos están el puzolánico y el siderúrgico

2.1.2.1. Cemento Puzolánico.

Se denomina puzolana a una fina ceniza volcánica. La puzolana es una piedra de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa. Un cemento puzolánico contiene aproximadamente: 55-70% de clinker Portland, 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.

2.2. Zeolita

Las zeolitas son aluminosilicatos con cavidades de dimensiones moleculares de 3 a 10 angstrom[3]. Contienen iones grandes y moléculas de agua con libertad de movimiento, para así poder permitir el intercambio iónico. Existen varios tipos de zeolita, nueve principales, y que surgen en las rocas sedimentarias, la analcima, chabazita, la clinoptilonita, la erionita, la ferrierita, la huelandita, la laumontita, la modernita, y la filipsita. La analcima y la clinoptolonita son las más abundantes[3]. Las 9 zeolitas muestran un considerable rango de contenido de cationes y radio de Si:Al. Excepto por la huelandista y la laumontita, estos generalmente son alcalinos y más siliciosos que sus contrapartes en rocas ígneas.

2.2.1. Propiedades Físicas.

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

a) Primero una descripción mineralógica de la zeolita desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, hábitos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión.
b) El segundo desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de, color, viscosidad de Broockfield, viscosidad de Hércules, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste [3].

2.2.2. Propiedades Químicas

Las aplicaciones de las zeolitas naturales hacen uso de uno o más de sus propiedades químicas, que generalmente incluye el intercambio de iones, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas propiedades están en función de la estructura del cristal de cada especie, y su estructura y composición catiónica [3].

2.3. Curado del Cemento

El curado es el mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el concreto a edades tempranas, de manera que este pueda desarrollar las propiedades para las cuales fue diseñada la mezcla [4].

Sin humedad necesaria, los materiales cementantes en el concreto, no pueden reaccionar para formar un producto de calidad. El secado puede eliminar el agua necesaria para esta reacción química denominada hidratación y por lo cual el concreto no alcanzara sus propiedades potenciales.

Para el concreto expuesto, la humedad relativa y las condiciones del viento son también importantes, ellas contribuyen al ritmo de perdida de humedad en el concreto y pueden dar como resultado agrietamiento, una pobre calidad y durabilidad superficial.

Tanto en terreno como en laboratorio se ha comprobado que un curado deficiente disminuye la resistencia y la durabilidad del hormigón. 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 [4]. 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.

El efecto sobre la durabilidad del hormigón es más difícil de cuantificar, pero no menos importante. 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 la durabilidad, 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.

A continuación se muestra un cuadro de ejemplo del periodo mínimo de curado para alcanzar un 50% de resistencia especificada

TABLA 1 PERIODO MINIMO DE CURADO
Fuente: *Research Department Bulletin 25, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1948*

Cemento Tipo I	Cemento Tipo II	Cemento Tipo III
Temperatura 50ºF-(10ºC)		
6 días	9 días	3 días
Temperatura 70ºF-(21ºC)		
4 días	6 días	3días

Los sistemas de curado se pueden dividir en tres grupos, curado con agua, curado con materiales sellantes y curado por aplicación artificial.

2.3.1. 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 [4]. 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. Se deben evitar los choques térmicos o fuertes gradientes de temperatura por el empleo de agua fría sobre el hormigón. A continuación se van a mostrar los diferentes tipos de curado con agua:

a) **Inundación o inmersión**. Aunque cada vez es 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 [1]. Es importante evitar la pérdida prematura o súbita del agua.

b) **Nebulización o rocío.** En general, la nebulización es un buen método de curado cuando la temperatura ambiente es superior a unos 10°C. Los regadores de jardín son muy efectivos cuando no hay que preocuparse por el costo del agua. El rociado debe ser continuo y debe evitarse la intermitencia

c) **Cubiertas de material absorbente.** Sacos, arpilleras, mantas de algodón, alfombras y otras cubiertas absorbentes también resultan útiles en la retención del agua superficial del hormigón. Estos materiales deben estar libres de sustancias que dañen y decoloren el hormigón, como azúcar o fertilizantes. Debe considerarse que mientras más pesado el saco, más agua retendrá y será necesario mojarlo con menor frecuencia

2.3.2. Materiales utilizados en el Curado para retener la Humedad

Hay diferentes tipos de materiales que se utilizan en el curado de cemento, los cuales se los detalla a continuación:

a) Los compuestos curadores de menbrana deben estar conformes con la ASTM C 305 [21]. Se aplican a la superficie del concreto alrededor de una hora despues del acabado. No se aplica al concreto que aun esta exudando o

que tiene un brillo visible de agua sobre la superficie. Si el concreto sera pintado o cubierto con enchapado de vinilo o ceramica, entonces debera ser utilizado un compuestos liquido que no sea reactivo con la pintura o los adhesivos, o utilice un compuesto que se pueda sacar con cepillo o lavado. En los pisos, la superficie debe ser protegida del trafico con papel a prueba de rasguños despues de la aplicación del compuestos de curado[4].

FIGURA. 2.1 LOSAS CUBIERTAS CON LAMINAS PLASTICAS

Fuente: *A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete, Research Department Bulletin 25, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1948*

b) Laminas plasticas, ya sean claras, blancas (reflectivas) o pigmentadas. Los plasticos deben estar conformes a la ASTM C171, tener como minimo 4 milesimas de pulgada(0.1 mm) de espesor y preferiblemente estar reforzadas con fibras de vidrio.

c) El papel impermeable es utilizado como las laminas plasticas, pero no mancha la superficie. Este papel consiste generalmente en dos capas de papel kraft cementadas juntas y reforzadas con fibras. El papel debera estar conforme a la ASTM C171.

2.4. Diseño Lineal

Un modelo estadístico es una expresión simbólica en forma de igualdad o ecuación que se emplea en todos los diseños experimentales y en la regresión para indicar los diferentes factores que modifican la variable de respuesta [5].

Vamos a dar unos conceptos básicos de modelos estadísticos:

a) 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.
b) Unidad Experimental.- es unidad más pequeña del material de estudio que comparte un tratamiento común.
c) Los Tratamientos.- Son el conjunto de circunstancias creadas para el experimento, en respuesta a la hipótesis de investigación.
d) Factor.- Es un grupo específico de tratamientos, las diversas categorías de un factor se denominan niveles del factor.

e) 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.

f) Error Experimental es la diferencia en las respuestas entre unidades experimentales, atribuibles sólo al error experimental.

g) Análisis de Varianza.- considera el problema de decidir si las diferencias observadas entre más de dos medias muéstrales se puede atribuir al azar o si hay diferencias reales entre las medias de las poblaciones muestreadas

h) Hipótesis Estadística.- es una afirmación o conjetura acerca de la distribución de una o más variables aleatorias.

i) Diseño Completamente Aleatorizado.- cuando todas las variaciones causadas por factores ajenos no controlados pueden incluirse así bajo el encabezado de variación fortuita

2.4.1. Modelos Estadísticos lineales

Es conocido como análisis de varianza en un sentido, es el análisis de varianza de un factor de tal manera que una sola variable independiente está representada por más de dos tratamientos. En este modelo la variable de respuesta de interés se expresa como:

$$\mathbf{Y_{ij} = u +} \alpha_i + e_{ij}$$

$u_{ij} = u + \alpha_i$

i = 1,2,…t j = 1,2,…r

Donde u es la gran media, α_i son los efectos del tratamiento y e_{ij} son los valores de rt variables aleatorias, independientes que tienen distribuciones normales con medias cero y varianza común σ^2 . En estadística la regresión lineal o ajuste lineal es un método matemático que modeliza la relación entre una variable dependiente *Y*, las variables independientes X_i y un término aleatorio ε [24]. Este modelo puede ser expresado como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

donde β_0 es la intersección o término "constante", las β_i son los parámetros respectivos a cada variable independiente, y p es el número de parámetros independientes a tener en cuenta en la regresión [5]. La regresión lineal puede ser contrastada con la lineal. El modelo lineal relaciona la variable dependiente *Y* con *K* variables explicativas X_k *(k = 1,...K)*, o cualquier transformación de éstas, que generan un hiperplano de parámetros β_k desconocidos:

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

donde εes la perturbación aleatoria que recoge todos aquellos factoresde la realidad no controlables u observables y que por tanto se asocian con el azar, y es la que confiere al modelo su carácter estocástico. En el caso más sencillo de dos variables explicativas, el hiperplano es una recta:

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

2.4.1.1. Modelo Completo

Establece la condición de la hipótesis alterna cuando solo existen algunas diferencias entre las medias de los tratamientos.

H_a : $\alpha_i \neq 0$ para al menos un valor de i

2.4.1.2. Modelo alterno

El modelo establece la condición de la hipótesis nula donde todas las observaciones pertenecen a la misma población con media u.

H_0 : $\alpha_i = 0$ para i = 1, 2,…,t

La característica principal de este modelo es que permite al observador realizar un análisis en relación a las

diferencias observadas considerando todos los tratamientos en un solo cálculo [5].

El procedimiento para aplicar este modelo es el siguiente:

1. Estimación de los parámetros del modelo con mínimos cuadrados. Este es el método que mas se usa para estimar los parámetros, propiamente las medias de los tratamientos. Para el modelo completo se una el siguiente estimador:

$$\hat{\mu}_i = \frac{y_i}{r} = \bar{y}_i \qquad i = 1, 2, \ldots, t$$

Para el modelo reducido se usa el siguiente estimador:

$$\hat{\mu} = \bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N}$$

2. Suma de cuadrados para identificar fuentes de variación importantes; corresponde a la suma del

cuadrado del error, para el modelo completo se define como:

$$SCE = \sum_{i=1}^{t}\sum_{j=1}^{r}(y_{ij} - \hat{\mu}_i)^2 = \sum_{i=1}^{t}\sum_{j=1}^{r}(y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

Para el modelo reducido la suma de los cuadrados para el error experimental.

3. Grados de libertad; para el modelo reducido se define como numero total de casos menos uno (N - 1) y para el modelo completo como (N – t).
4. Resumen en la tabla de análisis de varianza; consiste en construir una tabla semejante a la que se muestra en la Tabla 2

TABLA 2 TABLA ANOVA
Fuente: *ASTM Standarts (2002).C-1437*

Fuente de variación	**Grados de Libertad**	**Suma de cuadrados**	**Cuadrados Medios**
Tratamientos	t - 1	SC tratamiento	CMT = SCT / t-1
Error	N - t	SC Error	CME = SCE / N - t
Total	N - 1	SC Total	

5. Pruebas de hipótesis sobre modelos lineales; en este punto se aplica un conjunto explicito de reglas para decidir si aceptamos la hipótesis nula o la rechazamos a favor de la hipótesis alternativa.
6. Determinar un modelo estadístico que se ajuste a los datos del experimento; en base al análisis se

determina si el modelo completo o alterno es el que mejor caracteriza los datos del experimento.

Las ventajas de este método es que permite al investigador decidir si tiene sentido realizar análisis adicionales comparando tratamientos específicos.

Las desventajas 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.

2.5. Diseño Factorial

Un diseño factorial es un diseño experimental completo en el que se utilizan todas las combinaciones posibles de los valores seleccionados de las variables independientes. La anterior definición establece que 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 [5]. Una realización de un experimento esta conformada por a1*a2*….*ar*…..*ap 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.

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.

Los diseños factoriales tienen las ventajas de:

1. Analizan la interacción entre las variables
2. Analiza simultáneamente dos o más variables independientes en un solo experimento.
3. Permite una mejor comprobación de hipótesis.

Además de las siguientes desventajas:

3. Permite una mejor comprobación de hipótesis.

Además de las siguientes desventajas:

1. Incremento en el número de unidades experimentales necesarias para llevar a cabo una realización completa de un diseño factorial.
2. 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 (la variabilidad se puede incrementar).

2.5.1. Clasificación del Diseño Factorial

a) Según la cantidad de niveles o valores por factor, se clasifica en: Cantidad de valores constante y se lo representa por 2^2, el de tres factores por 2^3, etc. Y cantidad de valores variables el cual se lo representa por 2x2, 2 x 3, 2 x 3 x 4.

b) Según la cantidad de combinaciones: se clasifican en diseño factorial completo en el cual se hacen todas las combinaciones necesarias entre los valores de la variables. Y diseño factorial incompleto.

c) Según en función del control de variables extrañas. Diseño factorial completamente al azar, Diseño factorial de bloques aleatorizados, Diseño factorial de Cuadrado Grado de control Latino, Diseño factorial jerárquico o anidado, Diseño factorial de medidas repetidas.

Un modelo estructural factorial 2x2 viene representado de la siguiente $Y_{ijk} = \mu + \alpha_j + \beta_k + (\alpha\beta)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$

De donde

Y_{ijk} = la puntuación del *i* sujeto bajo la combinación del *j* valor del factor A y el *k* valor del factor B.

μ = la media común a todos los datos del experimento.

α_j = el efecto o impacto de *j* nivel de la variable de tratamiento A.

$ß_k$ = efecto del *k* valor de la variable de tratamiento B.

$(\alpha ß)_{jk}$ = efecto de la interacción entre el *i* valor de A y el *k* valor de B.

ε_{ij} = error experimental o efecto aleatorio de muestreo.

2.6. Estado del Arte

Durante los últimos años se han presentado numerosos trabajos que han intentado clarificar algunos de los aspectos relacionados con los fenómenos que se producen en el hormigón y que afectan su comportamiento mecánico [6-12]. En ellos se plantean los fundamentos básicos de los modelos matemáticos que permiten representar los fenómenos termo-químico-mecánicos que se producen en el hormigón.

En la actualidad ha permitido conocer satisfactoriamente las propiedades físicas y mecánicas del hormigón endurecido [16]. Sin embargo, las propiedades del hormigón durante el proceso de fraguado no son conocidas con la misma profundidad. Determinados Centros de Estudio han venido realizando invstigaciones y experimentaciones de este tipo asi por ejemplo el Comité 42-CEA del RILEM [17] realizó el primer esfuerzo de compilación y organización del conocimiento existente sobre el tema en cuestión. Durante las últimas décadas se han propuesto modelos de envejecimiento en los que las propiedades mecánicas del hormigón joven se expresan en función del grado de avance de la reacción de hidratación [13,14,15].

El comportamiento mecánico del hormigón, es complejo y altamente no lineal, incluso para niveles moderados de tensión. La Teoría del Daño Continuo fue presentada por primera vez por [18] en el contexto de problemas relacionados con la fluencia, pero ha sido aceptada con posterioridad como una alternativa válida y prometedora para formular comportamientos materiales complejos.

Existe cierto consenso dentro de la comunidad científica en que la causa principal de las deformaciones de fluencia del hormigón es el deslizamiento entre capas de hidratos. Resulta evidente que el proceso de envejecimiento influye en el proceso de deslizamiento entre geles. Sin embargo, no es del todo evidente inferir cómo influye el grado y cambio de humedad de la pasta en dicho proceso. En un primer intento presentado por Bazant et al. [18] se relaciona el deslizamiento entre las paredes de los microporos con la evolución de una micro-tensión. En un reciente trabajo presentado se presenta una reformulación de un modelo de viscoelasticidad clásica para tener en cuenta los fenómenos de fluencia a corto, medio y largo plazo, incluyendo el fenómeno de envejecimiento asociado al proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

3.1. Recolección de Datos.

Una vez tomadas las muestras de Zeolita tipo 1 Los datos para el análisis de nuestra investigación serán recolectados una vez hechas las probetas de cemento. La mezcla para las probetas consistirá de una parte de cemento. y 20% de Zeolita tipo 1 en porcentaje de masa, de acuerdo a lo establecido en por el Standard Test “Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in(C 109/C 109M-02)” [19]. La pasta se realizara de acuerdo a los estatutos especificados en la Norma C305,C1437, este a su vez consistirá en un cubo de 51x51x51mm3,Se realizaran tres replicas por cada Batch de mortero. Una vez realizados los morteros se los analizara para cada uno de los respectivos periodos establecidos en el Test. Similar a esto también se realizaron probetas de 22.5% de

zeolita .La relación agua/cemento para la mezcla fue de 0.3, cada compuesto fue analizado para realizar los ensayos mecánicos a 3, 7, 14,28 días y a 4, 11, 18,25 días respectivamente para cada uno de los porcentajes .Esto sirve para estudiar la afectación que la adición de la puzolana tiene hacia la resistencia a la compresión por cada tiempo de ensayo.

Los datos del esfuerzo a la compresión, fueron obtenidos calculando la máxima carga indicada por el test y la fuerza de compresión aplicada, para ello, mediante la ecuación

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

donde fm=fuerza de compresión en[Psi.]

