ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Simulación Del Comportamiento Del Cemento Tipo I Bajo La Adición De 15% De Zeolita Ecuatoriana En Las Mezclas De Cemento, Mediante Un Curado Al Agua"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por

Aldo Frank León Maridueña

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A mis compañeros de grupo, a todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de la tesis y por la invaluable ayuda prestada del Ing. Rodrigo Perugachi, Director de tesis, y al Ing. Juan Carlos Pindo.

DEDICATORIA

A DIOS, A MIS PADRES ALFONSO E HILDA Y A MI HERMANO RONALD POR NO PERDER LAS ESPERANZAS DE VER RECOMPENSADOS LOS ESFUERZOS Y SACRIFICIOS COMO FAMILIA.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

_____	_____
Dra. Cecilia Paredes V. **DELEGADA DEL DECANO** **DE LA FIMCP** **PRESIDENTE**	**Ing. Rodrigo Perugachi B.** **DIRECTOR DE TESIS**
_____	_____
Ing. Mauricio Cornejo M. **VOCAL**	**Ing. Juan Carlos Pindo M.** **VOCAL**

DECLARACIÓN EXPRESA

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

_____

Aldo Frank León Maridueña

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo, simular durante el período de curado en agua del cemento Tipo I, y mediante la adición del 15% de zeolita ecuatoriana, el comportamiento de la resistencia mecánica, de manera específica el esfuerzo a la compresión, característica esencial del cemento.

El objetivo de estudio fue la pasta de cemento compuesto, resultado de la mezcla de cemento Pórtland tipo I, diferentes porcentajes de zeolita ecuatoriana y agua, la misma que fue curada al agua.
La toma de datos de esfuerzo a la compresión fue un promedio de 3 muestras tomadas a los 7, 14, 21 y 28 días de curado, días equidistantes para poder observar los efectos.

Los datos obtenidos a base de los ensayos de compresión permitieron simular, a partir del comportamiento del esfuerzo de compresión del cemento, las respectivas curvas de esfuerzo-deformación, tanto experimental como teórico, en función del tiempo de curado y del

porcentaje de aditivo adicionado. Los diferentes porcentajes de zeolita ecuatoriana también fueron valores equidistantes en 5 unidades, desde 0% hasta un 25% con el fin de observar también los efectos, los mismos que fueron realizados por los demás integrantes del tópico de graduación. Así mismo, se definen los correctores plásticos (m, a) que implícitamente describen el material estudiado por el día de ensayo.

Finalmente, mediante un análisis estadístico, se logró verificar que a los 28 días de curado se obtuvo el mayor esfuerzo a la compresión y que, el 15% de adición de zeolita es mucho mejor en comparación con otros porcentajes estudiados.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN…….....II

ÍNDICE GENERAL……III

ABREVIATURAS…….....IV

SIMBOLOGÍA……V

ÍNDICE DE FIGURAS…….....VI

ÍNDICE DE TABLAS……...VII

INTRODUCCIÒN……...1

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES…….3

1.1. Planteamiento del problema……....3

1.2. Objetivos de la tesis……4

1.3. Metodología para el desarrollo de la tesis…….....6

1.4. Estructura de la tesis……10

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO…….....12

2.1. Generalidades…….12

2.1.1. El cemento y sus propiedades……...13

2.2. Aditivos usados en la industria cementera…….....26

2.2.1. Generalidades……26

2.2.2. Clasificación……...28

2.2.3. Zeolitas……30

2.3. Métodos de curado del cemento……..32

2.3.1. Generalidades……32

2.3.2. Clasificación……...33

2.3.3. Curado en Agua…….....35

2.4. Herramientas de diseño y modelación……35

2.4.1. Diseño experimental…….35

2.4.2. Modelo Matemático……...38

2.4.3. Principios de Simulación Computacional……..40

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA…….....45

3.1. Recolección de muestras……..45

3.2. Protocolo experimental……..46

3.3. Simulación computacional……67

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS……71

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES……106

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

In	Pulgadas
g.	Gramos
Kg.	Kilogramos
Lb. (s)	Libra(s)
MPa	Mega Pascales
mm.	Milímetros
Pa	Pascales

SIMBOLOGÍA

A	Área
Å	Amstrong
ε_0	Deformación unitaria inicial
ε_f	Deformación unitaria final
σ_{yo}	Esfuerzo de fluencia inicial
σ_u	Esfuerzo último ó de ruptura
f'c	Esfuerzo de ruptura
P	Fuerza
Lo	Longitud inicial
Lf	Longitud final
E	Módulo de elasticidad
%	Porcentaje

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1.	Esquema de la metodología……..	9
Figura 2.1.	Porcentajes de composición del concreto……	14
Figura 2.2.	Resistencia vs Relación agua – cemento…….	17
Figura 2.3.	Zeolita faujasita observada en el microscopio electrónico de barrido. Los cristales son de 50 Å aproximadamente…….	31
Figura 2.4.	Formación de zeolitas en la naturaleza……	32
Figura 2.5.	Esfuerzo – Deformación…….	42
Figura 3.1.	Intervalos permisibles para moldes……..	47
Figura 3.2.	Orden de apasionamiento de la muestra en los moldes……	51
Figura 3.3.	Tolerancia permisible según norma de los días de pruebas……..	52
Figura 3.4.	Molino de mandíbulas, tornillo, disco, bolas……...	55
Figura 3.5.	Balanza electrónica, medidor de humedad y temperatura……	56
Figura 3.6.	Máquina de ensayos universales……..	56
Figura 3.7.	Medidor de carátula……	57
Figura 3.8.	Disminución de tamaño……..	57
Figura 3.9.	Agregado del material al molino de rodillos y cuarteado de zeolita…….	58
Figura 3.10.	Tamizado y zeolita final……...	60
Figura 3.11.	Mezclado cemento + zeolita + agua, mezcla vertiéndose en moldes y probetas listas…….	63
Figura 3.12.	Desmolde……	64
Figura 3.13.	Muestras sumergidas en agua……..	64
Figura 3.14.	Muestras colocadas en la máquina de ensayo……	66
Figura 3.15.	Aplicación de fuerza a la muestra y después de aplicada la fuerza……..	66

Figura 3.16.	Gráfica que genera el algoritmo en Matlab……..	73
Figura 4.1.	Curvas esfuerzo-deformación muestras: m1-m2-m3 Adición: 15% Días de curado: 28……..	75
Figura 4.2.	Curva Esfuerzo - Deformación. Adición: 15% Días de curado: 28……	77
Figura 4.3.	Histogramas módulos de elasticidad para los valores promedios. Adición: 15% Días de curado: 28……..	77
Figura 4.4.	Aproximación de las curvas teórica - experimental	82
Figura 4.5.	Aproximación de las curvas teórica- experimental Ajuste del valor de a=0.6…….	83
Figura 4.6.	Días de curado - esfuerzo a las rupturas……..	86
Figura 4.7.	Ventana de Anova……	87
Figura 4.8.	Probabilidad de error……	88
Figura 4.9.	Medias de los Esfuerzos e intervalo de confianza….	88
Figura 4.10.	Gráfica de las medias……..	89
Figura 4.11.	Comparación con un grupo de control……..	91
Figura 4.12.	Método de Dunnett……...	92
Figura 4.13.	Curvas esfuerzo - deformación. Adición: 15% Días de curado: 7, 14, 21 y 28……	93
Figura 4.14.	Esfuerzos a las rupturas……..	94
Figura 4.15.	Probabilidad normal de los datos……...	95
Figura 4.16.	Valores predictivos y residuales…….	95
Figura 4.17.	Datos del día de curado - % de zeolita - esfuerzo ruptura…….	96
Figura 4.18.	Ventana para selección de las medias aritméticas….	97
Figura 4.19.	Tabla de probabilidades de errores……...	98
Figura 4.20.	Tabla de las medias aritméticas porcentajes de zeolita - esfuerzos de ruptura…….	98
Figura 4.21.	Esfuerzos de ruptura vs. porcentajes de zeolita……..	99
Figura 4.22.	Días de curado - esfuerzos de ruptura grupal……..	99
Figura 4.23.	Días de curado - esfuerzos de ruptura grupal……..	100
Figura 4.24.	Medias aritméticas de los esfuerzos a la ruptura grupal……..	101
Figura 4.25.	Curvas de las medias aritméticas esfuerzo a la ruptura-% de zeolita-días de curado……..	102
Figura 4.26.	Esfuerzos - % de zeolita……..	105
Figura 4.27.	Esfuerzos - días de curado grupal…….	107
Figura 4.28a.	Esfuerzos - días de curado- % de zeolita…….	108
Figura 4.28b.	Esfuerzos - días de curado- % de zeolita…….	109

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Resistencia al ataque de los sulfatos……..	25
Tabla 2	Características generales de la zeolita……	31
Tabla 3	Gramos de puzolana y cemento……..	60
Tabla 4	Deformación - Esfuerzo - Módulo de elasticidad E Adición: 15% días de curado: 28……	74
Tabla 5	Valores promedios Esfuerzo - Módulo de elasticidad E Adición: 15% días de curado: 28……	76
Tabla 6	Media del módulo de elasticidad, desviación estándar e intervalos de la media……	78
Tabla 7	Selección de los módulos promedios Adición: 15% días de curado: 28……	79
Tabla 8	Valores promedios y valores de “m”-“a” Adición: 15% días de curado: 28……..	80
Tabla 9	Valores que ingresamos al algoritmo Adición: 15% días de curado: 28……..	81
Tabla 10	Valores promedios y valores de “m”-“a”. Adición: 15% días de curado: 28……	83
Tabla 11	ERRORES. Adición: 15% días de curado: 28……	84
Tabla 12	Esfuerzos de ruptura……..	85
Tabla 13	Días de curado - esfuerzos de ruptura……	93
Tabla 14	Datos de comparación Duncan’s……..	106

INTRODUCCIÓN

El objetivo del proyecto es simular durante el periodo de curado en agua, el comportamiento de la resistencia a la compresión, característica esencial del cemento, mediante la adición del 15% de zeolita ecuatoriana.

La respuesta a la resistencia mecánica de la pasta del cemento compuesto depende de muchos factores que interactúan y obedecen a la aplicación que se le dé al cemento, estos factores son:

Composición: donde depende el tipo de cemento, el tipo de agua utilizada, las características de los aditivos y la clase de agregados usados. Condiciones de elaboración: los método de mezclado, compactación y curado del cemento.

Condiciones ambientales: es muy importante considerar la temperatura, humedad relativa y el tipo de presiones o cargas a las que el cemento será sometido.

Condiciones de ensayo: El tipo de ensayo que se le realiza al cemento y las variables a ser controladas para su desarrollo como la velocidad de aplicación de carga a las probetas de ensayos.

Tenemos otros factores que inciden aunque no están dentro del estudio realizado como: las variaciones de las propiedades físicas, propiedades químicas, y los costos del proceso de elaboración del cemento.

El cemento es producto de la combinación del clínker + yeso, por lo tanto al ser el clínker una de las materias primas del cemento, para su obtención se consume mucho combustible y se producen emanaciones de CO_2 al medio ambiente. Existen muchos sistemas basados en cemento y se puede indicar que se conoce al cemento compuesto como el resultado de combinar cemento + aditivos minerales, si al cemento compuesto se le agrega agua se lo conoce como pasta, y al adicionar agregados finos a la pasta de cemento el material toma el nombre de mortero. El concreto que resulta de combinar el mortero + agregados gruesos, y el hormigón que es una estructura mucho mas resistente porque se combina el hierro + concreto que son los materiales más usados en las construcciones civiles.

La metodología del proyecto comprende un diseño experimental que planifica la elaboración y ensayos de unidades experimentales, recolección de datos, tratamiento de deformación y análisis estadísticos en base a la resistencia a la compresión, como función de respuesta. Posteriormente, los datos se ingresaron en un algoritmo que simula el comportamiento teórico del material estudiado obteniendo una aproximación del 71% de los datos experimentales.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

El cemento pórtland o cemento tipo I es producto de la combinación del clínker y yeso, a su vez, el clínker es el resultado de la fusión primaria de materiales arcillosos, calizos que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio e hierro en cantidades convenientemente dosificadas. El proceso de obtención del clínker, se lleva a cabo en altos hornos, lo que conlleva a un alto costo energético y la emisión de CO_2 al medioambiente, como uno de los problemas de este proceso.

