



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

“Simulación Del Comportamiento Del Cemento Tipo I,
Adicionando Zeolita Ecuatoriana Al 20% Con Un Curado En
Agua.”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Miguel Ángel Eras Correa

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres, hermanos, familiares y amigos, especialmente a mi novia Lady, que supieron estar junto a mí, en todo momento, a las personas que coordinaron el tópicó para la graduación sin los cuales no hubiera podido cristalizar este presente trabajo de tesis.

DEDICATORIA

ESTE TRABAJO
REALIZADO CON
ESFUERZO ESTÁ
DEDICADO A MIS
PADRES, HERMANOS,
FAMILIARES Y A MI
NOVIA.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Dra. Cecilia Paredes V.

DELEGADO DEL DECANO DE LA FIMCP

PRESIDENTE

Ing. Rodrigo Perugachi B.

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Mauricio Cornejo M.

VOCAL

Ing. Juan Pindo M.

VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

Miguel Ángel Eras Correa

RESUMEN

Uno de los principales objetivos a tratar en este trabajo de investigación, fue simular el comportamiento de la pasta de cemento tipo I en presencia de zeolita ecuatoriana como aditivo en diferentes porcentajes de concentración, en varios tiempos de curado en agua teniendo como variable de respuesta la resistencia a la ruptura.

Para esto, se diseñó un modelo experimental usando 20% de aditivo de zeolita ecuatoriana en la mezcla de la pasta de cemento, a diferentes días de curado al agua.

Paralelamente, se realizaron otros ensayos con el mismo procedimiento, con un diferentes valores de porcentajes de aditivo de zeolita ecuatoriana en la mezcla de la pasta de cemento, 5%, 10%, 15% y 25%.

Los resultados que se obtuvieron producto de los ensayos, se analizaron de manera individual y grupal, mediante métodos estadísticos los cuales dieron a conocer que el método de curado al agua incidió significativamente y de manera positiva, en el esfuerzo a la ruptura.

Adicionalmente, para obtener el mejor esfuerzo a la ruptura se debió tener un curado al agua con un 15% de adición de zeolita ecuatoriana en la pasta de cemento.

Además, con los resultados obtenidos se pudo hallar un método eficaz para poder simular el comportamiento de la pasta de cemento, utilizando el software Matlab.

INDICE GENERAL

| | Pág. |
|------------------------|------|
| RESUMEN..... | VI |
| ÍNDICE GENERAL..... | VIII |
| ABREVIATURAS..... | XI |
| SIMBOLOGÍA..... | XII |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XIII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XIV |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |

CAPITULO 1

| | |
|--------------------------------------|---|
| 1. GENERALIDADES..... | 3 |
| 1.1. Planteamiento del problema..... | 3 |
| 1.2. Objetivos..... | 4 |
| 1.3. Metodología..... | 5 |
| 1.4. Estructura de la tesis..... | 5 |

CAPITULO 2

| | |
|--------------------------------|----|
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 8 |
| 2.1. El Cemento..... | 8 |
| 2.1.1. Generalidades..... | 8 |
| 2.2. Material puzolánico..... | 16 |
| 2.2.1. Generalidades..... | 16 |
| 2.2.2. Zeolita..... | 17 |
| 2.3. Métodos de curado..... | 18 |
| 2.3.1. Generalidades..... | 18 |
| 2.3.2. Curado en agua..... | 20 |

CAPITULO 3

| | |
|---|----|
| 3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL..... | 24 |
| 3.1. Diseño experimental..... | 24 |
| 3.2. Preparación y ensayo de probetas..... | 24 |
| 3.3. Simulación computacional..... | 31 |

CAPÍTULO 4

| | |
|---|----|
| 4. RESULTADOS..... | 34 |
| 4.1. Presentación de resultados experimentales..... | 34 |
| 4.2. Análisis estadístico..... | 41 |
| 4.3. Modelo matemático y simulación..... | 60 |

CAPÍTULO 5

| | |
|--|----|
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 66 |
|--|----|

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

| | |
|-----|--------------|
| g | gramo |
| Mpa | megapascales |
| min | minuto |
| plg | pulgada |
| seg | segundo |

SIMBOLOGÍA

| | |
|---------------------|--------------------------|
| σ_{n+1}^{tr} | Esfuerzo n+1 trial |
| σ_n | Esfuerzo n |
| σ_{n+1} | Esfuerzo n+1 |
| E | Módulo de Young |
| $\Delta\varepsilon$ | Delta deformación |
| $Y_{,n}$ | Esfuerzo n (anterior) |
| $Y_{,n+1}$ | Esfuerzo n+1 (posterior) |
| $\Delta\lambda$ | Delta landa |
| H' | H prima |
| sgn | Función signo |
| ε_{ult} | Deformación última |
| σ_{ult} | Esfuerzo de ruptura |
| S_y | Esfuerzo de fluencia |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pag. |
|--|------|
| Figura 1.1. Metodología para la experimentación..... | 5 |
| Figura 2.1 Proceso tradicional para producir cemento portland..... | 10 |
| Figura 2.2 Estructura de concreto para los hornos, molinos y ciclones en la torre 1 de la planta clinal (“San Eduardo” Holcim- Ecuador)..... | 13 |
| Figura 3.1 Return mapping: isotropic hardening..... | 32 |
| Figura 4.1 Intervalos de confianza para el promedio de las muestras en el día 4..... | 38 |
| Figura 4.2 Días de curado vs. Esfuerzo a la ruptura..... | 43 |
| Figura 4.3 Días de curado vs. Esfuerzo a la ruptura..... | 46 |
| Figura 4.4 Días de curado vs. Esfuerzo a la ruptura..... | 51 |
| Figura 4.5 % de zeolita vs. Esfuerzo a la ruptura..... | 51 |
| Figura 4.6 Días de curado vs. Esfuerzo a la ruptura a diferentes porcentajes de adición de zeolita..... | 52 |
| Figura 4.7 % de zeolita vs. Esfuerzo a la ruptura a diferentes días de curado porcentajes de adición de zeolita..... | 53 |
| Figura 4.8 Gráfica que indica la aleatoriedad de los datos..... | 55 |
| Figura 4.9 Gráfica que indica la normalidad de los datos..... | 55 |
| Figura 4.10 Días de curado vs. Esfuerzo a la ruptura..... | 57 |
| Figura 4.11 % de zeolita vs. Esfuerzo a la ruptura..... | 57 |
| Figura 4.12 Días de curado vs. Esfuerzo a la ruptura a diferentes porcentajes de adición de zeolita..... | 58 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.13 | % de zeolita vs. Esfuerzo a la ruptura a diferentes días de curado porcentajes de adición de zeolita..... | 59 |
| Figura 4.14 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 20% de zeolita a un curado de 7 días..... | 60 |
| Figura 4.15 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 20% de zeolita a un curado de 14 días..... | 61 |
| Figura 4.16 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 20% de zeolita a un curado de 21 días..... | 61 |
| Figura 4.17 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 20% de zeolita a un curado de 28 días..... | 62 |
| Figura 4.18 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 22.5% de zeolita a un curado de 4 días..... | 62 |
| Figura 4.19 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 22.5% de zeolita a un curado de 11 días..... | 63 |
| Figura 4.20 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 22.5% de zeolita a un curado de 18 días..... | 63 |
| Figura 4.21 | Diagrama esfuerzo vs. Deformación para 22.5% de zeolita a un curado de 25 días..... | 64 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pag. |
|----------|---|
| Tabla 1 | Esfuerzos a la ruptura con 20% de zeolita.....35 |
| Tabla 2 | Esfuerzos a la ruptura con 22.5% de zeolita.....35 |
| Tabla 3 | Datos de esfuerzos de ruptura de las 3 muestras del día 4.....36 |
| Tabla 4 | Intervalo de confianza para el promedio de la muestras del día 4.....39 |
| Tabla 5 | Valores de módulo de young, esfuerzo a la fluencia m y a, para cada día de muestreo.....40 |
| Tabla 6 | Valores de módulo de young, esfuerzo a la fluencia m y a, para cada día de muestreo.....41 |
| Tabla 7 | Esfuerzos de ruptura correspondientes al 20% de adición de zeolita para los diferentes días de curado.....42 |
| Tabla 8 | Intervalos de confianza para los esfuerzos de ruptura.....42 |
| Tabla 9 | Valores de dunnnett obtenidos del programa statistica 7.....44 |
| Tabla 10 | Esfuerzos de ruptura correspondientes al 22.5% de adición de zeolita para los diferentes días de curado.....45 |
| Tabla 11 | Intervalos de confianza para los esfuerzos de ruptura.....45 |
| Tabla 12 | Valores de dunnnett obtenidos del programa statistica 7.....47 |
| Tabla 13 | Esfuerzos de ruptura correspondientes a los porcentajes de adición de zeolita para los diferentes días de curado.....48 |
| Tabla 14 | Intervalos de confianza para los esfuerzos de ruptura.....50 |

| | | |
|----------|--|----|
| Tabla 15 | Estadístico p, de los días de curado..... | 54 |
| Tabla 16 | Estadístico p, del porcentaje de zeolita en la mezcla..... | 54 |
| Tabla 17 | Estadístico p, del análisis de la combinación de dos factores..... | 54 |
| Tabla 18 | Intervalos de confianza para los esfuerzos de ruptura..... | 56 |
| Tabla 19 | Error relativo entre los esfuerzos teórico y experimental para 20% de adición de zeolita..... | 65 |
| Tabla 20 | Error relativo entre los esfuerzos teórico y experimental para 20% de adición de zeolita..... | 65 |

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2000 hasta la actualidad la industria de la construcción en el Ecuador ha aumentado en un 60%. Uno de los principales insumos dentro de esta industria es el cemento, cuya demanda al momento ya no puede ser cubierta por la oferta local.

Por otro lado, al aumentar la demanda del cemento, aumenta la contaminación y la disminución de la materia prima que es un recurso natural no-renovable.

Para este caso de investigación se tiene la necesidad de probar que la adición de un aditivo natural (zeolita), que se encuentra en nuestro país, puede alterar la resistencia a la ruptura.

Se diseña un modelo experimental usando 20% de aditivo de zeolita ecuatoriana en la mezcla de la pasta de cemento, a diferentes días de curado al agua.

Paralelamente se realizan otros ensayos, con el mismo procedimiento, variando el porcentaje de aditivo de zeolita ecuatoriana en la mezcla de la pasta de cemento, 5%, 10%, 15% y 25%.

En el caso que la zeolita agregada tenga los resultados esperados, será el inicio de una serie de investigaciones las cuales finalmente llegaren a determinar que este material sería un buen sustituto del actual, con las

consecuencias del caso: bajar niveles de contaminación y alargar la vida útil del resto de materias primas que se utilizan para la elaboración de cemento.

Cabe señalar que la importancia de este estudio puede dar inicio a una serie de evaluaciones técnicas que incidirían en la explotación de nuevos recursos naturales y por ende nuevas fuentes de ingresos para los ecuatorianos.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

La imperiosa necesidad de tener alternativas de materias primas en el sector de la construcción, y mucho mejor si se tiene mejores propiedades, crea el ambiente propicio para la elaboración de la presente investigación científico-tecnológica, que permitirá modelar el comportamiento del cemento adicionando porcentajes de aditivos, 20% de zeolita ecuatoriana, en el presente caso manteniendo la relación agua/cemento, en diferentes días de curado en agua, debido a que se tiene la hipótesis de que este aditivo puede mejorar propiedades mecánicas especialmente, la resistencia a la ruptura.

Entonces, al estudiar si la zeolita como material puzolánico tiene la posibilidad de sustituir como materia prima en la industria cementera, a los aditivos usados actualmente en la producción de cemento,

podríamos reducir la emisión de CO₂ como resultado de la disminución de la cantidad de clinker en la formulación del cemento.

Se busca también estudiar la posibilidad de mejorar la resistencia a la compresión del cemento que se comercializa actualmente.

1.2. Objetivos

El objetivo general es simular el comportamiento de la pasta de cemento tipo I en presencia de zeolita ecuatoriana como aditivo en 20% de concentración, en varios tiempos de curado en agua teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Los objetivos específicos son:

- ❖ Analizar estadísticamente la resistencia a la ruptura de las diferentes mezclas.
- ❖ Estudiar el efecto que tiene la adición de mordenita a diferentes concentraciones en la pasta de cemento, con curado al agua.
- ❖ Analizar estadísticamente el efecto del tiempo de curado en la mezcla comparados con los demás porcentajes de adición.
- ❖ Construir el modelo matemático que describa el comportamiento mecánico del cemento con la adición de la zeolita, con la ayuda de un programa computacional.

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

1.3. Metodología

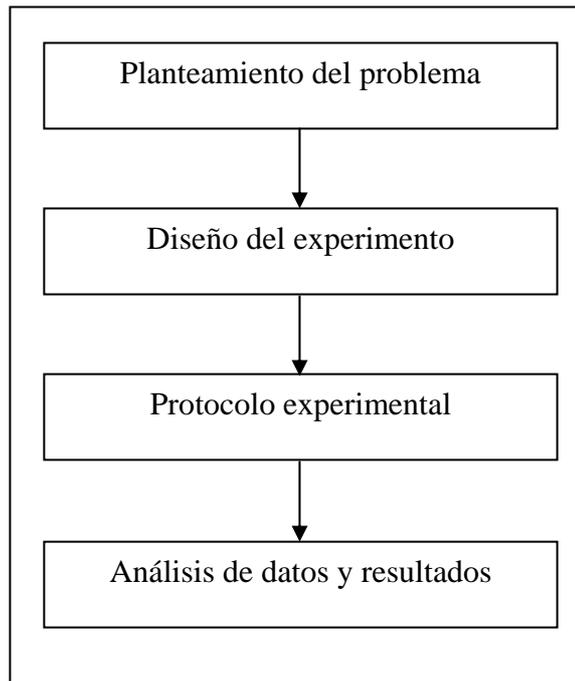


FIGURA 1.1. METODOLOGÍA PARA LA EXPERIMENTACIÓN

La metodología a seguir será básicamente la consecución de los pasos descritos en la figura 1.1., además cabe indicar que cada uno de estos pasos serán descritos ampliamente en el desarrollo de la presente tesis.

1.4. Estructura de la tesis

En el capítulo 1 se tratará básicamente acerca de la forma del planteamiento de la tesis y del desarrollo de la misma.

El capítulo 2 incluye la revisión de la literatura, donde se observa las propiedades del cemento, aditivos a usarse en la mezcla, como también se revisa los diferentes métodos de curado para el cemento y se estudia el curado en agua que es el que usaremos en nuestra experimentación.

En el capítulo 3 se plantea el modelo para la experimentación, desde luego la preparación y ensayo de las probetas, para luego desarrollar el modelo matemático para simular el comportamiento de una de las propiedades mecánicas de la mezcla.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de una manera adecuada y sustentada en un análisis estadístico para poder entenderlos, y luego simular el comportamiento de una propiedad mecánica de la mezcla. Se realizó análisis estadístico en el cual se observó la variación de los parámetros a estudiar, los cuales son los días de curado y el porcentaje adicionado de zeolita ecuatoriana en la mezcla agua/cemento, además en esta parte específica se hará la comparación del modelo matemático con los datos obtenidos experimentalmente y de ser necesario realizar un ajuste al modelo construido.

Finalmente en el capítulo 5, se expresaron las conclusiones obtenidas en el transcurso del presente trabajo, así como la

exposición de las posibles recomendaciones para éste y futuros trabajos de similar envergadura e interés.

CAPÍTULO 2

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cemento

2.1.1. Generalidades

El cemento es una de las principales materias primas para la industria de la construcción. Este ha estado presente en los adelantos de la civilización. Al mezclarse con aditivos minerales, más agua, más agregados finos y gruesos, y luego endurecerse, la mezcla se convierte en el concreto, siendo éste el producto terminado mucho más interesante para la industria de la construcción, por cuanto de esta manera se le puede dar las formas deseadas, tales como edificios, carreteras, puentes, cimentaciones para estructuras metálicas, es decir, la mayoría de las ramas de la ingeniería están ligadas a este material que desde hace mucho tiempo ha marcado, por su

utilidad, un importante progreso dentro de la civilización humana.

Es importante conocer que el cemento fue inventado por los romanos hace aproximadamente 2000 años, de una forma sui géneris como todo lo sucedido con otros grandes descubrimientos hasta la fecha dados. Al hacer fuego en un agujero recubierto de piedras, consiguieron deshidratar y descarboxilar parcialmente las piedras calcáreas o el yeso, convirtiéndolas en polvo que se depositó entre las piedras. Al llover dicho polvo unió las piedras entre sí. Los egipcios utilizaron un cemento fabricado con yeso impuro calcinado, que sirvió para unir los bloques de piedra en la construcción de las pirámides. El secreto de una larga duración del cemento se perdió hasta la edad media, cuando fue posible fabricar cemento de mediana duración. En 1756, Smeaton descubrió que los mejores cementos se obtenían al mezclar caliza con un 20-25% de materia arcillosa. En 1845, Jonson fijó las proporciones de materias primas a utilizar, así como la temperatura de cocción, con la que se asistió al inicio de la industria de cemento Portland. Dicho nombre le fue dado por su similitud con la piedra de Portland. Actualmente, hay tres procesos de fabricación de cemento que utilizan hornos

rotativos desarrollados en Inglaterra en 1855; vía seca, vía seca con precalentamiento/precalcinación y vía húmeda. [8]

La fabricación del cemento se la resume en la figura 2.1.

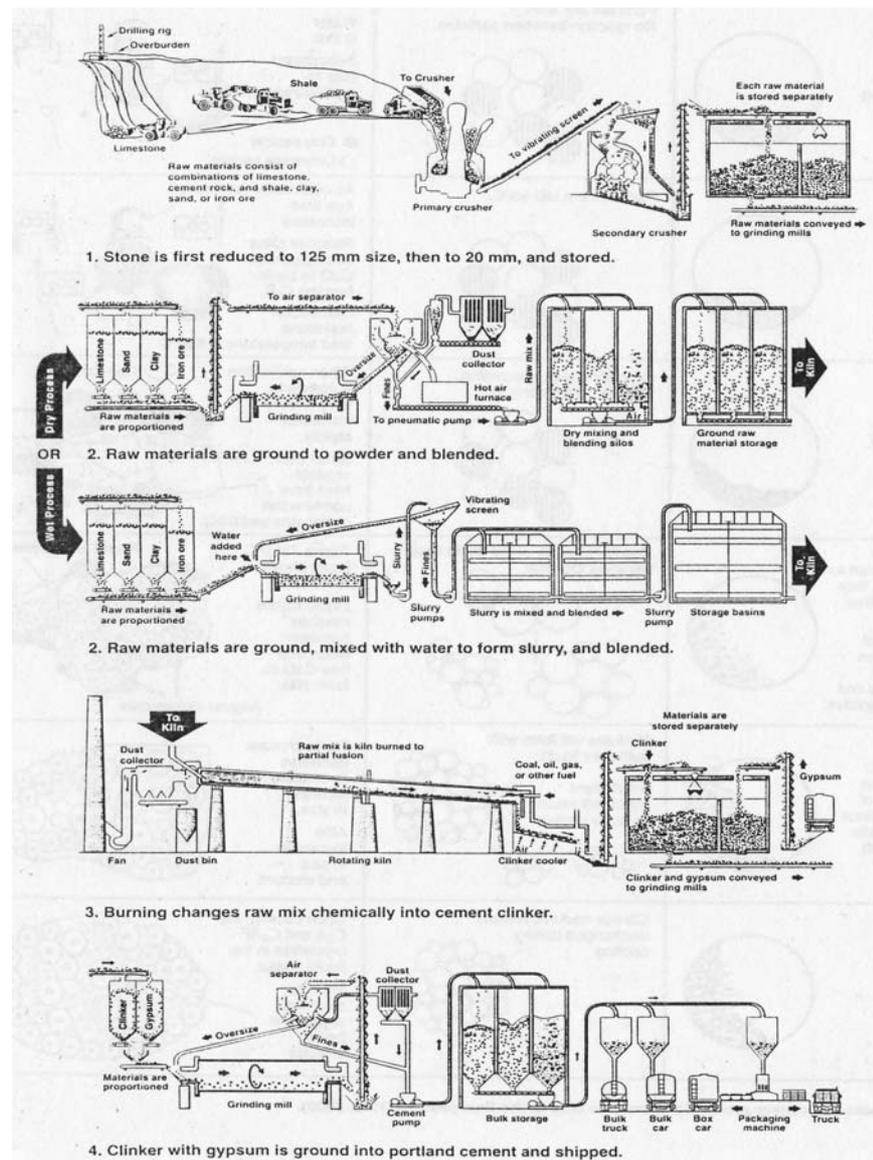


FIGURA 2.1. PROCESO TRADICIONAL PARA PRODUCIR CEMENTO PORTLAND.
Fuente: "Design and Control of Concrete Mixtures".

Los tipos de cementos Portland son:

Tipo I.- Es el cemento Portland normal, destinado a obras en general, cuando en las mismas no se especifique la utilización de otro tipo. (Edificios, conjuntos habitacionales). Libera más calor de hidratación que otros tipos de cemento.

Tipo II.- De resistencia moderada a los sulfatos, es el cemento Portland destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiera moderado calor de hidratación. (Puentes, tuberías de concreto).

Tipo III.- De resistencia inicial elevada, óptimo cuando se necesita que la estructura reciba carga lo antes posible o cuando es necesario desencofrar a los pocos días del vaciado.