P=máxima fuerza aplicada [lb-f]

A=area de la superficie [in2]

3.2. Diseño del Experimento

La planificación del experimento incluye el desarrollo de un plan que contiene pruebas de hipótesis específicas .Tendremos que buscar diferencias interesantes e inesperadas que puedan influenciar la interpretación del estudio o servir de base para un nuevo experimento

En nuestro estudio el diseño no es completamente aleatorizado debido a que los tiempos de curado de las probetas, son secuenciales, lo que hace que para este experimento los factores que modifican la variable de respuesta en el diseño experimental. Una vez obtenidos las medias de las probetas estos serán ingresados en el algoritmo desarrollado para obtener los resultados que serán valores característicos del material. En este diseño la relación de los ensayos mecánicos obtenidos mediante el Test $f_m = \frac{P}{A}$ serán generados mediante la aplicación de la Teoría de Inelasticidad, la cual será analizada mediante mecánica del continuo. Para esto se construyo un vector residual el cual lo integramos a una subrutina material que viene dentro de un código de elementos finitos. La relación con Mecánica del Continuo es que la componente direccional de este orden sea

$$\sigma = \not\subset^{ex} : \varepsilon$$

y este cuerpo o probeta debe estar en equilibrio. La teoría de Mecánica del Continuo es la que nos va a permitir desarrollar relaciones unidimensionales llevadas a tres dimensiones mediante un lenguaje tensorial más las condiciones de borde. Podríamos resolver esto, no obstante como nuestro ensayo no es lineal, se hace necesario desarrollar una ecuación plausible iterando computacionalmente de tal manera que tengamos una herramienta para hallar una solución al problema no lineal.

Como la deformación se define como el gradiente simétrico del desplazamiento, y teniendo además en cuenta que todo tensor tiene una parte simétrica y una parte antisimetrica

$$\varepsilon = \nabla^{s} \underline{\mu}$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{d\mu}{dx} + \left(\frac{d\mu}{dx}\right)^{+}\right)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{d\mu i}{dxj} + \frac{d\mu j}{dxi}\right)$$

Entonces la definición que usaremos para estas relaciones es de la forma:

$$\sigma_{ij} = \not{C}_{ijkl}^{ex} : \varepsilon_{kl}$$

La nolinealidad la desarrollaremos con el Método de Newton Rapson , ya que este método constituye un esquema iterativo que nos permite desarrollar un esquema no lineal en tres dimensiones definiendo un residual que siempre está regido por una relación dada por:

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

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

Con este método haremos una expansión de la Serie de Taylor donde

$$r(\mu_{k+1}) = r(\mu_r) + \frac{dr}{d\mu}]_{\mu=\mu_k}(\mu_{r+1} - \mu_r) + \frac{1}{2}\frac{d^2r}{d\mu^2}]_{\mu=\mu r} + \ldots\ldots\ldots\ldots$$

lo que nos asegurara que estamos convergiendo a la respuesta, lo que es la base fundamental de Newton Rapson.

La nolinealidad como ya explicamos viene de la respuesta del material en este caso la respuesta del material bajo la influencia del aditivo (Zeolita tipo 1 al 20%).

En casos como este la nolinealidad no equivale a inelasticidad, por ello existen dos formatos específicos para este tipo de análisis tales como:

Deformation Driven y Load Force Driven [24]. En este caso no tenemos una relación 1-1 entre F vs δ, lo más acertado que podemos usar es el método de Deformation Driven, debido a las condiciones que presentan los materiales como el cemento, con todos estos principios en conjunto se desarrollo el algoritmo mostrado en el Apéndice A, que se describe a continuación.

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

clc;
clear all;
E= ingresar valor experimental
m=valores de caracteristicas del material;
a=valores de características 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; %DEFORMACION PLASTICA%