La necesidad de encontrar un material puzolánico alternativo, que permita reducir la materia prima utilizada, evitando el agotamiento de yacimientos explotados y mantener la industria cementera con materia prima ecuatoriana, que mantenga o mejore las propiedades mecánicas, es una necesidad que se pretende subsanar con este trabajo de investigación.

1.2. Objetivo de la tesis

Objetivo General

- Simular el comportamiento de la pasta de cemento tipo I en presencia de zeolita ecuatoriana como aditivo en diferentes concentraciones, en varios tiempos de curado en agua teniendo como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Objetivos Específicos

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

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

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

- Establecer un diseño experimental y un algoritmo, que permita modelar el resultado de adicionar zeolita al cemento,

mediante la aproximación de las curvas esfuerzo-deformación experimental y teórico, empleando el software Matlab.

1.3. Metodología para el desarrollo de la tesis

Para el desarrollo de la tesis se siguió la siguiente metodología:

Identificación del problema

Estudiar si la zeolita ecuatoriana, 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.

Reducir la emisión de CO_2 como resultado de la disminución de la cantidad de clínker en la formulación del cemento.

Estudiar la posibilidad de mantener ó mejorar la resistencia a la compresión del cemento que se comercializa actualmente.

Diseño de experimentos y simulación

Estrategia del diseño experimental:

- Se realizó un modelo factorial con una variable de respuesta.
    - Función de respuesta: esfuerzo a la compresión.
    - Factores Variables:

- Días de curado (7, 14, 21, 28).
- Porcentaje de zeolita (0, 5, 10, 15, 20, 25 %).

- Factores constantes:
  - Temperatura.
  - Humedad relativa.
  - Relación agua/cemento.

- Los datos obtenidos fueron analizados individual y grupalmente con los métodos Dunnett y Duncan's respectivamente.

Estrategia para modelación:

1. Calcular esfuerzos promedios.
2. Definir zona elástica en la curva esfuerzo-deformación.
3. Calcular correctores plásticos *m* y *a.*
4. Simulación en programa Matlab.

Ejecución del experimento

Se tomaron las muestras del sector de Casas Viejas, identificando el tipo de zeolita a usar.

Proceso de molienda: Las muestras de zeolita debido a su gran tamaño de grano fue reducida a una finura de aproximadamente 45 micras.

Proceso de mezcla: En un recipiente se realizó la mezcla cemento+agua, se agregó 15% de zeolita Tipo I, luego, de esta mezcla se tomó 4 muestras consideradas unidades observacionales, que se colocaron en 3 probetas de 50 cm^3 cada una.

Durante el proceso de curado se establecieron los siguientes tiempos de pruebas: 7, 14, 21 y 28 días respectivamente; para cada día indicado se realizó la toma de datos de pesos y el respectivo ensayo a la compresión a 3 muestras de las 4 unidades observacionales de manera aleatoria. Los instrumentos de medición a ser empleadas fueron balanzas electrónicas, calibrador vernier, medidor de carátula, la máquina de pruebas universales para ensayos de tensión y compresión.

Tratamiento estadístico de los datos

Para el análisis de los datos se usó modelos estadísticos, donde se considera como nivel de significancia un valor de $\alpha=0.05$, lo que asegura que los valores de los módulos de elasticidad están dentro de un 95% de nivel de confianza. Como herramienta para este análisis se empleó el estadístico ANOVA factorial.

Análisis de los resultados estadísticos

Una vez entendidos y tabulados estos resultados, sirvieron para realizar los debidos cálculos de los esfuerzos a la compresión y poder hacer el modelamiento del aumento o disminución de esta propiedad mediante un algoritmo usando el Software Matlab.

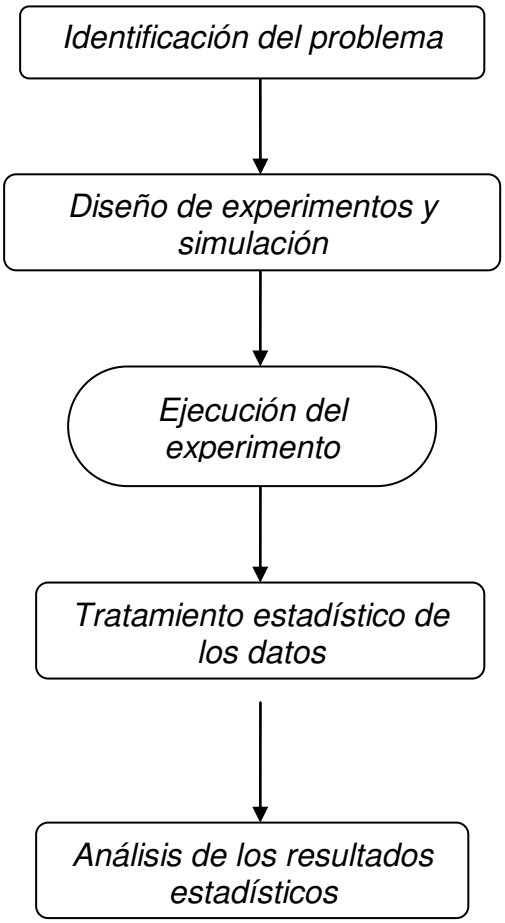


Figura 1.1 Esquema de la metodología

1.4. Estructura de la tesis

El Capítulo 1, corresponde a las generalidades, justificaciones, objetivos que la presente tesis alcanzó.

El Capítulo 2, abarca definiciones y conceptos referentes al cemento y a sus propiedades tanto físicas como química, así

como a describir que son los aditivos, su clasificación y se profundiza en conocer las características de la zeolita ecuatoriana. Se da a conocer los métodos de curado para el cemento, los modelos estadísticos y los fundamentos que permitieron entender el comportamiento de las propiedades mecánicas del cemento, a través del uso de herramientas computacionales (software) para el cálculo y modelado de los ensayos a realizar.

El Capítulo 3, corresponde al análisis estadístico de las muestras recolectadas, para este fin se definió el diseño experimental y respectivo protocolo de procedimiento para la realización de las experimentaciones o ensayos con el fin de obtener datos que sirvieron para el análisis de la variación de la resistencia a la compresión.

En el Capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos en el capítulo anterior, los que son tabulados, graficados y se da un análisis numérico previo a las conclusiones.

El Capítulo 5, tiene el análisis de ingeniería de los datos tabulados en el anterior capítulo y se observa si los objetivos planteados al

inicio de la tesis han sido respondidos, así como las respectivas recomendaciones

Al final se incluyen los apéndices y bibliografías respectivas que permitieron desarrollar la tesis.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

El cemento es la base en la elaboración de estructuras tales como el mortero, el concreto, y el hormigón que son ampliamente utilizados en el sector de la construcción. Sus primeros usos datan de los inicios de 1800 y, desde entonces, el cemento pórtland se ha convertido en el cemento más usado en el mundo. Su inventor le dio ese nombre porque el cemento ya curado es del mismo color que una piedra caliza que se obtiene cerca de Pórtland, Inglaterra. Este tipo de cemento es una mezcla de caliza quemada, hierro, sílice y alúmina. Esta mezcla se mete a un horno de secar y se pulveriza hasta convertirlo en un fino polvo, se empaca y se pone a la venta. [1]

2.1.1 El cemento y sus propiedades

El cemento pórtland es un material grisáceo finamente pulverizado, conformado fundamentalmente por silicatos de calcio y aluminio. Las materias primas usuales a partir de las cuales se fabrica son calizas que proporcionan el CaO y arcillas y esquitos que proveen el SiO_2 y el Al_2O_3. Estos materiales se muelen, se mezclan, se funden en hornos hasta obtener el llamado clínker, y se enfrían y se muelen de nuevo para lograr la finura requerida. [3]

Los materiales cementantes más el agua, al ser combinados con otros materiales como por ejemplo en la estructura del cemento, ocupan volúmenes que están entre el 7% al 15%, el agua esta entre el 14% al 21%, del volumen del concreto (figura 2.1). La pasta de cemento actúa como una especie de goma, endureciéndose por la reacción química entre el cemento, el agua. [2]

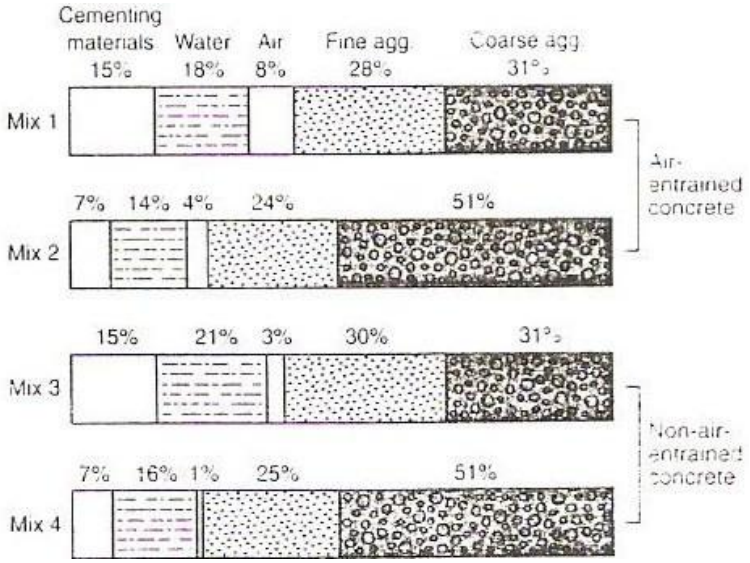


Figura 2.1. Porcentajes de la composición del concreto [2]

Cementantes en general

Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuadas. Esta categoría tecnológicamente importante de materiales incluye no solo el cemento sino también limos, asfaltos y alquitranes, tal como se usan en la construcción de carreteras y otros.

Para la fabricación del concreto estructural se utilizan exclusivamente los llamados cementos hidráulicos. Para completar el proceso químico (hidratación) mediante el cual el

polvo de cemento fragua y endurece para convertirse en una masa sólida se requiere la adición de agua.

Los principales cementantes hidráulicos son las cales, cementos hidráulicos, algunas escorias y ciertos materiales con propiedades puzolánicas. De acuerdo con el grado de poder cementante y los requerimientos específicos de las aplicaciones, estos cementantes pueden utilizarse en forma individual o combinados entre si. [1]

Cuando el cemento se mezcla con el agua para conformar una pasta suave, esta se endurece gradualmente hasta conformar una masa sólida. Este proceso se conoce como **fraguado** y **endurecimiento**. Se dice que el cemento ha fraguado cuando ha ganado suficiente rigidez para resistir una presión arbitrariamente definida, punto a partir del cual continúa endureciendo durante un largo tiempo, o sea que sigue ganando resistencia.

Para cementos normales la relación agua-cemento varía por lo general en el intervalo de 0.40 a 0.60, aunque para los cementos de alta resistencia se han utilizado relaciones tan bajas como

0.25. En este caso, la manejabilidad necesaria se obtiene mediante el uso de aditivos. Cualquier cantidad de agua por encima del 25 por ciento que se consuma en la reacción química produce poros en la pasta de cemento. La resistencia de la pasta endurecida disminuye en proporción inversa a la fracción del volumen total ocupado por los poros. Dicho de otra manera, debido a que los sólidos y no los vacíos son los que resisten los esfuerzos, la resistencia aumenta directamente con la fracción ocupada por los sólidos en el volumen total. Esta es la razón por la cual la resistencia de la pasta del cemento depende principalmente, y disminuye de manera directa, de un incremento en la relación agua-cemento. El proceso químico involucrado en el fraguado y en el endurecimiento libera calor, el cual es conocido como **calor de hidratación**. [3].

Dosificación y mezcla del cemento.