Tipo IV.- Se requiere bajo calor de hidratación en que no deben producirse dilataciones durante el fraguado.

Tipo V.- Usado donde se requiera una elevada resistencia a la acción concentrada de los sulfatos (canales, alcantarillas, obras portuarias). [10]

La determinación del calor de hidratación se hace mediante calorímetros, habiéndose seguido diversos métodos como:

- Método del Termo o Vaso Deward
- Método adiabático
- Método del calor de disolución

La resistencia mecánica de un cemento se aprecia por la resistencia que es capaz de desarrollar una vez fraguado y endurecido. Se debe a la cohesión de los granos de cemento y a la adherencia de los elementos que agreguen: arena, grava, etc.

Las normas exigen una determinada resistencia a la tracción y compresión, pero como éstas varían mucho en la manipulación, temperatura, grado de compresión, agua de amasado, conservación, etc., las fijan también. [10]

En cuanto a las aplicaciones podemos ver que son muy variadas, pero principalmente se lo usa en edificaciones, puentes, carreteras, sistemas de riego, etc. En la ingeniería mecánica se la usa para la cimentación de equipos y maquinarias. La siguiente figura ilustra una aplicación del cemento.



FIGURA 2.2. ESTRUCTURA DE CONCRETO PARA LOS HORNOS, MOLINOS Y CICLONES EN LA TORRE 1 DE LA PLANTA CLICAL ("SAN EDUARDO" HOLCIM-ECUADOR).

Propiedades

El cemento Portland es una mezcla de varios compuestos como el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico los cuales conforman el 90% o más del peso del cemento .

El diámetro promedio de una partícula típica de cemento es de aproximadamente 10 micras. Si todas las partículas de cemento tuvieran ese diámetro promedio, el cemento Portland contendría aproximadamente 298,000 millones de granos por kilogramo, pero de hecho existen unos 15 billones de

partículas debido a la alta variabilidad del tamaño de partícula. Las partículas en un kilogramo de cemento Portland tienen un área superficial aproximada de 400 metros cuadrados.

El hidrato de silicato de calcio es el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades en el campo de la ingeniería del concreto, fraguado, endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional principalmente dependen del gel del hidrato de silicato de calcio.

La composición química del hidrato de silicato de calcio es en cierto modo variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO_2), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. Las partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases

cristalinas. Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria, la relación mínima Agua – Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25.

El calor que se produce cuando el concreto está en el proceso de fraguado es conocido como calor de hidratación. El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción.

En condiciones climáticas de baja temperatura, el calor de hidratación ayudará a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación. En zonas cálidas, el calor en estructuras masivas, tales como presas, puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de endurecer.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua, porque la velocidad determinará el tiempo de fraguado y de endurecimiento. El yeso, que es adicionado en el molino de cemento durante la molienda del clinker, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del

cemento Portland. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado. [10]

2.2. Material puzolánico

2.2.1. Generalidades

Los aditivos son sustancias diferentes a los ingredientes normales, que se agregan a los morteros o al concreto para alterar las propiedades normales a fin de mejorarlas para un fin particular.[5]

Uno de los aditivos objeto de este estudio es la puzolana, principalmente la zeolita ecuatoriana.

Por esto, deberemos conocer qué son las puzolanas. Podemos decir que las puzolanas son materiales naturales o artificiales compuestos principalmente por sílice amorfa, que por sí solas poseen poco o ningún valor cementante o propiedades hidráulicas, pero que finamente divididas y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio o cal y forman un compuesto que posee propiedades aglomerantes.

Dentro de las puzolanas encontraremos las naturales y artificiales.

Dentro las artificiales podemos mencionar algunas:

- Cenizas volantes (fly ash)
- Arcillas activadas térmicamente
- Microsílice
- Cenizas de cáscaras de arroz

Entre las naturales podemos rescatar las siguientes:

- Cenizas volcánicas
- Tobas volcánicas o zeolitas
- Diatomitas

[9]

2.2.2. Zeolita

Las zeolitas naturales son un grupo de aluminosilicatos hidratados de metales alcalinos y alcalino-térreos. El término zeolita se utiliza para designar a una familia de minerales naturales con propiedades particulares como el intercambio de iones y la desorción reversible de agua. Esta última propiedad

es la que da origen a su nombre, que se deriva de dos palabras griegas: *zeo*: que ebulle y *lithos*: piedra. [9]

Para nuestro caso usaremos una zeolita que llamaremos zeolita tipo I, la cual se encuentra en nuestro país, por lo que la obtención de ésta es más sencilla.

Además, esto es una formidable ventaja ya que, de comprobarse los beneficios cuando se adiciona al concreto en cuanto a sus propiedades físicas, la materia prima estará en nuestro país y por ende un ahorro significativo en los costos en relación al beneficio que obtendremos.

2.3. Métodos de curado

2.3.1. Generalidades

Se llama curado al procedimiento que se utiliza para promover la hidratación del cemento, y consiste en un control de movimiento de temperatura y humedad hacia adentro y hacia fuera de la mezcla, donde esté presente el cemento.

La necesidad de curar proviene del hecho de que la hidratación del cemento sólo se logra en capilares llenos de agua. Por eso es necesario evitar la pérdida de humedad de los capilares causada por la evaporación. Además, el agua que se pierde internamente por autodesecación se tiene que

reemplazar con agua del exterior; o sea, se debe hacer posible el ingreso del agua hacia la mezcla. [10]

La mezcla puede mantenerse húmeda con el uso de tres métodos de curado:

Curado por interposición de un medio húmedo: este método mantiene la presencia de agua de mezclado en el concreto durante el período inicial de endurecimiento. Este tipo de curado incluye al estacionamiento o inmersión, al rociado y a las cubiertas de húmedas saturadas.

Estos métodos proporcionan un cierto enfriamiento a través de la evaporación, lo cuál es beneficioso en climas cálidos.

Curado por control de la evaporación: método que evita la pérdida del agua de mezclado del concreto sellando la superficie. Esto se puede lograr cubriendo al concreto con papel impermeable o con hojas de plástico, o aplicando compuestos de curado que formen membranas.

Curado por aplicación artificial: método que acelera la ganancia de resistencia suministrando calor y humedad adicional al concreto. Esto se logra normalmente con vapor directo, serpentines de calentamiento, o cimbras o almohadillas calentadas eléctricamente. [10]

El método o la combinación de métodos elegidos dependerán de factores tales como la disponibilidad de los materiales de curado, el volumen y forma del concreto, las instalaciones de producción (en obra o en planta), la apariencia estética y la economía.

2.3.2. Curado en agua

En el caso de un elemento con una relación superficie/volumen pequeña, el curado se puede mejorar engrasando o mojando las cimbras antes del colado. También se pueden mojar las cimbras durante el endurecimiento y, después del descimbrado, el concreto se debe rociar y envolver en hojas de polietileno o de algún otro material de recubrimiento adecuado.

Las superficies grandes de concreto, como las losas para carreteras, presentan un problema más grave. Para evitar que la superficie se cuartee al secarse, se debe evitar que haya pérdida de agua aún desde antes del fraguado. Puesto que en ese momento la mezcla está mecánicamente débil, es necesario colgar un elemento de protección sobre el mismo. Este tipo de cubierta se requiere en climas secos, pero también puede ser útil para evitar que la lluvia manche la superficie de la mezcla fresca. [3]

2.4. Estudios previos

Mundialmente se han realizado estudios en los cuales denotan un interés en encontrar materiales sustitutos para los aditivos del cemento, mejorando una o varias propiedades de la pasta del cemento.

B.Y. Pekmezci*, **S. Akyuz** en su trabajo “Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete”, encontraron que las puzolanas proporcionan una posibilidad de producción económica en la industria del concreto y puede mejorar las propiedades del concreto tal como la resistencia a la compresión.

Los efectos de las puzolanas en las propiedades del concreto varían con el volumen y tipo de puzolana.

En el estudio que se realizó, se investigó el efecto de una puzolana natural en las propiedades del concreto. Quince mezclas de concreto fueron producidas en tres series con mezclas de control, teniendo 300, 350 y 400 kilogramos de contenido de cemento. Estas mezclas de control fueron modificadas para tener una combinación de 250, 300 y 350 kilogramos de contenido de cemento y 40, 50, 75 y 100 kilogramos de adición de puzolana por cada metro cúbico de concreto. La eficiencia de la puzolana fue obtenida usando las ecuaciones de esfuerzo de Bolomey y Feret a los 28 días de

fraguado. El máximo contenido de puzolana con la eficiencia óptima fue determinada. El estudio presenta que la eficiencia se obtiene de cada ecuación de esfuerzo y son similares, estos valores decrecen con el incremento de la proporción puzolana/cemento. [11]

Hani H. Nassif *, **Husam Najm**, **Nakin Suksawang** en su estudio “Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC” mencionan que el objetivo de este estudio es evaluar el efecto de puzolanas como ceniza, humo de sílice y escoria de alto horno y el efecto de curado en el módulo elástico del concreto de alto rendimiento y su variación con el tiempo.

En Estados Unidos de América, el concreto de alto rendimiento es uno de los materiales más importantes disponible para los estados federales, las agencias locales, y el público general para ser utilizado en las nuevas construcciones y en la rehabilitación de edificios, carreteras, y puentes. Con el aumento acelerado del uso de este nuevo material, hay una necesidad de predecir con precisión sus propiedades como módulo de elasticidad, permeabilidad, y durabilidad.

El hormigón de alto rendimiento es uno de los materiales más significativos. La resistencia de compresión y el módulo de elasticidad son dos de las propiedades más importantes que deben conocerse. Además, el conocimiento del módulo de elasticidad a edad temprana

y cómo cambia con el tiempo es importante para predecir efectos a largo plazo y durabilidad de estructuras de concretos. Por ello, hay una necesidad para evaluar el módulo de elasticidad y estudiar los factores que influyen en su predicción con el tiempo. [12]

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. Diseño experimental

Cuando se desea realizar un método de diseño experimental se lo realiza para obtener la mayor información posible de uno o varios procesos que afectan a los efectos de interés de una manera rápida, económica, simple y precisa.

Para este caso se realizó un modelo factorial con un bloque de respuesta, que cumple una variación en el tiempo 7, 14, 21 y 28 días, y esto con el curado en agua y con una adición de la zeolita ecuatoriana del 20%.

3.2. Preparación y ensayo de las probetas

Para el efecto de realizar estos ensayos preparamos tanto los materiales como los equipos.

3.2.1. Materiales

Los materiales a usar se los registra en la siguiente lista:

- ❖ Recipiente plástico para dejar las muestras con agua
- ❖ Moldes para los especímenes cúbicos

Los equipos que se utilizaron:

- ❖ Balanza electrónica Sartorius
- ❖ Máquina mezcladora Hobart
- ❖ Prensa de compresión
- ❖ Trituradora de mandíbula
- ❖ Trituradora de rodillos
- ❖ Molino de disco
- ❖ Molino de bolas
- ❖ Tamizador eléctrico

Los insumos que se usaron:

- ❖ Cemento portland tipo I
- ❖ Zeolita ecuatoriana
- ❖ Agua

La molienda se refiere básicamente al proceso para llegar a la pulverización de la zeolita ecuatoriana, entonces obviamente se utilizará la zeolita que se recogió, en el recinto Casas

Viejas, vía a Guayaquil-Progreso, provincia del Guayas, Ecuador.

PROCESO DE MOLIENDA

1. Disminuir la granulometría de la zeolita, lo suficiente para poder molerlo en el molino de mandíbulas.
2. Para una mejor molienda, es necesario agregar la zeolita por porciones sucesivas, para evitar que se trabe el equipo.
3. Pesar la zeolita ecuatoriana y usar la cantidad requerida.
4. Encender el molino de tornillo, al momento de agregar es necesario agregarla por porciones sucesivas.
5. Repetir el procedimiento con todo el material.
6. Cuartear la zeolita utilizando elementos de ruptura manuales como combos.
7. Pesar 100 g de la porción de cuarteo y llevarlos al tamizador, utilizar tamices # 14, 18, 40, 50.
8. Regresar al proceso de molienda y encender el molino de disco, agregar el material en porciones sucesivas.
9. Repetir el procedimiento con todo el material
10. Cuartear la zeolita.

11. Tomar una porción del cuarteo y pesar 100 gramos
12. Llevar estos 100 g al tamizador, con tamices # 50, 100, 200, 325 y fondo.
13. Regresar al proceso de molienda y encender el molino de bolas, agregar el material y moler por 45 minutos
14. Cuartear la zeolita
15. Tomar una porción del cuarteo y pesar 100 g
16. Llevar estos 100 g al tamizador, con tamices # 325
17. Si existe un 60% de material pasante, parar el procedimiento de molienda y usar la zeolita. Si no es así, repetir los pasos del 13 al 18.

Una vez que obtengo los materiales listos para la mezcla procedemos a pesarlos de la siguiente manera:

Para el 20% de adición de zeolita ecuatoriana tenemos lo siguiente 720 g de zeolita ecuatoriana y 2880 g de cemento portland lo que da un total de 3600 g

Para el 22,5% de adición de zeolita ecuatoriana tenemos lo siguiente 810 g de zeolita ecuatoriana y 2790 g de cemento portland lo que da un total de 3600 g

La relación de agua/cemento se lo estableció en 0,3 lo que para las dos mezclas, por tanto se necesitaría pesar 1080 g de agua.

Ahora estamos en capacidad de mezclar, desmoldar y realizar las pruebas de ruptura, esto lo resumiremos en los siguientes puntos:

PROCEDIMIENTO PARA MEZCLA

1. Encerar la balanza electrónica tomando en cuenta la tara del recipiente a usar.
2. Pesar en la balanza electrónica el cemento portland tipo I en la cantidad indicada utilizando el recipiente.
3. Pesar en la balanza electrónica la zeolita en la cantidad indicada utilizando el recipiente.
4. Pesar en la balanza electrónica el agua en la cantidad indicada usando un recipiente que previamente se haya tomado en cuenta la tara.
5. Para homogeneizar los materiales, mezclar el cemento y zeolita en seco en la mezcladora eléctrica por 10 minutos aproximadamente.
6. Apagar la mezcladora, ponerla a velocidad uno, encenderla y agregar agua en forma sucesiva, una vez

que le adicionamos toda, mantener la mezcladora a esta misma velocidad por 45 seg.

7. Apagar la mezcladora, cambiar la velocidad a 2, encender y mezclar por 2 min adicionales.
8. Durante el proceso de mezcla, armar los moldes, recubrir las paredes internas con aceite de grado 10 y limpiar el exceso del mismo, para evitar que en el momento del desmolde se quede pegado a las paredes del molde.
9. Verter la mezcla en los moldes poco a poco hasta la mitad y apisonar de acuerdo a las instrucciones dadas en la norma.
10. Mientras se realiza este paso, no dejar de mover la mezcla para evitar que el agua suba a la superficie y mantener la homogeneidad de la mezcla.
11. Verter la segunda mitad, volver a apisonar.
12. Realizo un compactado de las probetas, este consiste en dar pequeños golpes con el objetivo de retirar el aire interior de la mezcla.
13. Dejo reposar las probetas por dos minutos
14. Elimino el exceso de mezcla de las probetas para mejorar el acabado de la cara superior de la probeta.

15. Cubrir las probetas con láminas plásticas para evitar que pierdan humedad en exceso.

PROCEDIMIENTO PARA DESMOLDE

1. Retiro las láminas plásticas colocado en los moldes el día anterior.
2. Retiro el exceso de mezcla de la cara superior, para definir los bordes de la muestra.
3. Separo los moldes.
4. Marcar las caras superiores de las probetas.
5. Marcar las probetas bajo el código interno establecido para evitar confusiones al momento de realizar las rupturas, ya que tenemos dos tipos de mezclas.
6. Sumergirlas totalmente en agua.

PROCEDIMIENTO PARA PRUEBAS DE COMPRESIÓN

1. Retiro del recipiente con agua, las probetas a ser usadas en el ensayo, reconocidas por el código utilizado.
2. Dejar secar las probetas por unos minutos.
3. Encender y encerrar la máquina de ensayo universal.
4. Encerrar el medidor de deformación.

5. Medir las dimensiones de las probetas.
6. Colocar la probeta en el equipo de tal forma que las caras lisas del mismo estén en contacto con las caras superior e inferior de la prensa respectivamente.
7. Aplicar las cargas y anotar los valores que resulten de intervalos indicados de deformación para nuestro caso será de 5 marcas, cada marca equivale a 0,001”
8. Anotar la carga que produce la ruptura de cada probeta.
9. Repetir este procedimiento para cada probeta y para cada día de ensayo.

3.3. Simulación computacional

Es importante conocer que para llegar a este punto usamos el algoritmo return mapping: isotropic hardening, el cual se describe a continuación:

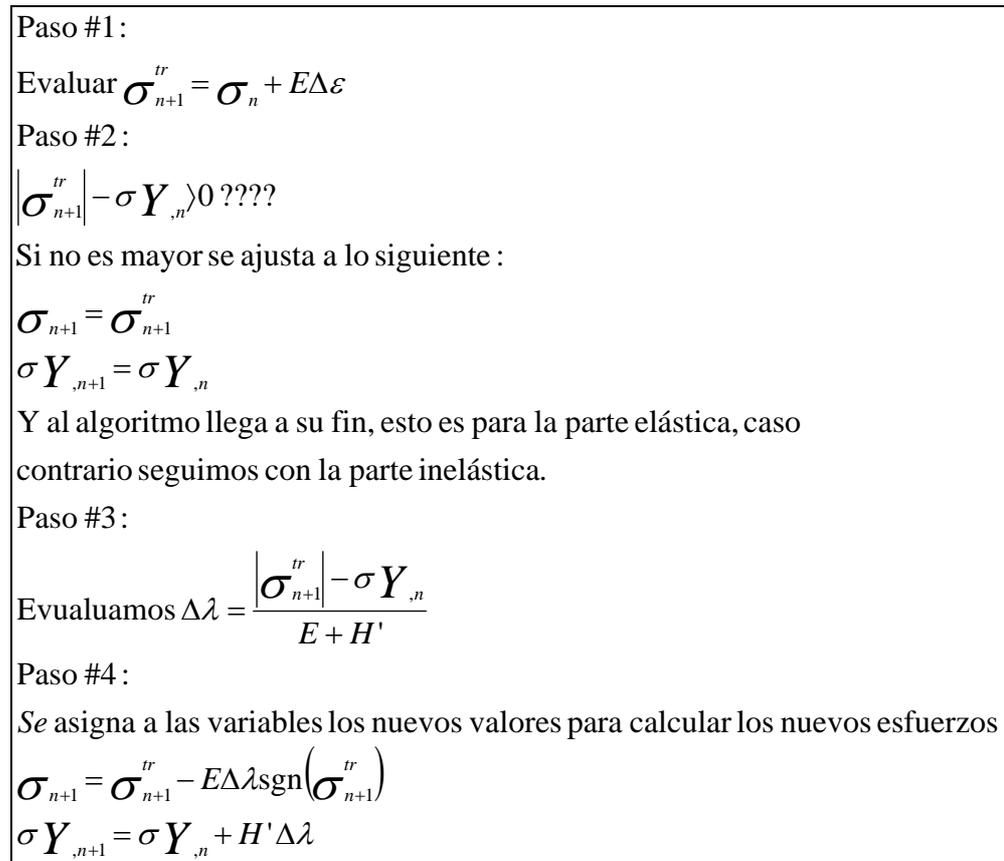


Figura 3.1. RETURN MAPPING: ISOTROPIC HARDENING

Fuente: "Plasticity Modeling and Computation, Stanford University Lectura Notes"

Este algoritmo se lo usa para poder modelar los materiales, como se sabe la zona elástica tiene un comportamiento lineal y básicamente está dado por los dos primeros pasos, los pasos 3 y cuatro básicamente modelan el comportamiento del material en la parte inelástica del mismo, adicional a esto cuando trabajamos con este algoritmo utilizo una herramienta matemática adicional llamada

Newton-Raphson, la cual se debe incluir en el código que se utilizó en Matlab.

Por lo que en este problema se maneja algunas variables, lo que hice es tratar de dejar fijas algunas variables para poder realizar de una manera eficaz la simulación requerida, de los valores obtenidos de las muestras, se los analizará estadísticamente para encontrar los valores del esfuerzo a la fluencia, el módulo de Young de la muestra y los valores intrínsecos del material llamados a y m .

En ese momento estaremos listos para simular el comportamiento del material expuesto a carga axial de compresión.

En el siguiente capítulo se realizará la presentación de resultados así como el procedimiento para llegar a ellos así como también la presentación de las gráficas con las simulaciones pertinentes.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Presentación de resultados experimentales

Cuando se desea implementar un diseño experimental se lo realiza para obtener la mayor información posible de uno o varios procesos de una manera rápida, económica, simple y precisa.

Para nuestro caso se realizó un modelo factorial con una función de respuesta, que cumple una variación en el tiempo 7, 14, 21 y 28 días, tomando como referencia la norma ASTM C 109 y esto con el curado en agua y con una adición del 20% de zeolita ecuatoriana, igualmente se ha realizado la validación con 22.5% de adición de zeolita.

A continuación se presenta los resultados obtenidos, para 20% y 22,5% respectivamente.