    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*sigma
y(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')
```

3.3. Experimentación

La experimentación se llevo a cabo en tres secciones o procesos, basándose en la Norma C-109 [19]. del código ASTM., para ensayos en probetas de pasta de cemento, entre los tres procesos que fueron necesarios realizar se determino el proceso de molienda, proceso de mezclado y elaboración de probetas y el proceso de ruptura de los especímenes.

PROCESO DE MOLIENDA.

Las muestras de Zeolita en bruto fueron traídas del Sector de Casas Viejas vía a la Costa, debido a su estado, se hizo necesario un proceso de molienda para obtener la zeolita en la composición y tamaño de grano requerido.

FIGURA. [3.1] ZEOLITA EN ESTADO BRUTO

PROCESO DE MEZCLADO Y ELABORACION DE PROBETAS

En el proceso de molienda el objetivo era lograr un tamaño de partícula de 45micras, para ello las muestra de Zeolita en bruto primero fueron reducidas mediante combazos a trozos de 5 cm. Luego de haber reducido las muestras a trozos de cinco centímetros, estas fueron conducidas a un triturador de mandíbulas por un periodo de tiempo de 2min.

FIGURA. [3.2] TRITURADORA DE MANDIBULAS

En la trituradora de mandíbula los fragmentos de roca salieron a un tamaño aproximado de 1cm y fueron cuarteados antes de pasar por el molino de disco donde por un periodo aproximado de 5min.

FIGURA. [3.3] CUARTEO

FIGURA. [3.4] MOLINO DE DISCOS

Una vez salidas la muestra del molino de disco , el último paso para reducir en su totalidad la granulometría de la zeolita a utilizar fue la introducción de las muestras salidas del molino de disco en el molino de bolas durante un periodo de 40 min, para posteriormente volverlo a cuartear e introducir en el molino de bolas nuevamente.

FIGURA. [3.5] MOLINO DE BOLAS

Una vez terminado todo este proceso se peso 100gr de Zeolita y se tamizo 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 [3.6].

FIGURA. [3.6] TAMAÑO DE PARTICULAS DE MUESTREO

Se realizo una segunda pasada del material por el molino de bolas y se volvió a tamizar con tamices de 50, 100, 200, 325 y fondo cuyo

material pasante presenta los siguientes tamaños de grano para cada uno de ellos como se muestra en la tabla [3].

TABLA 3 TAMAÑO DE PARTÍCULA POR TAMIZ

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

Después de esto, se peso por segunda vez la muestra quedada en los tamices hasta obtener 70 gramos del material en el fondo.

COMPOSICION DE LA MEZCLA

Para efectos de convalidar los resultados, se realizo dos mezclas de 250 gramos, con diferentes porcentajes cada una, para este caso particular se realizo una mezcla de 20% y 22.5% de Zeolita respectivamente.

La proporción de los materiales para la primera mezcla fue de 20% de zeolita en porcentaje de masa, lo que corresponde a (50gr.), la cantidad de cemento usado para esta mezcla fue de (200gr.) Se uso una proporción de agua-cemento de 0.3, como se muestra en la tabla [4].

TABLA 4 PORCENTAJES DE MEZCLA POR UNIDAD DE ESPECÍMENES

Nº mezcla	cantidad de especímenes	% de zeolita	gr. Zeolita	% de cemento	gr Cemento	relación agua cemento	cantidad de agua
		(%)	(gr)	(%)	(gr)	(%)	(gr)
1	1	20%	50	80%	200	0%	75
2	1	22.50%	56.25	77.50%	193.75	0.30%	75

De igual manera para la segunda mezcla se tomo 22.5% de zeolita en porcentaje de masa, lo que corresponde a (56.25gr.), la cantidad de cemento usado para esta mezcla fue de (193.75gr.) Se uso al igual que en la mezcla anterior una proporción de agua-cemento de 0.3, como se muestra en la tabla [4].

Para cada una de las mezclas estos valores estimados corresponden para cada uno de los cubitos o probetas, debido a que las pruebas de ruptura para el caso de la mezcla al 20% se harán en periodos de (7, 14, 21,28) días, a razón de tres cubitos por día ,

dando un total de 12 cubitos , la mezcla total al 20% fue de (600gr de Zeolita +2400gr de Cemento), como se muestra en la tabla [5].

TABLA 5 PORCENTAJES DE MEZCLA PARA DOCE ESPECÍMENES

Nº mezcla	cantidad de especímenes	% de zeolita	gr. Zeolita	% de cemento	gr Cemento	relación agua cemento	cantidad de agua
		(%)	(gr)	(%)	(gr)	(%)	(gr)
1	12	20%	600	80%	2400	0%	900
2	12	22,50%	675	77,50%	2325	0,30%	900

De igual manera para la mezcla de 22.5% de zeolita los valores tomados se muestran en la tabla [5], (675 gr Zeolita +2325gr de Cemento).

Una vez constituida la composición de las mezclas, el mezclador usado fue de tipo mecánico; accionado por electricidad, del tipo equipado con remo y tazón de mezclado especificado en **C305.[-]** como se muestra en la figura [3.7], hasta obtener una mezcla completamente homogénea.

FIGURA. [3.7] MEZCLADOR MECANICO

PREPARACION DE LOS MOLDES

Los moldes usados poseen no más de 3 compartimientos cúbicos. El material de los moldes está constituido por un metal duro que no es atacado por la pasta de cemento, y con lados lo suficientemente rígidos para prevenir extensiones u ondula miento [-].

La preparación de los moldes se siguió teniendo en cuenta lo establecido en la norma C-109[--], una vez colocado el molde sobre su placa base se aplico una fina capa de aceite usando una pequeña brocha, luego se removió cuidadosamente con un paño seco el exceso de aceite o grasa de la superficie del molde y de la placa base.

FIGURA. [3.8] PREPARACION DE MOLDES

ELABORACION DE PROBETAS

Una vez lista la mezcla y preparados los moldes se procedió a lo siguiente:

1. Se mezclo el lote completo (600 Zeolita+2400gr de cemento) y el lote de (675 gr Zeolita +2325 gr de cemento) para la mezcla a 20% y la mezcla a 22.5% con los 900 gr de agua, respectivamente , durante 15 s a velocidad media. Hasta completar las pasta de cemento.

FIGURA. [3.9] ELABORACION DE LA MEZCLA CON AGUA

2. Se moldearon los especímenes dentro de un tiempo total no mayor a 2 min 30 s después de haber sido completada la mezcla original del lote. Se coloco la pasta de cemento (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde) en todos

FIGURA. [3.10] LLENADO DE PRIMERA CAPA DE MEZCLA

los compartimentos cúbicos . Y se apisono la mezcla en cada compartimento cúbico 32 veces durante 10 s en 4 rondas, cada ronda fue en ángulos rectos con respecto a la otra y consistió de ocho golpes contiguos sobre la superficie del espécimen, como se muestra en la Fig.[-].

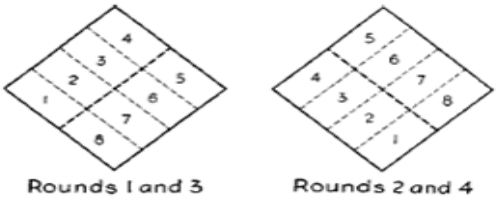


FIGURA [3.11] ORDEN DE APISONAMIENTO DE ESPECIMENES

La presión de apisonado aplicada fue la suficiente para asegurar el correcto llenado del molde. Luego se aplico la segunda capa de la mezcla, llenando los compartimentos y volviendo a repetir el método de apisonado hasta lograr que la mezcla cubriera el borde superior del molde.

FIGURA. [3.12] LLENADO DE SEGUNDA CAPA DE MEZCLA

Luego de este procedimiento los moldes con la mezcla fueron sellados con una película plástica, y se tomo lectura de la humedad relativa y la temperatura del cuarto. Después de 24 horas las probetas fueron desmoldadas para su posterior secado al aire, de igual manera que en el paso anterior se debe tomar lectura de la temperatura y de la humedad relativa, además de registrar las lecturas de las dimensiones de las probetas. Fue de gran importancia numerar las probetas según el porcentaje y los días de curado mediante un código por ejemplo para la proporción de 20% , con un curado de 7 días el código fue G2/20/7, donde G2 es la denominación dada a el grupo Zeolita 1 curado al aire, al cual pertenece esta experimentación

RUPTURA DE LAS PROBETAS

1. Los especímenes de prueba inmediatamente después de su remoción de pasados los (4,11,18,25) y (7,14,21,28) días de secado para el caso de la mezcla al 22.5% de Zeolita y del 20% de Zeolita respectivamente; fueron rotos dentro de la tolerancia permisible prescrita en la norma ASTM C-109 como se muestra :

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	±½ h
3 days	±1 h
7 days	±3 h
28 days	±12 h

FIGURA [3.13] TOLERANCIA PERMISIBLE EN LOS ENSAYOS

Antes de la ruptura se limpio con un trapo cada espécimen hasta tener la superficie del mismo seca, y remover cualquier incrustación de las caras y cerciorándose de de que no hubiesen curvaturas.

2. Se aplico la carga a las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las caras planas del molde. Cuidadosamente el espécimen fue puesto en la máquina de pruebas que se muestran en el Apéndice B, la probeta fue colocada justo debajo del centro del bloque de soporte superior , antes de probar un cubo, se

cercioro de que el bloque esférico estuviese libre de inclinación, luego de esto se aplico la velocidad de variación de la carga a una velocidad de movimiento relativo entre las platinas superiores o inferiores correspondiente a una velocidad de carga de 200 a 400ls/s (900-1800 N/s), cada variación de cinco milésimas de pulgada se tomaron las lecturas de la carga ejercida, hasta alcanzar el límite de ruptura.

FIGURA [3.14] PROBETA DEFORMADA EN ENSAYO DE RUPTURA

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1. Tabulación de Datos y Resultados.

De acuerdo a los ensayos realizados para cada una de las probetas con los distintos porcentajes de adición de Zeolita (20% y 22.5%), para los distintos días de curado respectivamente, se obtuvieron los datos de la carga aplicada a cada uno de ellos para las distintas deformaciones que correspondían a amplitudes de cinco milésimas de pulgada, como se muestra en las tablas a continuación.

TABLA 6 DATOS DE RUPTURA 22.5% ZEOLITA 4 DÍAS DE RUPTURA

G2/20,5/4			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	**Deformación**	**Fuerza(N)**	**Fuerza(N)**	**Fuerza(N)**
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0025	2940	2940	2940
10	0,000254	0,005	6370	8820	8820
15	0,000381	0,0075	11760	17150	16170
20	0,000508	0,01	21070	28420	27440
25	0,000635	0,0125	32830	40670	41160
30	0,000762	0,015	47530	47530	53900
35	0,000889	0,0175	61250	56350	67620
40	0,001016	0,02	79870	74970	84770
45	0,001143	0,0225	98000	88200	98000
50	0,00127	0,025	117600	104370	110250
55	0,001397	0,0275	137200	121520	117600

TABLA 7 DATOS DE RUPTURA 22.5% ZEOLITA 11 DÍAS DE RUPTURA

G2/20,5/11			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0025	6370	6370	7154
10	0,000254	0,005	15680	15190	20580
15	0,000381	0,0075	26950	27244	34790
20	0,000508	0,01	44100	41160	48510
25	0,000635	0,0125	58800	59780	64190
30	0,000762	0,015	75950	81830	82320
35	0,000889	0,0175	92120	99470	98490
40	0,001016	0,02	108290	115150	115150
45	0,001143	0,0225	127400	134750	136220
50	0,00127	0,025	142100	151900	147000
55	0,001397	0,0275	159250	169050	159740

TABLA 8 DATOS DE RUPTURA 22.5% ZEOLITA 18 DÍAS DE RUPTURA

G2/20,5/18			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0025	20588,576	15113,699	26671,233
10	0,000254	0,005	26671,233	56898,631	50675,343
15	0,000381	0,0075	61343,836	98481,097	79569,179
20	0,000508	0,01	109352,06	129360,96	111130,14
25	0,000635	0,0125	162250	162250	146691,78
30	0,000762	0,015	184476,03	185789,04	180030,82

TABLA 9 DATOS DE RUPTURA 22.5% ZEOLITA 25 DÍAS DE RUPTURA

G2/20,5/25			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0025	23811,918	24024,658	25004,658
10	0,000254	0,005	44896,576	59565,754	46230,137
15	0,000381	0,0075	69789,727	96905,48	83104,795
20	0,000508	0,01	93793,836	144469,18	118585,75
25	0,000635	0,0125	125375,34	168917,81	148914,38
30	0,000762	0,015	155582,19	193366,44	179627,4
35	0,000889	0,0175	186295,21	202256,85	198063,78

TABLA 10 DATOS DE RUPTURA 20% ZEOLITA 7 DÍA DE RUPTURA

G2/20/7			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	**Deformación**	**Fuerza(N)**	**Fuerza(N)**	**Fuerza(N)**
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0024902	14700	7350	18130
10	0,000254	0,0049804	28420	18130	31850
15	0,000381	0,0074706	41160	30380	44590
20	0,000508	0,0099608	55370	44100	61250
25	0,000635	0,012451	72520	61250	80850
30	0,000762	0,0149412	88200	78400	100450
35	0,000889	0,0174314	105350	95550	120050
40	0,001016	0,0199216	120050	105350	137200