Los componentes de una mezcla, se dosificaron de manera que la pasta de cemento resultante tenga una resistencia adecuada. Para una relación agua-cemento dada se seleccionó la mínima cantidad de cemento que asegure la manejabilidad deseada. La figura 2.2 muestra la influencia decisiva de la relación agua-cemento en la resistencia a la compresión del cemento. Su

influencia sobre la resistencia a la tensión, medida a través de la resistencia nominal a la flexión o módulo de rotura, es pronunciada pero mucho menor que su efecto sobre la resistencia a la compresión. Esto parece ser así porque, además de la relación de vacíos, la resistencia a la tensión depende en gran medida de la resistencia de adherencia entre el agregado grueso y el mortero de cemento (es decir la pasta de cemento más los agregados finos). [3]

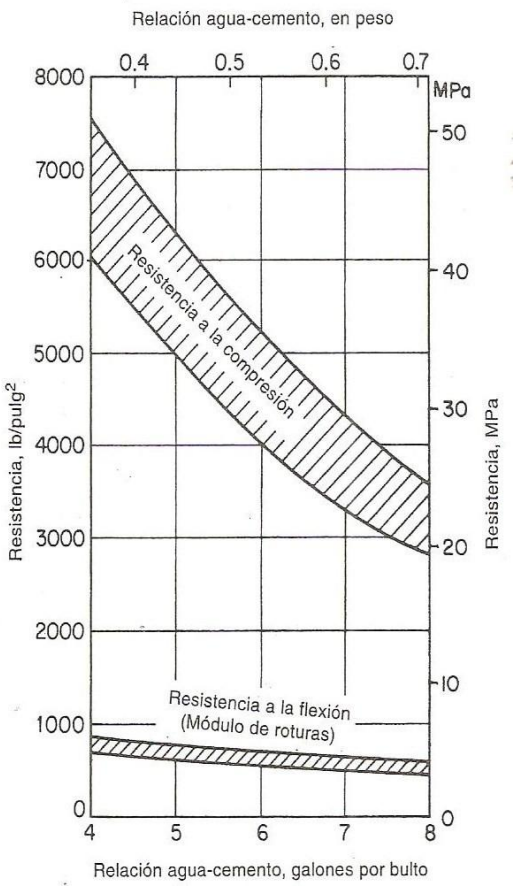


Figura 2.2. Resistencia vs. Relación agua-cemento [3]

La pasta de cemento fresco gana resistencia más rápidamente durante las primeras semanas. El diseño estructural se basa generalmente en la resistencia a los 28 días, de la cual cerca del 70 por ciento, se logra al final de la primera semana después de la colocación. La resistencia final del cemento depende en forma importante de las condiciones de humedad y temperatura durante este periodo inicial. El mantenimiento de las condiciones adecuadas durante este tiempo se conoce como curado. El 30 por ciento de la resistencia o más puede perderse por secado prematuro del cemento; cantidades similares pueden perderse si se permite que la temperatura del cemento caiga a 40°F o menos, durante los primeros días, a menos que después de esto el cemento se mantenga continuamente húmedo durante un buen periodo. [3]

Fabricación del cemento

El cemento pórtland se fabrica en cuatro etapas básicas:

- Trituración y molienda de la materia prima.
- Mezcla de los materiales en las proporciones correctas, para obtener el polvo crudo.
- Calcinación del polvo crudo.

 Molienda del producto calcinado, conocido como clínker, junto con una pequeña cantidad de yeso. [4]

La norma ASTM C 150 establece ocho diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción:

Clasificación de los cementos

Tipo, nombre y aplicación:

I: Normal. Para uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento.

IA: Normal. Uso general, con inclusión de aire.

II: Moderado. Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.

IIA: Moderado. Igual que el tipo II, pero con inclusión de aire.

III: Altas resistencias. Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.

IIIA: Altas resistencias. Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.

IV: Bajo calor de hidratación. Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.

V: Resistente a la acción de los sulfatos. Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

Cementos hidráulicos mezclados

Estos cementos han sido desarrollados debido al interés de la industria por la conservación de la energía y la economía en su producción. La norma ASTM C 595 reconoce la existencia de cinco tipos de cementos mezclados:

- Cemento pórtland de escoria de alto horno - Tipo IS.
- Cemento pórtland puzolana - Tipo IP y Tipo P.
- Cemento de escoria - Tipo S.
- Cemento de escoria - Tipo IS.
- Cemento pórtland modificado con puzolana - Tipo I (PM).
- Cemento pórtland modificado con escoria - Tipo I (SM).

Propiedades Físicas

Cementos recomendables

Las condiciones que deben tomarse en cuenta para especificar y seleccionar el cemento adecuado para una obra, pueden determinarse por la indagación oportuna de dos aspectos principales:

1) las características propias de la estructura, de los equipos y procedimientos previstos para construirla.

2) las condiciones de exposición y servicio del cemento dadas por las características del medio ambiente, del medio de contacto y por los efectos previsibles resultantes del uso destinado a la estructura.

Existen diversos aspectos del comportamiento del cemento en estado fresco o endurecido, que pueden ser modificados mediante el empleo de un cemento apropiado, para adecuar a los requerimientos específicos dados por las condiciones de la obra. Las principales características y propiedades del cemento que pueden ser influidas, modificadas por los diferentes tipos y clases de cemento, son las siguientes:

- Cohesión y manejabilidad
- Pérdida de revenimiento fresco
- Asentamiento y sangrado
- Tiempo de fraguado
- Adquisición de resistencia mecánica
- Generación de calor endurecido
- Resistencia al ataque de los sulfatos

- Estabilidad dimensional (cambios volumétricos)
- Estabilidad química (reacciones cemento-agregados)

En algunos aspectos la influencia del cemento es fundamental, en tanto que en otros resulta de poca importancia porque existen otros factores que también influyen y cuyos efectos son más notables. Para obtener el beneficio adecuado de resistencia de cada tipo y clase de cemento en función de sus características, lo conveniente es especificar la resistencia de proyecto del concreto a edades que sean congruentes con dichas características. Consecuentemente, estas edades pueden ser como sigue:

- Pórtland III 14 ó 28 días.
- Pórtland I, II y V 28 ó 90 días.
- Pórtland-puzolana 90 días, o más. [1]

Propiedades Químicas

La propiedad de liga de las pastas de cemento pórtland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación. El cemento pórtland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro

de ellos conforman el 90% o más del peso del cemento pórtland y son: el silicato tricálcico, el silicato di-cálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio férrico tetracálcico.

Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los tipos de cemento pórtland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

Fórmula - Nombre - Abreviatura.

$2CaO.SiO_2$ - Silicato dicálcico - C_2S

$3CaO.SiO_2$ - Silicato tricálcico - C_3S

$3CaO.Al_2O_2$ - Aluminato tricálcico - C_3A

$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ - Alumnioferrito tetracálcico - C_4AF

MgO - En estado libre.

K_2O y Na_2O - formando pequeños montículos de varios componentes con CaO, Al_2O3, SiO_2 y SO_3

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento pórtland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es el componente cementante más importante en el cemento.

Resistencia al ataque de los sulfatos.

El cemento pórtland es susceptible de sufrir daños en distinto grado al prestar servicio en contacto con diversas substancias químicas de carácter ácido o alcalino. Las soluciones alcalinas pueden ocasionar reacciones del tipo álcali-agregado, en cementos con agregados reactivos con los álcalis.

Estabilidad volumétrica.

Una característica indeseable del cemento, es su predisposición a manifestar cambios volumétricos, particularmente contracciones, que suelen causar agrietamientos en las estructuras. Para corregir este inconveniente, en casos que lo ameritan, se han desarrollado los cementos expansivos que se utilizan en los concretos de contracción compensada.

TABLA 1

RESISTENCIA AL ATAQUE DE LOS SULFATOS

Ácidos inorgánicos:	Rápido	Moderado	Lento	Despreciable
Clorhídrico, fluorhídrico, nítrico, sulfúrico	x			
Fosfórico		x		
Carbónico			x	
Ácidos orgánicos:	**Rápido**	**Moderado**	**Lento**	**Despreciable**
Acético, fórmico, lácteo	x			
Tánico		x		
Oxálico, tartárico				x
Soluciones alcalinas:*	**Rápido**	**Moderado**	**Lento**	**Despreciable**
Hidróxido de sodio > 20\		x		
Hidróxido de sodio 10-20\, hipoclorito de sodio			x	
Hidróxido de sodio < 10\, hidróxido de amonio				x
Soluciones salinas:	**Rápido**	**Moderado**	**Lento**	**Despreciable**
Cloruro de aluminio	x			
Nitrato de amonio, sulfato de amonio, sulfato de sodio, sulfato de magnesio, sulfato de calcio		x		
Cloruro de amonio, cloruro de magnesio, cianuro de sodio			x	
Cloruro de calcio, cloruro de sodio, nitrato de zinc, cromato de sodio				x
Diversas:	**Rápido**	**Moderado**	**Lento**	**Despreciable**
Bromo (gas), solución de sulfito		x		
Cloro (gas), agua de mar, agua blanda -			x	
Amonio (liquido)				x

Estabilidad química

De tiempo atrás se reconoce que ningún arqueado es completamente inerte al permanecer en contacto con la pasta de cemento, debido a los diversos procesos y reacciones químicas, que en distinto grado suelen producirse entre ambos. Algunas de estas reacciones son benéficas porque, contribuyen a la adhesión del agregado con la pasta, mejorando las propiedades mecánicas del cemento, pero otras son detrimentales porque generan expansiones internas que causan daño y pueden terminar por destruir al cemento.

Las principales reacciones químicas que ocurren en el cemento tienen un participante común representado por los álcalis, óxidos de sodio y de potasio, que normalmente proceden del cemento pero eventualmente pueden provenir también de algunos agregados [1]

2.2 Aditivos usados en la industria cementera

2.2.1 Generalidades

Los aditivos generalmente son subproductos de otros procesos o materiales de origen natural. Estas adiciones pueden o no ser procesados antes de ser utilizados en el cemento. Algunos de

estos materiales son denominados puzolanas, que por sí mismo no tienen propiedades cementantes, pero cuando se los combinan con el cemento pórtland, reaccionan para formar componentes cementantes. Otros materiales como la escoria sí exhiben propiedades cementantes. [5]

Un material se lo puede considerar como aditivo cuando se lo incorpora individualmente al cemento, es decir, se puede ejercer control sobre su dosificación. De esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivas si se les maneja y administra por separado del cemento pórtland. Lo cual no deja de ser más bien una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento. Los aditivos para cemento se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente su comportamiento en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el cemento endurecido. [1]

2.2.2 Clasificación

Los aditivos se definen como productos químico que se agregan a la mezcla de cemento en cantidades no mayores de 5% por masa de cemento durante el mezclado o durante una operación adicional antes de su colocación, comúnmente son usados entre el 0.2% y el 0.5% del peso del cemento.

Los aditivos se clasifican por su función en el cemento. La clasificación de la Norma ASTM C 494-92 es la siguiente:

- Tipo A Reductores de agua.
- Tipo B Retardantes.
- Tipo C Acelerantes.
- Tipo D Reductores de agua y retardantes.
- Tipo E Reductores de agua y acelerantes.
- Tipo F Reductores de agua de alto rango o superfluidificantes.
- Tipo G Reductores de agua de alto rango y retardantes o Superfluidificantes y retardantes. [6]

Tipos de aditivos.

Los aditivos pueden ser orgánicos o inorgánicos en cuanto a su composición pero su carácter químico, que difiere del mineral, es su característica esencial. Estos materiales pueden ser usados

individualmente o en combinación en el cemento. Generalmente los materiales más usados como elementos de adición para el cemento son: la cenizas volantes, las escorias molidas de altos hornos, el humo de sílice y las puzolanas naturales.[5]

Los materiales cementantes suplementarios (adiciones) están basados del CSA Standard A23.5, *Supplementary Cementing Materials,*el cual forma parte del CSA A3000, *Cementitions Materials Compendium.* Esta categoría de estandarización es para los cuatro tipos de materiales adicionantes al cemento: las cenizas volantes y las puzolanas naturales, las escorias granuladas, el humo de sílice y los materiales cementantes (ASTM C618, ASTM C989, ASTM C 1240) [2]

Puzolanas Naturales

Varios materiales naturales poseen o pueden ser procesados para poseer propiedades puzolánicas. Estos materiales están también cubiertos por la especificación normativa ASTM C618. Las puzolanas naturales tienen generalmente un origen volcánico y estos materiales silíceos tienden a ser reactivos si son enfriados rápidamente. Tenemos como puzolanas naturales a los cristales volcánicos, zeolitas, cenizas de cáscara de arroz y tierra de diatomeas.