TABLA 1
ESFUERZOS A LA RUPTURA CON 20% DE ZEOLITA

| Días de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura (Mpa) |
|----------------|--------------|-----------------------------|
| 7 | 20 | 57,49766 |
| 7 | 20 | 56,55507 |
| 7 | 20 | 65,03834 |
| 14 | 20 | 47,03041 |
| 14 | 20 | 61,56709 |
| 14 | 20 | 85,50984 |
| 21 | 20 | 89,78533 |
| 21 | 20 | 94,06082 |
| 21 | 20 | 89,78533 |
| 28 | 20 | 111,16279 |
| 28 | 20 | 111,16279 |
| 28 | 20 | 108,59750 |

TABLA 2
ESFUERZOS A LA RUPTURA CON 22.5% DE ZEOLITA

| Días de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura (Mpa) |
|----------------|--------------|-----------------------------|
| 4 | 22,5 | 52,78474 |
| 4 | 22,5 | 58,44024 |
| 4 | 22,5 | 60,89096 |
| 11 | 22,5 | 89,54554 |
| 11 | 22,5 | 81,06227 |
| 11 | 22,5 | 82,00486 |
| 18 | 22,5 | 94,06082 |
| 18 | 22,5 | 103,46691 |
| 18 | 22,5 | 82,08945 |
| 25 | 22,5 | 115,95134 |
| 25 | 22,5 | 111,16279 |
| 25 | 22,5 | 103,46691 |

Estas son las tablas que corresponden a la presentación de los porcentajes agregados de zeolita, días de curado con sus respectivos valores experimentales de esfuerzo a la ruptura. Pero, para realizar el modelado matemático con ayuda del software Matlab, debemos encontrar los valores a ingresar al programa para realizar la simulación gráfica del comportamiento elástico e inelástico de las muestras para los diferentes días.

Se desarrolló un método simple para encontrar dichos parámetros y por motivos didácticos se explicará con un ejemplo, que corresponde al primer día de ruptura.

Los valores experimentales obtenidos en las tres muestras se promedian, teniéndose así un valor que representa a las tres muestras.

Las tablas de los datos que se muestran a continuación, corresponden a la ruptura al cuarto día con 22.5% de adición de zeolita para cada una de las tres muestras.

TABLA 3
DATOS DE ESFUERZOS DE RUPTURA DE LAS 3 MUESTRAS DEL
DÍA 4

| Marca | Deformación | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Promedio |
|-------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Esfuerzo | | | |
| | | Mpa | | | |
| 0 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 | 0,00000 |
| 5 | 0,00249 | 0,37703 | 0,64096 | 0,37703 | 0,46501 |
| 10 | 0,00498 | 1,96058 | 1,88517 | 1,1311 | 1,65895 |

| Marca | Deformación | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Promedio |
|-------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Esfuerzo | | | |
| | | Mpa | | | |
| 15 | 0,00747 | 5,88173 | 4,33589 | 2,07369 | 4,09710 |
| 20 | 0,00996 | 13,3847 | 8,48326 | 3,50641 | 8,45813 |
| 25 | 0,01245 | 21,67945 | 14,32729 | 6,03254 | 14,01309 |
| 30 | 0,01494 | 26,39237 | 20,73686 | 12,81915 | 19,98279 |
| 35 | 0,01743 | 29,22012 | 28,08902 | 20,35983 | 25,88966 |
| 40 | 0,01992 | 39,58855 | 32,04788 | 28,08902 | 33,24182 |
| 45 | 0,02241 | 45,24406 | 39,58855 | 32,04788 | 38,96016 |
| 50 | 0,0249 | 49,0144 | 46,94071 | 41,47372 | 45,80961 |
| 55 | 0,02739 | 52,78474 | 50,89957 | 47,12923 | 50,27118 |
| 60 | 0,02988 | | 58,44024 | 53,72732 | 56,08378 |
| 65 | 0,03237 | | | 56,17804 | 56,17804 |
| 70 | 0,03486 | | | 60,89096 | 60,89096 |

Los valores que están coloreados representan: la deformación última, el esfuerzo de ruptura y el esfuerzo de fluencia, los cuales, se calculan con la ayuda del intervalo de confianza formado por los valores de los módulos de Young que se encontraron. Esto se debe a que es necesario tener en cuenta que para la parte elástica de la curva del comportamiento del material sometida a carga, el módulo de Young debería ser el mismo, para esto previamente se calcula el módulo de Young entre dos puntos, de la muestra promedio; seguido de esto, se forma un intervalo de confianza utilizando Statistica 7. Los valores a ingresar al programa serán los que se calcularon en el paso precedente, y aquí mediante forma gráfica y matemática, y con la ayuda de una hoja electrónica, encontraremos los intervalos

correspondientes, lo que nos dirá en que intervalo teóricamente debería estar la parte elástica de la curva. Es decir, el valor máximo del intervalo ubicado en la tabla se corresponde al valor de esfuerzo de fluencia, y las curvas que representan los ensayos están en el apéndice A.

Para calcular los esfuerzos utilizo fuerza entre área, la fuerza la tomé de la lectura del equipo de ensayos y el área será para todos los casos de 50 mm².

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

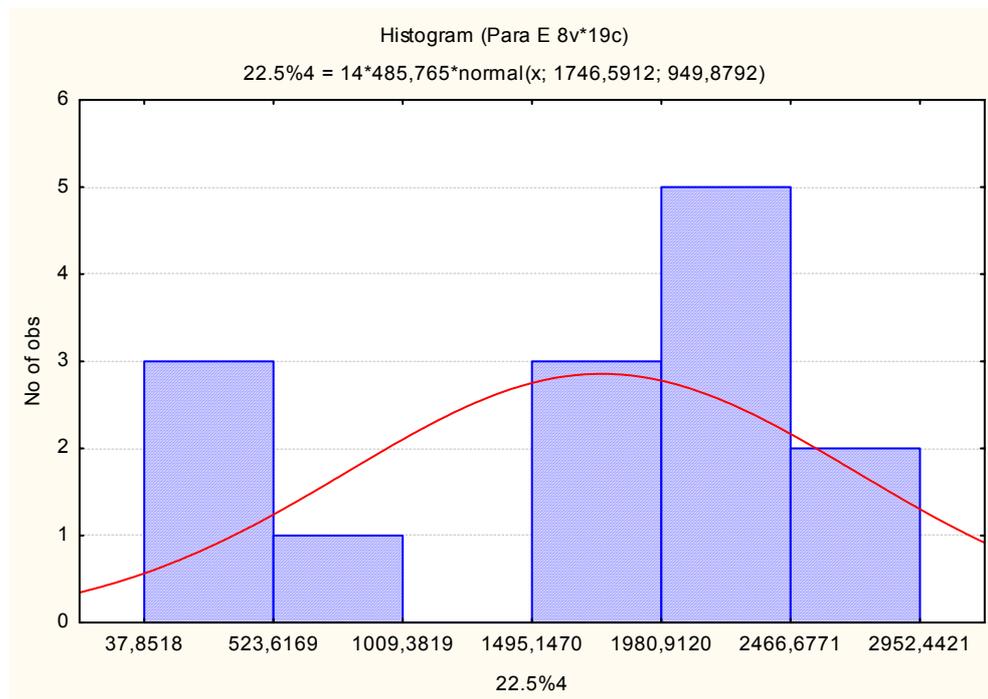


FIGURA 4.1. INTERVALOS DE CONFIANZA PARA EL PROMEDIO DE LAS MUESTRAS EN EL DÍA 4

TABLA 4
INTERVALO DE CONFIANZA PARA EL PROMEDIO DE LA
MUESTRAS DEL DÍA 4

| 22.5% | | | | |
|-----------|------------|------------|---------------|---------------|
| Día 4 | E promedio | desviación | límite máximo | límite mínimo |
| Muestra 1 | 1746,5912 | 949,8792 | 2696,47 | 796,712 |

Ahora los intervalos formados para el promedio de las muestras nos proporcionarán información hasta donde estadísticamente estará el punto de la fluencia, ya que por definición es en donde empieza la parte inelástica del material, es decir el valor mayor del intervalo corresponde a un punto de esfuerzo y ésta se tomará en cuenta como esfuerzo de fluencia; por tanto el límite superior nos da una muy buena aproximación de lo que está ocurriendo en la muestra.

Ya teniendo el módulo de Young y el esfuerzo a la fluencia para cada el promedio de las muestras procedemos a calcular los valores de m y a respectivamente, para cada día, las fórmulas usadas se las indica a continuación.

$$m = \varepsilon_{ult} - \left(\frac{\sigma_{ult}}{E} \right)$$

$$a = \left(\frac{\sigma_{ult}}{S_y} \right) - 1$$

A continuación se presenta el resumen de los cálculos realizados por cada porcentaje y cada día de curado, los valores correspondientes para esfuerzo de fluencia, módulo de Young, m y a, es decir los valores que se debe ingresar al programa para realizar la simulación.

TABLA 5
VALORES DE MÓDULO DE YOUNG, ESFUERZO A LA FLUENCIA, m Y a, PARA CADA DÍA DE MUESTREO.

| Días de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura (Mpa) | Sigma fluencia (Mpa) | E promedio (Mpa) | m promedio | a promedio |
|----------------|--------------|-----------------------------|----------------------|------------------|------------|------------|
| 7 | 20 | 57,49766 | 39,02300 | 2270,26816 | 0,00539 | 0,57005 |
| 7 | 20 | 56,55507 | | | | |
| 7 | 20 | 65,03834 | | | | |
| 14 | 20 | 47,03041 | 51,70495 | 5190,85131 | 0,00217 | 0,28170 |
| 14 | 20 | 61,56709 | | | | |
| 14 | 20 | 85,50984 | | | | |
| 21 | 20 | 89,78533 | 58,43172 | 4551,00878 | 0,00268 | 0,53659 |
| 21 | 20 | 94,06082 | | | | |
| 21 | 20 | 89,78533 | | | | |
| 28 | 20 | 111,16279 | 85,79487 | 5742,17657 | 0,00305 | 0,29568 |
| 28 | 20 | 111,16279 | | | | |
| 28 | 20 | 108,59750 | | | | |

TABLA 6
VALORES DE MÓDULO DE YOUNG, ESFUERZO A LA FLUENCIA,
m Y a, PARA CADA DÍA DE MUESTREO

| Días de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura (Mpa) | Sigma fluencia (Mpa) | E promedio (Mpa) | m promedio | a promedio |
|----------------|--------------|-----------------------------|----------------------|------------------|------------|------------|
| 4 | 22,5 | 52,78474 | 45,80961 | 2216,22417 | 0,00739 | 0,32922 |
| 4 | 22,5 | 58,44024 | | | | |
| 4 | 22,5 | 60,89096 | | | | |
| 11 | 22,5 | 89,54554 | 70,37965 | 2296,34386 | 0,00583 | 0,27232 |
| 11 | 22,5 | 81,06227 | | | | |
| 11 | 22,5 | 82,00486 | | | | |
| 18 | 22,5 | 94,06082 | 88,36017 | 6661,68790 | 0,00151 | 0,05000 |
| 18 | 22,5 | 103,46691 | | | | |
| 18 | 22,5 | 82,08945 | | | | |
| 25 | 22,5 | 115,95134 | 96,34109 | 6104,63954 | 0,00342 | 0,20355 |
| 25 | 22,5 | 111,16279 | | | | |
| 25 | 22,5 | 103,46691 | | | | |

4.2. Análisis estadístico

Habiendo analizado las características geométricas y mecánicas del material, procederemos con el análisis estadístico para los porcentajes del 20% y 22.5% de zeolita adicionada a la pasta de cemento.

En la tabla 8 se muestran los valores de los esfuerzos de ruptura para 20% de adición de zeolita.

TABLA 7
ESFUERZOS DE RUPTURA CORRESPONDIENTES AL 20% DE
ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE
CURADO

| Orden estadístico de las muestras | Análisis Estadístico Individual | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|
| | 1 Dias de curado | 2 %de zeolita | 3 Esfuerzo a la ruptura |
| 1 | 7 | 20 | 57,49766 |
| 2 | 7 | 20 | 56,55507 |
| 3 | 7 | 20 | 65,03834 |
| 4 | 14 | 20 | 47,03041 |
| 5 | 14 | 20 | 61,56709 |
| 6 | 14 | 20 | 85,50984 |
| 7 | 21 | 20 | 89,78533 |
| 8 | 21 | 20 | 94,06082 |
| 9 | 21 | 20 | 89,78533 |
| 10 | 28 | 20 | 111,1628 |
| 11 | 28 | 20 | 111,1628 |
| 12 | 28 | 20 | 108,5975 |

Ahora podemos encontrar los parámetros estadísticos de las muestras, a continuación en la tabla 8 que muestra los valores calculados por el programa statistica 7.

TABLA 8
INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS ESFUERZOS DE
RUPTURA

| Cell No. | Dias de curado; Unweighted Means (Spreadsheet1) Current effect: F(3, 8)=16,510, p=,00087 Effective hypothesis decomposition | | | | | |
|----------|---|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | Dias de curado | Esfuerzo a la ruptura Mean | Esfuerzo a la ruptura Std.Err. | Esfuerzo a la ruptura -95,00% | Esfuerzo a la ruptura +95,00% | N |
| 1 | 7 | 59,6970 | 5,826989 | 46,25996 | 73,1341 | 3 |
| 2 | 14 | 64,7024 | 5,826989 | 51,26538 | 78,1395 | 3 |
| 3 | 21 | 91,2105 | 5,826989 | 77,77344 | 104,6476 | 3 |
| 4 | 28 | 110,3077 | 5,826989 | 96,87063 | 123,7448 | 3 |

Se tiene un factor $p = 0.00087$ teniendo como resultado que existe un nivel de significancia óptimo para el cual los valores tomados experimentalmente tienen un 95% de confianza.

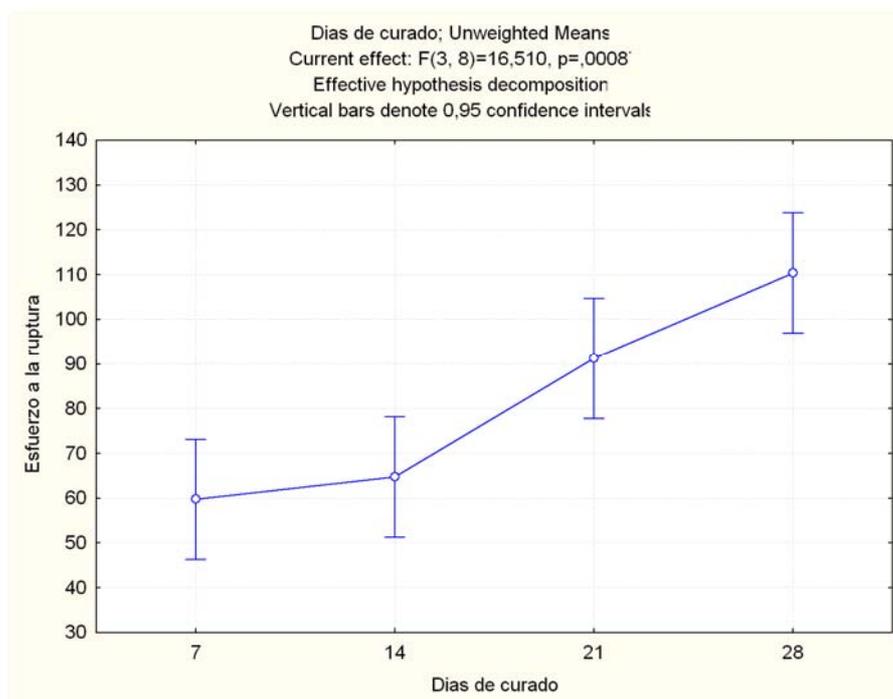


FIGURA 4.2. DÍAS DE CURADO VS. ESFUERZO A LA RUPTURA

Esto indica que hasta el día 28, la tendencia de los valores de esfuerzo a la ruptura estuvo afectada significativamente en los días de curado como se muestra en la figura 4.2.

Para analizar estos datos se usa el método de Dunnett, que se aplica directamente utilizando el programa estadístico 7, y se usa como control el primer día de ruptura para este caso el día 7.

Hipótesis nula.

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$.

Hipótesis alterna.

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq 0$.

TABLA 9
VALORES DE DUNNETT OBTENIDOS DEL PROGRAMA
STATISTICA 7

| Dunnett test; variable Esfuerzo a la ruptura (Spreadsheet1) Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 101,86, df = 8,0000 | | |
|--|----------------|---------------|
| Cell No. | Dias de curado | {1} 59,697 |
| 1 | 7 | |
| 2 | 14 | 0,501460 |
| 3 | 21 | 0,006423 |
| 4 | 28 | 0,000383 |

Según la tabla 9, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, concluyéndose que los días de curado afectan significativamente al esfuerzo de ruptura.

Para 22.5% se presentan los datos utilizados.

TABLA 10
ESFUERZOS DE RUPTURA CORRESPONDIENTES AL 22.5% DE
ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LOS DIFERENTES DÍAS DE
CURADO

| Orden estadístico de las muestras | Análisis Estadístico Individual | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|------------------|----------------------------|
| | 1 Dias de curado | 2 %de zeolita | 3 Esfuerzo a la ruptura |
| 1 | 4 | 22,5 | 52,78474 |
| 2 | 4 | 22,5 | 58,44024 |
| 3 | 4 | 22,5 | 60,89096 |
| 4 | 11 | 22,5 | 89,54554 |
| 5 | 11 | 22,5 | 81,06227 |
| 6 | 11 | 22,5 | 82,00486 |
| 7 | 18 | 22,5 | 94,06082 |
| 8 | 18 | 22,5 | 103,4669 |
| 9 | 18 | 22,5 | 82,08945 |
| 10 | 25 | 22,5 | 115,9513 |
| 11 | 25 | 22,5 | 111,1628 |
| 12 | 25 | 22,5 | 103,4669 |

Ahora podemos encontrar los parámetros estadísticos de las muestras de validación a continuación, en la tabla 11.

TABLA 11
INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS ESFUERZOS DE
RUPTURA

| Cell No. | Días de curado; Unweighted Means (Spreadsheet1) Current effect: F(3, 8)=30,197, p=,00010 Effective hypothesis decomposition | | | | | N |
|----------|---|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| | Días de curado | Esfuerzo a la ruptura Mean | Esfuerzo a la ruptura Std.Err. | Esfuerzo a la ruptura -95,00% | Esfuerzo a la ruptura +95,00% | |
| 1 | 4 | 57,3720 | 4,014245 | 48,1151 | 66,6288 | 3 |
| 2 | 11 | 84,2042 | 4,014245 | 74,9474 | 93,4611 | 3 |
| 3 | 18 | 93,2057 | 4,014245 | 83,9489 | 102,4626 | 3 |
| 4 | 25 | 110,1937 | 4,014245 | 100,9368 | 119,4505 | 3 |

Se tiene un factor $p= 0.00010$ teniendo como resultado que existe un nivel de significancia óptimo para el cual los valores tomados experimentalmente tienen un 95% de confianza.

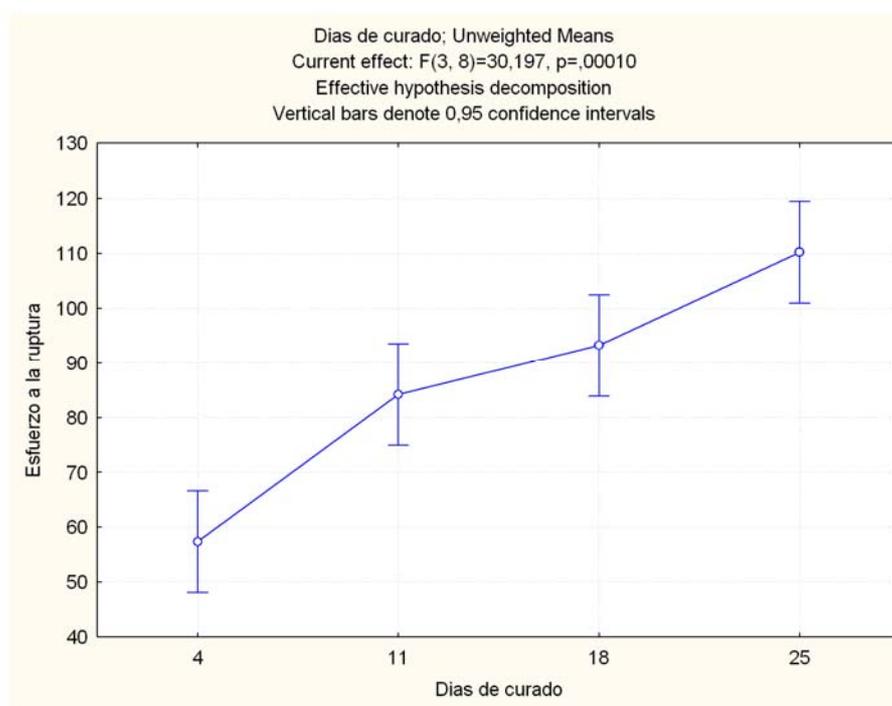


FIGURA 4.3. DÍAS DE CURADO VS. ESFUERZO A LA RUPTURA

La tendencia general se mantiene para este porcentaje, teniendo la certeza que el tratamiento días de curado afectan significativamente en forma positiva, esto es por cuanto en los dos porcentajes se ha cumplido la misma tendencia.

Para analizar estos datos se usa el método de Dunnett, que se aplica directamente utilizando el programa estadística 7, y se usa como control el primer día de ruptura, es decir el día 4.

Hipótesis nula.

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$.

Hipótesis alterna.

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq 0$.

Según la tabla 12, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula, concluyéndose que los días de curado afectan significativamente al esfuerzo de ruptura.