45	0,001143	0,0224118	132300	120050	149450
50	0,00127	0,024902	137200	132300	166600
55	0,001397	0,0273922		142100	

TABLA 11 DATOS DE RUPTURA 20% ZEOLITA 14 DÍAS DE RUPTURA

G2/20/14			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0025	6370	7840	7350
10	0,000254	0,005	15190	18130	21560
15	0,000381	0,0075	26950	30380	33810
20	0,000508	0,01	41650	47040	48020
25	0,000635	0,0125	57820	65170	65170
30	0,000762	0,015	75950	82320	80850
35	0,000889	0,0175	93100	98000	98000
40	0,001016	0,02	110250	115150	110250
45	0,001143	0,0225	129850	128870	122500
50	0,00127	0,025	144550	141120	134750
55	0,001397	0,0275	163170	151900	139650

TABLA 12 DATOS DE RUPTURA 20% ZEOLITA 21 DÍAS DE RUPTURA

G2/20/21			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0025	11113,014	6223,2877	9779,4521
10	0,000254	0,005	32894,521	14669,178	28449,315
15	0,000381	0,0075	59121,233	26317,671	63121,918
20	0,000508	0,01	85347,946	50251,37	106684,93
25	0,000635	0,0125	121333,56	78094,795	160027,4
30	0,000762	0,015	155582,19	105816,44	206702,06
35	0,000889	0,0175	180030,82	133356,17	217815,07
40	0,001016	0,02	197811,65	148914,38	
45	0,001143	0,0225		162250	

TABLA 13 DATOS DE RUPTURA 20% ZEOLITA 28 DÍA DE RUPTURA

G2/20/28			MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3
Marca	**Delta Longitud(mm)**	Deformación	Fuerza(N)	Fuerza(N)	Fuerza(N)
0	0	0	0	0	0
5	0,000127	0,0025	14254,545	5790,9091	24054,545
10	0,000254	0,005	53454,545	42763,636	72609,091
15	0,000381	0,0075	89981,818	72609,091	104681,82
20	0,000508	0,01	133636,36	122500	155909,09
25	0,000635	0,0125	184863,64	164818,18	187090,91
30	0,000762	0,015	227181,82	204909,09	213818,18
35	0,000889	0,0175		229409,09	224954,55

Los datos del esfuerzo a la compresión, fueron obtenidos calculando la máxima carga indicada por el test y la fuerza de compresión aplicada, mediante la ecuación $f_m = \frac{P}{A}$. Donde:

fm=fuerza de compresión en [Mpa.]

P=máxima fuerza aplicada [N]

A continuación se muestran los valores de deformación promedios para cada día de ruptura, tanto para la adición de 20% de Zeolita como para la adición de 22.5%.

TABLA 14 VALORES DE ESFUERZOS PROMEDIOS CON 20% DE ZEOLITA EN (7, 14, 21,28) DÍAS DE CURADO

Porcentaje			días de curado			
Zeolita 20%			7 días	14 días	21 días	28 días
Marca	**Delta Longitud**	**Deformación**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**
0	0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,0024902	5,149301	2,763039	3,47504212	5,65167243
10	0,254	0,00498039	10,04741	7,033192	9,74151152	21,6362005
15	0,381	0,00747059	14,88273	11,68012	19,0389367	34,2525602
20	0,508	0,00996078	20,59720	17,520184	31,0501408	52,8060303
25	0,635	0,01245098	27,50480	24,113802	46,0663535	68,7905584
30	0,762	0,01494118	34,22401	30,644623	59,9898358	82,7770205
35	0,889	0,01743137	41,1316	37,049852	68,0766448	87,3440285
40	1,016	0,01992157	46,46930	43,015506		
45	1,143	0,02241176	51,49301	48,855568		
50	1,27	0,02490196	55,88876	53,879277		
55	1,397	0,02739216		58,275022		

TABLA 15 VALORES DE ESFUERZOS PROMEDIOS CON 22.5% DE ZEOLITA EN (4, 11, 18,25) DÍAS DE CURADO

Porcentaje			días de curado			
Zeolita 22,5%			4 días	11 días	18 días	25 días
Marca	**Delta Longitud**	**Deformación**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**	**esfuerzo de Compresión (Mpa)**
0	0	0	0	0.0	0	0
5	0,127	0,0024902	1,13033449	2,54953223	7,99352916	9,33502
10	0,254	0,00498039	3,07702166	6,59361784	17,2043069	19,3121
15	0,381	0,00747059	5,77726515	11,403819	30,6797529	32,0133
20	0,508	0,00996078	9,85902858	17,1434064	44,8344422	45,732
25	0,635	0,01245098	14,6943483	23,4230424	60,3859778	56,7996
30	0,762	0,01494118	19,0900936	30,7702166	70,5236314	67,7401
35	0,889	0,01743137	23,7370242	37,1754453		75,1784
40	1,016	0,01992157	30,7074202	43,392285		
45	1,143	0,02241176	36,421889	51,053441		
50	1,27	0,02490196	42,5759323	56,5167243		
55	1,397	0,02739216	48,2276048	62,8161806		
60	1,524	0,02988235	52,3721646			

4.2. Análisis de Resultados.

Los valores de esfuerzos obtenidos nos permitieron graficar mediante matlab o Excel las curvas de esfuerzo –deformación, las cuales detallan claramente el comportamiento de el material tanto en la zona elástica como en la zona inelástica como sabemos que en la zona elástica el comportamiento o respuesta del material es lineal , designamos la pendiente bajo la curva (en la zona elástica) como el valor del modulo de Young (E) .

El límite de ruptura es tomado como el máximo valor de deformación $\sigma_y = \sigma_{rup}$ **,** que permiten las probetas debido a que el cemento a diferencia del acero posee una deformación inelástica mucho menor.

El valor del esfuerzo de fluencia para efectos de nuestro análisis lo tomamos como el esfuerzo antepenúltimo antes de la ruptura tomando como base l los valores comprendidos dentro de la linealidad de las curvas experimentales. Para efectos de calcular los valores de los tensores característicos de el material aplicamos las relaciones dadas mediante la teoría de inelasticidad que establecen que el valor de el 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= (def f*Eprom)-σu)/Eprom

El valor del intervalo de deformación máxima con respecto al modulo de fluencia "**a**", puede ser determinado mediante la siguiente correlación:

a= (σu/σy)-1

Una vez establecidos estos valores, se corrió el algoritmo de simulación y se obtuvo la curva experimental para simular y establecer la diferencia entre las graficas experimentales y las graficas teóricas para cada uno de los porcentajes de adición de Zeolita a los diferentes días de curado, como se muestra a continuación.

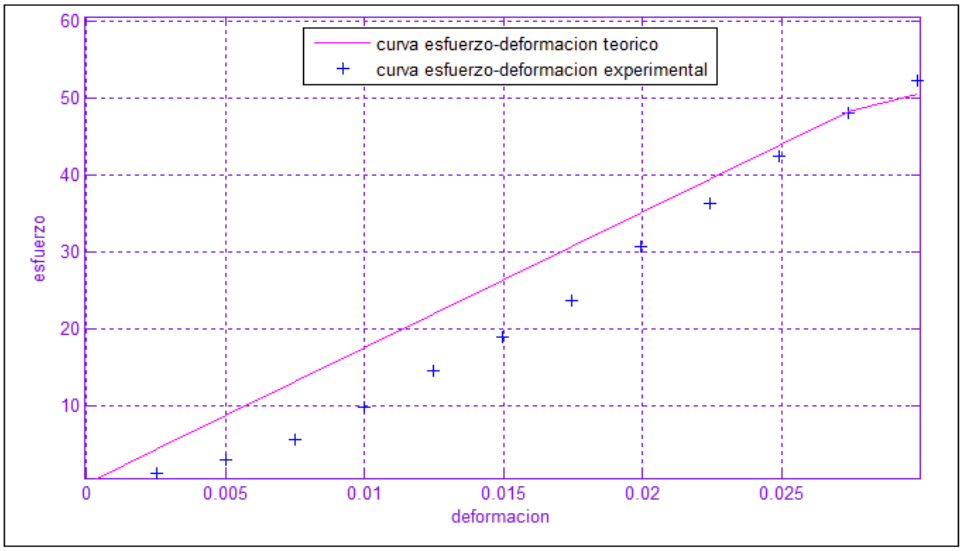


FIGURA [4.1] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 22.5% DE ZEOLITA AL 4 DÍA DE CURADO

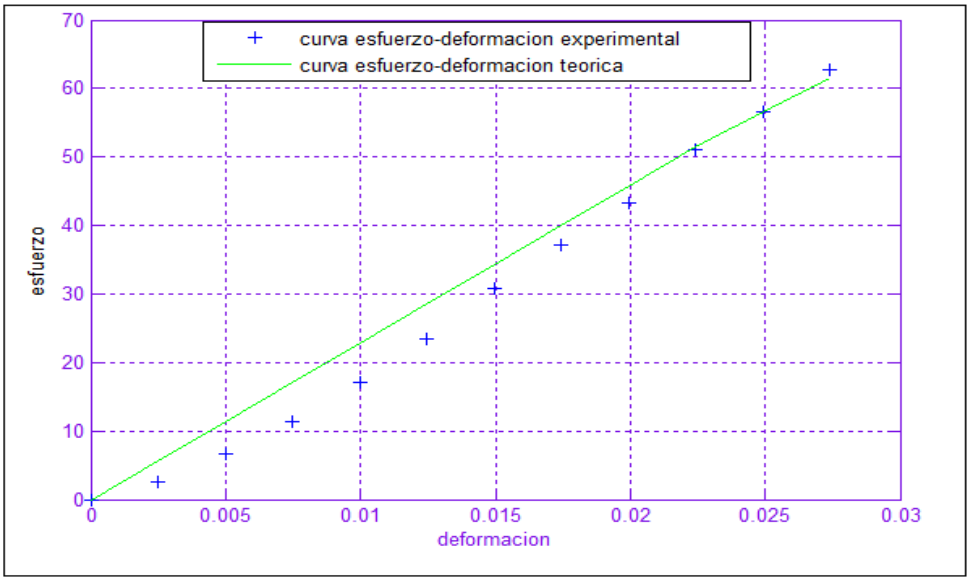


FIGURA [4.2] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 22.5% DE ZEOLITA A 11 DÍAS DE CURADO

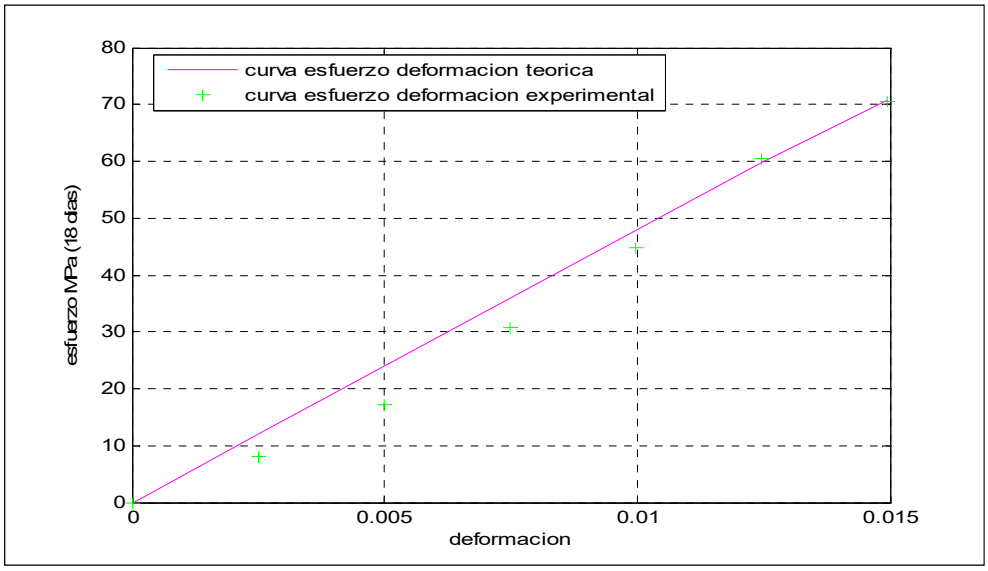


FIGURA [4.3] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 22.5% DE ZEOLITA A 18 DÍAS DE CURADO

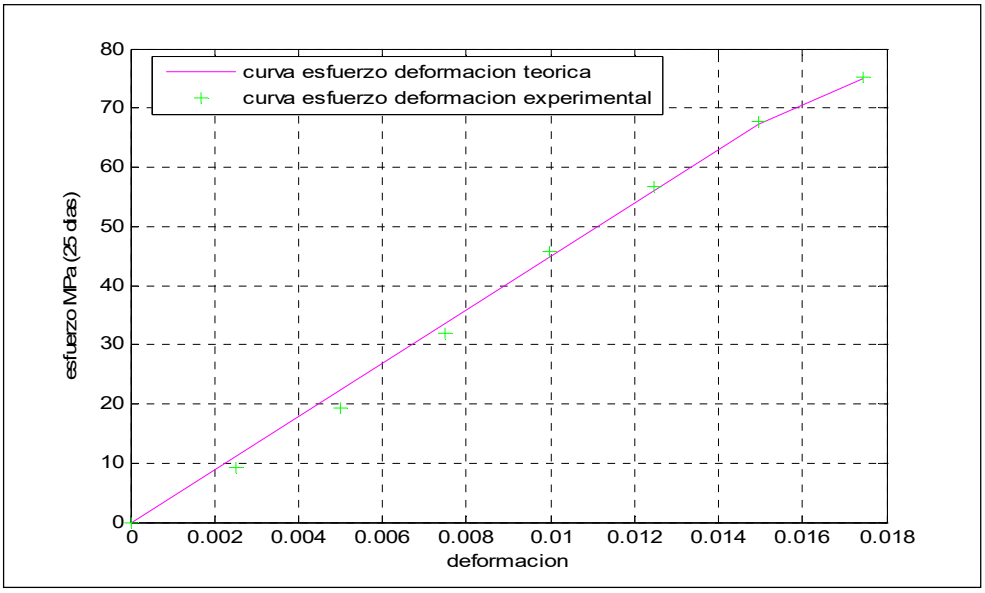


FIGURA [4.4] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 22.5% DE ZEOLITA A 25 DÍAS DE CURADO

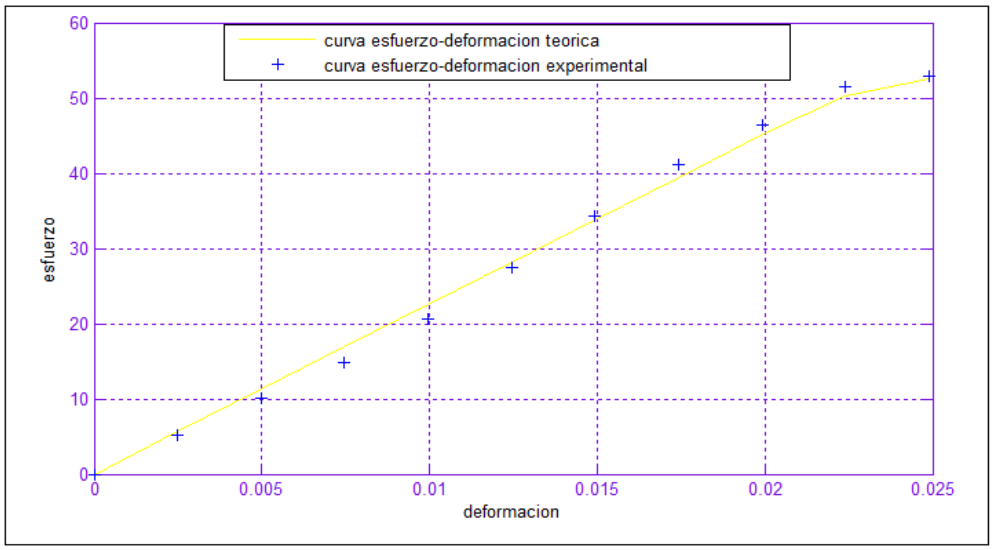


FIGURA [4.5] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 20 % DE ZEOLITA A 7 DÍAS DE CURADO

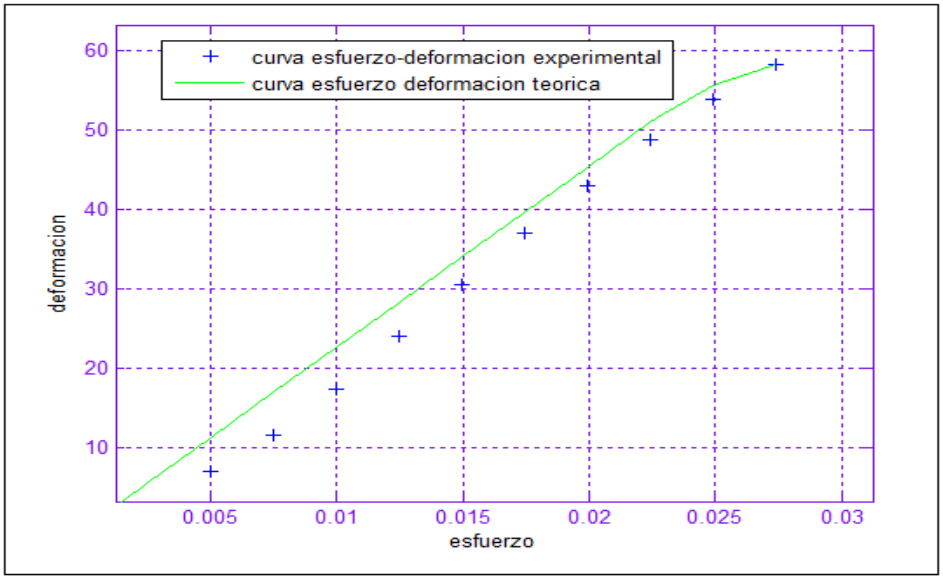


FIGURA [4.6] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 20% DE ZEOLITA A 14 DÍAS DE CURADO

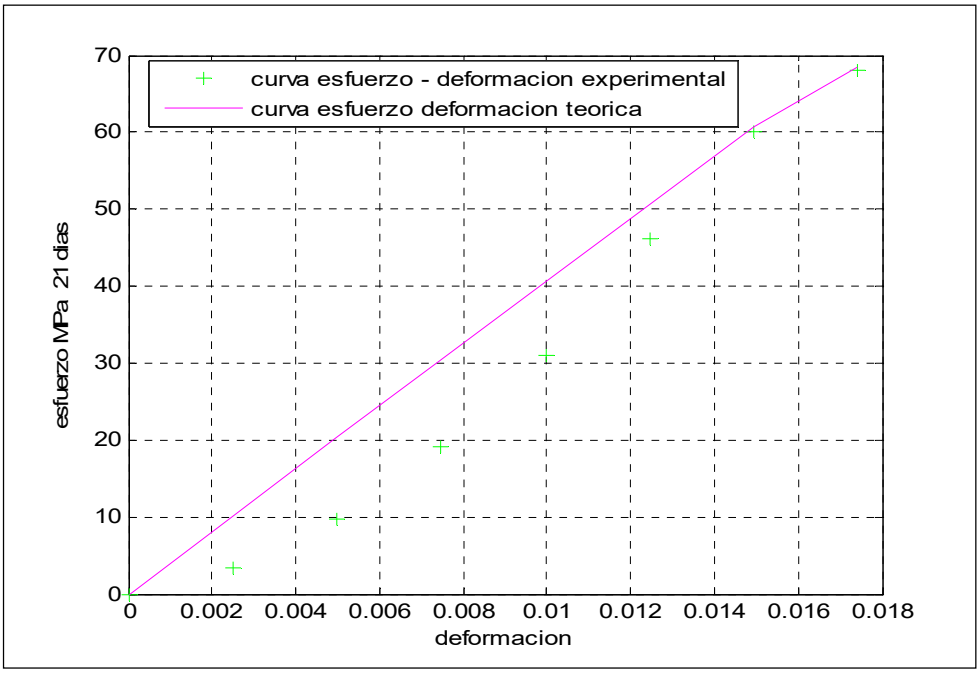


FIGURA [4.7] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 20% DE ZEOLITA A 21 DÍAS DE CURADO

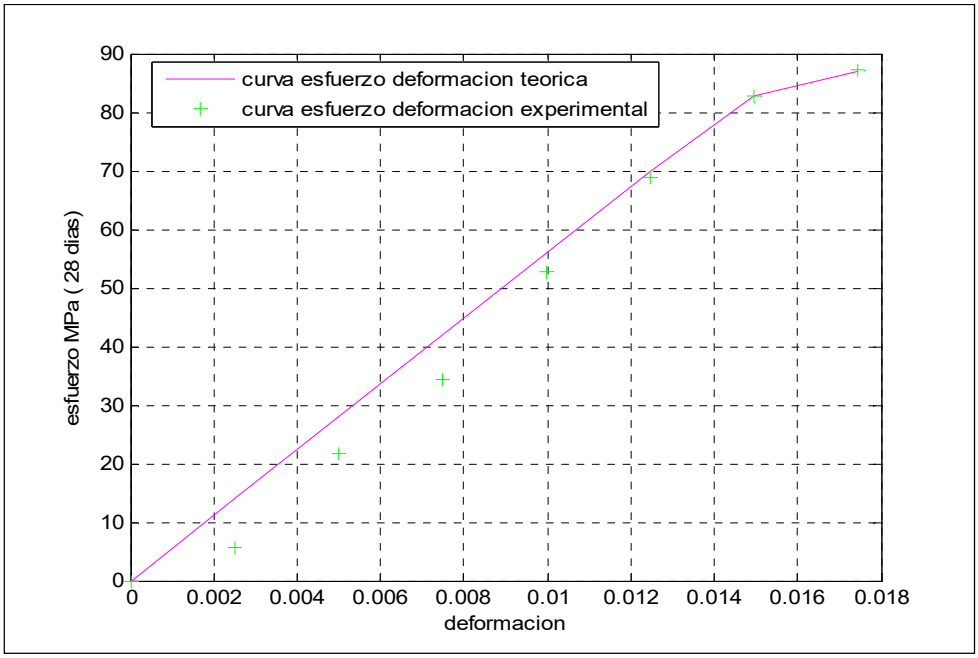


FIGURA [4.8] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 20% DE ZEOLITA A 28 DÍAS DE CURADO

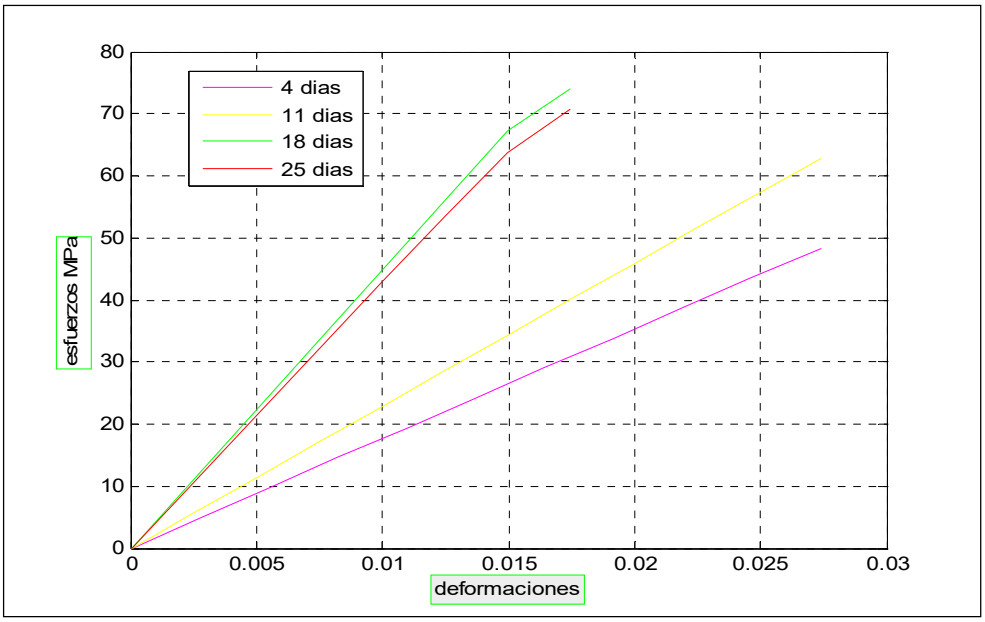


FIGURA [4.9] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 22.5% DE ZEOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO

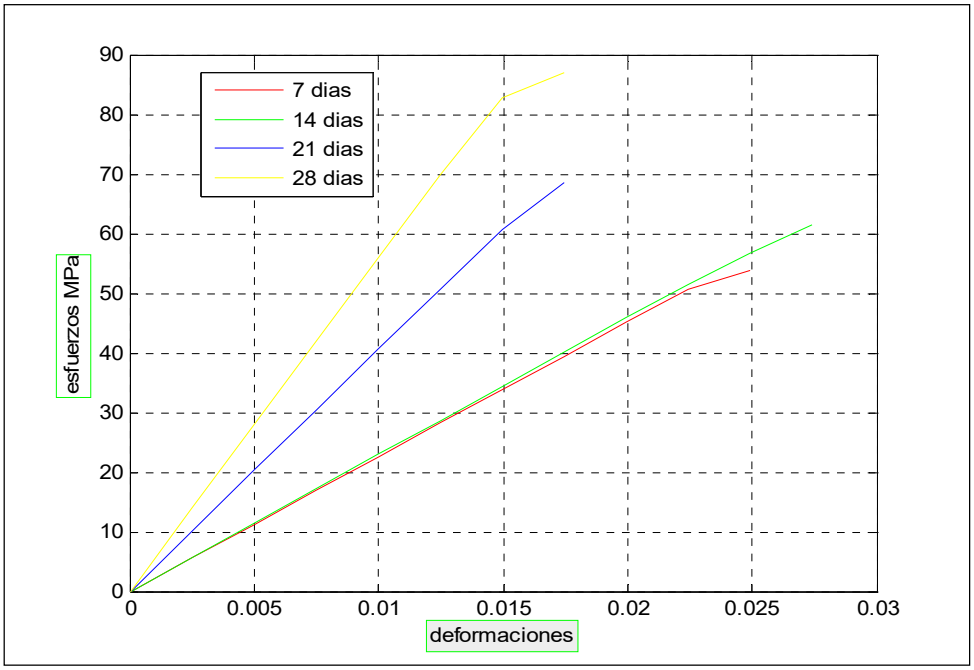


FIGURA [4.10] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO CON 20% DE ZEOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO

Las correlaciones dadas anteriormente, debido a su carácter experimental, hacen que los valores de los resultados de **m** y **a** varíen en cierto rango, como se muestra en la tabla siguiente:

TABLA 16 VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN DE 22.5% DE ZEOLITA

DIAS DE CURADO	E	σ_U	σ_Y	m	a
4	1765	52,370	50	0,007	0,05
11	2300	62,810	53,87	0,024	1,1
18	4300	70,524	60	0,024	0,8
25	4500	75,178	70	0,024	0,3235

TABLA 17 VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN DE 20% DE ZEOLITA

DIAS DE CURADO	E	σ_U	σ_Y	m	a
7	2263,96	52,881	51,49	0,0249	0,11
14	2300	58,275	50	0,024	1,1
21	4068,98	68,077	57	0,003	0,5879
28	5616,51	82,229	81	0,03	0,2697

De acuerdo con los resultados obtenidos tanto en las tablas como en las graficas ya sea experimentales como teóricas vemos que la resistencia a la compresión de las probetas o especímenes tienden a disminuir su resistencia con forme aumenta el porcentaje de Zeolita, los valores de los correctores plásticos aparentemente se hallan dentro del mismo rango para ambos porcentajes, no obstante al realizar la comparación tomando datos de los estudios análogos a este ,realizados por parte de otros investigadores. Tenemos los siguientes resultados, como se muestran tabulados en el siguiente tabal donde se aprecian los valores de los correctores plásticos, así como los módulos de Young y el esfuerzo ultimo de ruptura, para cada porcentaje para cada día de ruptura.

TABLA 18 VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN DE (5, 10, 15,20, 25) % DE ZEOLITA

DIAS DE CURADO	DIAS DE CURADO	E	σ_Y	m	a
5%	7	194489	58,11	0,005	0,086
	14	3029,91	45,27	0,005	1,9
	21	4447,439	44,13	0,01	1,9
	28	5903,17	58,8	0,035	1
10%	7	1973,55	55,14	0,002	0,4
	14	3871,5081	59,001	0,2	0,5
	21	5470,58	60	0,002	0,11
	28	4236,19	50	0,005	0,45
15%	7	2147,9141	34,81	0,001224	0,69
	14	5923,1125	60	0,09	0,65
	21	4914,88	62,41	0,01524	0,1
	28	4802,89	60,999	0,00354	0,45
20%	7	2263,96	51,49	0,0249	0,11
	14	2300	50	0,024	1,1
	21	4068,98	57	0,003	0,5879
	28	5616,51	81	0,03	0,2697
25%	7	4463,8	56	0,013	0,355
	14	4149,04	62	0,012	0,46
	21	3902,96	47	0,009	0,014942
	28	2017,39	48	0,017	0,25

En base a estos resultados y de acuerdo con las graficas a continuación, podemos notar que el modulo de Young, que gobierna la parte elástica de las curvas de esfuerzo deformación a los 7 días de curado aumenta conforme aumenta el porcentaje de Zeolita, a los 21 días de curado, registra un aumento hasta el 15% de Zeolita y decae con el 20 y 25% de Zeolita, Al comparar las curvas de

Esfuerzo deformación teóricas con las curvas experimentales se ve que el rango de error para los datos tomados no excede del 25%, como se muestra en la tabla 19, el máximo error se denota para la adición de 22.5% de Zeolita a los 11 y 4 días de curado, aquí las curvas de las graficas mostraron un mayor desfase, las curvas con menor rango de erro fueron las correspondientes a la adición de 20% a los 7 días y la adición de 22.5% a los 25 días de curado.

Los esfuerzos de fluencia aumentan conforme aumenta la adición de Zeolita y los días de curado, no obstante para la adición de 25% esta decae conforme aumentan los días de curado como se muestra en la graficas anteriores. Los valores de los correctores plásticos y los valores de deformación máxima con respecto al modulo de fluencia se mantienen relativamente dentro de los mismos rangos.

4.3. Modelado y Valoración de Resultados.

Para efectos de validar la adición de Zeolita De acuerdo a los datos de los esfuerzos obtenidos para cada una de las adiciones a los distintos días de curado se realizo un análisis estadístico , para validar los dos porcentajes de zeolita que conforman este estudio (20% de Zeolita y 22.5% de Zeolita), se fijo establecer el mejor porcentaje a través de un análisis Dunnett que establece como un control al valor de la media que corresponde al cuarto día de curado

con 22.5% de Zeolita, ya que los especímenes a esta edad presentan menor resistencia a la compresión. Para obtener una mejor comparación, se estableció como comparadores a los valores de esfuerzo último de compresión, Las hipótesis formuladas para el control y validación del método se establecieron de la siguiente manera.

Ho= La media aritmética del cuarto día de curado es igual a las otras medias aritméticas.

$$\mu_c = \mu_i$$

Ha=Al menos una de las diferentes medias es mayor al control.

$$\mu_i > \mu_c$$

Donde μ_c , pertenece a la media aritmética del control (4 día de curado) y el segundo término μ_i es la media aritmética de los diferentes días de curado para 20% de zeolita I (7,14,21 y 28) y 22.5% de Zeolita I (11,18 y 25).

Los datos ingresados en el software, se muestran a continuación en la tabla 19, donde se muestran valores de esfuerzos de cada espécimen para los distintos días de curado de cada adición de Zeolita.