2.2.3 Zeolitas

Zeolita del griego zeo (hervir) y lithos (piedra) porque hervía cuando las zeolitas son alumino-silicatos cristalinos de elementos de los grupos I y II, en particular, Na, K, Mg, Ca, Sr, y Ba. Se representan mediante la fórmula empírica siguiente (Breck,1974):

$$M_{2/n}O^*\ Al_2O_3^*\ ySiO_2^*\ wH_2O$$

Donde, M representa el ión intercambiable, en su estado de oxidación, **y** es 2 o mayor y **w** representa el agua contenida en los orificios de la zeolita. Unas de las características más interesantes de las zeolitas desde el punto de vista de sus posibles aplicaciones, es su capacidad para actuar como tamices moleculares dada su propiedad de absorber otras moléculas dentro de su estructura. Algunas características de la zeolita se muestran en la tabla 2. [5]

La estructura cristalina de la zeolita es apreciada en el microscopio electrónico de barrido (figura 2.3) con mucha claridad. Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas.

TABLA 2

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZEOLITA.

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

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

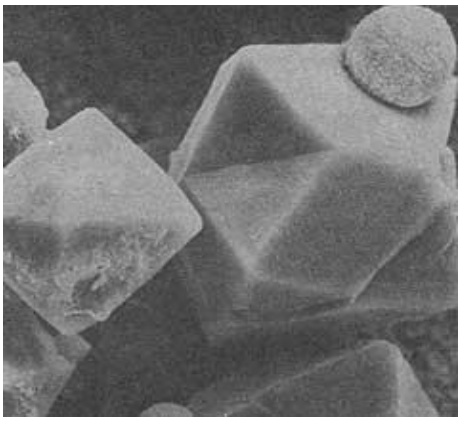


Figura 2.3. Zeolita faujasita. Observada en el microscopio electrónico de barrido. Los cristales son de 50 Å aproximadamente.

Formación de zeolitas

Las zeolitas son obtenidas de la naturaleza de fenómenos volcánicos. Las zeolitas son caracterizadas por su habilidad para perder y ganar agua reversiblemente y por intercambiar constituyentes que presentan mejores cambios de estructura. [6]

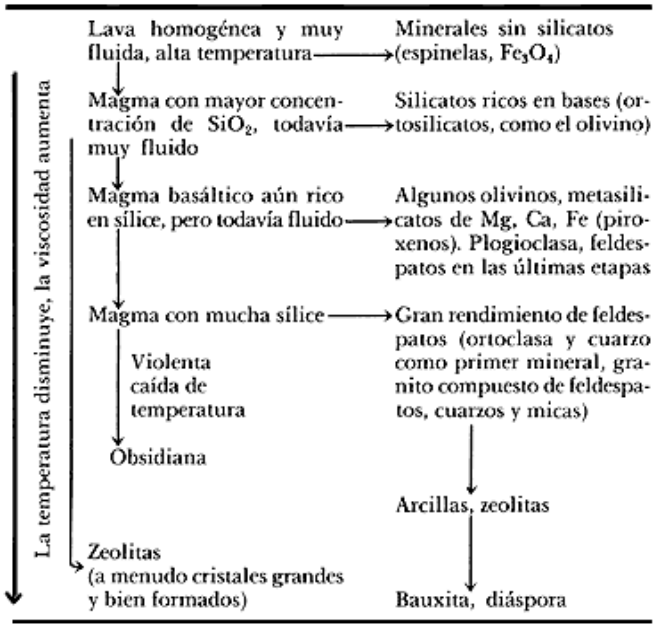


Figura 2.4. Formación de zeolitas en la naturaleza [6]

2.3 Métodos de curado del cemento.

2.3.1 Generalidades

El curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y de temperaturas satisfactorios en el cemento, durante un periodo definido inmediatamente después de la

colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas. Nunca se exagerará al enfatizar la necesidad de un curado adecuado.

Al mezclar cemento pórtland con agua, se lleva a caso la reacción química denominada hidratación. El grado hasta el cual esta reacción se llegue a completar, influye en la resistencia, y en la densidad del cemento.

Como objetivos del curado se tiene:

1. Prevenir (o reaprovisionar) la pérdida de humedad del cemento.
2. Mantener una temperatura favorable en el cemento durante un periodo definido.

2.3.2 Clasificación

El cemento puede mantenerse húmedo (y en ciertos casos a temperatura favorable) con el uso de tres métodos de curado:

Curado por interposición de un medio húmedo

Método que mantiene la presencia de agua de mezclado en el cemento durante el período inicial de endurecimiento. Entre

estos se incluye al estacionamiento o inmersión, al rociado y a las cubierta de húmedas saturadas.

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

Curado por control de la evaporación.

Método que evita la pérdida del agua de mezclado del cemento sellando la superficie. Esto se puede lograr cubriendo al cemento 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 cemento. Esto se logra normalmente con vapor directo, serpentines de calentamiento, o cimbras o almohadillas calentadas eléctricamente.

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 cemento, las instalaciones de producción (en obra o en planta), la apariencia estética y la economía.

2.3.3 Curado en agua

El curado en agua es el conocido procedimiento de curado por interposición de un medio húmedo que el contratista puede emplear para prevenir o impedir la evaporación del agua, lo que se logra de las siguientes maneras o métodos:

- Formación de lagunas sobre el cemento después que éste ha fraguado.
- Aplicación de agua por roseado a la superficie del cemento.
- Cobertura de la superficie de cemento con tierra, arena, aserrín o paja, mantenidos húmedos por roseado.
- Cobertura de la superficie con aspillera o estera de algodón que se mantienen húmedas el tiempo necesario.[6]

2.4. Herramientas de diseño y modelación

2.4.1. Diseño experimental

Mediante el diseño experimental se pretende obtener la máxima información de un proceso de la forma más rápida, económica, simple y precisa posible. Consiste en planificar los experimentos de la forma más racional posible, de manera que, los datos obtenidos puedan ser procesados adecuadamente y

que mediante un análisis de los objetivos, conduzcan a deducciones aceptables del problema planteado.

No se puede tener un trabajo experimental sin previamente tener algún tipo de diseño, porque al final se puede dar que los datos que se van obteniendo, no permitan llegar al análisis de los objetivos requeridos. Se puede indicar que hay tres principios del diseño experimental:

Reproducibilidad: Se define como la repetición del experimento básico para poder estimar el error puro o aleatorio, que permitirá determinar si las diferencias observadas son significativas o no.

Aleatorización: En las mayorías de las pruebas estadísticas se suponen que las muestras son independientes unas de otras y que sólo están afectadas por los parámetros que se controlan. Para esto se debe tomar las muestras al azar o aleatoriamente de la población investigada.

Control local: Se indica con esto de manera implícita en primer lugar, al tipo de diseño experimental que se haya realizado y en segundo lugar, a las medidas que se toman para controlar el proceso experimental.

La estadística es otra de las herramientas usada en esta tesis, mediante la cual se analiza los métodos científicos para la toma de muestras, recopilación, presentación de los datos, tanto para la deducción de conclusiones como para tomar decisiones razonables de acuerdo con los análisis.

Dependiendo del método empleado en la medida, el valor observado se acercará más o menos al valor real. Sin embargo, en la mayor parte de los casos no es posible conocer el valor real para determinar la precisión de la observación por lo que existirá cierta incertidumbre en el resultado. Esto quiere decir que la variable que se estudia de alguna forma, lleva consigo un determinado error.

En general el análisis estadístico se aplica a aquellas situaciones frecuentes en las investigaciones científicas, técnicas a nivel de laboratorio y de planta piloto o en procesos de producción, en que se encuentran fenómenos que no son exactos y perfectamente repetibles.

2.4.2. Modelo Matemático

Mediante la mecánica del continuo que define las notaciones a ser empleadas por medio de las ecuaciones usadas en la ineslasticidad computacional, se puede describir el comportamiento de los esfuerzos que se producen sobre un material determinado, conociendo que existen campos de elasticidad y plasticidad de los materiales al ser aplicada sobre estos una carga específica. Las ecuaciones que describen este comportamiento son:

1. $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{e} + \Delta\varepsilon^{p}$

2. $\dot{\sigma} = E * \dot{\varepsilon}^{è} \Rightarrow \varepsilon * \Delta\varepsilon = E * \Delta\varepsilon - E * \Delta\varepsilon^{p}$
$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E * \Delta\varepsilon^{p}$

3. $\dot{\varepsilon}^{p} = \dot{\lambda} * \frac{\partial F}{\partial \sigma}$
$\Rightarrow \dot{\lambda} * Sgn(\sigma) \Rightarrow \Delta\varepsilon^{p} = \Delta\lambda * Sgn(\sigma_{n+1}^{tr})$

4. $\dot{\sigma}_{y} = H' * \dot{\lambda} \Rightarrow \Delta\sigma_{y} = H' * \Delta\lambda$

Ley de endurecimiento

Módulo lineal

$$\sigma_{y} = \sigma_{yo} + H' * \lambda$$

$$\sigma_{y} = \sigma_{yo}\left(1 + \frac{2 * a}{m + \lambda} * \sqrt{m * \lambda}\right)$$

Si se reemplaza en 4 se tiene:

$$\dot{\sigma}_y = H' * \dot{\lambda}$$

$$H' = \frac{\partial \sigma_y}{\partial \lambda} = H'(\lambda) \Rightarrow \Delta\sigma_y = H'_{n+1} * \Delta\lambda \mapsto \text{aproximación}$$

$$H'_{n+1} = H'(\lambda_{n+1})$$

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

5. Consistencia $F_{n+1} = 0$

$$F(\sigma, \sigma_y) \Rightarrow F_{n+1} = F(\delta_{n+1}, \delta_{y,n+1})$$

$$F_{n+1} = Sgn(\sigma_{n+1})(\sigma^{tr}_{n+1} - \Delta\lambda * E * Sgn(\sigma_{n+1})) - \sigma_{y,n} - H'_{n+1} * \Delta\lambda = 0$$

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n + \Delta\lambda$$

$$H'_{n+1} = H'(\lambda_{n+1}) = H'(\lambda_n \overset{cte}{\hookleftarrow} + \Delta\lambda)$$

$$H'_{n+1} = H'(\Delta\lambda)$$

$$r(\Delta\lambda) = \left| \sigma^{tr}_{n+1} \right| - \Delta\lambda * E - \sigma_{y,n} - H'_{n+1} * \Delta\lambda = 0$$

$$r(\Delta\lambda) = F^{tr}_{n+1} - \Delta\lambda(E + H'_{n+1}) = 0$$

$$r_{k+1} \approx r_k + \frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda}\Big|_k * \partial\Delta\lambda = 0$$

$$\Rightarrow \partial\Delta\lambda = -\left(\frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda}\Big|_k \right)^{-1} * r_k$$

$$\Delta\lambda_{k+1} = \Delta\lambda_k + \partial\Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda_{k+1} = \Delta\lambda_k - \left(\frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda} \right)^{-1}_k * r_k$$

$$r(\Delta\lambda) = F_{n+1}^{tr} - \Delta\lambda (E + H'_{n+1})$$

$$\frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda} = -E - H'_{n+1} - \Delta\lambda * \frac{\partial H'}{\partial \Delta\lambda}$$

Si $H' = \frac{\partial \sigma_y}{\partial \Delta\lambda}$;

$$\frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda} = -(E + H' + \Delta\lambda * \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial \Delta\lambda^2})$$

Se tiene que

$$\sigma_y(\lambda) = \sigma_{yo}(1 + \frac{2*a}{m + (\lambda_n + \Delta\lambda)} * \sqrt{m(\lambda_n + \Delta\lambda)})$$

2.4.3. Principios de Simulación Computacional

Una vez que se tiene las ecuaciones de inelasticidad haciendo uso del software Matlab, se trabajó en un algoritmo que permita calcular teóricamente el comportamiento del material teniendo los valores del esfuerzo a la fluencia la ruptura, el módulo de elasticidad, la deformación máxima, las constantes del material **m** y **a**.