TABLA 12
VALORES DE DUNNETT OBTENIDOS DEL PROGRAMA
STATISTICA 7

| Dunnett test; variable Esfuerzo a la ruptura (Spreadsheet1) Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 48,342, df = 8,0000 | | |
|--|----------------|---------------|
| Cell No. | Dias de curado | {1} 57,372 |
| 1 | 4 | |
| 2 | 11 | 0,001939 |
| 3 | 18 | 0,000322 |
| 4 | 25 | 0,000041 |

Para el análisis grupal, es decir incluyendo los demás porcentajes 5, 10, 15, y 25% de adición de zeolita y un control, sin adición de zeolita, que para el lenguaje matemático sería 0% de zeolita, se resume los datos a analizar en la siguiente tabla.

TABLA 13
 ESFUERZOS DE RUPTURA CORRESPONDIENTES A LOS
 PORCENTAJES DE ADICIÓN DE ZEOLITA PARA LOS
 DIFERENTES DÍAS DE CURADO

| | 1 | 2 | 3 |
|----|----------------|--------------|-----------------------|
| | Dias de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura |
| 1 | 7 | 0 | 89,7853345 |
| 2 | 7 | 0 | 90,6404329 |
| 3 | 7 | 0 | 87,2200392 |
| 4 | 7 | 5 | 93,3 |
| 5 | 7 | 5 | 87,34 |
| 6 | 7 | 5 | 88,2 |
| 7 | 7 | 10 | 80,3802672 |
| 8 | 7 | 10 | 86,9998186 |
| 9 | 7 | 10 | 76,5976664 |
| 10 | 7 | 15 | 84,4555786 |
| 11 | 7 | 15 | 62,5876163 |
| 12 | 7 | 15 | 72,201979 |
| 13 | 7 | 20 | 57,4976596 |
| 14 | 7 | 20 | 56,555075 |
| 15 | 7 | 20 | 65,0383362 |
| 16 | 7 | 25 | 52,9564 |
| 17 | 7 | 25 | 52,9564 |
| 18 | 7 | 25 | 52,7673 |
| 19 | 14 | 0 | 99,1914171 |
| 20 | 14 | 0 | 97,4812203 |
| 21 | 14 | 0 | 89,7853345 |
| 22 | 14 | 5 | 83,06 |
| 23 | 14 | 5 | 74,05 |
| 24 | 14 | 5 | 89,06 |
| 25 | 14 | 10 | 95,4247022 |
| 26 | 14 | 10 | 78,2310622 |
| 27 | 14 | 10 | 88,5472462 |
| 28 | 14 | 15 | 106,887294 |
| 29 | 14 | 15 | 81,2343432 |
| 30 | 14 | 15 | 81,2343432 |
| 31 | 14 | 20 | 47,0304123 |
| 32 | 14 | 20 | 61,5670853 |
| 33 | 14 | 20 | 85,5098406 |
| 34 | 14 | 25 | 94,565 |
| 35 | 14 | 25 | 95,4247 |
| 36 | 14 | 25 | 83,3892 |
| 37 | 21 | 0 | 102,611811 |
| 38 | 21 | 0 | 108,5975 |
| 39 | 21 | 0 | 76,9588581 |
| 40 | 21 | 5 | 66,79 |
| 41 | 21 | 5 | 114,75 |
| 42 | 21 | 5 | 94,19 |
| 43 | 21 | 10 | 116,05707 |
| 44 | 21 | 10 | 90,2666102 |
| 45 | 21 | 10 | 100,582794 |
| 46 | 21 | 15 | 112,017884 |
| 47 | 21 | 15 | 109,452589 |
| 48 | 21 | 15 | 115,438277 |
| 49 | 21 | 20 | 89,7853327 |

| | 1 | 2 | 3 |
|----|----------------|--------------|-----------------------|
| | Dias de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura |
| 50 | 21 | 20 | 94,0608247 |
| 51 | 21 | 20 | 89,7853327 |
| 52 | 21 | 25 | 67,0552 |
| 53 | 21 | 25 | 51,5809 |
| 54 | 21 | 25 | 54,16 |
| 55 | 28 | 0 | 95,7710235 |
| 56 | 28 | 0 | 97,4812203 |
| 57 | 28 | 0 | 94,0608266 |
| 58 | 28 | 5 | 107,89 |
| 59 | 28 | 5 | 107,04 |
| 60 | 28 | 5 | 109,61 |
| 61 | 28 | 10 | 92,8456562 |
| 62 | 28 | 10 | 127,232936 |
| 63 | 28 | 10 | 111,75866 |
| 64 | 28 | 15 | 120,568867 |
| 65 | 28 | 15 | 112,872982 |
| 66 | 28 | 15 | 115,438277 |
| 67 | 28 | 20 | 111,162793 |
| 68 | 28 | 20 | 111,162793 |
| 69 | 28 | 20 | 108,597498 |
| 70 | 28 | 25 | 102,3021 |
| 71 | 28 | 25 | 97,1441 |
| 72 | 28 | 25 | 98,0037 |

De esta manera se ingresan los datos al programa de estadística, para luego usar los comandos correspondientes y obtener los resultados a analizar.

TABLA 14
INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS ESFUERZOS DE
RUPTURA

| Cell No. | Dias de curado*% de zeolita; Unweighted Means (análisis grupal) Current effect: F(15, 48)=4,2898, p=,00006 Effective hypothesis decomposition | | | | | | |
|----------|---|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
| | Dias de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura | N |
| 1 | 7 | 0 | 89,2153 | 5,800250 | 77,5531 | 100,8775 | 3 |
| 2 | 7 | 5 | 89,6133 | 5,800250 | 77,9511 | 101,2755 | 3 |
| 3 | 7 | 10 | 81,3259 | 5,800250 | 69,6637 | 92,9881 | 3 |
| 4 | 7 | 15 | 73,0817 | 5,800250 | 61,4195 | 84,7439 | 3 |
| 5 | 7 | 20 | 59,6970 | 5,800250 | 48,0348 | 71,3592 | 3 |
| 6 | 7 | 25 | 52,8934 | 5,800250 | 41,2312 | 64,5556 | 3 |
| 7 | 14 | 0 | 95,4860 | 5,800250 | 83,8238 | 107,1482 | 3 |
| 8 | 14 | 5 | 82,0567 | 5,800250 | 70,3945 | 93,7189 | 3 |
| 9 | 14 | 10 | 87,4010 | 5,800250 | 75,7388 | 99,0632 | 3 |
| 10 | 14 | 15 | 89,7853 | 5,800250 | 78,1231 | 101,4475 | 3 |
| 11 | 14 | 20 | 64,7024 | 5,800250 | 53,0403 | 76,3646 | 3 |
| 12 | 14 | 25 | 91,1263 | 5,800250 | 79,4641 | 102,7885 | 3 |
| 13 | 21 | 0 | 96,0561 | 5,800250 | 84,3939 | 107,7182 | 3 |
| 14 | 21 | 5 | 91,9100 | 5,800250 | 80,2478 | 103,5722 | 3 |
| 15 | 21 | 10 | 102,3022 | 5,800250 | 90,6400 | 113,9643 | 3 |
| 16 | 21 | 15 | 112,3029 | 5,800250 | 100,6407 | 123,9651 | 3 |
| 17 | 21 | 20 | 91,2105 | 5,800250 | 79,5483 | 102,8727 | 3 |
| 18 | 21 | 25 | 57,5987 | 5,800250 | 45,9365 | 69,2609 | 3 |
| 19 | 28 | 0 | 95,7710 | 5,800250 | 84,1088 | 107,4332 | 3 |
| 20 | 28 | 5 | 108,1800 | 5,800250 | 96,5178 | 119,8422 | 3 |
| 21 | 28 | 10 | 110,6124 | 5,800250 | 98,9502 | 122,2746 | 3 |
| 22 | 28 | 15 | 116,2934 | 5,800250 | 104,6312 | 127,9556 | 3 |
| 23 | 28 | 20 | 110,3077 | 5,800250 | 98,6455 | 121,9699 | 3 |
| 24 | 28 | 25 | 99,1500 | 5,800250 | 87,4878 | 110,8122 | 3 |

Se tiene un factor $p= 0.00006$ teniendo como resultado que existe un nivel de significancia óptimo para el cual los valores tomados experimentalmente tienen un 95% de confianza.

Para describir mejor esta tabla presentaremos las siguientes gráficas.

En la figura 4.4. se muestra como es afectada la propiedad del material del esfuerzo a la ruptura, al aumentar los días de curado.

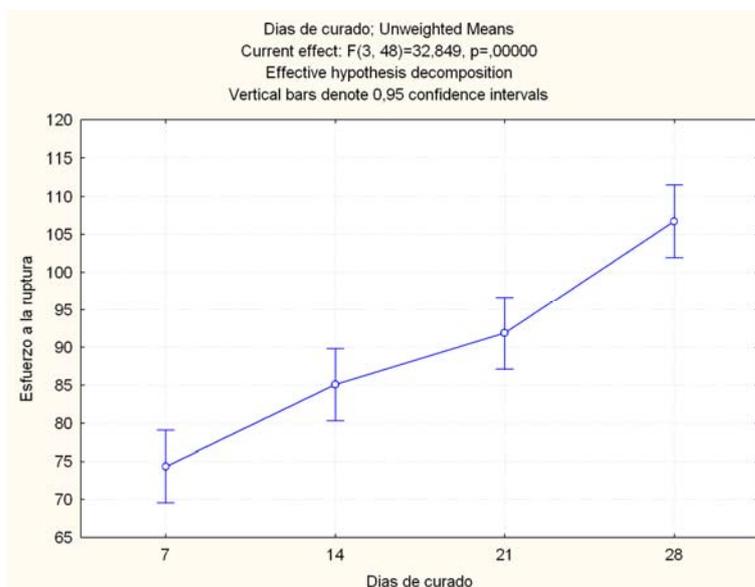


FIGURA 4.4. DÍAS DE CURADO VS. ESFUERZO A LA RUPTURA

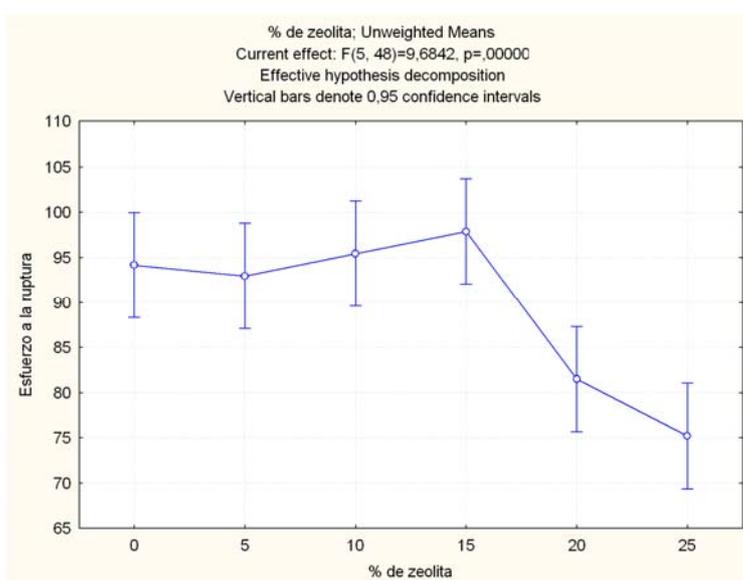


FIGURA 4.5. % DE ZEOLITA VS. ESFUERZO A LA RUPTURA

En la figura 4.5 se ve afectada la propiedad del material del esfuerzo a la ruptura en una forma negativa al incremento de zeolita en la mezcla a partir del 15%.

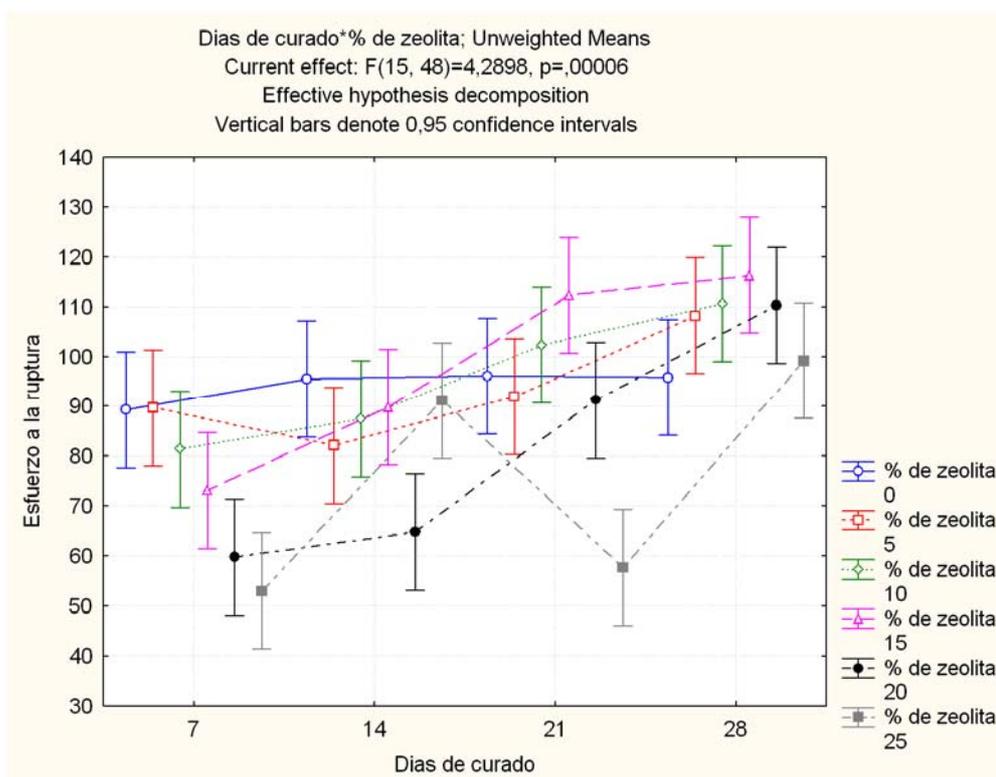


FIGURA 4.6. DÍAS DE CURADO VS. ESFUERZO A LA RUPTURA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ADICIÓN DE ZEOLITA

En la figura 4.7. se observa que el porcentaje del 15% de zeolita sería el mejor factor, gráficamente hablando, se revisará entonces los valores calculados con el programa statistica 7, cuyos valores se muestran el apéndice B.

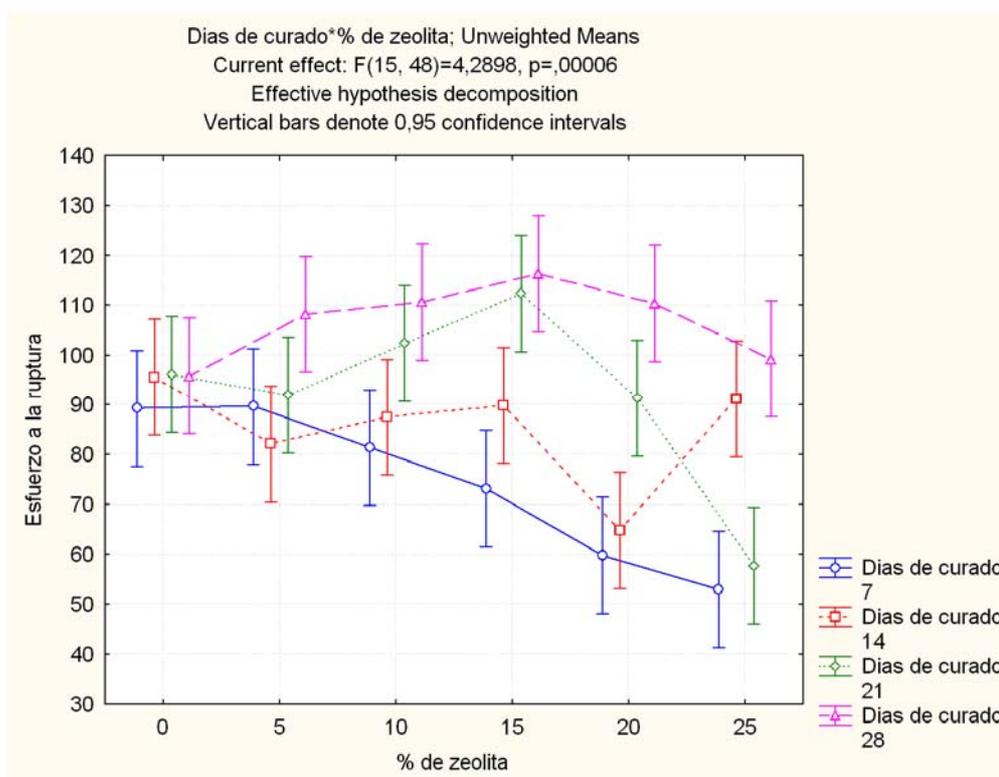


FIGURA 4.7. % DE ZEOLITA VS. ESFUERZO A LA RUPTURA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO PORCENTAJES DE ADICIÓN DE ZEOLITA

En este gráfico se ratifica que el valor con el mejor esfuerzo a la ruptura se da con el 15% a 28 días de curado en agua; en forma gráfica pero los valores que se debe tomar en cuenta esta en la tabla que nos da el programa statistica 7.

En las siguientes tablas se presentan los resultados de como intervienen dos factores a la vez es decir el porcentaje de zeolita y los días de curado y en donde se certifica que el mejor factor son los días de curado.

TABLA 15
ESTADÍSTICO P, DE LOS DÍAS DE CURADO.

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

TABLA 16
ESTADÍSTICO P, DEL PORCENTAJE DE ZEOLITA EN LA MEZCLA.

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

TABLA 17
ESTADÍSTICO P, DEL ANÁLISIS DE LA COMBINACIÓN DE DOS FACTORES.

| Custom Univariate Tests of Significance for Esfuerzo a la ruptura (an Error based on: Dias de curado*% de zeolita Effective hypothesis decomposition | | | | | |
|--|----------|------------------|----------|----------|----------|
| Effect | SS | Degr. of Freedom | MS | F | p |
| Dias de curado*% de zeolita | 6494,499 | 15 | 432,9666 | 1,000000 | 0,500000 |
| Dias de curado*% de zeolita | 6494,499 | 15 | 432,9666 | | |

A continuación se presentará la tabla en donde se indica en análisis usando la descripción Duncan utilizada en el lenguaje estadística 7, esta tabla se la verá en el apéndice B.

Seguido se muestra las condiciones de normalidad y aleatoriedad lo que hace aplicable todos los análisis realizados en forma estadística.

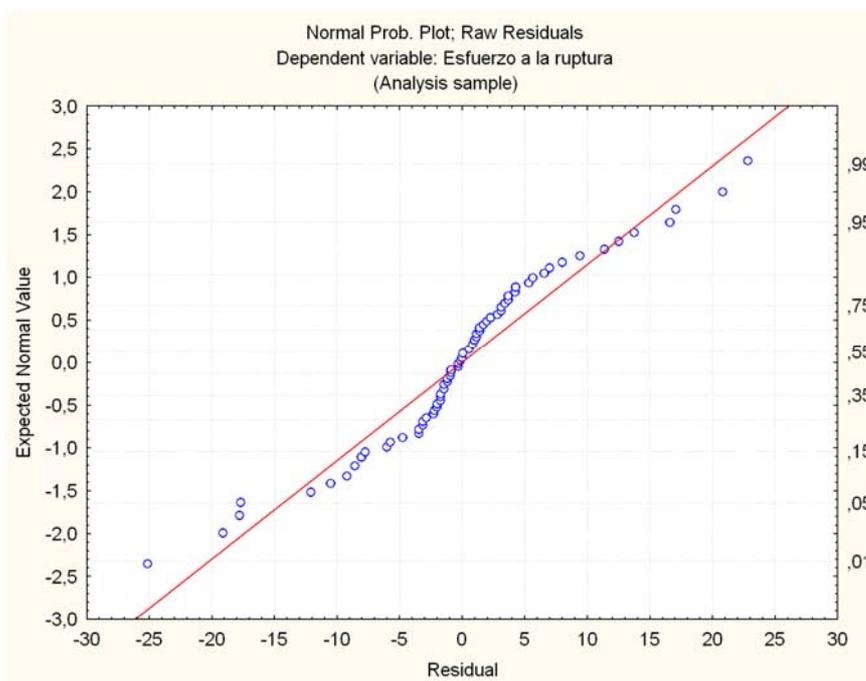


FIGURA 4.8. GRÁFICA QUE INDICA LA ALEATORIEDAD DE LOS DATOS

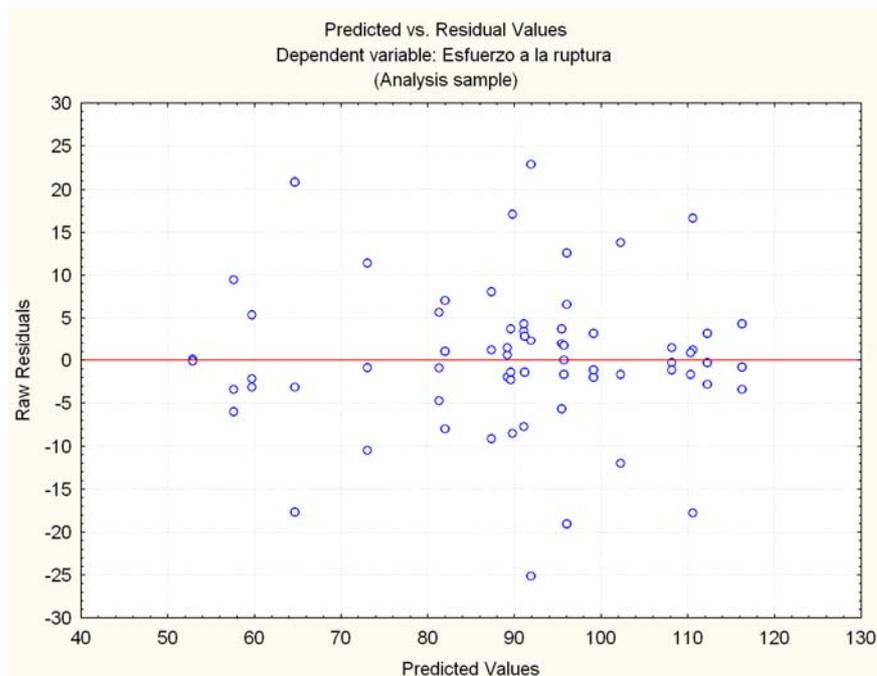


FIGURA 4.9. GRÁFICA QUE INDICA LA NORMALIDAD DE LOS DATOS

Es necesario una comparación con el control que tiene cemento tipo IV, las figuras que se muestran a continuación son el resultado del análisis realizado.