TABLA 19 VALORES DE RESPUESTAS DEL MATERIAL BAJO LA ADICIÓN DE (20 ,22.5) % DE ZEOLITA

% de Zeolita	σu Mpa	σu Mpa	σu Mpa	σu Mpa	σu Mpa	σu Mpa	σu Mpa	σu Mpa	Error Total (esfuerzos teóricos vs experimentales)
	4 días	7 días	11 días	14 días	18 días	21 días	25 días	28 días	
22.5%	22.5 error	52.75	25.91 error	62.73	12.96 error		5.86 error	87.34	16.78
		54.63		58.4				88.2	
		53.05		59.69				86.46	
20.0%	52.74	5.86 error		18.32 error	70.92	11.98 error	71.62	11.13 error	11.82
	52.37				71.42		77.76		
	45.21				69.21		76.14		

Para el análisis estadísticos , como ya se especifico se uso el método factorial con el análisis de Dunnet, debido a que tenemos varias variables involucradas en el análisis, como control para el Método de Dunnet ,establecemos el esfuerzo de compresión a los cuatro días de curado, debido a que es el valor que presenta menor resistencia a la compresión .

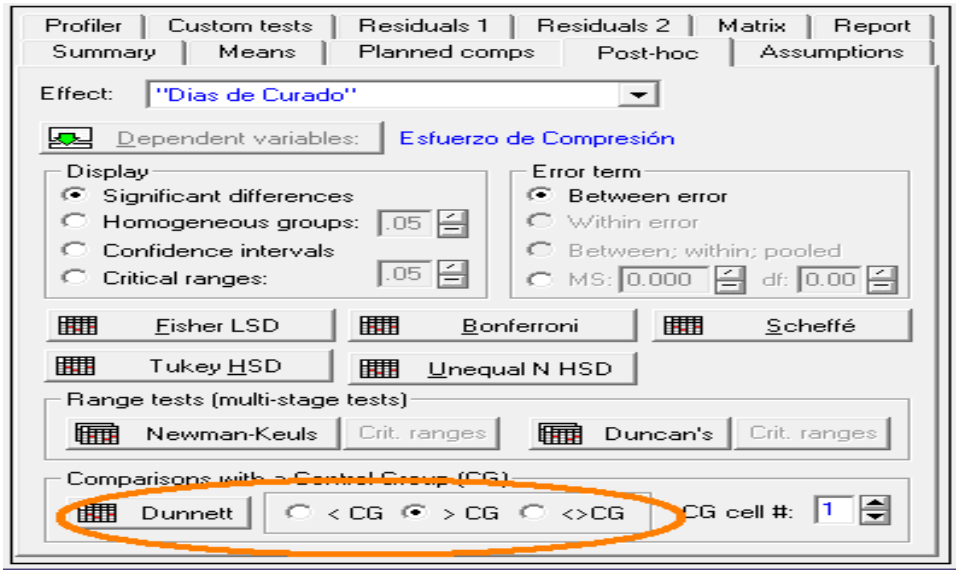


FIGURA [4.11] VENTANA ESTADÍSTICA DEL MÉTODO DE DUNNETT

Dunnett test; variable Esfuerzos (Spreadsheet1)
Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control)
Error: Between MS = 19.633, df = 16.000

Cell No.	Dias de curado	{1} 50.107
1	4	
2	7	0.515139
3	11	0.007815
4	14	0.031147
5	18	0.000129
6	21	0.000037
7	25	0.000030
8	28	0.000020

FIGURA [4.12] CUADRO DE ANÁLISIS DE DUNNETT

De acuerdo a la figura 4.12 observamos que los valores de color rojo nos muestran que existen significancia de los diferentes valores de las medias aritméticas con respecto al control; es decir que todos los

esfuerzos son mayores a partir del onceavo día , no obstante de todos ellos el que tiene menor significancia es el esfuerzo a los 28 días de curado , por lo tanto para este valor se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna que establece que la media de la resistencia a la compresión a los veintiocho días es mayor que la media de la resistencia a la compresión de el control establecido, lo cual se corrobora con lo obtenido en los gráficos de esfuerzo deformación para 20 y 22.5 % de Zeolita que dan a notar que la resistencia a la compresión aumenta conforme aumentan los días de curado.

Dias de curado; Unweighted Means (Spreadsheet1)
Current effect: F(7, 16)=23.420, p=.00000
Effective hypothesis decomposition

Cell No.	Dias de curado	Esfuerzos Mean	**Esfuerzos Std.Err.**	Esfuerzos -95.00%	Esfuerzos +95.00%	N
1	4	50.10667	2.558175	44.68358	55.52976	3
2	7	53.47667	2.558175	48.05358	58.89976	3
3	11	62.81000	2.558175	57.38691	68.23309	3
4	14	60.27333	2.558175	54.85024	65.69642	3
5	18	70.51667	2.558175	65.09358	75.93976	3
6	21	74.05667	2.558175	68.63358	79.47976	3
7	25	75.17333	2.558175	69.75024	80.59642	3
8	28	87.33333	2.558175	81.91024	92.75642	3

FIGURA [4.13] VALORES DE MEDIAS STANDART PARA ESFUERZOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DUNNETT

De la figura 4.13 se vio que los resultados a los veintiocho días de curado establecen que la pasta de cemento presenta mayor Resistencia a la Compresión como se recalco pero con un porcentaje

de confiabilidad del 99.99% ya que el valor de p=0.0001 cumpliendo con las normas estadísticas. Una vez más se afirma que a mayor días de curado con esta adición de puzolana se obtuvo mayor esfuerzo de compresión con un nivel de ajuste de los datos del 99.999%, además de ello se noto que el nivel de ajuste de los datos experimentales R , es mayor que 75% , lo que nos permite establecer que los valores están ajustados al 95% de confiabilidad, y al cumplirse esto se corrobora que la aplicación del método de Dunnett es aceptable.

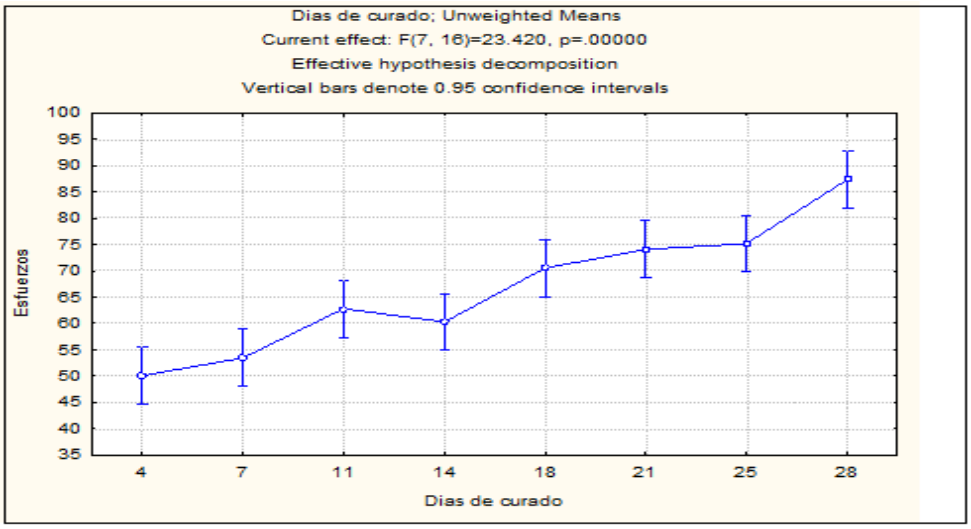
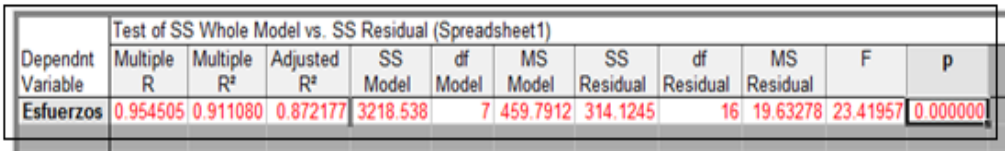


FIGURA 4.14. GRÁFICO DE INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE CURADO



Dependnt Variable	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (Spreadsheet1)										
	Multiple R	Multiple R^2	Adjusted R^2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
Esfuerzos	0.954505	0.911080	0.872177	3218.538	7	459.7912	314.1245	16	19.63278	23.41957	0.000000

FIGURA 4.15. CUADRO DEMOSTRATIVO DEL NIVEL DE CONFIABILIDAD DEL EXPERIMENTO

La modelación y valorado de los resultados de todos los porcentajes de Zeolita , en general, los realizamos tomando los datos proporcionados por los diferentes valores de esfuerzo para las adiciones de Zeolita de 5, 10, 15,20,25% proporcionados por los ensayos realizados en conjunto con este estudio por parte de otros investigadores. A continuación se muestran los datos proporcionados para los otros porcentajes de Zeolita.

TABLA 20 ESFUERZOS ÚLTIMOS DE RUPTURA PARA DISTINTOS PORCENTAJES DE ZEOLITA Y DÍAS DE CURADO.

% de Zeolita	Esfuerzo de ruptura	Esfuerzo de ruptura	Esfuerzo de ruptura	Esfuerzo de ruptura
	7 días	14 días	21 días	28 días
	65,963	53,948	77,068	80,493
	63,11	64,22	74,5	75,36
5%	66,501	58,23	74,5	86,49
	64,132	55,851	64,132	61,566
	63,153	62,422	64,732	55,581
10%	56,555	61,567	59,857	59,856
	58,144	61,564	64,129	65,842
	56,551	62,419	64,129	68,401
15%	54,299	68,404	65,839	64,132
	52,749	62,733	76,052	87,34
	54,633	58,4	62,379	88,2
20%	53,052	59,691	83,743	86,458
	59	68,27	47,03	53,87
	62,42	67,55	59	38,62
25%	60,71	73,23	54,72	51,81

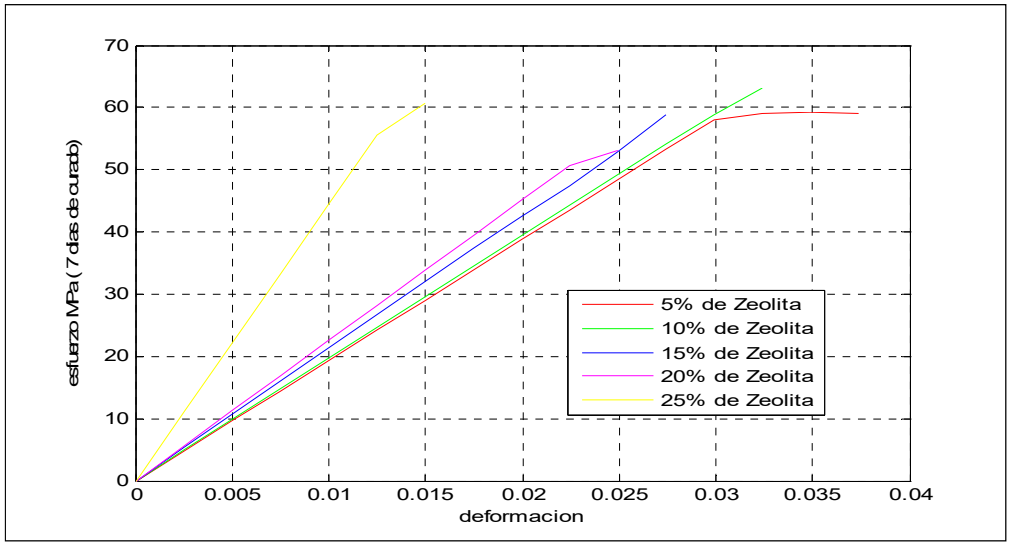


FIGURA [4.16] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y 7 DÍAS DE CURADO

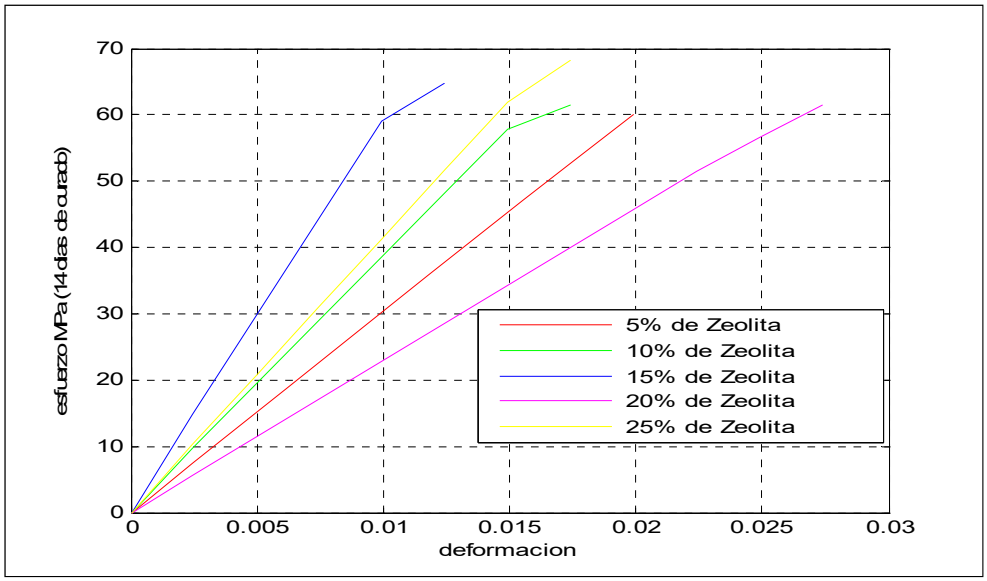


FIGURA [4.17] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PROMEDIO PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y 14 DÍAS DE CURADO

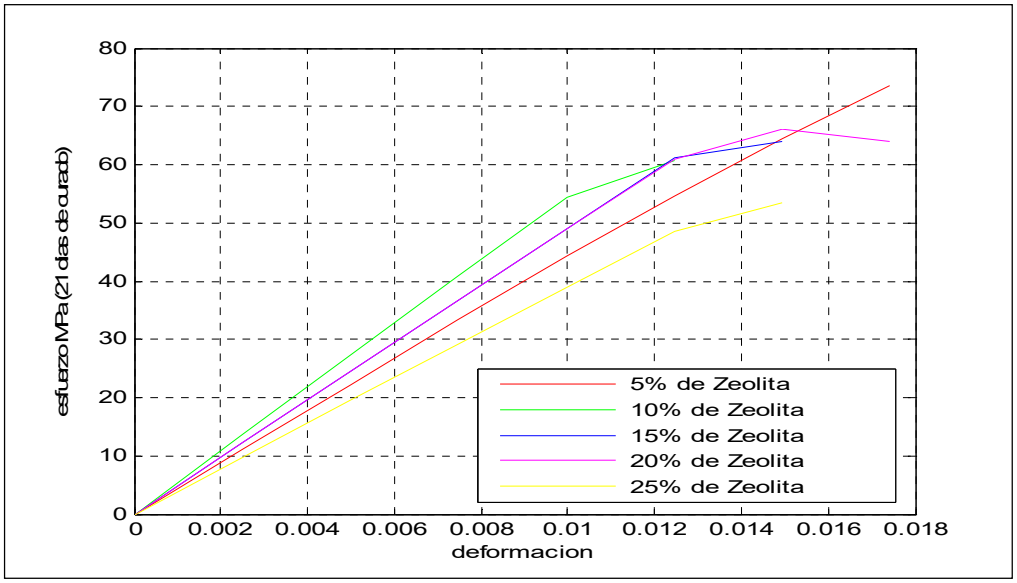


FIGURA [4.18] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y 21 DÍAS DE CURADO

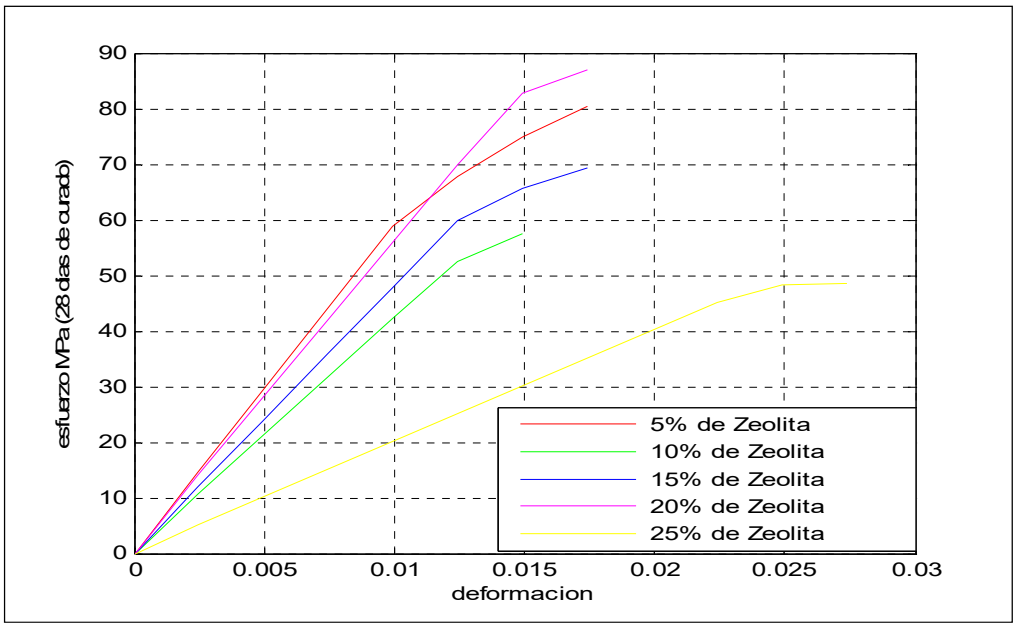


FIGURA [4.19] CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA Y 28 DÍAS DE CURADO

Al igual que para la adición de 20 y 22.5% se procedió a realizar los mimos procedimientos para los análisis generales, los valores de las respuestas del material se hallan especificadas en el apéndice C, para las comparaciones entre los distintos porcentajes los resultados se analizaron mediante la inclusión de la herramienta de STADISTICA, usando Comparaciones Múltiples con distintos tratamientos, aplicando el Método de Dunnett que consiste en realizar comparaciones de cada tratamiento con el control, que en este caso es la pasta de cemento Tipo I sin adición de Zeolita, y la pasta de Cemento Portland tipo IV cuyos valores se muestran en el apéndice D, para obtener una mejor comparación en base a estos comparadores , se estableció como indicadores a los valores de esfuerzo ultimo de compresión. Las hipótesis formuladas para el control y validación del método se establecieron de la siguiente manera.

Ho= La media aritmética de los diferentes porcentaje es menor o igual al control

$$\mu_i \leq \mu_c$$

Ha= Existe al menos una media mayor al control; que cumpla con una resistencia mayor a la compresión de los demás porcentajes.

$$\mu_i > \mu_c$$

Donde µc, pertenece a la media aritmética del control establecido ya sea de la pasta de cemento tipo I sin adición de Zeolita o la pasta de cemento tipo IV, µi es la media aritmética de los otros porcentajes o comparadores el análisis Dunnett que realizamos fue en base a escoger la medias aritméticas que sean mayor al control.

A continuación se muestran los resultados de las medias obtenidas con el método de control en los distintos días de curado para los diferentes porcentajes.

TABLA 21 MEDIAS ARITMÉTICAS DE LOS DISTINTOS PORCENTAJES CALCULADAS PARA EL 7 DÍA DE CURADO.

Cell No.	% de zeolita; Unweighted Means (analisis 1) Current effect: F(4, 10)=11.153, p=.00105 Effective hypothesis decomposition 7 dias de curado **% de zeolita**	Esfuerzo de Ruptura 7 Mean	Esfuerzo de Ruptura 7 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 7 -95.00%	Esfuerzo de Ruptura 7 +95.00%	N
1	5	65.18233	1.365389	62.14006	68.22461	3
2	10	61.28000	1.365389	58.23772	64.32228	3
3	15	56.33133	1.365389	53.28906	59.37361	3
4	20	53.47800	1.365389	50.43572	56.52028	3
5	25	60.71000	1.365389	57.66772	63.75228	3

TABLA 22 MEDIAS ARITMÉTICAS DE LOS DISTINTOS PORCENTAJES CALCULADAS PARA 14 DÍAS DE CURADO.

Cell No.	% de zeolita; Unweighted Means (analisis 1) Current effect: F(4, 10)=4.3463, p=.02710 Effective hypothesis decomposition 14 dias de curado **% de zeolita**	Esfuerzo de Ruptura 14 Mean	Esfuerzo de Ruptura 14 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 14 -95.00%	Esfuerzo de Ruptura 14 +95.00%	N
1	5	58.79933	2.143483	54.02336	63.57531	3
2	10	59.85667	2.143483	55.08069	64.63264	3
3	15	64.12900	2.143483	59.35302	68.90498	3
4	20	60.27467	2.143483	55.49869	65.05064	3
5	25	69.68333	2.143483	64.90736	74.45931	3

TABLA 23 MEDIAS ARITMÉTICAS DE LOS DISTINTOS PORCENTAJES CALCULADAS PARA 21 DÍAS DE CURADO.

Cell No.	% de zeolita; Unweighted Means (analisis 1) Current effect: F(4, 10)=7.2622, p=.00520 Effective hypothesis decomposition 21 dias de curado **% de zeolita**	Esfuerzo de Ruptura 21 Mean	Esfuerzo de Ruptura 21 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 21 -95.00%	Esfuerzo de Ruptura 21 +95.00%	N
1	5	75.35600	3.307730	67.98592	82.72608	3
2	10	62.90700	3.307730	55.53692	70.27708	3
3	15	64.69900	3.307730	57.32892	72.06908	3
4	20	74.05800	3.307730	66.68792	81.42808	3
5	25	53.58333	3.307730	46.21325	60.95342	3

TABLA 24 MEDIAS ARITMÉTICAS DE LOS DISTINTOS PORCENTAJES CALCULADAS PARA 28 DÍAS DE CURADO.

Cell No.	% de zeolita; Unweighted Means (analisis 1) Current effect: F(4, 10)=33.353, p=.00001 Effective hypothesis decomposition **% de zeolita**	Esfuerzo de Ruptura 28 Mean	Esfuerzo de Ruptura 28 Std.Err.	Esfuerzo de Ruptura 28 -95.00%	28 dias de curado Esfuerzo de Ruptura 28 +95.00%	N
1	5	80.78100	2.761320	74.62840	86.93360	3
2	10	59.00100	2.761320	52.84840	65.15360	3
3	15	66.12500	2.761320	59.97240	72.27760	3
4	20	87.33267	2.761320	81.18006	93.48527	3
5	25	48.10000	2.761320	41.94740	54.25260	3

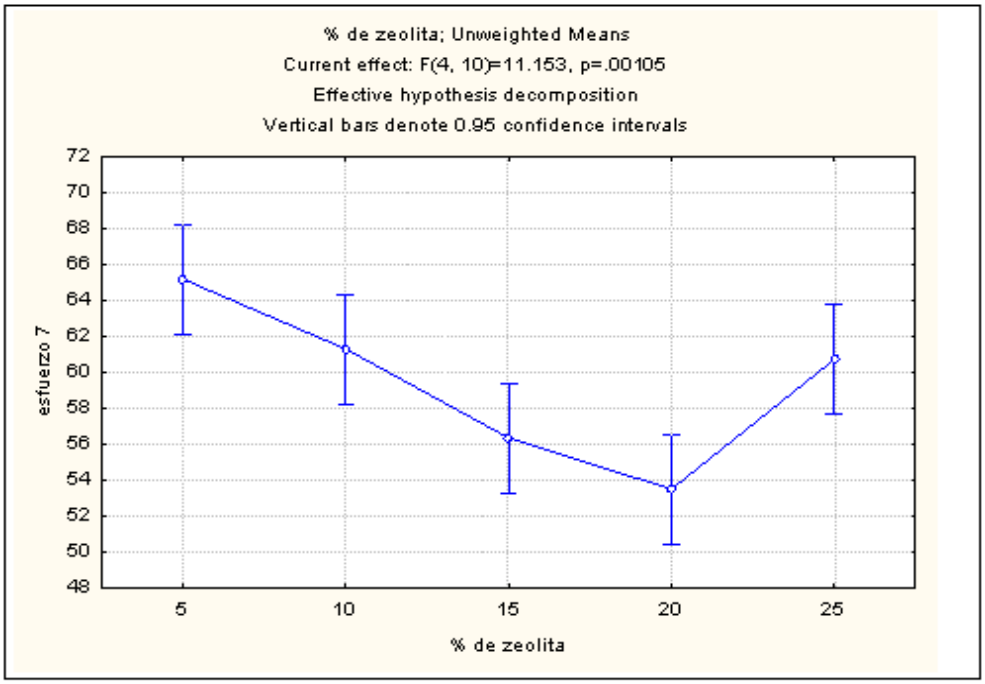


FIGURA [4.20] CURVAS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE ESFUERZOS DE RUPTURA PARA 7 DÍAS DE CURADO.

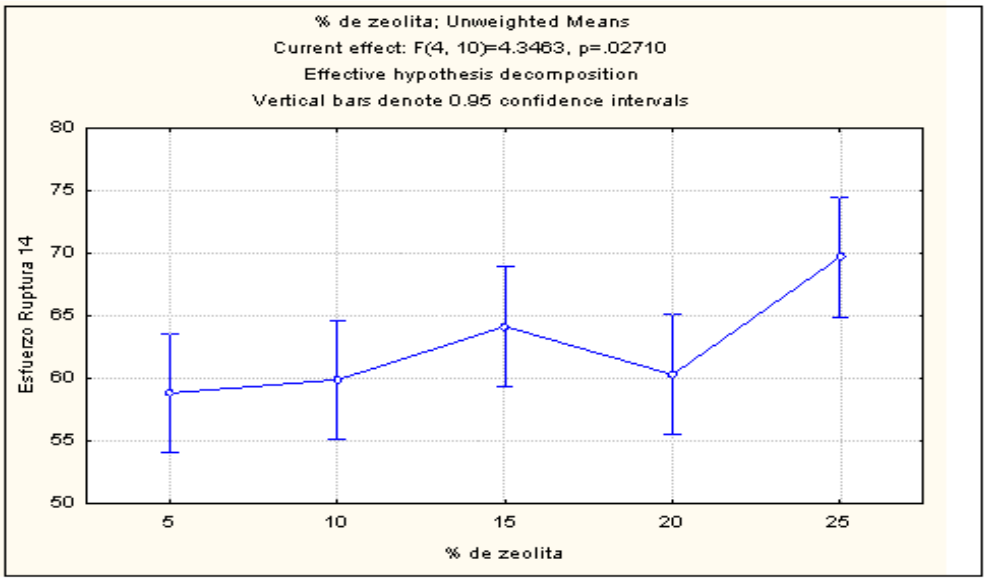


FIGURA [4.21] CURVAS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE ESFUERZOS DE RUPTURA PARA 14 DÍAS DE CURADO

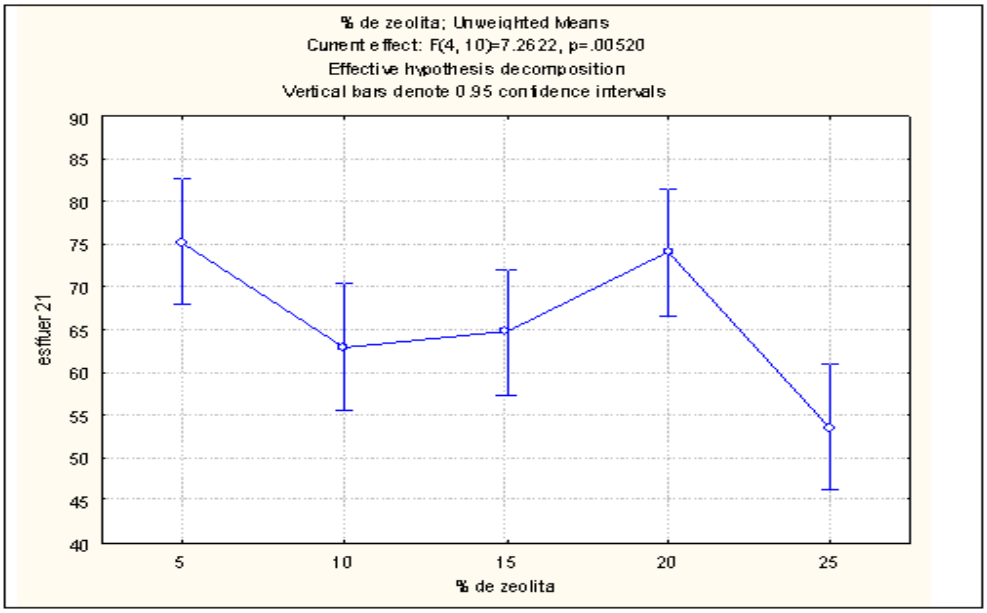


FIGURA [4.22] CURVAS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE ESFUERZOS DE RUPTURA PARA 21 DÍAS DE CURADO

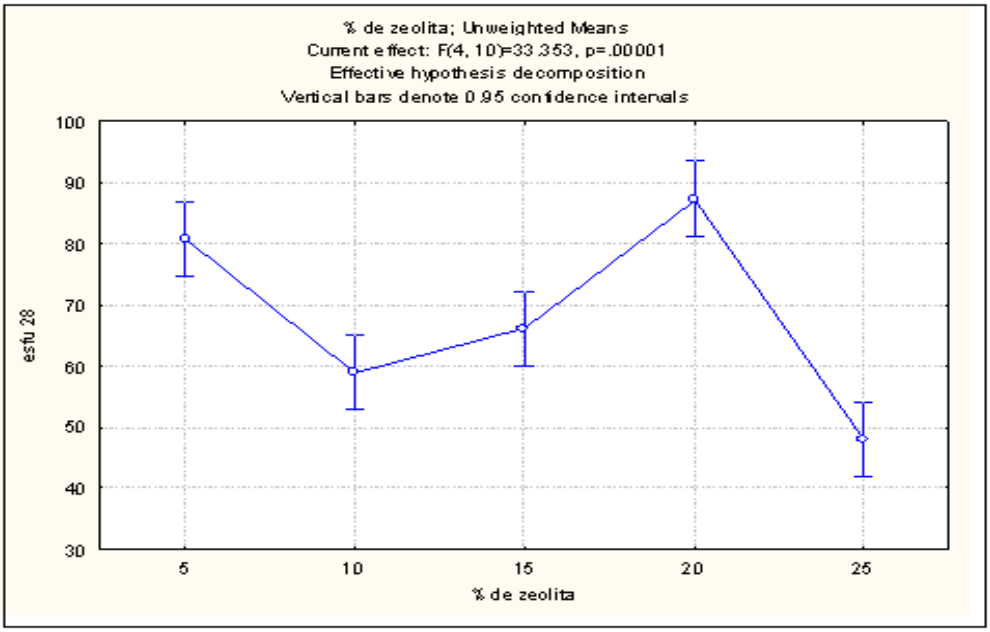


FIGURA [4.23] CURVAS DE COMPARACIONES MÚLTIPLES DE ESFUERZOS DE RUPTURA PARA 28 DÍAS DE CURADO

TABLA 25 RESPUESTAS DEL TEST DE DUNNETT PARA CADA PORCENTAJE POR DÍAS DE CURADO.

Dunnett test ; variable Esfuerzo de Ruptura Probabilities for Post Hoc Test (M>Control)							
7 días de curado		14 días de curado		21 días de curado		28 días de curado	
Error Between MS =5,5929 df=10		Error Between MS =13,784 df=10		Error Between MS =32,823 df=10		Error Between MS =22,875 df=10	
% de Zeolita	{1} 65,182	% de Zeolita	{1} 58,799	% de Zeolita	{1} 75,356	% de Zeolita	{1} 80,781
5		5		5		5	
10	0,997739	10	0,670505	10	0,999488	10	0,99998
15	0,999974	15	0,148431	15	0,998769	15	0,999932
20	0,999981	20	0,611808	20	0,876413	20	0,166481
25	0,998859	25	0,008011	25	0,999975	25	0,999981

TABLA 26 VARIABLES ESTADÍSTICAS DEL MÉTODO DE DUNNETT PARA DIFERENTES PORCENTAJES Y DÍAS DE CURADO

Dependnt Variable	Multiple R	Multiple R^2	Adjusted R^2	SS Model	df Model	MS Model	SS Residual	df Residual	MS Residual	F	p
	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analisis 1)										
Esfuerzo de Ruptura 7	0.903823	0.816895	0.743654	249.5178	4	62.37946	55.92865	10	5.592865	11.15340	0.001047
	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analisis 1)										
Esfuerzo de Ruptura 14	0.796768	0.634838	0.488774	239.6291	4	59.90727	137.8356	10	13.78356	4.346286	0.027102
	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analisis 1)										
Esfuerzo de Ruptura 21	0.862503	0.743911	0.641475	953.4785	4	238.3696	328.2323	10	32.82323	7.262222	0.005198