El ensayo a la compresión permite obtener para cada intervalo de deformación ε los datos necesarios para determinar el esfuerzo a la compresión máxima o de ruptura $f'c$.

Haciendo uso de la relación $f'c = \frac{P}{A}$ donde:

P= fuerza o carga aplicada sobre la probeta.

A= área donde es aplicada la carga P.

Para cada intervalo de deformación y su respectivo esfuerzo a la compresión, se puede determinar el respectivo valor del módulo de elasticidad E (MPa), que es un parámetro que caracteriza al material dentro de su comportamiento elástico, la relación

$$E = \frac{f'c}{\varepsilon} = \frac{f'c_f - f'c_o}{\varepsilon_f - \varepsilon_o}$$

Es la que permite encontrar este valor. Es de notar que la relación mostrada, en una gráfica o curva de esfuerzo – deformación, el módulo de elasticidad es la pendiente de la misma.

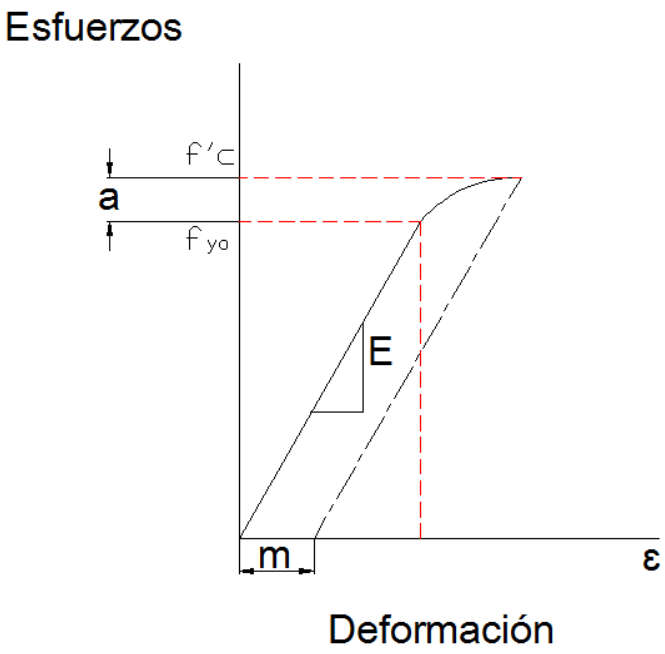


Figura 2.5. Esfuerzo-Deformación

Como se puede apreciar en la curva esfuerzo-deformación se tiene dos variables **"a"** y **"m"** para el esfuerzo y la deformación respectivamente que son característicos de cada material conocidos como correctores plásticos y que tienen una relación muy estrecha en la ecuación de ineslasticidad. Para poder calcular las variables **"a"** y **"m"** se tomó para los respectivos días de curado los valores de esfuerzos promedios y a partir de los mismos se determinó el valor del módulo de elasticidad E y por medio de la relación:

$$m = \frac{(E_{prom} * \varepsilon_{total}) - f'c}{E_{prom}}$$

$$a = \left(\frac{f'c}{\sigma_y} \right) - 1$$

Donde:

$E_{prom} = Módulo_Elástico$

$\varepsilon_{total} = deformación_total$

$f'c = Esfuerzo_de_Ruptura$

$f_{yo} = \sigma_{yo} = Esfuerzo_de_Fluencia$

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1 Recolección de muestras

El procedimiento a seguir tanto para la recolección de muestras y su respectivo tratamiento, hasta llegar al proceso de ensayo a la compresión, están basados en las especificaciones según la norma ASTM C109.

La muestras tomadas (rocas de zeolita ecuatoriana) fueron obtenidas del sector conocido como Casas Viejas, el cual se encuentra vía a la costa en la ciudad de Guayaquil, el material recolectado fue aproximadamente 25 Kg. de rocas enteras. Para la experimentación se tomó cerca de 10 Kg. para un grupo de 5 integrantes y para este caso particular 1170 g. del cual se dividió en dos mezclas, una al 15 y otra al 17.5%, con 540 y 630 g. respectivamente.

3.2 Protocolo Experimental

DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN.

Basado en especificaciones según norma ASTM **C1005**. La balanza fue evaluada para una carga total de 2000g.

MOLDES DE ESPECÍMENES

Los moldes están dispuestos en 3 compartimientos que tienen forma cúbica de 2 in o 50 mm, las partes de los moldes al ser ensambladas permanecieron juntas. Están hechos de metal duro para evitar atascarse por el mortero de cemento. Para nuevos moldes, la dureza Rockwell no debió ser menor a 55HRB. Los lados del molde fueron lo suficientemente rígidos para prevenir extensiones u ondulamiento. Las caras interiores son superficies planas y se ajustaron a la siguiente tabla de tolerancias.

TABLE 1 Permissible Variations of Specimen Molds

	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
Parameter	New	In Use	New	In Use
Planeness of sides	<0.001 in.	<0.002 in.	[<0.025 mm]	[<0.05 mm]
Distance between opposite sides	2 in. ± 0.005	2 in. ± 0.02	[50 mm ± 0.13 mm]	[50 mm ± 0.50 mm]
Height of each compartment	2 in. + 0.01 in. to − 0.005 in.	2 in. + 0.01 in. to − 0.015 in.	[50 mm + 0.25 mm to − 0.13 mm]	[50 mm + 0.25 mm to − 0.38 mm]
Angle between adjacent faces[A]	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°

[A] Measured at points slightly removed from the intersection. Measured separately for each compartment between all the interior faces and the adjacent face and between interior faces and top and bottom planes of the mold.

Figura 3.1. Intervalos permisibles para moldes

MEZCLADOR, TAZÓN Y REMO

Un mezclador de tipo mecánico accionado por electricidad, del tipo equipado con remo y tazón de mezclado especificado en **C305.**

PALETA

Una hoja de acero de 4-6 in (100 - 150 mm) en longitud, con bordes rectos.

MÁQUINA DE PRUEBAS

La máquina de ensayo hidráulico o tipo de tornillo, contó con suficiente apertura entre el soporte superior e inferior, que permitió el uso de esta máquina para la verificación o ensayo. La carga aplicada al espécimen de prueba tiene una exactitud de ±1.0%.

TEMPERATURA Y HUMEDAD

TEMPERATURA

La temperatura del aire en la vecindad de la losa de mezclado, los materiales secos, moldes, soportes, y el tazón de mezcla se los mantuvo a 73.5±5.5 ºF o 23±3 ºC. La temperatura del cuarto húmedo y del agua en el tanque de depósito estuvo a 73.5±3.5 ºF o 23±2 ºC.

HUMEDAD

La humedad relativa del laboratorio estuvo no menos del 50%. Según los requerimientos de la especificación **C511.**

PREPARACIÓN DE LOS MOLDES

- Se colocó una fina capa de agente deslizante en las caras interiores del molde y en las placas base no-absortivas. Luego, se aplicó aceites y grasas usando un trapo impregnado, para posteriormente remover con un trapo el exceso de agente en las caras y las placas base, para así obtener una fina capa sobre las superficies. Se usó un aerosol lubricante, se aplicó dicho agente a una distancia de 6-8 in (150-200 mm.) de las caras o placas base para poder cubrirlos de manera completa. Luego de aplicar el aerosol, se limpió la superficie con un paño para remover el exceso de aerosol. La capa residual fue lo suficiente como para obtener una visible huella dactilar a simple luz.

- Se selló las superficies donde se unen las mitades del molde aplicando una capa de grasa ligera como “petrolatun”. La cantidad de grasa, fue suficiente para extruir ligeramente al ajustar las dos mitades, posteriormente se removió todo exceso con un trapo.

- Después de colocar el molde sobre su placa base se removió cuidadosamente, con un paño seco cualquier exceso de aceite o grasa de la superficie del molde y de la placa base a las cuales se aplicaron sellador impermeable. Como sellador se usó en algunos casos parafina, cera microcristalino o una mezcla de tres partes de parafina con cinco partes de colofonia medidas en masa. Se licuó el sellador al calentarlo entre 230-248 °F (110-120 °C). El efecto fue un sellado impermeable al aplicar el sellador licuado a las líneas externas de contacto entre el molde y su placa base.

MOLDES DE PRUEBA

Se comenzó a moldear los especímenes dentro de un tiempo total no mayor a 2 min. 30 s, después de haber sido completada la mezclada original del lote. Se puso una capa de mortero de 1 in. (25mm) (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde) en todos los compartimentos cúbicos. Se apisonó la probeta en cada compartimiento cúbico 32 veces durante 10 s en 4 rondas, cada ronda estuvo en ángulos rectos con respecto a la otra y consiste de ocho golpes contiguos sobre la superficie del espécimen, como se muestra en la figura 3.2. La presión de apisonado fue la suficiente para asegurar el correcto llenado del molde y las 4 rondas de

apisonado de los moldes fueron completadas en un cubo antes de seguir con otro. Cuando el apisonado de la primera capa en todos los compartimentos se completó, los compartimentos se llenaron con la mezcla sobrante y se volvió a apisonar de la misma forma. Durante el apisonado de la segunda capa y al completarlo, en la parte superior de los compartimentos quedó algo de mezcla y ligeramente se retiró del borde superior de los moldes.

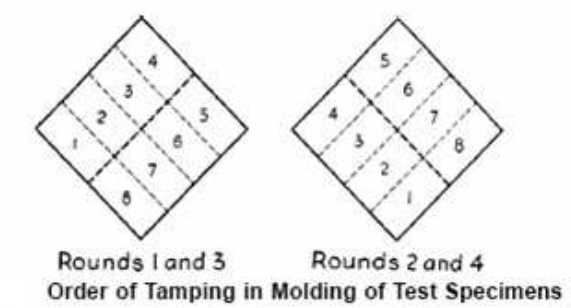


Figura 3.2. Orden de apasionamiento de la muestra en los moldes

ALMACENAMIENTO DE ESPECÍMENES DE PRUEBA

Inmediatamente una vez completado el moldeo, se colocaron los especímenes de prueba en el cuarto húmedo durante un tiempo de 20 a 72 horas, con sus superficies superiores expuestas al aire húmedo pero protegidas de goteo. Si los especímenes son removidos de los moldes antes de las 24 horas, mantenerlos en los estantes del cuarto húmedo hasta que tenga 24 horas de edad, luego sumerja los especímenes, excepto aquellos para prueba de las 24 horas, en agua de lima saturada en los tanques de almacenamiento construidos de

materiales no-corrosivos. Mantenga el agua de almacenamiento limpia cambiándola cuando sea necesario.

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO DE COMPRESIÓN

1. Los especímenes de prueba, inmediatamente después de su remoción del cuarto húmedo, incluso los probados a las 24 horas, fueron sumergidos en agua. Todos los especímenes para una edad de prueba deberán romperse dentro de una tolerancia permisible prescrita como se muestra :

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

Figura 3.3. Tolerancia permisible según norma de los días de pruebas

Se mantuvo los especímenes cubiertos con un paño húmedo hasta ser probado. Los especímenes para las pruebas fueron dispuestos en agua a 73,5 ± 3,5 ºF (23 ± 2 ºC) y sumergidos completamente hasta su momento de prueba.

2. Cada espécimen, se limpió con un trapo, hasta tener una superficie seca, y se removió cualquier grano de arena suelto o

incrustaciones de las caras que vayan a estar en contacto con los bloques de soporte de la máquina de pruebas. Se chequeó las caras por medio de un filo recto y cuando existió curvaturas en las caras se las trabajó para obtener superficies o descarte del espécimen.

3. Se aplicó la carga a las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las caras planas del molde. Cuidadosamente se colocó el espécimen en la máquina de pruebas debajo del centro del bloque de soporte superior. Antes de probar un cubo, se cercioró de que el bloque esférico estuvo libre de inclinación. Se aplicó 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 400lbs/s (900-1800 N/s). Se obtuvo dicha velocidad de movimiento de la platina durante la primera mitad de la anticipada carga máxima y no se ajustó en la velocidad del movimiento de la platina en la última mitad del proceso de carga especialmente mientras el cubo estuvo cediendo antes de la falla.