TABLA 18
INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS ESFUERZOS DE RUPTURA

| Cell No. | Dias de curado*% de zeolita; Unweighted Means (análisis grupal) Current effect: F(18, 56)=4,4938, p=,00001 Effective hypothesis decomposition | | | | | | N |
|----------|---|--------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| | Dias de curado | % de zeolita | Esfuerzo a la ruptura Mean | Esfuerzo a la ruptura Std.Err. | Esfuerzo a la ruptura -95,00% | Esfuerzo a la ruptura +95,00% | |
| 1 | 7 | 0 | 89,2153 | 5,487216 | 78,2231 | 100,2075 | 3 |
| 2 | 7 | Tipo IV | 49,0144 | 5,487216 | 38,0222 | 60,0066 | 3 |
| 3 | 7 | 5 | 89,6133 | 5,487216 | 78,6211 | 100,6055 | 3 |
| 4 | 7 | 10 | 81,3259 | 5,487216 | 70,3337 | 92,3181 | 3 |
| 5 | 7 | 15 | 73,0817 | 5,487216 | 62,0895 | 84,0739 | 3 |
| 6 | 7 | 20 | 59,6970 | 5,487216 | 48,7048 | 70,6892 | 3 |
| 7 | 7 | 25 | 52,8934 | 5,487216 | 41,9012 | 63,8856 | 3 |
| 8 | 14 | 0 | 95,4860 | 5,487216 | 84,4938 | 106,4782 | 3 |
| 9 | 14 | Tipo IV | 60,3254 | 5,487216 | 49,3332 | 71,3176 | 3 |
| 10 | 14 | 5 | 82,0567 | 5,487216 | 71,0645 | 93,0489 | 3 |
| 11 | 14 | 10 | 87,4010 | 5,487216 | 76,4088 | 98,3932 | 3 |
| 12 | 14 | 15 | 89,7853 | 5,487216 | 78,7931 | 100,7775 | 3 |
| 13 | 14 | 20 | 64,7024 | 5,487216 | 53,7102 | 75,6947 | 3 |
| 14 | 14 | 25 | 91,1263 | 5,487216 | 80,1341 | 102,1185 | 3 |
| 15 | 21 | 0 | 96,0561 | 5,487216 | 85,0638 | 107,0483 | 3 |
| 16 | 21 | Tipo IV | 75,4068 | 5,487216 | 64,4146 | 86,3990 | 3 |
| 17 | 21 | 5 | 91,9100 | 5,487216 | 80,9178 | 102,9022 | 3 |
| 18 | 21 | 10 | 102,3022 | 5,487216 | 91,3099 | 113,2944 | 3 |
| 19 | 21 | 15 | 112,3029 | 5,487216 | 101,3107 | 123,2951 | 3 |
| 20 | 21 | 20 | 91,2105 | 5,487216 | 80,2183 | 102,2027 | 3 |
| 21 | 21 | 25 | 57,5987 | 5,487216 | 46,6065 | 68,5909 | 3 |
| 22 | 28 | 0 | 95,7710 | 5,487216 | 84,7788 | 106,7632 | 3 |
| 23 | 28 | Tipo IV | 65,6667 | 5,487216 | 54,6745 | 76,6589 | 3 |
| 24 | 28 | 5 | 108,1800 | 5,487216 | 97,1878 | 119,1722 | 3 |
| 25 | 28 | 10 | 110,6124 | 5,487216 | 99,6202 | 121,6046 | 3 |
| 26 | 28 | 15 | 116,2934 | 5,487216 | 105,3012 | 127,2856 | 3 |
| 27 | 28 | 20 | 110,3077 | 5,487216 | 99,3155 | 121,2999 | 3 |
| 28 | 28 | 25 | 99,1500 | 5,487216 | 88,1578 | 110,1422 | 3 |

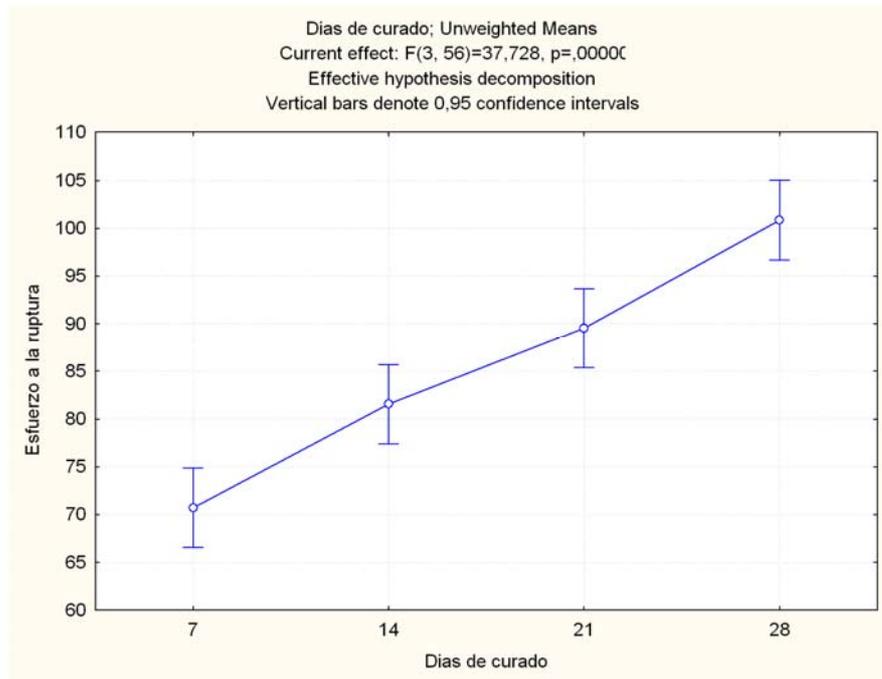


FIGURA 4.10. DÍAS DE CURADO VS. ESFUERZO A LA RUPTURA

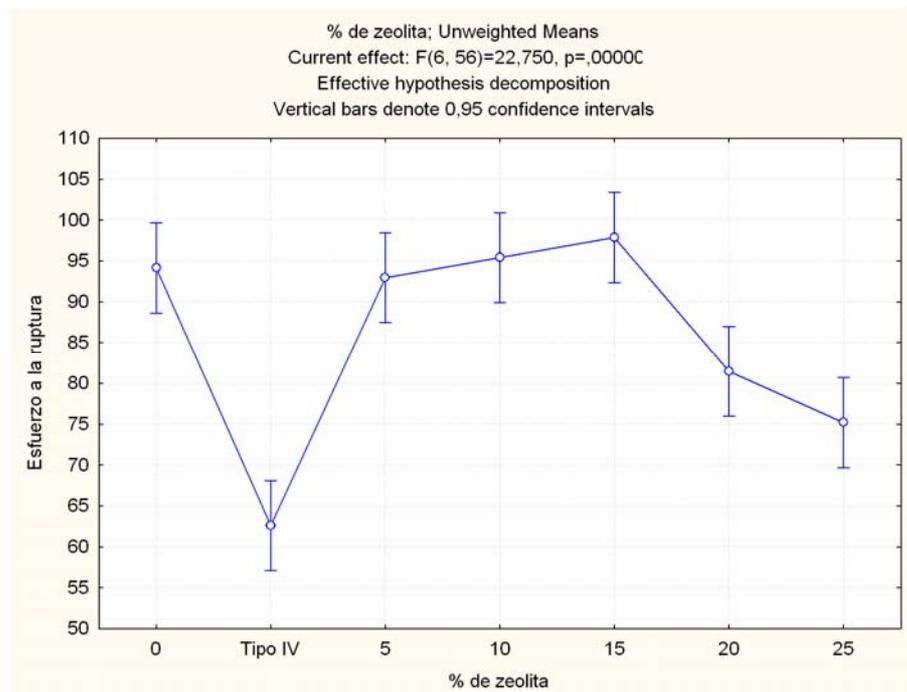


FIGURA 4.11. % DE ZEOLITA VS. ESFUERZO A LA RUPTURA

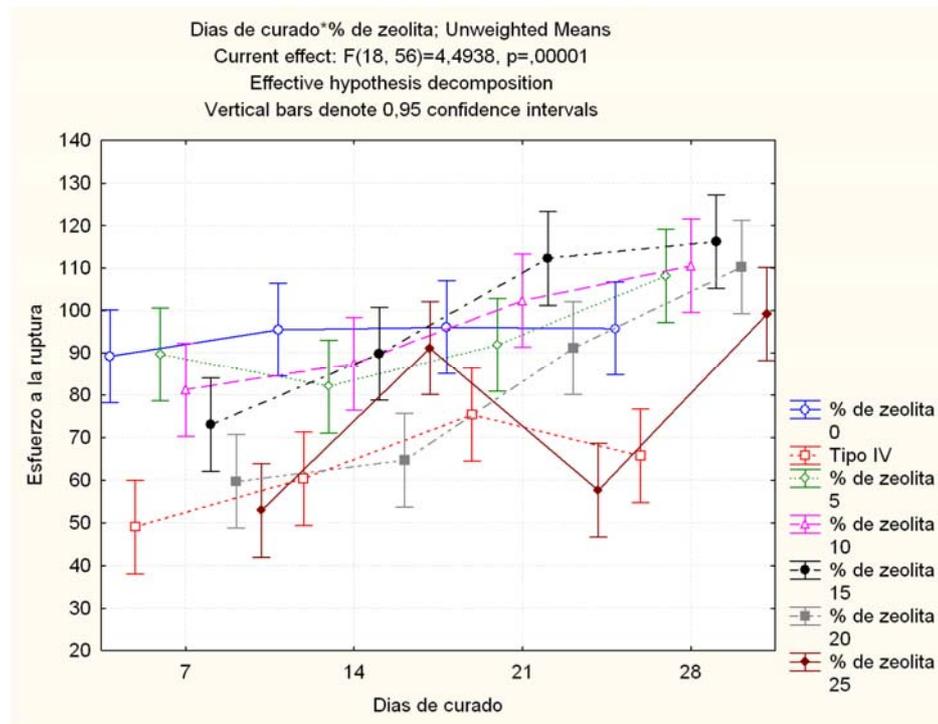


FIGURA 4.12. DÍAS DE CURADO VS. ESFUERZO A LA RUPTURA A DIFERENTES PORCENTAJES DE ADICIÓN DE ZEOLITA

En esta figura es importante describir lo que está sucediendo, al agregar la curva del comportamiento de la pasta con cemento tipo IV, aquí se aprecia que la propiedad mecánica, esfuerzo a la ruptura, es más baja en el global de la comparación con los otros porcentajes.

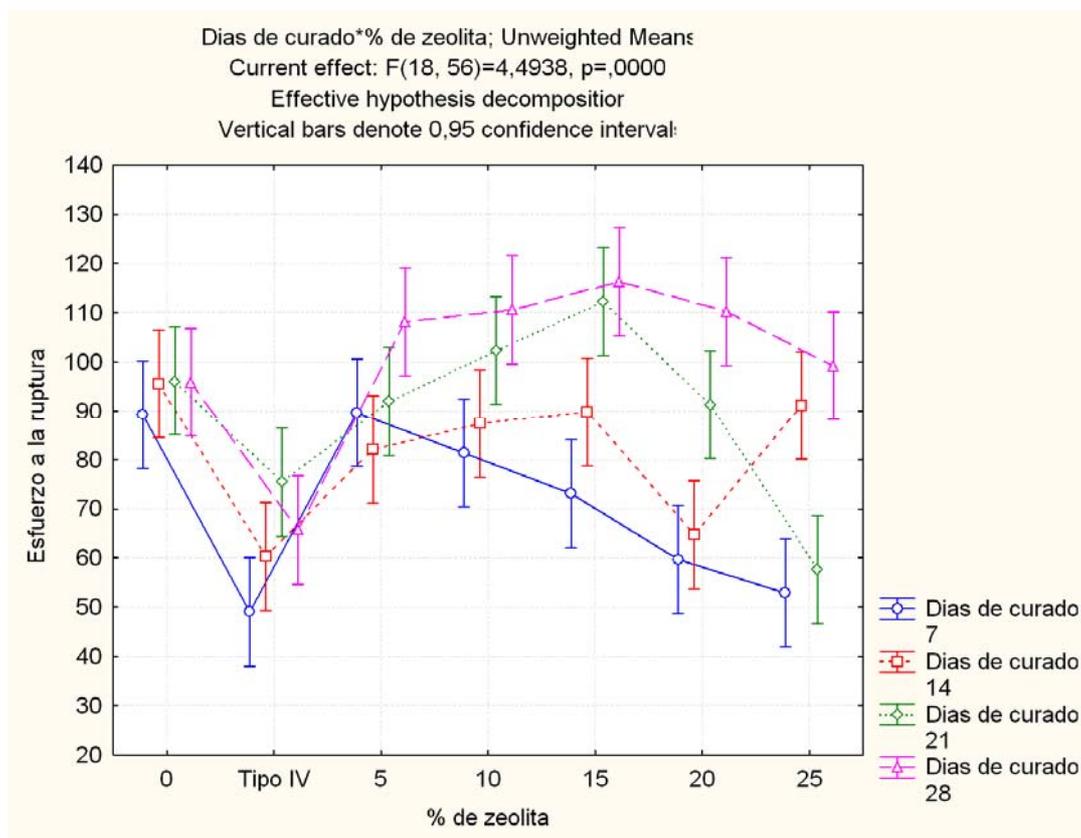


FIGURA 4.13. % DE ZEOLITA VS. ESFUERZO A LA RUPTURA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO PORCENTAJES DE ADICIÓN DE ZEOLITA

En esta figura se nota que durante todos los días de curado hay un aumento en el esfuerzo a la ruptura, pero este aumento en comparación con los demás porcentajes no representa un aumento de esfuerzo a la ruptura al pasar los días de curado.

Una manera de visualizar lo que está sucediendo simultáneamente es tener un gráfico donde pueda tener a la vez días de curado vs.

ruptura y otro porcentaje de zeolita vs. ruptura, estos se los verá en el apéndice C.

4.3. Modelo matemático y simulación

Para realizar un modelo adecuado al comportamiento de la adición de un material, usamos la teoría de la inelasticidad, una herramienta muy importante es el algoritmo de return mapping: isotropic hardening que desarrollé en el software Matlab, los datos de entrada para el programa desarrollado se los plasmó en las tablas 6 y 7.

El resultado de la modelación da como resultado lo siguiente:

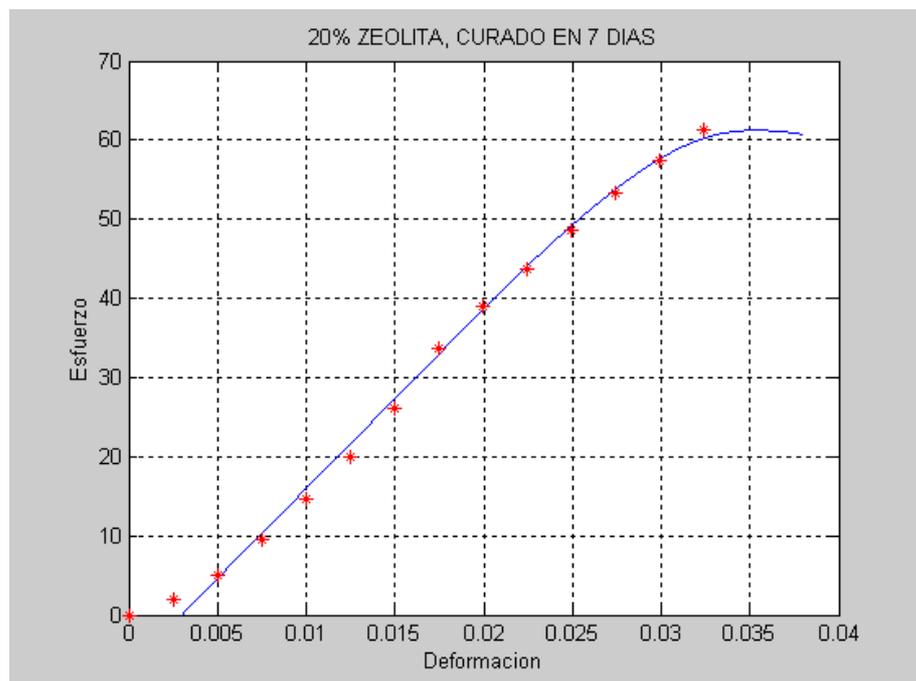


FIGURA 4.14. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 20% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 7 DÍAS.

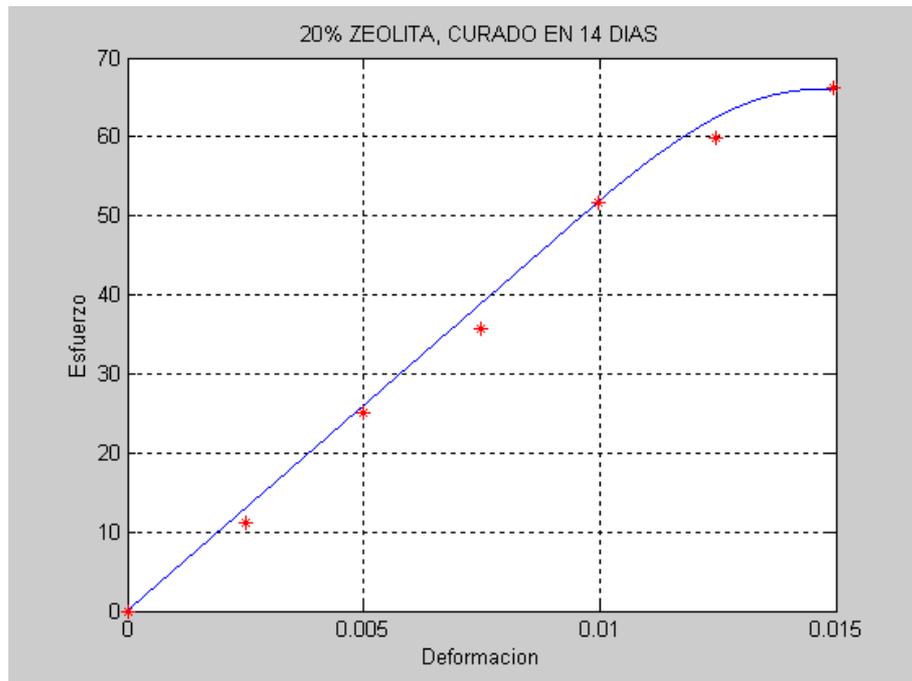


FIGURA 4.15. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 20% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 14 DÍAS

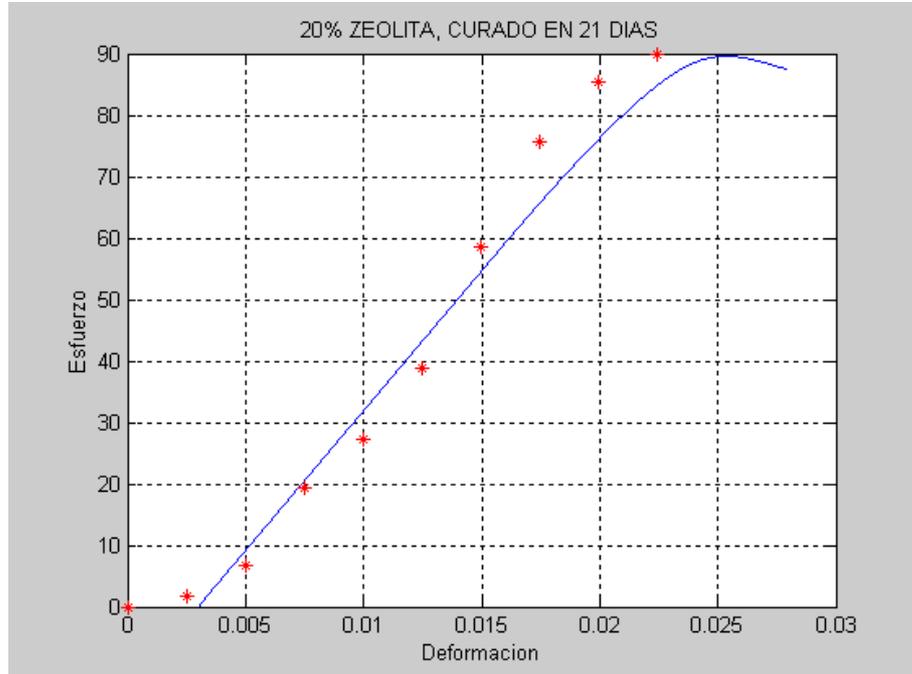


FIGURA 4.16. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 20% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 21 DÍAS