	Test of SS Whole Model vs. SS Residual (analisis 1)										
esfuerzo de Ruptura 28	0.964506	0.930271	0.902379	3051.764	4	762.9410	228.7465	10	22.87466	33.35311	0.000009

En base a los datos obtenidos en las tablas mostradas el análisis da como resultado lo siguiente:

A los siete días de curado las medias aritméticas de los comparadores son menores a el control por lo tanto se acepta la hipótesis nula con una probabilidad de con un ajuste de 74.37%.

A los 14 días se rechaza la hipótesis nula para la adición de 25% de Zeolita, por cuanto la media aritmética de este porcentaje es mucho mayor que la de el control, y su probabilidad es de 2.7%, es decir la

diferencia de promedios entre el control (5%) y el tratamiento de 25% de Zeolita superan el valor D, por lo cual son significativamente diferentes.

A los 21 días de curado se acepta la hipótesis nula con una probabilidad de 0.5% de que no sea cierta.

Para los 28 dias de curado, se acepta la hipótesis alterna para la adición de Zeolita de 20%, lo que implica que la mejor resistencia a la compresión se obtiene en una pasta de cemento con 20% de Zeolita a los 28 días de curado, con un nivel de confianza de del orden de 99.98%.

Como compendio a todos estos resultados, la grafica 4.24 a continuación muestra el rango de confianza para los distintos porcentajes de adición de Zeolita a distintos días de curado.

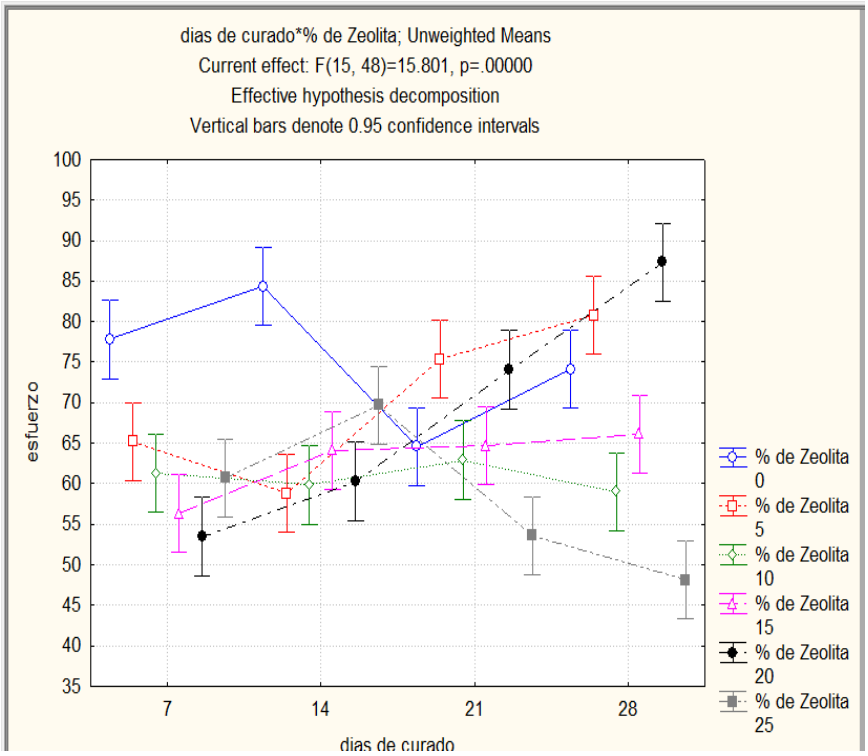


FIGURA [4.24]. GRAFICAS DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA TODOS LOS DIAS DE CURADO

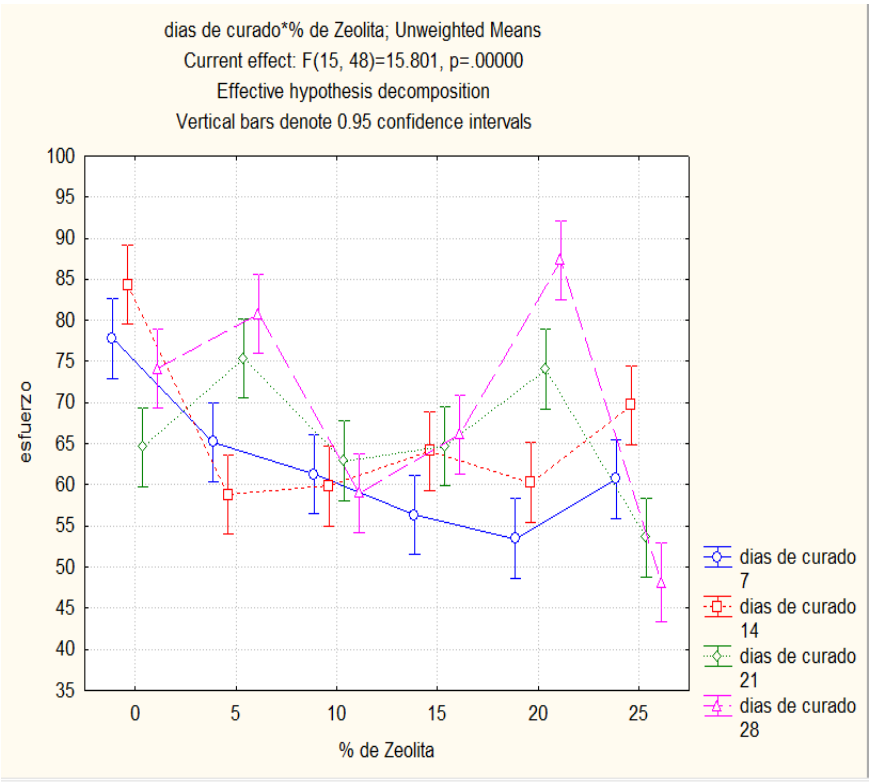


FIGURA [4.25]. GRAFICAS DEMOSTRATIVO DEL RANGO DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA

En la figura 4.24 a los 28 días de curado se nota que para los porcentajes de adición de 10% y 25% el esfuerzo a la compresión disminuye; una de las posibles causas puede ser la mala calibración de los instrumentos o debido a un error experimental en la toma de datos. En la figura 4.25, se ve que el mejor porcentaje que presenta un alto valor de esfuerzo a la compresión conforme aumenta sus días de curado es la adición de 20% de Zeolita I, ocurriendo lo contrario con los otros porcentajes (5, 10, 15 y 25%), de los cuales

cuyos valores de esfuerzo a la compresión aumentan y en otros casos disminuye. En la grafica 4.26, tenemos un diagrama de cajas donde los mayores valores de esfuerzo se da a los 28 días de curado

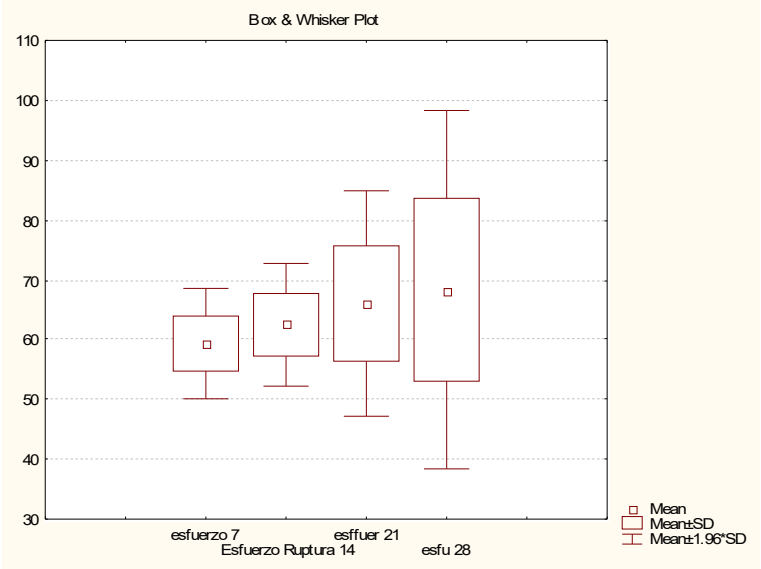


FIGURA [4.26] DIAGRAMA DE CAJAS DE LOS ESFUERZOS DE COMPRESION

El análisis con los datos de validación (7.5; 12.5; 17.5; 22.5 y 27.5%) aplicamos el mismo método de Dunnett, arrojo los resultados que se muestran en la figura 4.27, como se muestra a continuación.

Cell No.	Dunnett test; variable esfuerzo (Spreadsheet13 Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 17.299, df = 48.000 **dias de curado**	% de Zeolita	{1} 77.813
1	7	0	
2	7	5	0.999970
3	7	10	0.999970
4	7	15	0.999970
5	7	20	0.999970
6	7	25	0.999970
7	14	0	0.247556
8	14	5	0.999970
9	14	10	0.999970
10	14	15	0.999970
11	14	20	0.999970
12	14	25	0.999970
13	21	0	0.999970
14	21	5	0.995983
15	21	10	0.999970
16	21	15	0.999970
17	21	20	0.999108
18	21	25	0.999970
19	28	0	0.999036
20	28	5	0.730598
21	28	10	0.999970
22	28	15	0.999970
23	28	20	0.046934
24	28	25	0.999970

FIGURA [4.27] DATOS ESTADISTICOS DE SIGNIFICANCIA CON EL ANALISIS DUNNETT.

En esta figura se nota que para los diferentes porcentaje de zeolitas con respecto al control (7.5% con 4 días de Curado); los resultados son mayores al control a excepción del 27.5% con 4 días de curado que acepta la hipótesis nula que es la misma escogida para los datos de calibración (5, 19,15, 20 y 25%).

A los 21 días de curado todas los porcentajes son mayores al control y rechazan la hipótesis nula, el esfuerzo de compresión para la adición de Zeolita 22.5% presenta valores mayores con respecto a los demás; es decir que en un rango de 20 a 22,5% de adición de Zeolita la pasta de cemento experimenta un aumento significativo del espécimen con respecto a las otras muestras siendo lo esperado de acuerdo al análisis con las muestras de calibración.

En la figura 4.28 a continuación se muestran los diferentes intervalos de confianza para los esfuerzos de compresión para los distintos porcentajes de zeolita con sus respectivos días de curado.

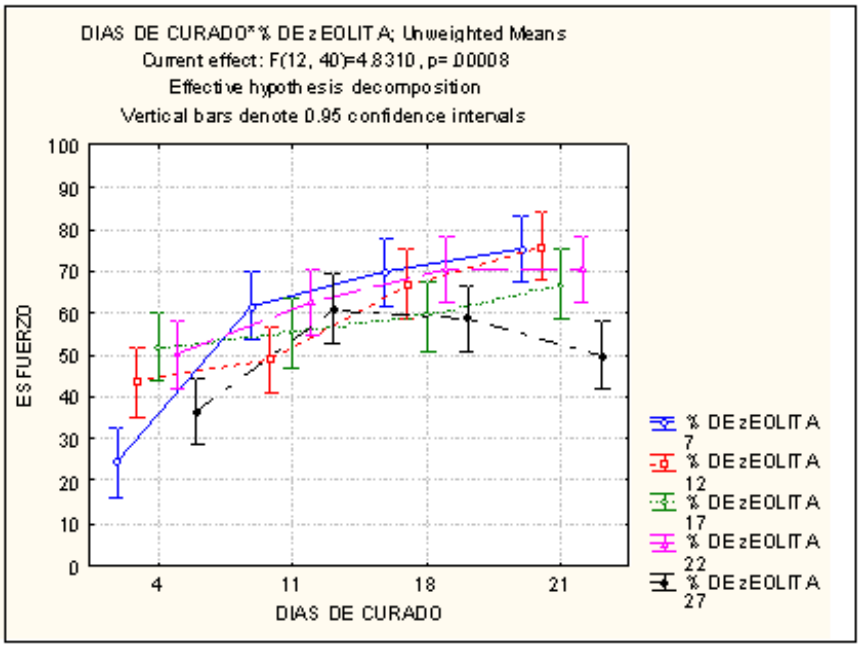


FIGURA [4.28] GRAFICOS DE INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE ZEOLITA I.

En un análisis generalizado mediante la inclusión de una grafica de superficie donde se a introducido los valores de esfuerzos, los porcentajes de Zeolita y los días de curado como se muestra en la grafica 4.29.

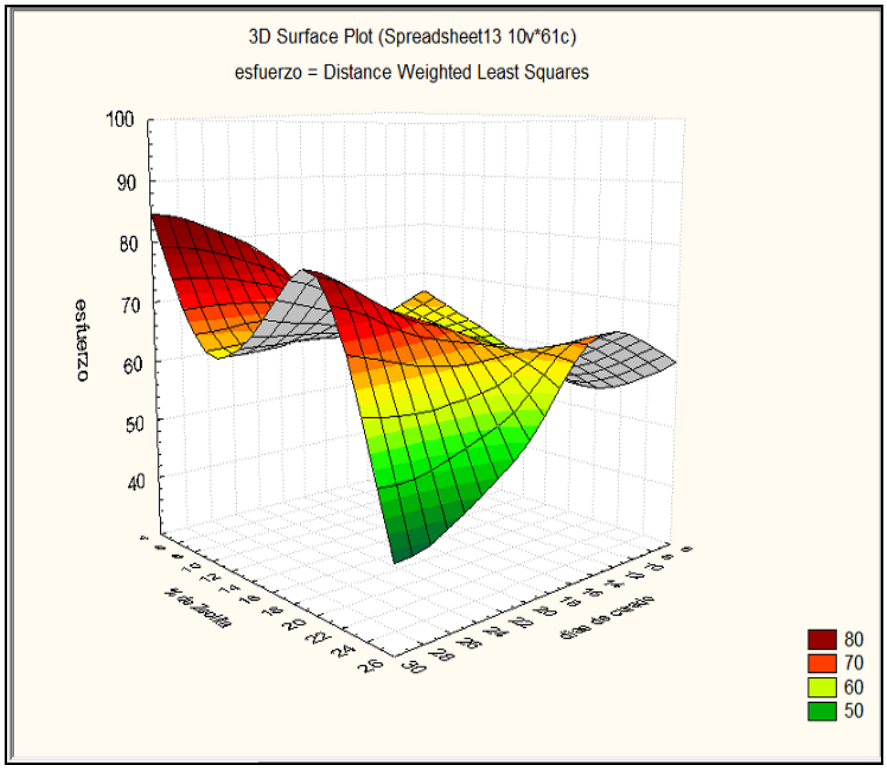


FIGURA 4.29. CURVA DE SUPERFICIE DEL COMPORTAMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO PARA LOS DIFERENTES DIAS DE CURADO

La inclusión de todos estos parámetros en un mismo grafico nos permite observar que al aumentar los días de curado el esfuerzo a la compresión de las distintas probetas , siendo a los 28 días el tiempo de curado optimo donde se obtiene una mayor resistencia a la

compresión, en esta también se puede corroborar que la adición de 20% de Zeolita a los 28 días de curado es presenta mejores propiedades que los demás porcentajes de adición , en la grafica se puede ver claramente que el mayor pico de la superficie que corresponde para este porcentaje de adición a los veintiocho días de curado de los especímenes.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

- De acuerdo a los ensayos realizados para cada una de las probetas con porcentajes de adición de Zeolita (20% y 22.5%), para los distintos días de curado respectivamente, se pudo notar que conforme la adición de Zeolita aumentaba de 20 a 22.5%, la resistencia a la compresión aumentaba al igual que el Modulo de Young.

- Los valores de los correctores plásticos así como el valor de la deflexión máxima con respecto al modulo de fluencia se mantienen relativamente dentro de los mismos rangos, con variaciones pequeñas del orden de 0.01% aproximadamente, con

lo cual se corrobora el hecho de que estos son valores característicos del material , y dependen directamente de este.

- La comparación entre los distintos porcentajes de Zeolita (5,10,15,20,25%) , establecen que no hay una relación directa entre el porcentaje de adición de Zeolita y el esfuerzo de compresión , este tiende a variar disparejamente aumentando para unos casos y disminuyendo para otros como se vio en el análisis de resultados .

- Al contrario de la relación entre el esfuerzo de compresión y el porcentaje de adición de Zeolita , la relación entre los días de curado y el esfuerzo de compresión para un mismo porcentaje de adición de Zeolita , si es una relación directa , conforme aumentan los días de curado aumenta la resistencia de compresión.
- El porcentaje más óptimo de adición de Zeolita en base a las comparaciones múltiples realizadas en esta investigación determina que el mejor porcentaje de adición es el porcentaje de 20%, debido a que registra una mayor resistencia a la compresión a los 28 días.
- La adición de Zeolita al 20% al inicio de los días de curado presenta una resistencia de compresión no muy significativa en comparación con las demás muestras pero alcanza la máxima

resistencia sobrepasando a las demás a los 28 días de curado, con un nivel de confianza del 99.98%.

- Se estableció que la diferencia entre las curvas esfuerzo deformación experimental versus las curvas esfuerzos deformación teórica para la adición de 20% de Zeolita, arrojan un error de 11.13% , por ende los resultados de este estudio están dentro de un margen aceptable.

5.2. Recomendaciones.

De acuerdo a los ensayos realizados para cada una de las probetas con los distintos porcentajes de adición de Zeolita, para los distintos días de curado respectivamente, se puede establecer las siguientes recomendaciones:

- Es importante eliminar al máximo el contenido de porosidad al momento de la elaboración de las probetas, ya que esto ocasiona que la resistencia a la compresión de las probetas disminuya significativamente, debido a que la estructura porosa determina la resistencia a la penetración en la pasta de cemento fresco, así como las características de resistencia a la compresión en el cemento endurecido.

- Una de las causas de la porosidad se da al momento de fundir los moldes, estos pueden estar mal ajustados, con suciedad o incrustaciones en los lados de sus caras, o con demasiado agente engrasante.

- Al momento de apisonar la mezcla dentro de los compartimentos de los moldes debe tenerse mucho cuidado de seguir los pasos establecidos en la norma ya que si no se logra reducir al máximo la formación de burbujas en la mezcla esta ocasiona también la formación de porosidades por la inclusión de burbujas.

- Otra de las posibles causas de la obtención de resistencias a la compresión bajas en los especímenes de prueba puede darse debido a las condiciones del laboratorio donde se efectúen las probetas, el mayor tamaño y cantidad de poros suelen corresponder a las temperaturas más altas por ello es indispensable restringir la temperatura a no más de 27-28ªC.

- Los ensayos de ruptura deben ser realizados en una misma máquina de Compresión, el uso de distintas maquinas con diferentes calibraciones pueden variar la exactitud de las tomas de lectura.

- Al colocar los especímenes de prueba en el plato de la máquina de ensayos es importante cerciorarse que la probeta se halle alineada con el eje del centro del plato, estas incidencias pueden ocasionar que en el modelamiento de las curvas esfuerzo deformación al inicio no se ajusten las curvas con exactitud.

- Los intervalos de los correctores plásticos así como los valores de la máxima deflexión con respecto a él modulo de fluencia deben ser tomados a prueba y error para establecer un límite máximo.

BIBLIOGRAFIA

[1] CEM I 42.5R UNE 80301:96, CEM II/A 32.5 UNE 80301:96, BL V 22.5 UNE 80305:96

[2] ASTM Standarts (2002).C-1437, Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standart , Vol 04.01

[3] D.W.(1974). Breck. "Zeolite Molecular Sieves". Wiley-Interscience, New York,

[4] Powers, T.C., A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete, Research Department Bulletin 25, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1948

[5] Stapleton, J. (1995). Linear Statistical Models. New York: Wiley.

[6] Bazant, Z. P. (1988). Mathematical modelling of creep and shrinkage of concrete. John Wiley & Sons, New York, USA.

[7] Bazant, Z. P. y Wittmann, F. H., editores (1982). Creep and shrinkage in concrete structures. John Wiley & Sons, New York, USA.

[8] Byfors, J. (1980). Plain concrete at early ages. Technical Report N° 3:80, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.

[9] Gilbert, R. I., editor (1988). Time Effects in Concrete Structures. Elsevier, New York, USA.

[10] Kupfer, H. B., Hilsdorf, H., y Rusch, H. (1969). Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses. Journal ACI, 66(8).

[11] Neville, A. M. (1981). Properties of Concrete. John Wiley & Sons, New York, USA.

[12] Copeland, L. E., Kantro, D. L., y Verbeck, G. (1962). Chemistry of hydration of cement. In National Bureau of Standards, W., editor, Proc. 4th Int. Symp. On the Chemistry of Cement, volume Monograph 43, pages 429-465.

[13] Rastrup, E. (1954). Heat of hydration in concrete. Magazine of Concrete Research, 6(17):2-13.

APENDICE A

ALGORITMO PARA LA MODELACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO

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

clc;
clear all;
E= ingresar valor experimental
m=valores de caracteristicas del material;
a=valores de características 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; %DEFORMACION PLASTICA%


    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*sigma
y(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')
```