EQUIPOS Y MATERIALES

MOLIENDA

1. Zeolita en bruto.
2. Balanza electrónica SARTORIUS certificada ISO 9001.
3. Molinos de mandíbulas, rodillo, disco y de bolas.
4. Máquina tamizadora.
5. Tamices de #14, 18, 40, 50, 100, 200, 325.
6. Cuarteadora.
7. Recipientes.
8. Combo o martillo.

MEZCLADO

1. Balanza electrónica SARTORIUS certificada ISO 9001.
2. Mezcladora HOBART.
3. Medidor de temperatura y humedad relativa.
4. Tazones de mezcla, espátula.
5. Cemento tipo I.
6. Zeolita.
7. Agua.

ENSAYO DE COMPRESIÓN

1. Máquinas de pruebas universales

   Marca: Soiltest

Modelo: Versa Tester AP 1020. Unidad de respuesta: Kg.

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

2. Balanza electrónica SARTORIUS certificada ISO 9001.

3. Medidor de carátula.

Figura 3.4. Molinos de mandíbulas, tornillos, disco y de

bolas

Figura 3.5. Balanza electrónica, medidor de humedad y temperatura

Figura 3.6. Máquinas de ensayos universales
Modelos: Versa Tester AP 1020 y CT-900 Norma ASTM C-39

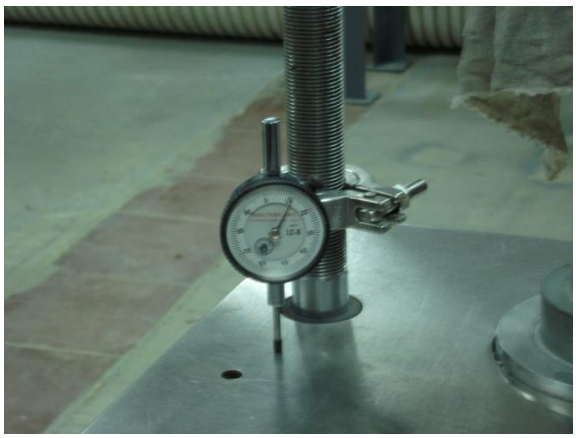


Figura 3.7. Medidor de carátula

PROCEDIMIENTO PARA MOLIENDA

1. Se disgregó la zeolita en bruto en piedras pequeñas que puedan ingresar fácilmente al primer molino. Este procedimiento es conocido como disminución de tamaño.

Figura 3.8. Disminución de tamaño

2. Se encendió el molino de mandíbulas, y se agregó el material poco a poco.
3. Se repitió el procedimiento con todo el material.
4. Se pesó la zeolita y se usó la cantidad requerida.
5. Se encendió el molino de rodillo, y se agregó el material poco a poco.
6. Se repitió el procedimiento con todo el material.
7. Se cuarteó la zeolita, con el objetivo de homogenizar el material.

Figura 3.9. Agregado del material molino de rodillo y cuarteado de la zeolita

8. Se tomó una porción del cuarteo y pesó 100 gramos.
9. Se llevó estos 100 gr. al tamizador, con tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo. Si el material pasa al recipiente que sirve de fondo en aproximadamente el 50%, se pasa al siguiente paso.
10. Se regresó al proceso de molienda, se encendió el molino de disco, y se agregó el material poco a poco.
11. Se repitió el procedimiento con todo el material.
12. Se cuarteó nuevamente la zeolita.
13. Se tomó una porción del cuarteo y se pesó 100 gramos.
14. Se llevó estos 100 gr. al tamizador, con tamices # 50, 100, 200, 325 y fondo.
15. Se regresó al proceso de molienda, se encendió el molino de bolas, se agregó el material y se molió por 45 minutos.
16. Se cuarteó la zeolita.
17. Se tomó una porción del cuarteo y se pesó 100 gramos.
18. Nuevamente se llevó estos 100 gr. al tamizador, con tamices # 325 y fondo.
19. El 60% de la muestra pasó al fondo y se paró el procedimiento de molienda. Si esto no se cumple, se repite los pasos del 15 al 18.

Figura 3.10. Tamizado y zeolita final

MEZCLADO

Es un proceso que se realizó, según el porcentaje de las relaciones de cemento-zeolita y agua.

TABLA 3

Gramos de puzolana y cemento

Fracción de	PUZOLANA(g)	CEMENTO(g)

puzolana (%)		
5	15	285
7.5	22.5	277.5
10	30	270
12.5	37.5	262.5
15	**45**	**255**
17.5	**52.5**	**247.5**
20	60	240
22.5	67.5	232.5
25	75	225
27.5	82.5	217.5

- Esta tabla aplica para una mezcla total de 300 g. (Cemento + puzolana).
- Este valor es por cada cubo, pero como se tiene 3 cubos por 4 días (7, 14, 21, 28), será: un total de 300g * 12 cubos= 3600g (mezcla).
- Agua/mezcla=0.3 por lo que se tiene agua= 0.3*3600g= 1080g de agua.

PROCEDIMIENTO PARA MEZCLA

1. Se enceró la balanza electrónica tomando en cuenta el peso del recipiente a usar.
2. Se pesó en la balanza electrónica el cemento en la cantidad indicada.
3. Se pesó en la balanza electrónica la zeolita en la cantidad indicada.
4. Se pesó en la balanza electrónica el agua en la cantidad indicada.

5. Para homogeneizar los materiales, se mezcló el cemento y zeolita en seco en la mezcladora eléctrica por 10 minutos aproximadamente.
6. Se apagó la mezcladora, se cambió a velocidad uno, nuevamente se la encendió y se agregó poco a poco el agua, una vez que se adicionó toda, se mantuvo la mezcladora a esta misma velocidad por 45 seg.
7. Se apagó la mezcladora, y se cambió a la segunda velocidad, se encendió nuevamente y se mezcló por 2 min., incluyendo los 45 seg. anteriores.
8. Durante el proceso de mezcla, se armaron los moldes, se recubrieron las paredes internas con aceite de grado 10 y se limpió el exceso del mismo.
9. Se vertió la mezcla en los moldes poco a poco hasta la mitad y se apisonó de acuerdo a las instrucciones dadas en la norma.
10. Mientras se realizó el punto anterior, no se dejó de mover la mezcla para evitar que el agua suba a la superficie y mantener la homogeneidad de la mezcla.
11. Se vertió la segunda mitad, y se volvió a apisonar.
12. Después se realizó un compactado de las probetas, esto consistió en dar pequeños golpes, con el objetivo de retirar el aire interior de la mezcla.

13. Se dejó reposar las probetas por dos minutos.
14. Se retiró el exceso de mezcla de las probetas para mejorar el acabado de la cara superior de la probeta.
15. Finalmente, se cubrió las probetas con plástico para evitar que las probetas pierdan agua en exceso.

Figura 3.11. Mezclado cemento+zeolita+agua, mezcla vertiéndose en moldes y probetas listas

PROCEDIMIENTO PARA DESMOLDE

1. Se retiró el plástico colocado en los moldes el día anterior.

2. Se retiró el exceso de mezcla de la cara superior, para definir los bordes de la muestra.
3. Se abrieron los moldes.
4. Se marcaron las caras superiores de las probetas.
5. Se marcaron las probetas bajo el código establecido.
6. Se pesaron cada una de las probetas.
7. Las muestras fueron sumergidas en agua.

Figura 3.12. Desmolde

Figura 3.13. Muestras sumergidas en agua

PROCEDIMIENTO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN

1. Se retiraron del recipiente con agua, las probetas a ser usadas en el ensayo.
2. Se pesaron las probetas.
3. Se dejaron secar las probetas por unos minutos.
4. Se encendió y enceró el equipo de ensayo universal.
5. Se enceró el medidor de deformación.
6. Se midieron las dimensiones de las probetas.
7. Se colocó la probeta en el equipo de tal forma que las caras lisas del mismo estuvieron en contacto con las caras superior e inferior de la prensa respectivamente.
8. Se aplicaron las cargas y se anotaron los valores que resultaron de los intervalos indicados de deformación.
9. Se anotó la carga que produce la ruptura de la probeta.

Figura 3.14. Muestra colocada en la máquina de ensayo

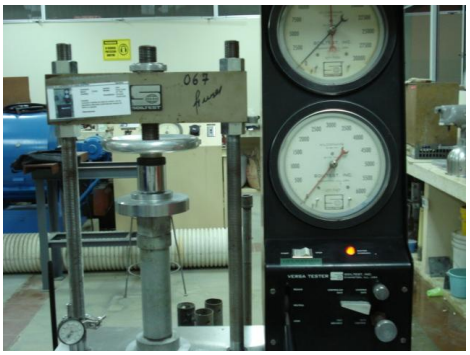


Figura 3.15. Aplicación de fuerza a la muestra y después de aplicada

Simulación Computacional

Basado en conocimientos de inelasticidad y empleando el programa Matlab como herramienta de simulación computacional, se obtuvo una gráfica esfuerzo-deformación que representa el comportamiento a la resistencia a la compresión del cemento mas la adición de la zeolita.

La relación $\mathbf{f_m = \frac{P}{A}}$, es la más usada para encontrar esfuerzo a la compresión, pero si se desea ser un poco más específicos con el tipo de reacción que se genera a nivel estructural, la investigación requiere de mas parámetros que permitan llegar a una conclusión confiable, por este motivo, la teoría de inelasticidad por medio de la mecánica del continuo permiten obtener resultados mas confiables.

Así, la deformación se define como el gradiente simétrico del desplazamiento, y teniendo en cuenta que todo tensor tiene una parte simétrica y una parte antisimétrica, se tiene:

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

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

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

La definición que se usa para estas relaciones es de la forma:

$$\sigma = \mathbb{C}^{ex} : \varepsilon$$

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

La parte de no linealidad se desarrolló con el Método de Newton Raphson. Método que se puede considerar como un esquema iterativo que ayudará a desarrollar un esquema no lineal en tres dimensiones definiendo un residual que siempre está regido por una relación dada por:

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

Donde (μ^*) es la solución y va a depender estrictamente del material. Haciendo una expansión de la serie de Taylor, lo cual asegura que va a converger a la respuesta, se tuvo lo siguiente:

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

El método de Deformation Driven, permitió presentar un algoritmo que al ser ejecutado bajo el software Matlab, generó una gráfica o curva esfuerzo-deformación, el algoritmo básicamente solo toma en cuenta las propiedades del material, debido a que el modelo es no lineal, porque se analizó la respuesta del material bajo la influencia del aditivo (zeolita ecuatoriana tipo 1) en los porcentajes requeridos:

ALGORITMO

```
%Declaración de parámetros del material
m=0.025; % Intersección de la curva ESF-def con el eje x
a=0.78;    % Intervalo de Deformación máxima respecto al esf de fluencia
E=2128.11354; % Módulo de Elasticidad del Material

tol=1e-20; % Valor para la precisión en el cálculo de raíces por el Método de Newton-Raphson
L(1,1)=0;  % Valor de Lambda.... inicialmente cero para la zona elástica

deltaeps=0.0005; %Incremento de la deformación para graficar los puntos en la curva
def_total=0.03237;    % Deformación máxima del material bajo la carga aplicada

epsilon=0:deltaeps:def_total;
n=length(epsilon)-1;
sigma=zeros(n,1);
sigma(1,1)=0;
sigmay=ones(n,1)*28.6545; % Valor del Esfuerzo de Fluencia del Material = 100

for i=1:n;

  % A CONTINUACIÓN SE TIENEN LOS PASOS DETERMINADOS POR EL ALGORITMO RETURN MAPPING
%==============================================
%PASO 1
```

```
sigmatrial(i,1)=sigma(i,1)+E*deltaeps; %Esfuerzo estimado o de
prueba

%PASO 2
 Ftrial(i,1)=abs(sigmatrial(i,1))-sigmay(i,1);

 % Determinar en que zona se encuentra (Ftrial >0 ==> Zona
Plástica; Ftrial <0;   ZONA ELASTICA
  if Ftrial(i,1)>0;

   % A PARTIR DE ESTE PUNTO SE TIENEN LOS PASOS DEL
MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SOLUCIÓN DE
ECUACIONES NO LINEALES
% EL RESULTADO SON LOS VALORES DE LANDA_N Y
DELTALANDA
% PASO 3 DE LA RUTINA RETURN MAPPING
      sql(1,1)=tol;
   for s=1:20
  SF(s,1)=sql(s,1)+L(i,1); % Valor de Landa_n+1=Deltalanda +
Landa_n
       H(i,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/SF(s,1))*((m-
SF(s,1))/(m+SF(s,1))^2); % Valor de H_prima
       r(s,1)=Ftrial(i,1)-sql(s,1)*(E+H(i,1));
       ir(s,1)=norm(r(s,1));

       if ir(s,1)<tol*ir(1,1)
          break
       end
       W=-E-a*sigmay(1,1)*(m/SF(s,1))^(1/2)*(m-
SF(s,1))/(m+SF(s,1))^2-SF(s,1)*(-1/2*a*sigmay(1,1)*(m-
```

```
SF(s,1))*m/((m/SF(s,1))^(1/2)*(m+SF(s,1))^2*(SF(s,1))^2)-
a*sigmay(1,1)*(m/SF(s,1))^(1/2)/(m+SF(s,1))^2-
2*a*sigmay(1,1)*(m/SF(s,1))^(1/2)*(m-SF(s,1))/(m+SF(s,1))^3);
        rdl(s+1,1)=-(r(s,1)/W);
        sql(s+1,1)=sql(s,1)+rdl(s+1,1);
    end
 % FIN DE LA RUTINA DE NEWTON-RAPHSON
%================================================
 dl(i+1,1)=sql(s,1);
 L(i+1,1)=SF(s,1);

 %PASO 4 DE LA RUTINA RETURN MAPPING
 sigma(i+1,1)=sigmatrial(i,1)-E*dl(i+1,1)*sign(sigmatrial(i,1));
 sigmay(i+1,1)=sigmay(i,1)+H(i)*dl(i+1,1);

   % FIN DEL CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS EN LA ZONA
PLÁSTICA PARA EL PUNTO i
    else
    L(i+1,1)=0;
        sigma(i+1,1)=sigmatrial(i,1);

    end

   % ACTUALIZACIÓN DE VARIABLES Y FIN DE LA RUTINA DE
RETURN MAPPING PARA EL PUNTO i

end

%GRÁFICA DE LA CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN PARA
LOS PARAMETROS INGRESADOS
```

```
Plot (epsilon',sigma,'-b')
xlabel('EJE DE LAS DEFORMACIONES');
ylabel('EJE DE LOS ESFUERZOS');
title('CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACION');
grid
```

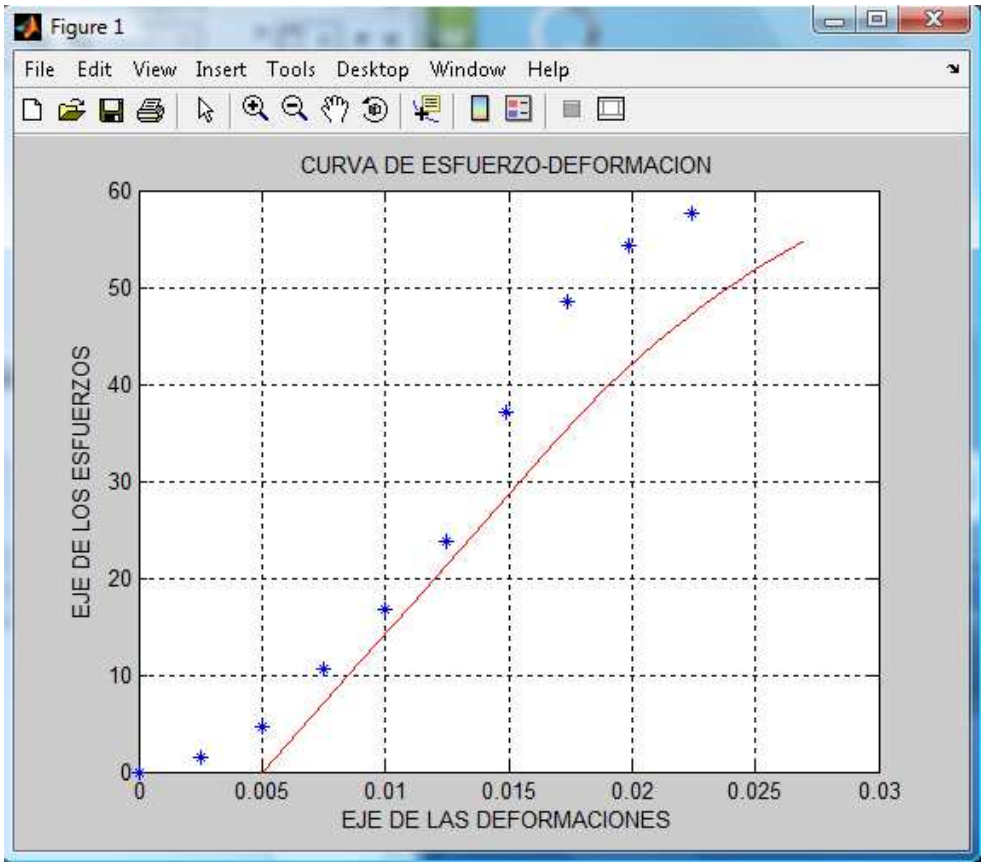


Figura 3.16. Gráfica que genera el algoritmo en Matlab

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Resultados para los valores del día 28 de curado, adición de zeolita 15%.

TABLA 4

Deformación-Esfuerzo-Módulo de elasticidad E

Adición: 15% Días de curado: 28

G1/15/28						
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación	Esfuerzo	E	Esfuerzo	E	Esfuerzo	E
mm	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**MPa**

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.003	10.603	4257.986	5.473	2197.670	2.052	824.126
0.005	30.100	7829.200	19.496	5631.530	14.708	5082.112
0.008	47.030	6799.042	42.071	9065.389	27.363	5082.112
0.010	70.118	9271.421	68.408	10576.287	44.465	6867.719
0.013	106.032	14422.210	100.047	12705.280	68.408	9614.807
0.015	120.569	5837.561	112.873	5150.789	89.785	8584.649
0.017					106.887	6867.719
0.020					115.438	3433.860

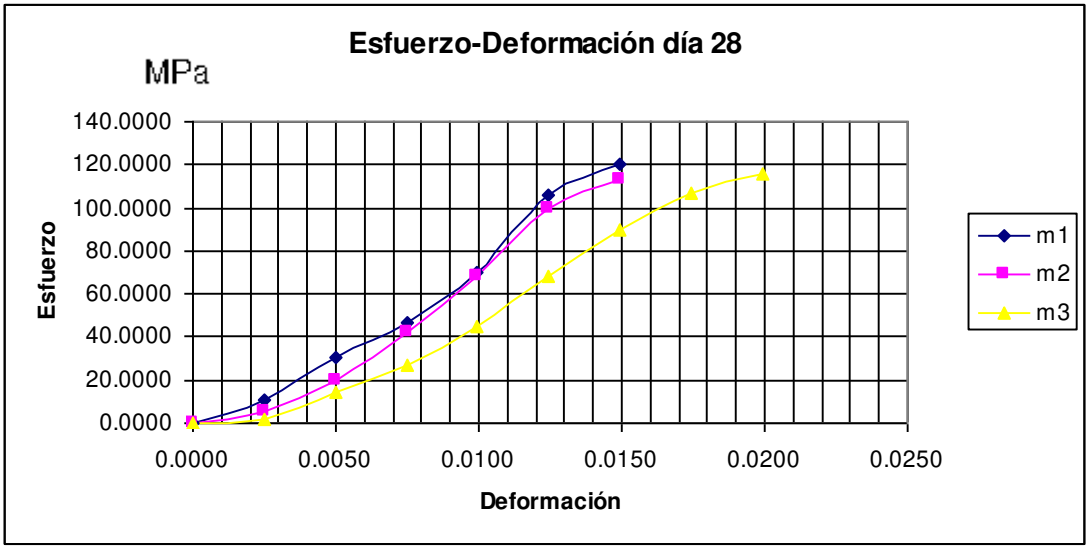


Figura 4.1. Curvas esfuerzo-deformación muestras: m1-m2-m3

Adición: 15% Días de curado: 28

Como se puede observar (figura 4.1), se tiene las curvas respectivas para las tres muestras del ensayo a la compresión, con el objetivo de no despreciar ninguno de los valores, se generó en una tabla los valores promedios; luego se consideró que para una curva esfuerzo-deformación,

el valor de la pendiente representa al módulo de elasticidad, el cual se calculó entre cada punto de la curva generada.

Para este primer análisis, usando como herramienta un histograma de valores y la campana de Gauss, se observa si los datos del módulo de elasticidad se relacionan y que tan cercanos están los valores los unos de los otros. Esto se realiza ya que existen muchos errores sistemáticos en el proceso del ensayo a la compresión de los cuales se puede mencionar la falta de experiencia en el uso de la máquina de ensayo universal, el no poder controlar la temperatura y humedad relativa existente en el laboratorio en el instante del experimento, la apreciación visual del medidor de carátulas, etc.

TABLA 5

Valores promedios

esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 15% Días de curado: 28

Deformación (mm)	Esfuerzos promedios (MPa)	E promedios (MPa)
0	0	
0.0025	6.0427	2426.59406
0.0050	21.4345	6180.94713
0.0075	38.8215	6982.18101
0.0100	60.9970	8905.14234
0.0125	91.4955	12247.4323

0.0149	107.7424	6524.33308
0.0174	106.8873	-343.385951
0.0199	115.4383	3433.85951