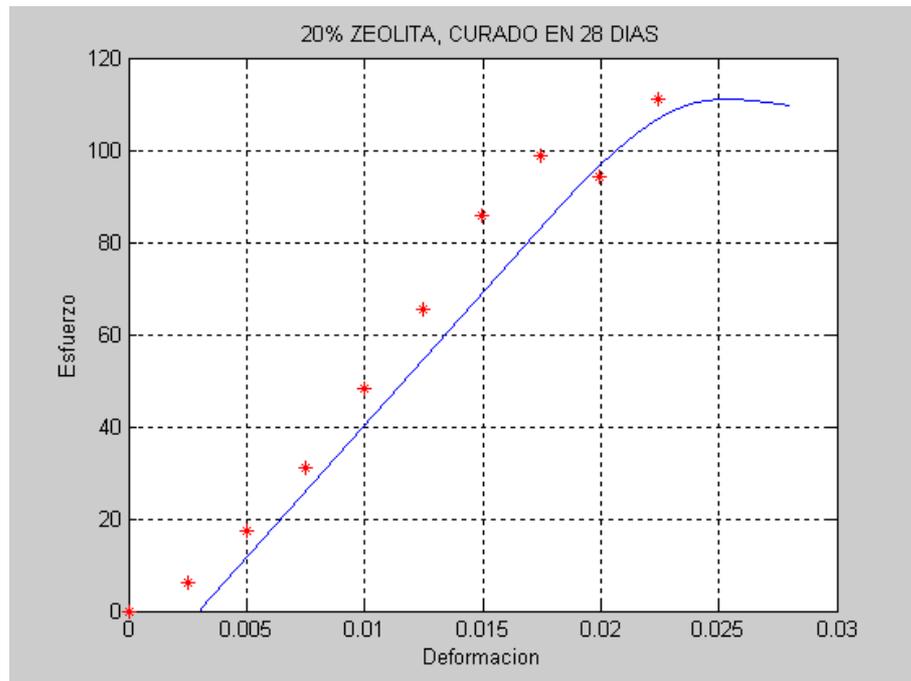


FIGURA 4.17. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 20% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 28 DÍAS

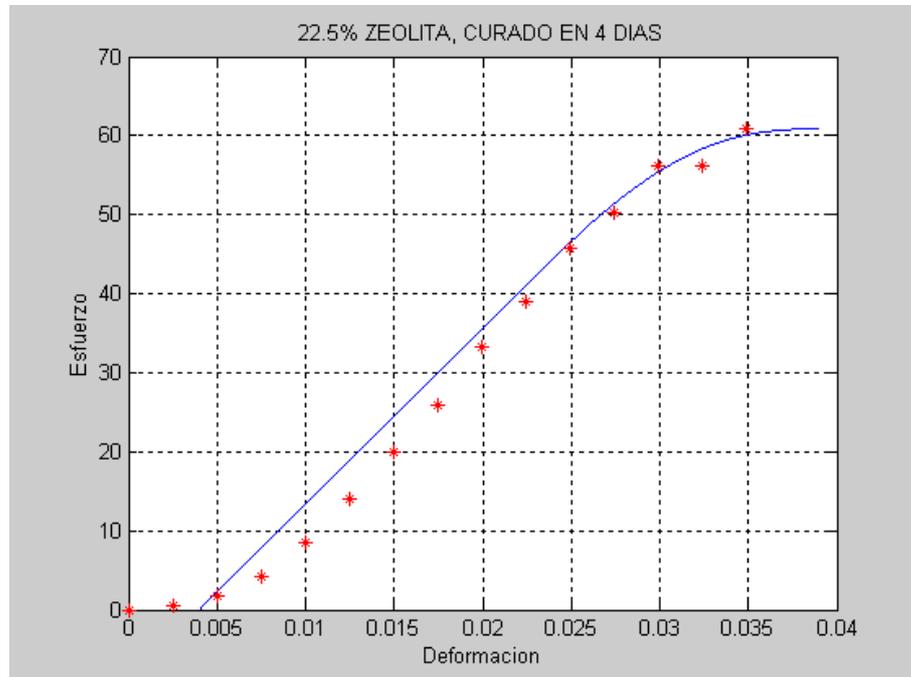


FIGURA 4.18. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 22.5% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 4 DÍAS

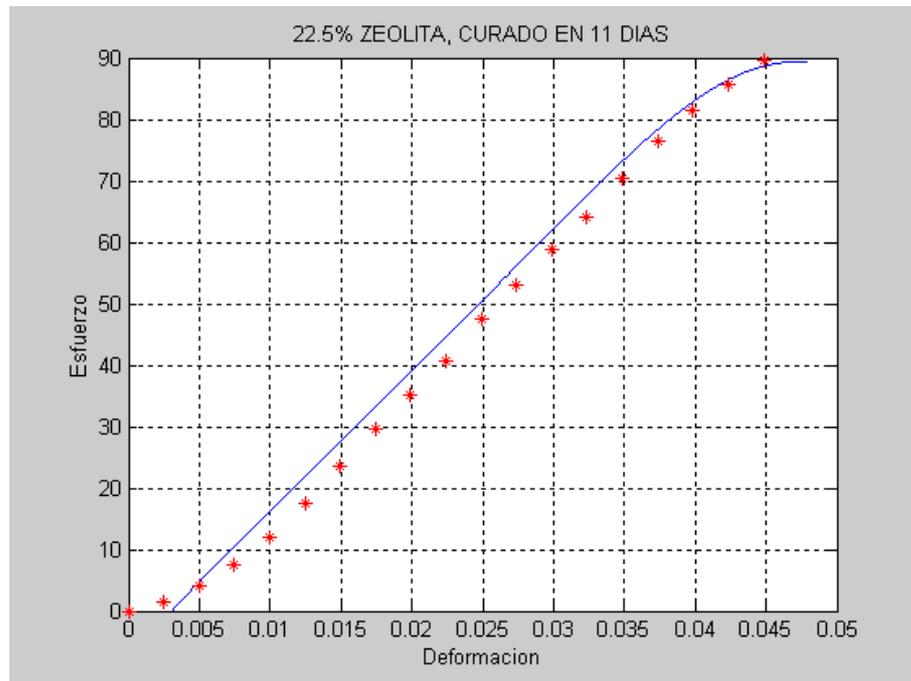


FIGURA 4.19. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 22.5% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 11 DÍAS

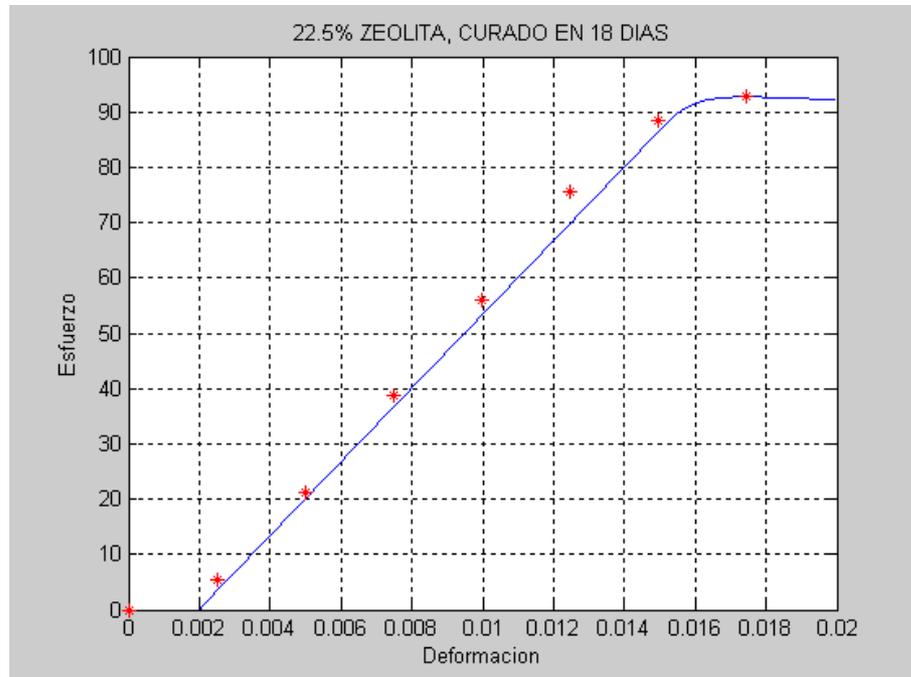


FIGURA 4.20. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 22.5% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 18 DÍAS

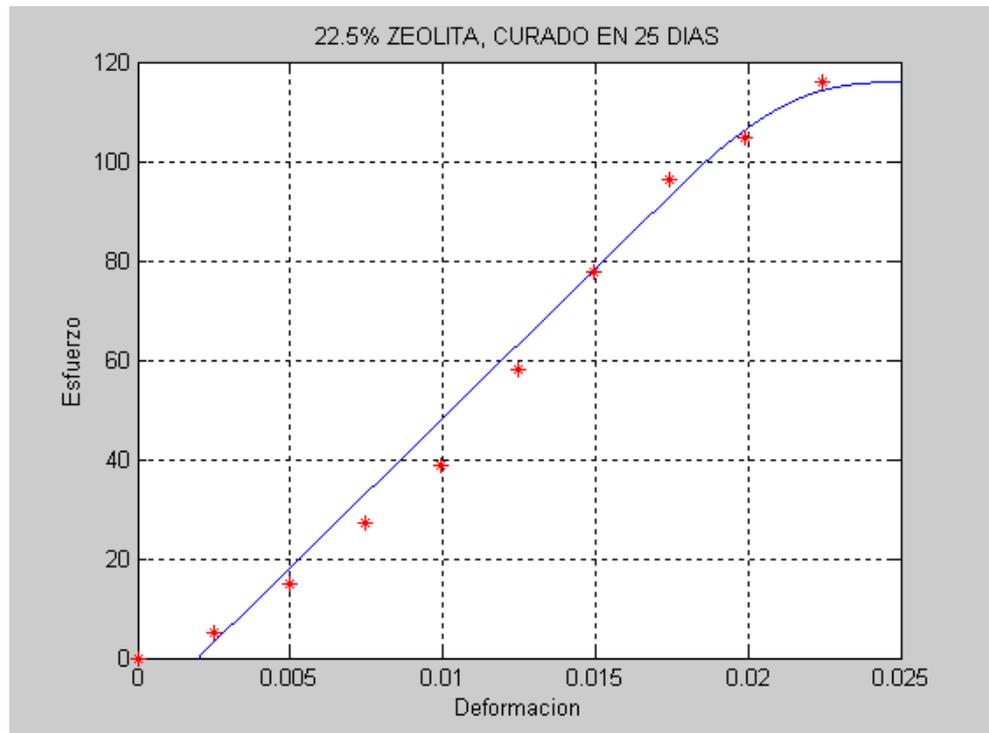


FIGURA 4.21. DIAGRAMA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN PARA 22.5% DE ZEOLITA A UN CURADO DE 25 DÍAS

Cabe aclarar que las unidades en los gráficos presentados en el software Matlab son: el esfuerzo en Mpa, y como sabemos la deformación unitaria es adimensional.

Un resultado tangible lo podemos obtener comparando el valor de la ruptura teórico con el valor de la ruptura experimental, se lo describe en las siguientes tablas:

TABLA 19
ERROR RELATIVO ENTRE LOS ESFUERZOS TEÓRICO Y
EXPERIMENTAL PARA 20% DE ADICIÓN DE ZEOLITA

| | | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|----------|
| ruptura experimental promedio (Mpa) | 61,27 | 66,27 | 89,79 | 111,16 |
| ruptura teórica en matlab (Mpa) | 61,244 | 66,091 | 89,597 | 111,0345 |
| error relativo | -4,58% | -0,27% | -0,21% | -0,12% |

TABLA 20
ERROR RELATIVO ENTRE LOS ESFUERZOS TEÓRICO Y
EXPERIMENTAL PARA 22,5% DE ADICIÓN DE ZEOLITA

| | | | | |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| ruptura experimental promedio (Mpa) | 60,89 | 89,55 | 92,78 | 115,95 |
| ruptura teórica en matlab (Mpa) | 60,87 | 89,45 | 92,73 | 115,89 |
| error relativo | -0,04% | -0,11% | -0,05% | -0,05% |

Los valores expuestos aquí están demostrando que el algoritmo aplicado es efectivo y que ayudaría bastante con las simulaciones de este tipo de materiales, siempre y cuando podamos tener las variables de entrada a disposición.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

1. La simulación del comportamiento de la pasta de cemento tipo I, tuvo una buena aproximación a los datos experimentales.
2. La adición de zeolita en diferentes porcentajes tuvo un crecimiento gradual hasta llegar al 15% de aditivo, luego la resistencia a la ruptura disminuyó.
3. Se comprobó que la resistencia a la compresión aumenta conforme pasan los días de curado, hasta llegar a un máximo asintótico en el día 28.
4. La resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo I con adición del 15% de zeolita fue máxima en comparación al esfuerzo a la compresión dado por el mismo cemento sin aditivo y que el cemento tipo IV (comercial).

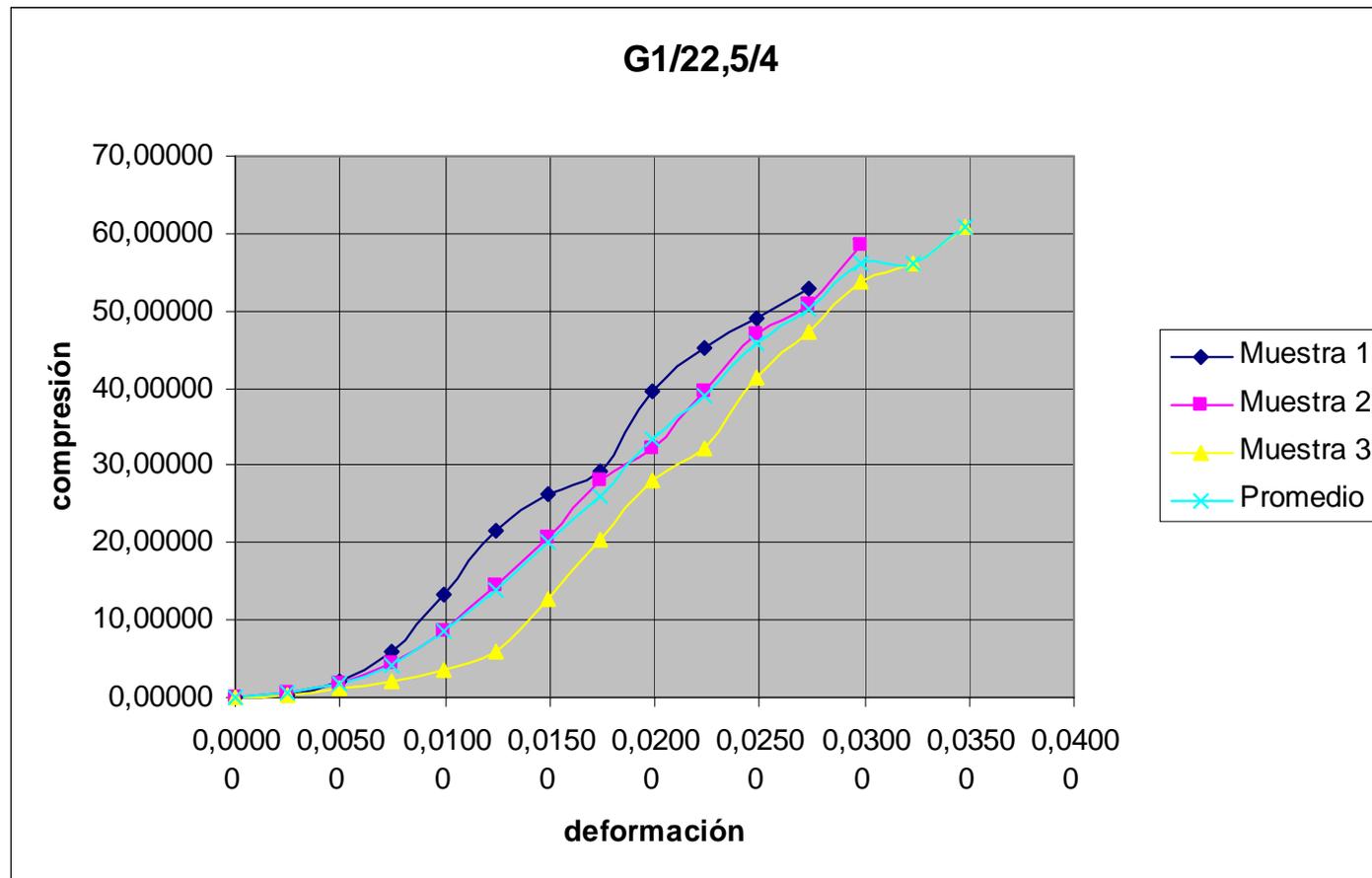
5. Todos los resultados de resistencia a la compresión con diferentes porcentajes de aditivos fueron mayores comparados con el cemento tipo I con 0% de aditivo y que el cemento tipo IV.
6. La zeolita puede ser usada en la pasta de cemento para aumentar su resistencia a la compresión, en caso de faltar un aditivo utilizado actualmente.

Recomendaciones.

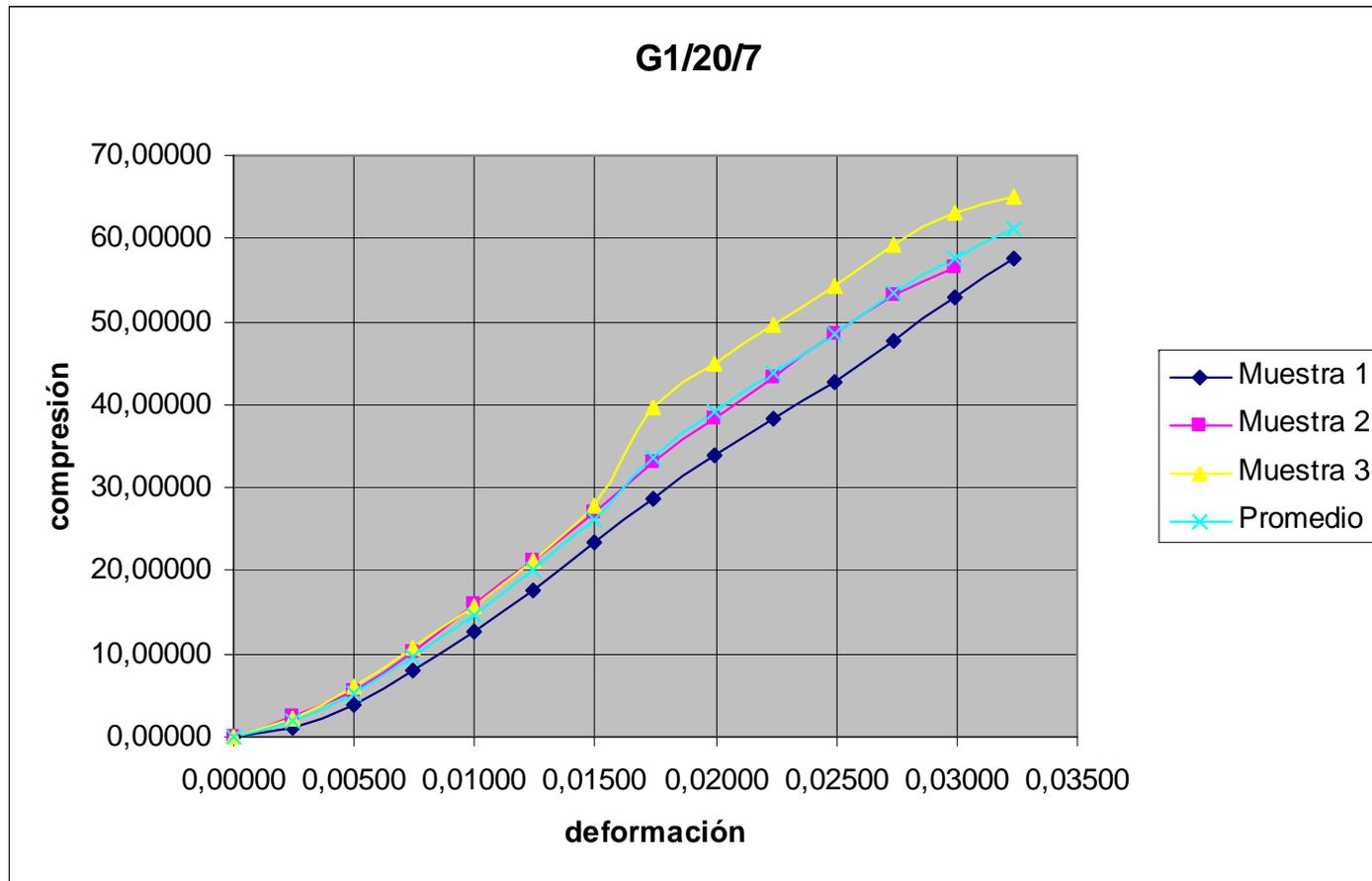
1. Se recomienda examinar otras propiedades de la pasta de cemento con la adición de zeolita para saber si puede o no ser un producto sustituto en la industria cementera.
2. Realizar un estudio de impacto ambiental, para que de encontrarse que la mezcla estudiada fuese un producto sustituto en la industria del cemento, se puede impulsar su utilización.
3. Realizar otras pruebas dentro de las cuales se extienda el tiempo de curado, para conocer su comportamiento en un período largo.
4. Para poder tener una mejor precisión con respecto a los valores del módulo de Young se debería utilizar medidores, como los extensómetros, para obtener una mejor precisión en la deformación y por ende una mejor precisión en el cálculo de los módulos de Young.