APENDICE B

MAQUINA DE ENSAYOS DE RUPTURA SOILTEST

Marca:	Soiltest
Modelo	CT-900
Norma:	ASTM C-39
Unidad de respuesta:	Lbf

APENDICE C

VALORES DE LAS RESPUESTAS MECANICAS DEL MATERIAL

DIAS DE CURADO	DIAS DE CURADO	E	σY	m	a
5%	7	1944.89	58.11	0.005	0.086
	14	3029.91	45.27	0.005	1.9
	21	4447.439	44.13	0.01	1.9
	28	5903.17	58.8	0.035	1
7.5%	4	1084.3	13.5	0.01	1.5
	11	2026.5	55.51	0.01	0.3
	18	4222	63.08	0.099	0.4
	25	4722.5	58.8	0.01	0.8
10%	7	1973.55	55.14	0.002	0,4
	14	3871.51	59	0.2	0,5
	21	5470.58	60	0.002	0,11
	28	4236.19	50	0.005	0,45
12.5%	4	1590.41	28.28	0.0017	0.1
	11	5470.61	55.51	0.00975	0.154
	18	4331.58	51.01	0.1	0.321
	25	5835.29	59.27	0.0022	0.284
15.0%	7	2147.91	34.81	0.001224	0.69
	14	5923.11	60	0.09	0.65
	21	4914.88	62.41	0.01524	0.1
	28	4802.89	61	0.00354	0.45
17.5%	4	1805.88	45.86	0.00029	0.192
	11	2241.89	45.56	0.0023	0.262
	18	4265.38	50.45	0.0076	0.175
	25	4825.12	61.28	0.00136	0.093
20%	7	2263.96	51.49	0.0249	0.11
	14	2300	50	0.024	1.1
	21	4068.98	57	0.003	0.5879
	28	5616.51	81	0.03	0.2697
22.5%	4	1765	50	0.007	0,05
	11	2300	53.87	0.024	1,1
	18	4300	60	0.024	0,8
	25	4500	70	0.024	0.3235
25.00%	7	4463.8	56	0.01	0.355
	14	4149.04	62	0.01	0.46
	21	3902.96	47	0.01	0.45
	28	3902196	47	0.01	0.014942
27.5%	4	1956.15	38	0.00122	0.9
	11	5007.46	58	0.00265	0.06
	18	3529.07	54	0.00079	0.09
	25	3223.09	46	0.00191	0.09

APENDICE D

DATOS EXPERIMENTALES DEL CONTROL (PASTA DE CEMENTO TIPO I SIN ADICION DE ZEOLITA)

CEMENTO TIPO I: ESFUERZO ÚLTIMO					
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		7	76.96	76.96	79.52
		14	83.80	84.65	84.65
		21	61.27	60.89	71.64
		28	74.39	73.54	74.39
	VALIDACIÓN	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		4	67.55	68.41	76.96
		11	82.94	82.94	84.65
		18	83.80	97.48	82.94
		25	88.08	81.23	83.80

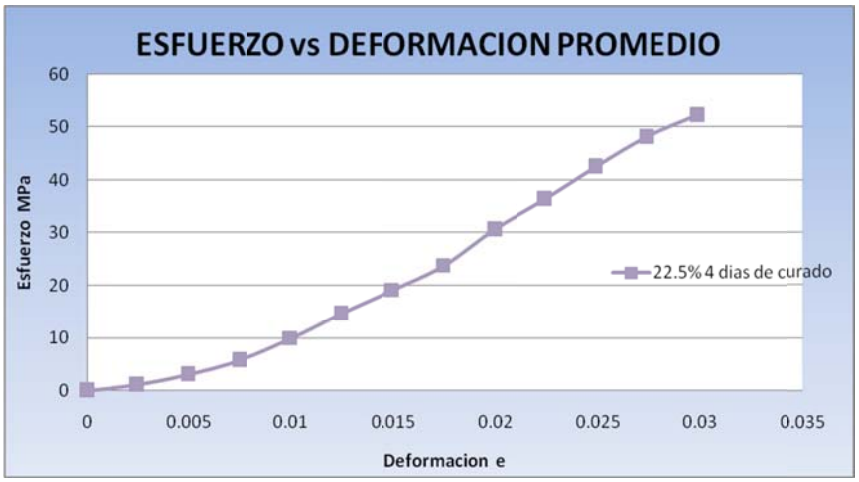
DATOS EXPERIMENTALES DEL CONTROL (PASTA DE CEMENTO TIPO IV SIN ADICION DE ZEOLITA)

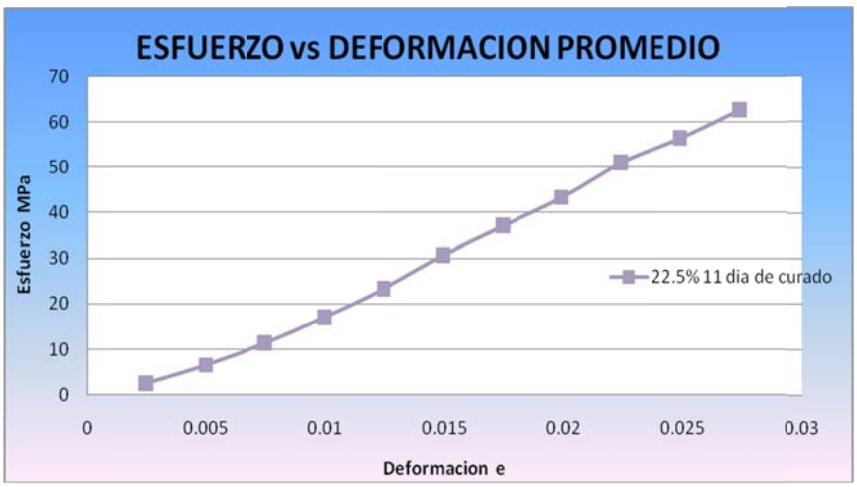
CEMENTO TIPO IV: ESFUERZO ÚLTIMO					
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		7	49.96	45.24	48.07
		14	50.90	49.96	49.01
		21	45.24	40.53	42.42
		28			
	VALIDACIÓN	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		4	45.24	39.59	38.65
		11	42.42	46.19	42.23
		18	40.53	44.30	36.76
		25	46.75	37.33	44.30

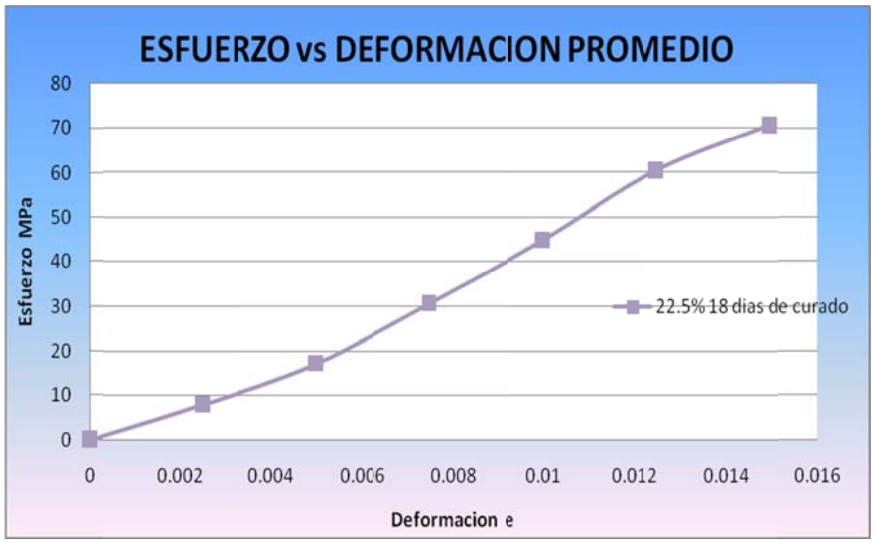
APENDICE E

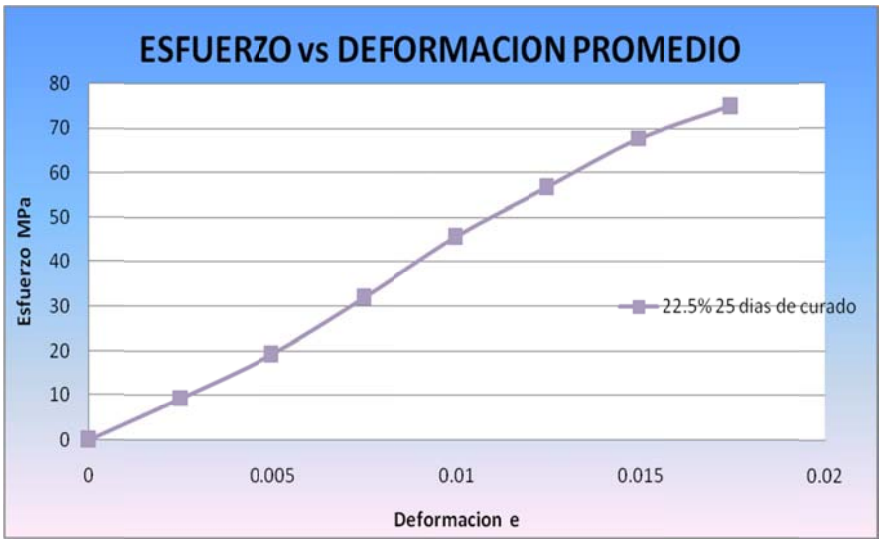
GRAFICAS DE ESFUERZO DEFORMACION DE CADA MUESTRA UTILIZADA EN LA EXPERIMENTACION

Datos de Validación (22.5%)

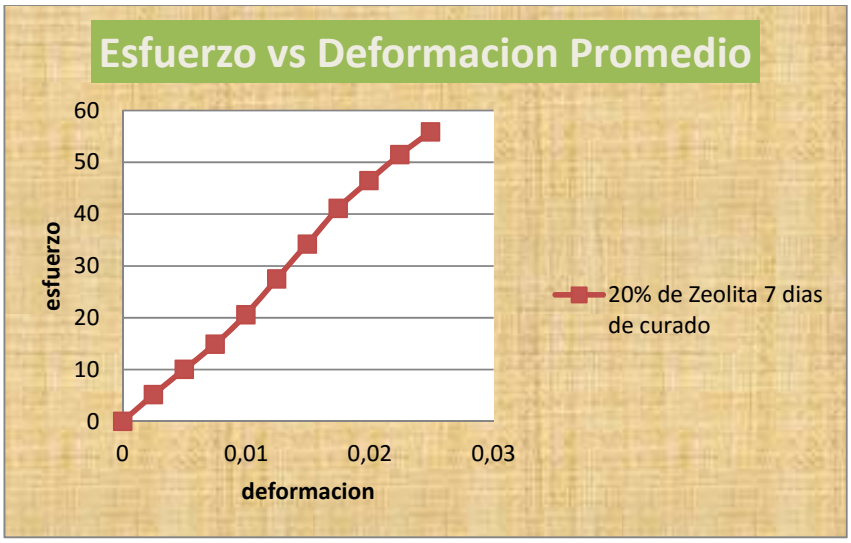


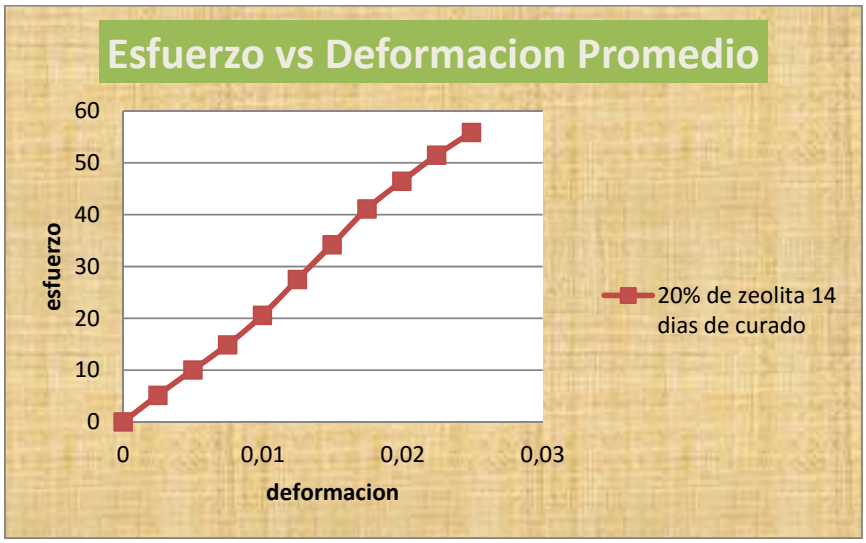


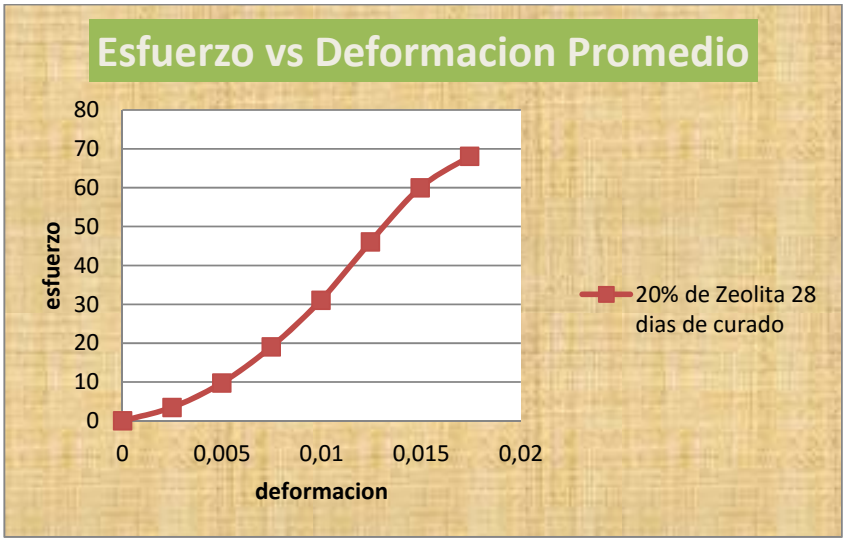

ESFUERZO vs DEFORMACION PROMEDIO
Esfuerzo MPa
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0.002
0.004
0.006
0.008
0.01
0.012
0.014
0.016
Deformacion e
22.5% 18 dias de curado

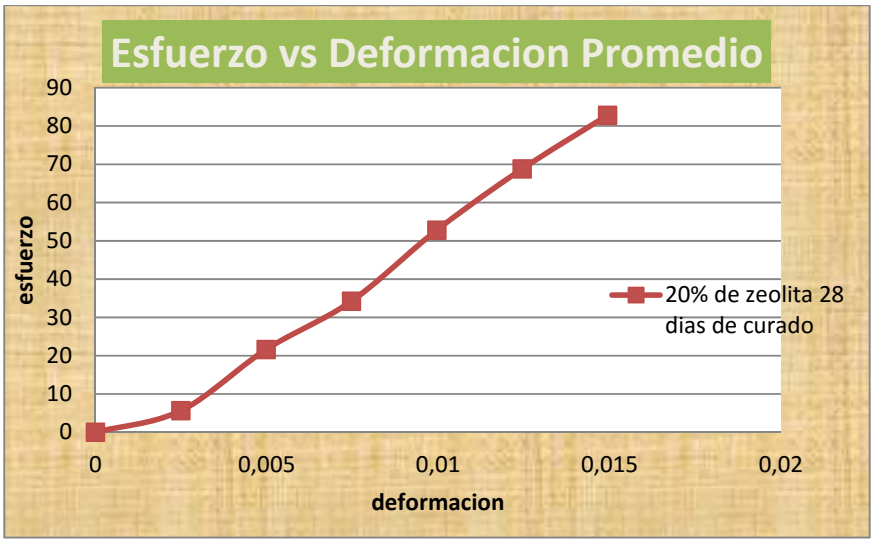

ESFUERZO vs DEFORMACION PROMEDIO
Esfuerzo MPa
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0
0.005
0.01
0.015
0.02
Deformacion e
22.5% 25 dias de curado

Datos de Calibracion (20%)



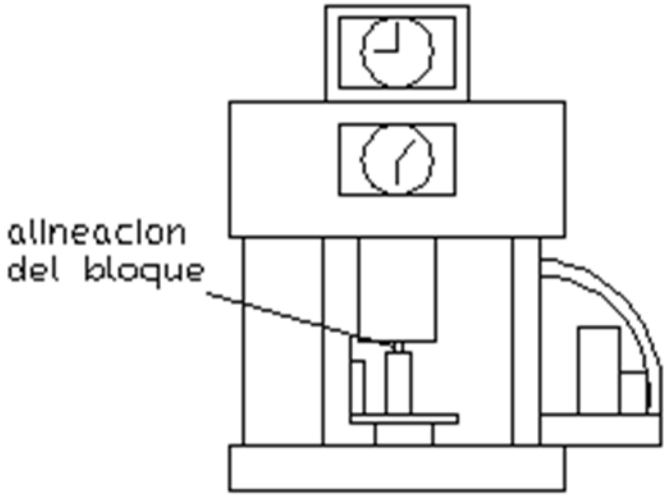



Esfuerzo vs Deformacion Promedio
80
70
60
50
40
30
20
10
0
esfuerzo
0
0,005
0,01
0,015
0,02
deformacion
20% de Zeolita 28 dias de curado

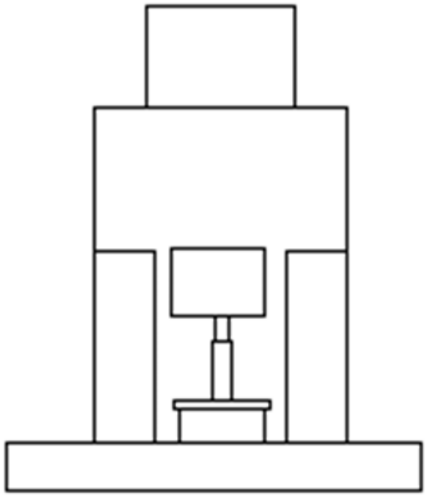

Esfuerzo vs Deformacion Promedio
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
esfuerzo
0
0,005
0,01
0,015
0,02
deformacion
20% de zeolita 28 dias de curado

APENDICE D

PLANO DE MAQUINA DE ENSAYOS PARA RUPTURA



VISTA FRONTAL
ESCALA 1:10



VISTA LATERAL
ESCALA 1:10

FIMCP-ESPOL				FECHA / NOMBRE
			Dibujo	08/09/08
			Revisado	08/09/08
PROYECTO: MAQUINA DE ENSAYOS DE RUPTURA			PLANO No: 1	
	ESCALA: 1:10	CONTIENE: Vista frontal y lateral		
		MATERIALES: ACERO		