APENDICES

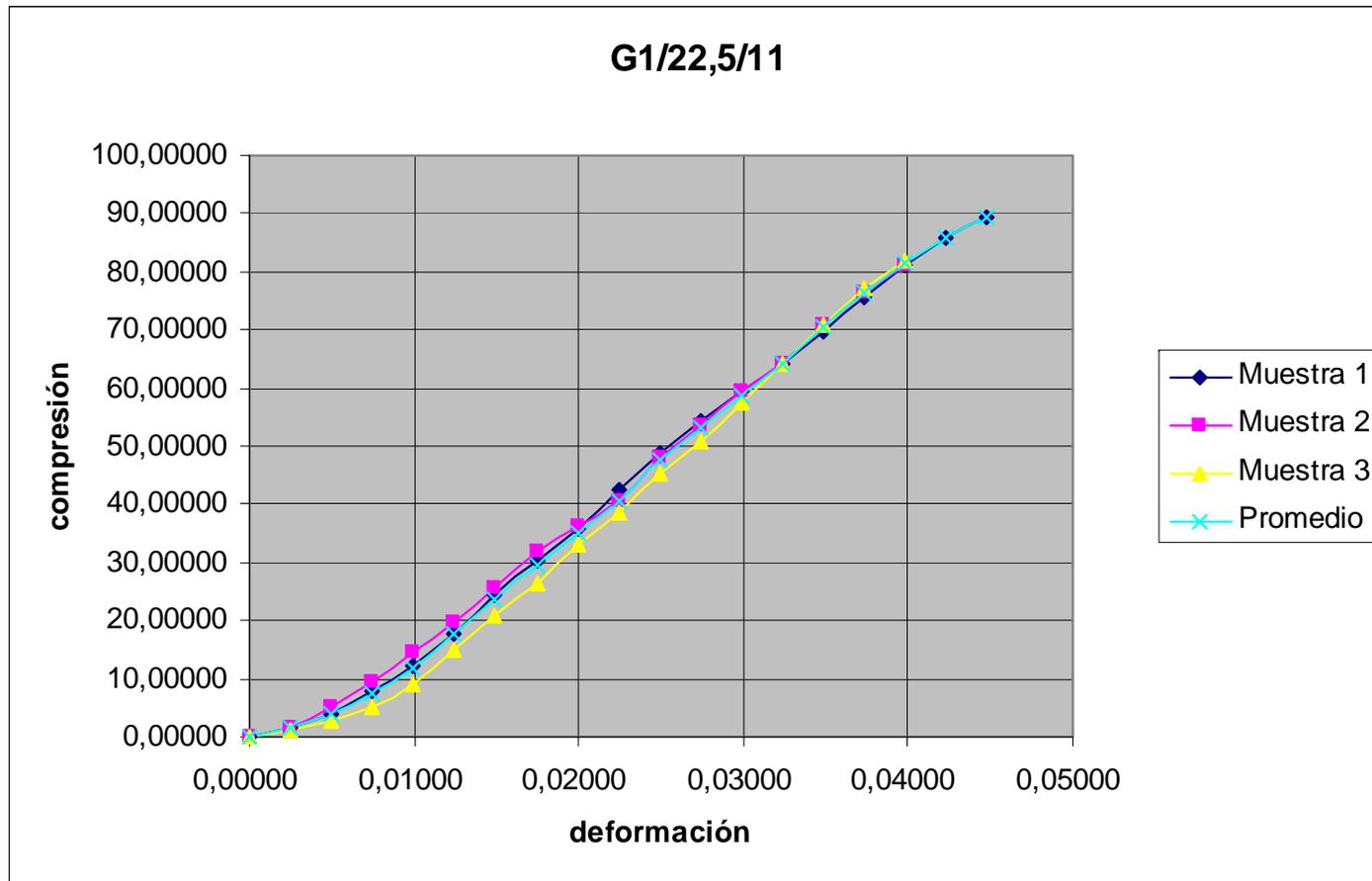
APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 4



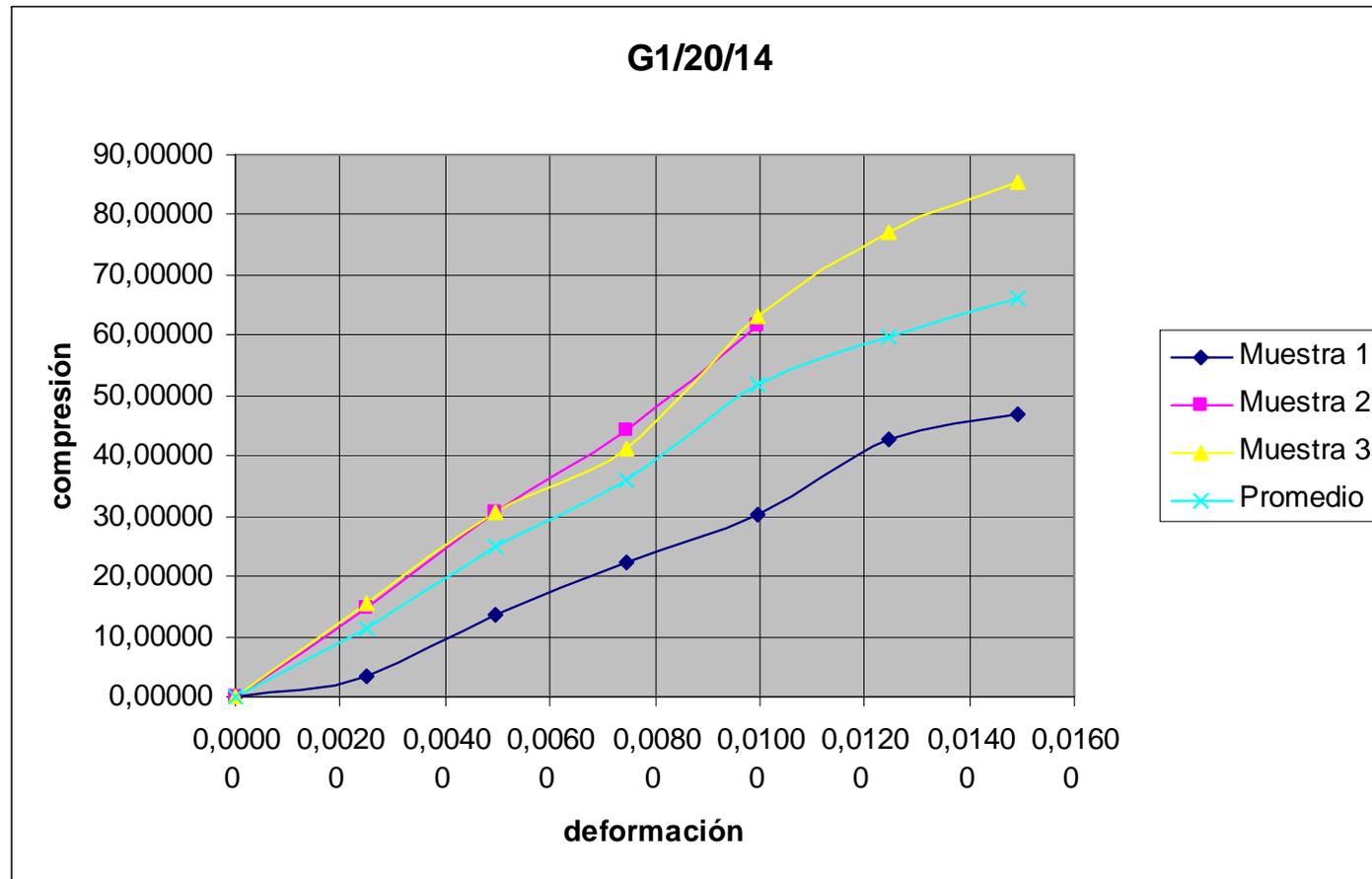
APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 7



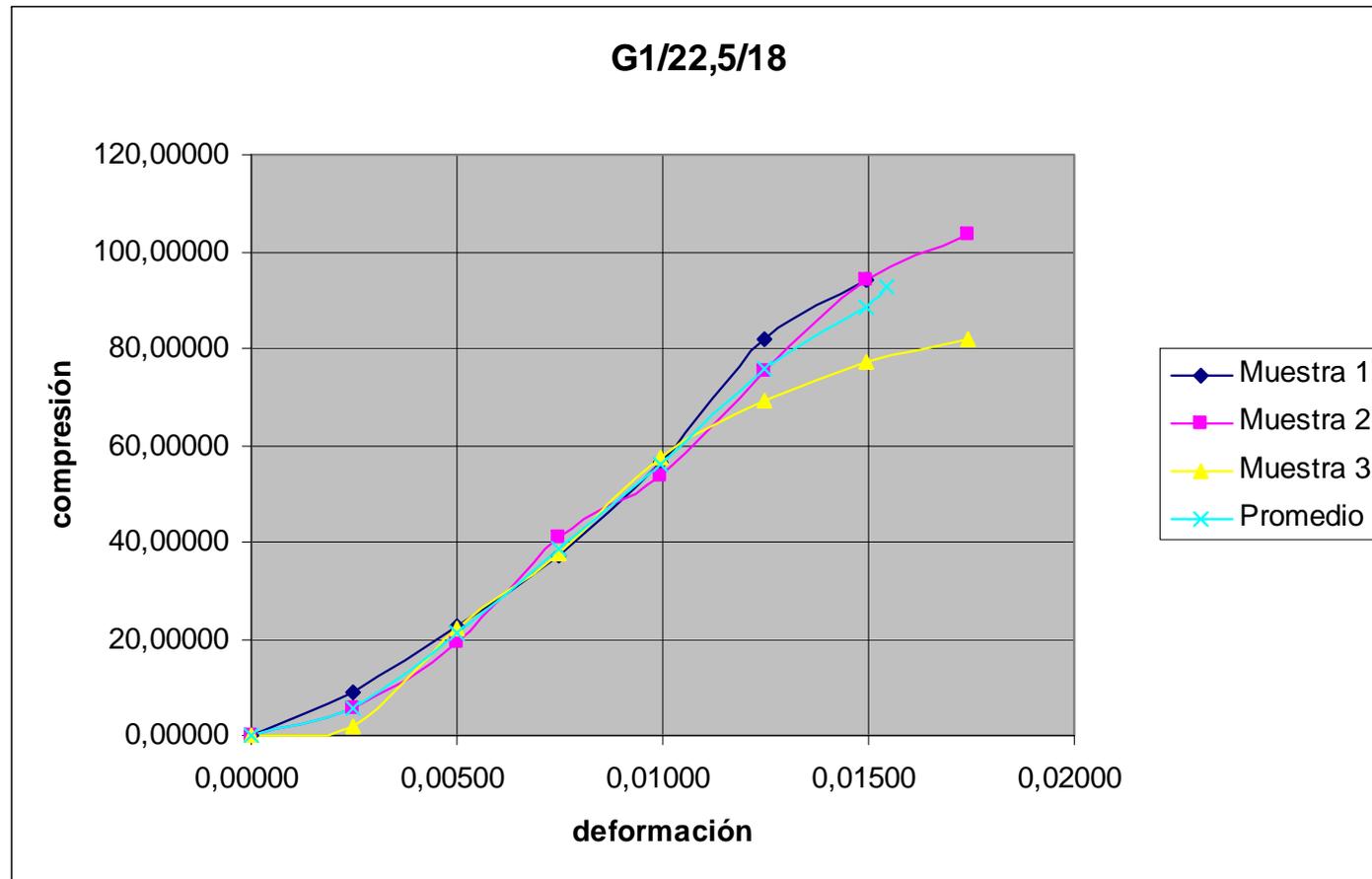
APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 11



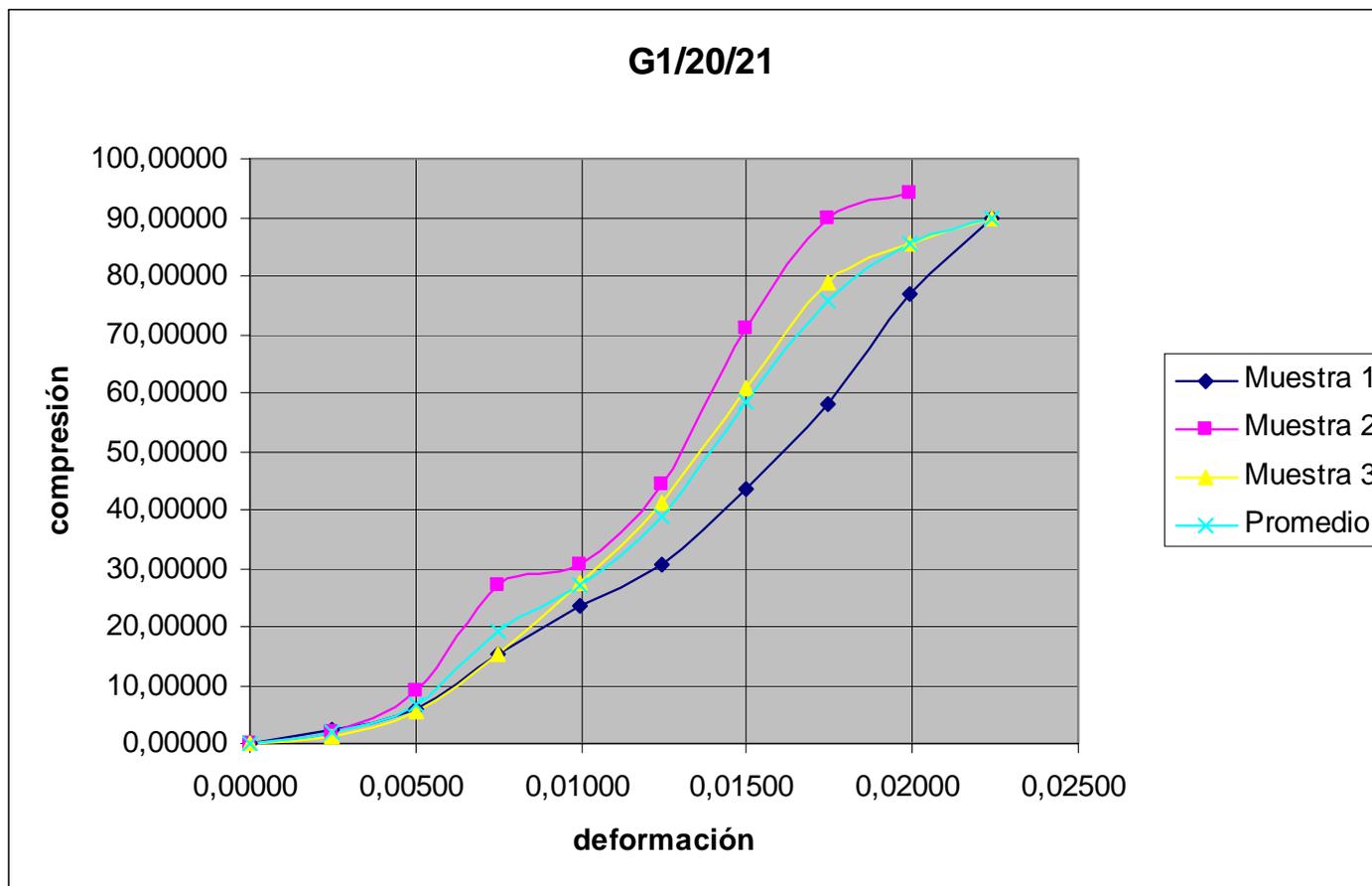
APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 14



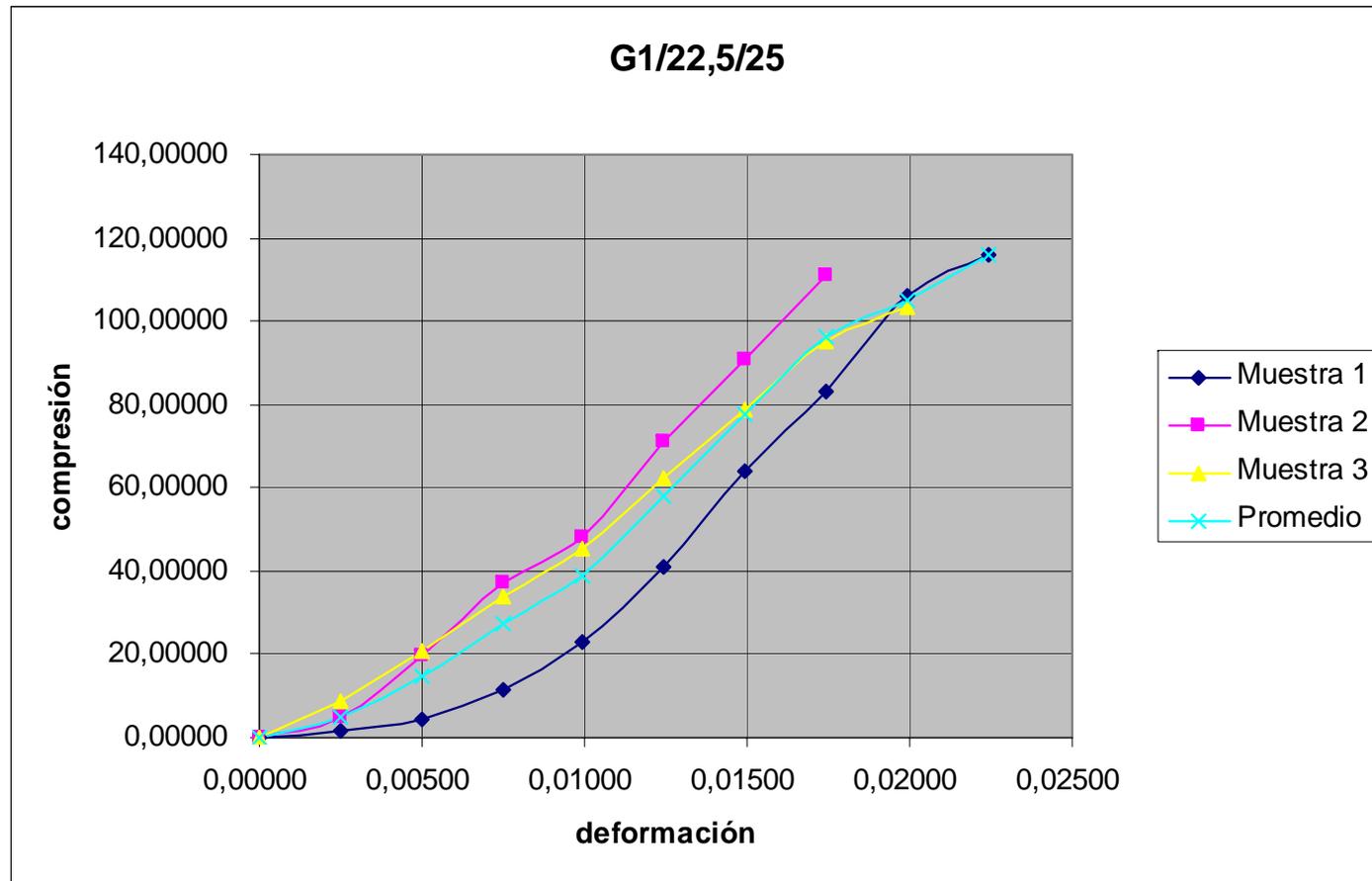
APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 18



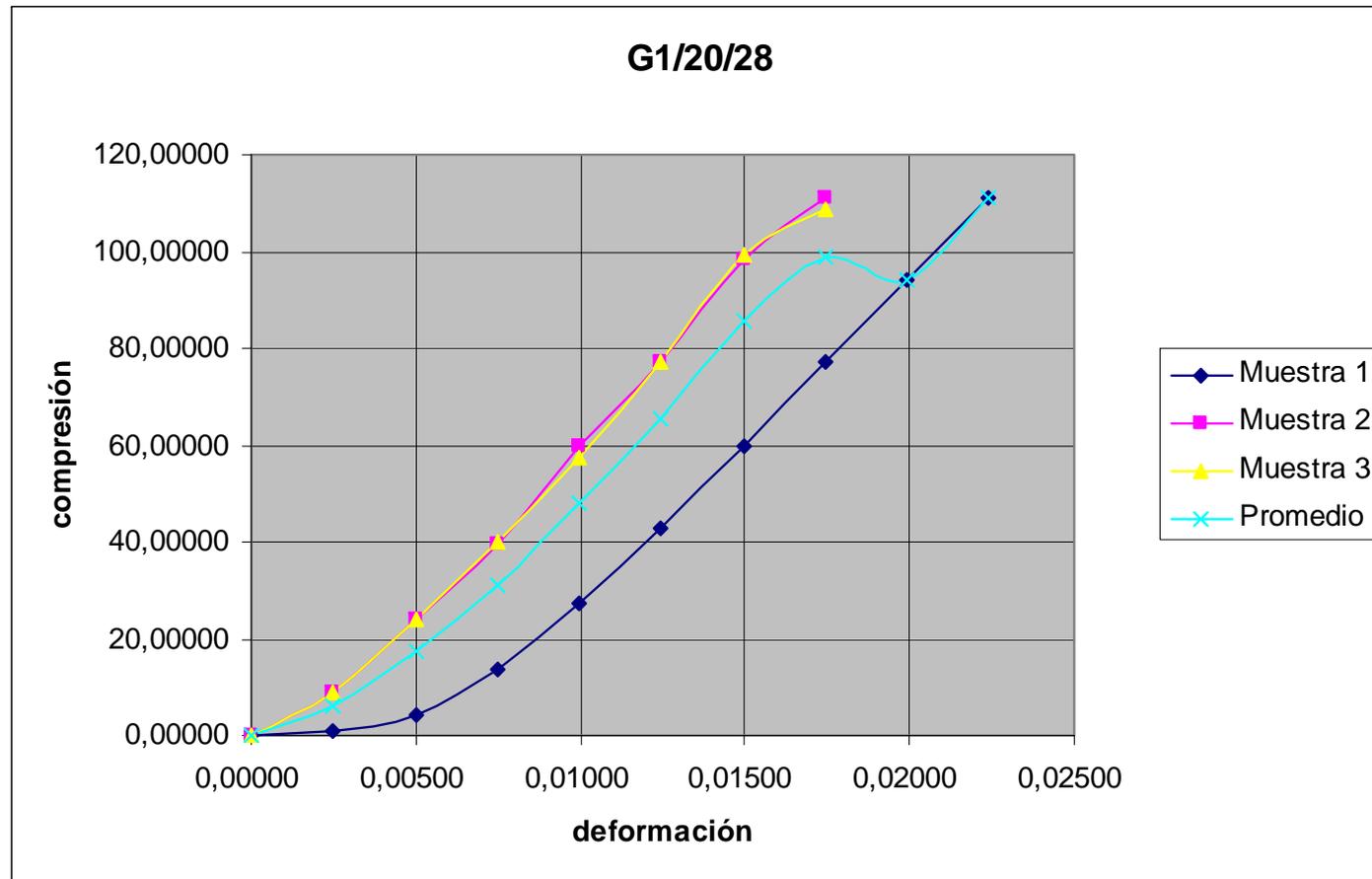
APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 21



APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 25



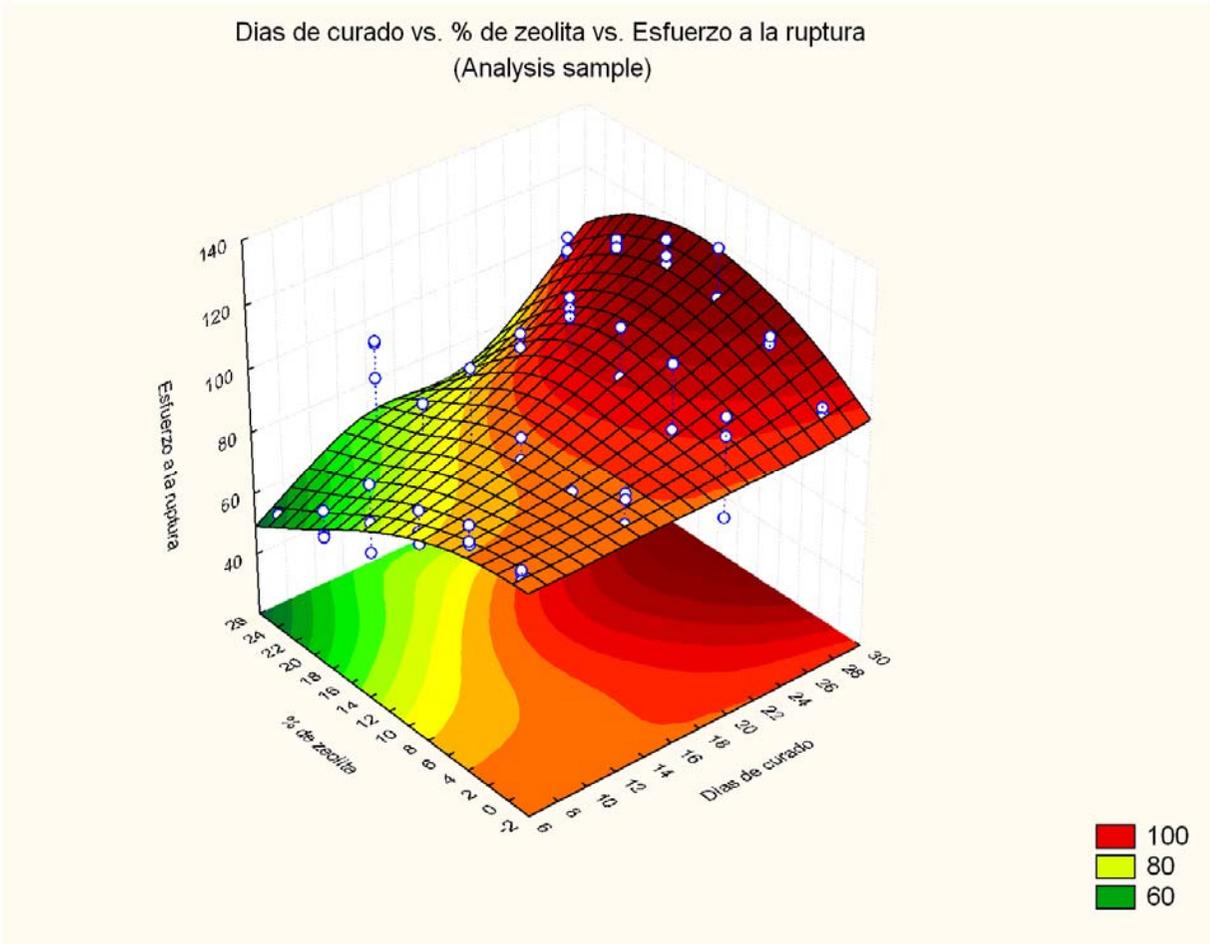
APENDICE A
GRÁFICA DE LAS 3 MUESTRAS CON SU RESPECTIVO PROMEDIO
PARA EL DIA 28



APENDICE B
VALORES DE DUNCAN OBENIDOS DEL PROGRAMA STATISTICA 7

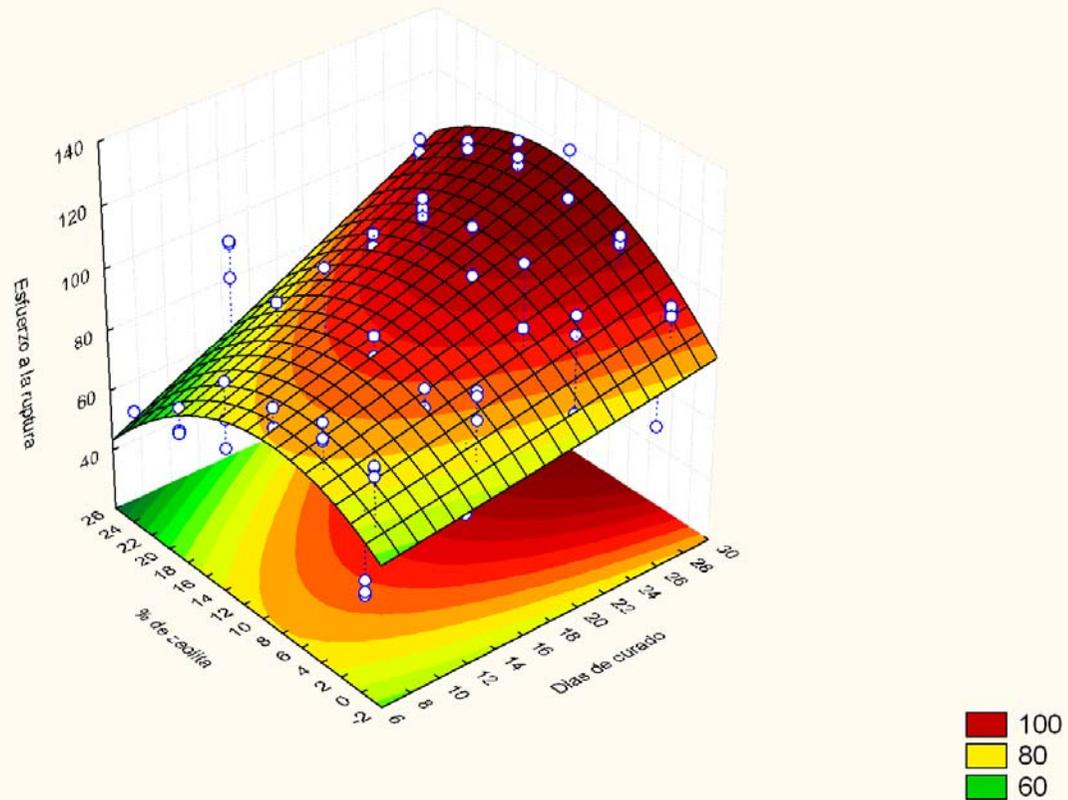
| Duncan test; variable Esfuerzo a la ruptura (análisis grupal) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Approximate Probabilities for Post Hoc Tests | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Error: Between MS = 100,93, df = 48,000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cell No | Días | % | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) | (14) | (15) | (16) | (17) | (18) | (19) | (20) | (21) | (22) | (23) | (24) |
| | curado | zeolita | 89,215 | 89,613 | 81,326 | 73,082 | 59,697 | 52,893 | 95,486 | 82,057 | 87,401 | 89,785 | 64,702 | 91,126 | 96,056 | 91,910 | 102,30 | 112,30 | 91,210 | 57,599 | 95,771 | 108,18 | 110,61 | 116,29 | 110,31 | 99,150 |
| 1 | 7 | 0 | | 0,9616 | 0,3688 | 0,0845 | 0,0021 | 0,0002 | 0,5170 | 0,4169 | 0,8260 | 0,9491 | 0,0097 | 0,8356 | 0,4869 | 0,7817 | 0,1887 | 0,0226 | 0,8352 | 0,0011 | 0,5022 | 0,0582 | 0,0340 | 0,0076 | 0,0359 | 0,3155 |
| 2 | 7 | 5 | 0,9616 | | 0,3771 | 0,0823 | 0,0020 | 0,0002 | 0,5388 | 0,4091 | 0,8021 | 0,9835 | 0,0094 | 0,8640 | 0,5097 | 0,8092 | 0,2001 | 0,0245 | 0,8628 | 0,0010 | 0,5245 | 0,0623 | 0,0367 | 0,0083 | 0,0386 | 0,3323 |
| 3 | 7 | 10 | 0,3688 | 0,3771 | | 0,3200 | 0,0180 | 0,0027 | 0,1529 | 0,9295 | 0,4908 | 0,3756 | 0,0603 | 0,3107 | 0,1411 | 0,2820 | 0,0377 | 0,0024 | 0,3113 | 0,0110 | 0,1470 | 0,0079 | 0,0039 | 0,0006 | 0,0042 | 0,0763 |
| 4 | 7 | 15 | 0,0845 | 0,0823 | 0,3200 | | 0,1296 | 0,0306 | 0,0241 | 0,3089 | 0,1172 | 0,0832 | 0,3122 | 0,0639 | 0,0221 | 0,0571 | 0,0038 | 0,0001 | 0,0650 | 0,0902 | 0,0232 | 0,0005 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0002 | 0,0096 |
| 5 | 7 | 20 | 0,0021 | 0,0020 | 0,0180 | 0,1296 | | 0,4404 | 0,0003 | 0,0166 | 0,0035 | 0,0021 | 0,5447 | 0,0014 | 0,0003 | 0,0012 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0014 | 0,7993 | 0,0003 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 |
| 6 | 7 | 25 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0027 | 0,0306 | 0,4404 | | 0,0000 | 0,0024 | 0,0004 | 0,0002 | 0,1966 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,5690 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 14 | 0 | 0,5170 | 0,5388 | 0,1529 | 0,0241 | 0,0003 | 0,0000 | | 0,1723 | 0,4077 | 0,5438 | 0,0020 | 0,6342 | 0,9491 | 0,6850 | 0,4677 | 0,0872 | 0,6278 | 0,0002 | 0,9725 | 0,1830 | 0,1209 | 0,0353 | 0,1247 | 0,6893 |
| 8 | 14 | 5 | 0,4169 | 0,4091 | 0,9295 | 0,3089 | 0,0166 | 0,0024 | 0,1723 | | 0,5179 | 0,4102 | 0,0575 | 0,3420 | 0,1599 | 0,3129 | 0,0440 | 0,0029 | 0,3438 | 0,0099 | 0,1662 | 0,0094 | 0,0048 | 0,0008 | 0,0051 | 0,0878 |
| 9 | 14 | 10 | 0,8260 | 0,8021 | 0,4908 | 0,1172 | 0,0035 | 0,0004 | 0,4077 | 0,5179 | | 0,7952 | 0,0150 | 0,6921 | 0,3817 | 0,6423 | 0,1365 | 0,0142 | 0,6909 | 0,0019 | 0,3948 | 0,0387 | 0,0219 | 0,0045 | 0,0231 | 0,2378 |
| 10 | 14 | 15 | 0,9491 | 0,9835 | 0,3756 | 0,0832 | 0,0021 | 0,0002 | 0,5438 | 0,4102 | 0,7952 | | 0,0097 | 0,8709 | 0,5170 | 0,8173 | 0,2034 | 0,0250 | 0,8719 | 0,0011 | 0,5310 | 0,0631 | 0,0373 | 0,0084 | 0,0391 | 0,3375 |
| 11 | 14 | 20 | 0,0097 | 0,0094 | 0,0603 | 0,3122 | 0,5447 | 0,1966 | 0,0020 | 0,0575 | 0,0150 | 0,0097 | | 0,0068 | 0,0018 | 0,0060 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0071 | 0,4205 | 0,0019 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0006 |
| 12 | 14 | 25 | 0,8356 | 0,8640 | 0,3107 | 0,0639 | 0,0014 | 0,0001 | 0,6342 | 0,3420 | 0,6921 | 0,8709 | 0,0068 | | 0,6062 | 0,9297 | 0,2523 | 0,0342 | 0,9920 | 0,0007 | 0,6210 | 0,0828 | 0,0503 | 0,0121 | 0,0525 | 0,4067 |
| 13 | 21 | 0 | 0,4869 | 0,5097 | 0,1411 | 0,0221 | 0,0003 | 0,0000 | 0,9491 | 0,1599 | 0,3817 | 0,5170 | 0,0018 | 0,6062 | | 0,6510 | 0,4787 | 0,0921 | 0,6060 | 0,0002 | 0,9725 | 0,1849 | 0,1265 | 0,0374 | 0,1279 | 0,7078 |
| 14 | 21 | 5 | 0,7817 | 0,8092 | 0,2820 | 0,0571 | 0,0012 | 0,0001 | 0,6850 | 0,3129 | 0,6423 | 0,8173 | 0,0060 | 0,9297 | 0,6510 | | 0,2761 | 0,0391 | 0,9325 | 0,0006 | 0,6615 | 0,0916 | 0,0569 | 0,0140 | 0,0588 | 0,4405 |
| 15 | 21 | 10 | 0,1887 | 0,2001 | 0,0377 | 0,0038 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4677 | 0,0440 | 0,1365 | 0,2034 | 0,0002 | 0,2523 | 0,4787 | 0,2761 | | 0,2862 | 0,2512 | 0,0000 | 0,4757 | 0,4772 | 0,3639 | 0,1420 | 0,3640 | 0,7026 |
| 16 | 21 | 15 | 0,0226 | 0,0245 | 0,0024 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0872 | 0,0029 | 0,0142 | 0,0250 | 0,0000 | 0,0342 | 0,0921 | 0,0391 | 0,2862 | | 0,0339 | 0,0000 | 0,0899 | 0,6528 | 0,8377 | 0,6290 | 0,8212 | 0,1676 |
| 17 | 21 | 20 | 0,8352 | 0,8628 | 0,3113 | 0,0650 | 0,0014 | 0,0001 | 0,6278 | 0,3438 | 0,6909 | 0,8719 | 0,0071 | 0,9920 | 0,6060 | 0,9325 | 0,2512 | 0,0339 | | 0,0007 | 0,6187 | 0,0816 | 0,0498 | 0,0119 | 0,0518 | 0,4057 |
| 18 | 21 | 25 | 0,0011 | 0,0010 | 0,0110 | 0,0902 | 0,7993 | 0,5690 | 0,0002 | 0,0099 | 0,0019 | 0,0011 | 0,4205 | 0,0007 | 0,0002 | 0,0006 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0007 | | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 |
| 19 | 28 | 0 | 0,5022 | 0,5245 | 0,1470 | 0,0232 | 0,0003 | 0,0000 | 0,9725 | 0,1662 | 0,3948 | 0,5310 | 0,0019 | 0,6210 | 0,9725 | 0,6815 | 0,4757 | 0,0899 | 0,6187 | 0,0002 | | 0,1853 | 0,1241 | 0,0364 | 0,1270 | 0,7016 |
| 20 | 28 | 5 | 0,0582 | 0,0623 | 0,0079 | 0,0005 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1830 | 0,0094 | 0,0387 | 0,0631 | 0,0000 | 0,0828 | 0,1849 | 0,0916 | 0,4772 | 0,6528 | 0,0816 | 0,0000 | 0,1853 | | 0,7828 | 0,3872 | 0,7966 | 0,3059 |
| 21 | 28 | 10 | 0,0340 | 0,0367 | 0,0039 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1209 | 0,0048 | 0,0219 | 0,0373 | 0,0000 | 0,0503 | 0,1265 | 0,0569 | 0,3639 | 0,8377 | 0,0498 | 0,0000 | 0,1241 | 0,7828 | | 0,5194 | 0,9706 | 0,2213 |
| 22 | 28 | 15 | 0,0076 | 0,0083 | 0,0006 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0353 | 0,0008 | 0,0045 | 0,0084 | 0,0000 | 0,0121 | 0,0374 | 0,0140 | 0,1420 | 0,6290 | 0,0119 | 0,0000 | 0,0364 | 0,3872 | 0,5194 | | 0,5134 | 0,0754 |
| 23 | 28 | 20 | 0,0359 | 0,0386 | 0,0042 | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1247 | 0,0051 | 0,0231 | 0,0391 | 0,0000 | 0,0525 | 0,1279 | 0,0588 | 0,3640 | 0,8212 | 0,0518 | 0,0000 | 0,1270 | 0,7966 | 0,9706 | 0,5134 | | 0,2225 |
| 24 | 28 | 25 | 0,3155 | 0,3323 | 0,0763 | 0,0096 | 0,0001 | 0,0000 | 0,6893 | 0,0878 | 0,2378 | 0,3375 | 0,0006 | 0,4067 | 0,7078 | 0,4405 | 0,7026 | 0,1676 | 0,4057 | 0,0001 | 0,7016 | 0,3059 | 0,2213 | 0,0754 | | 0,2225 |

APENDICE C
COMPARACIÓN CON EL CONTROL CEMENTO TIPO I



APENDICE C COMPARACIÓN CON EL CONTROL CEMENTO TIPO IV

Dias de curado vs. % de zeolita vs. Esfuerzo a la ruptura
(Analysis sample)



BIBLIOGRAFÍA

- [1] MERRITT FREDERICK S. Y KURTZ MAX, P.E., "Guía del Ingeniero Civil", Mcgraw-Hill, Traducido de la primera edición en inglés de Civil Engineering Reference Guide, México 1990.
- [2] ASKELAND DONALD R., "Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Internacional Thomson Editores, México, 1998.
- [3] NEVILLE A.A., "Tecnología del Concreto", Tomo 2, Limusa, México, 1989.
- [4] NEVILLE A.A., "Tecnología del Concreto", Tomo 3, Limusa, México, 1989.
- [5] BAUMEISTER THEODORE, AVALLONE EUGENE A. Y BAUMEISTER III THEODORE, "Marks Manual del Ingeniero Mecánico", Octava Edición, Volumen I, Macgraw-Hill, México, 1984.
- [6] BAUMEISTER THEODORE, AVALLONE EUGENE A. Y BAUMEISTER III THEODORE, "Marks Manual del Ingeniero Mecánico", Octava Edición, Volumen II, Macgraw-Hill, México, 1984.

- [7] BAUMEISTER THEODORE, AVALLONE EUGENE A. Y BAUMEISTER III THEODORE, "Marks Manual del Ingeniero Mecánico", Octava Edición, Volumen III, Macgraw-Hill, México, 1984.
- [8] NAGORE GILISAGASTI PÉREZ Y ELI ELORZA URIA, "El Cemento", Espe, Quito 1999.
- [9] ROBALINO PAOLA, "El uso de la zeolita como una adición mineral para producir cemento puzolánico", ESPOL, Guayaquil, 2004.
- [10] JIMENEZ, H."TECNOLOGIA DEL CONCRETO", Universidad Nacional de Ingeniería del Perú. www.fic.uni.edu.pe. Febrero, 2008.
- [11] B.Y. PEKMEZCI*, S. AKYUZ, "Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete", Cement and Concrete Research 34 (2004) 2175-2179, Faculty of Civil Engineering, Division of Building Materials, Istanbul Technical University, 34469, Maslak, Istanbul, Turkey, 2004.
- [12] HANI H. NASSIF *, HUSAM NAJM, NAKIN SUKSAWANG, "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC", Cement & Concrete Composites 27 (2005) 661-670, Departament of Civil and Environmental Engineering, Rutgers, The State University of New Jersey, 98 Brett Road, SOE Building, 131 A-Wing, Piscataway, NJ 08854, USA, 2004.