`

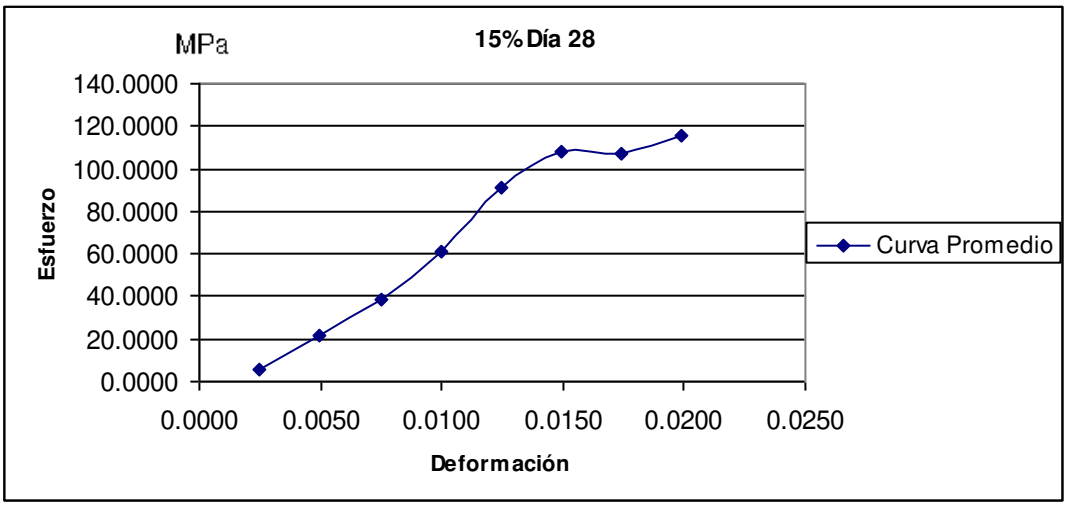


Figura 4.2. Curva esfuerzo-deformación

Adición: 15% Días de curado: 28

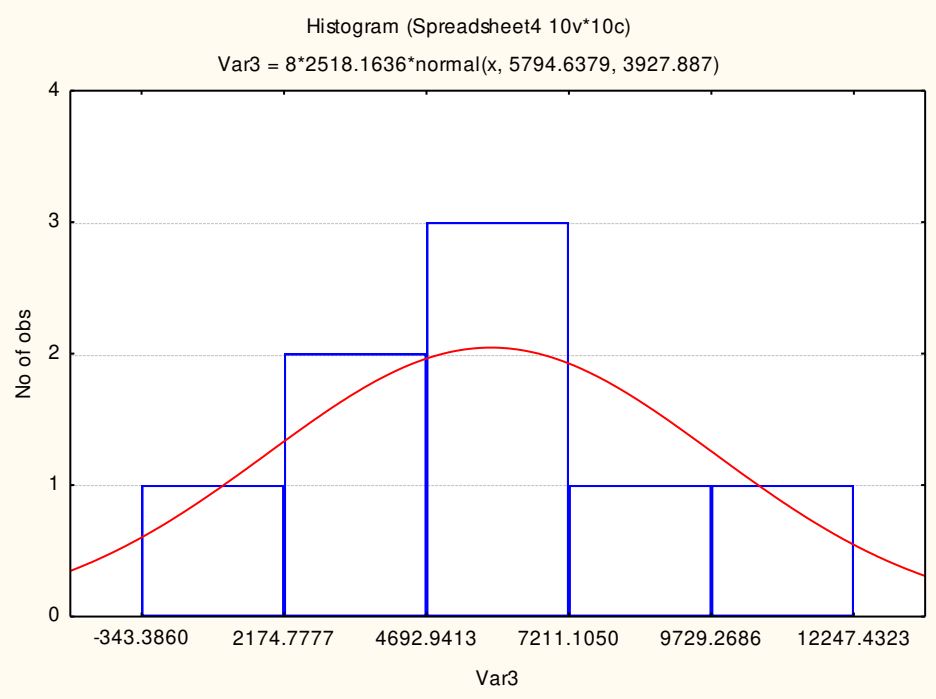


Figura 4.3. Histogramas módulos de elasticidad para los valores promedios

Adición: 15% Días de curado: 28

Con el histograma de frecuencias y la campana gaussiana, se pudo establecer los respectivos intervalos a partir de la media y de las desviaciones estándares, los mismos que sirvieron para encontrar la interrelación existente entre los módulos calculados y así se pudo aproximar la zona elástica en la curva esfuerzo-deformación, e indicar el valor del esfuerzo a la fluencia.

TABLA 6

Media del módulo de elasticidad, desviación estándar e intervalos de la media

E (MPa) 15% 28 días	media	St.dv	intervalo	
	5794.6379	3927.887	1866.7509	9722.5249

Una vez que se tiene el intervalo, se regresó a la TABLA 5 con todos los valores promedios y se realizó una inspección de aquellos datos que están dentro de este intervalo, y si van acorde con el comportamiento de estos puntos en la curva esfuerzo-deformación, y como se puede apreciar (TABLA 7) los puntos seleccionados presentan un valor promedio del módulo de elasticidad de 8578.9256 MPa. (resaltados por el color amarillo).

TABLA 7

Selección de los módulos promedios

Adición: 15% Días de curado: 28

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0.0025	6.0427	2426.59406
0.0050	21.4345	6180.94713
0.0075	38.8215	6982.18101
0.0100	60.9970	8905.14234
0.0125	91.4955	12247.4323
0.0149	107.7424	6524.33308

0.0174	106.8873	-343.385951
0.0199	115.4383	3433.85951

Con las muestras tanto para el esfuerzo a la compresión y para el módulo de elasticidad, se obtuvo los respectivos valores promedios para el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo de ruptura máximo y el módulo de elasticidad promedio, los parámetros indicados sirven para obtener los valores de **m** y **a**, a partir de la relación:

$$m = \frac{(E_{prom} * \varepsilon_{total}) - f'c}{E_{prom}}$$

$$a = \left(\frac{f'c}{\sigma_y} \right) - 1$$

Variables que son necesarias para poder generar los valores teóricos a través del algoritmo de ineslasticidad indicado.

TABLA 8

Valores promedios y valores de "m"-"a"

Adición: 15% Días de curado: 28

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
MPa	MPa	MPa	mm		
91.496	115.438	**8578.926**	0.0199	0.00646554	0.26168224

Como se puede apreciar, se calcularon los valores de **m** y **a**, a partir de la deformación, el esfuerzo a la fluencia, y el esfuerzo a la compresión promedio. Los valores para los correctores plásticos de **m** y **a** son considerados como experimentales ya que su cálculo es en función de la relación de los datos obtenidos experimentalmente.

Con los valores de la tabla y con el algoritmo "return mapping" mostrado en el capítulo 3 por medio del software Matlab, se aproximaron las curvas experimentales y las teóricas. De tal forma se pudo decir que los valores encontrados para los correctores plásticos por medio del algoritmo son datos teóricos que caracterizan al material.

Para el día 28 de curado y para el 15% de zeolita adicionada, los siguientes valores son los ingresados al algoritmo mencionado.

TABLA 9

Valores que ingresados al algoritmo

Adición: 15% Días de curado: 28

m=0.0064
a=0.5
E=8578.926
deltaeps=0.002
def_total=0.0199
sigmay=ones(n,1)*91.496

Se tiene que tener en cuenta que se ingresaron los datos de la matriz deformación (defor) y de la matriz esfuerzo (esf) que generaron los intervalos de esfuerzo y deformación para la representación gráfica de los puntos. También es importante observar que el valor de deltaeps (Δε) debe ser proporcional de la deformación total, ya que este valor permite una mejor definición de la curva mostrada.

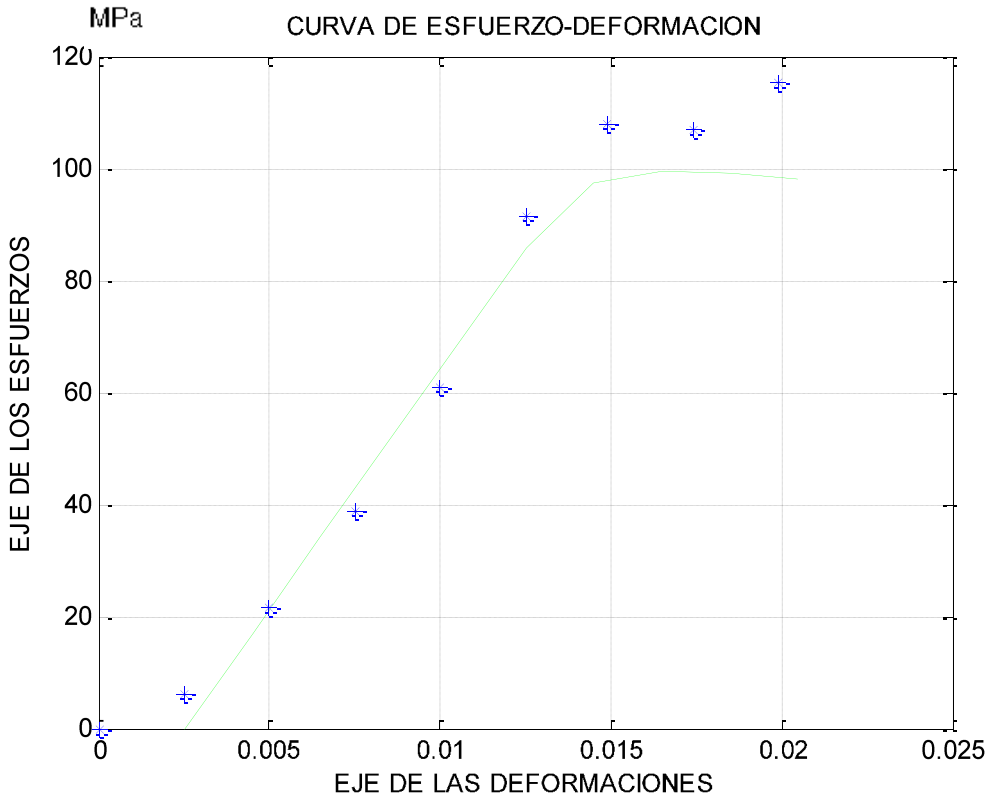


Figura 4.4. Aproximación de las curvas teórica + experimental

Como se puede apreciar, es fácil distinguir entre la zona elástica y la zona plástica de las curvas experimentales y teóricas. Si se desea ajustar el comportamiento de la curva teórica en la zona plástica hasta llegar al punto de ruptura del material, se puede variar los valores de los correctores plásticos **m** y **a** alternadamente ó de ambos al mismo tiempo. Para este caso el único dato a modificar fue **a**, cuyo valor pasa de 0.26 a 0.6.

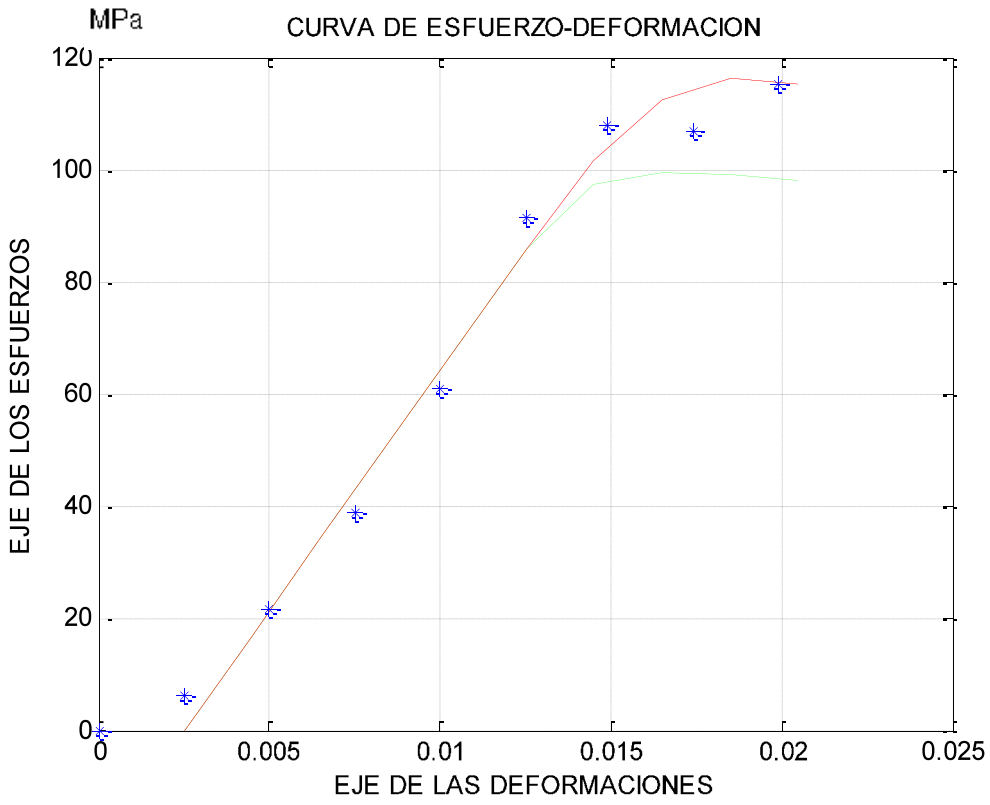


Figura 4.5. Aproximación de las curvas teórica + experimental

Ajuste del valor de a=0.6

TABLA 10

Valores promedios y valores de "m"-"a"

Adición: 15% Días de curado: 28

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
MPa	**MPa**	**MPa**	mm		
91.496	115.438	**8578.926**	0.0199	0.00646554	0.6

Como ya se indicó, al variar los valores de los correctores plásticos, se trató de ajustar o aproximar las curvas teóricas que generó el algoritmo en Matlab y las curvas experimentales generadas con los datos de los ensayos; así que se estimó el error experimental que existe entre estas dos curvas. Como se puede apreciar en la TABLA 9 esta aproximación generó un error de aproximación para el esfuerzo a la ruptura del 1%, pero para el error de aproximación total de la curva (error de la media cuadrática) el valor es del 36%, el cual se debe a la sumatoria de errores a lo largo de los puntos que conforman la curva.

TABLA 11

ERRORES

Adición: 15% Días de curado: 28

	15% día 28 ajuste del valor de a=0.6					
Esfuerzo a	Deformación	Esfuerzos	Esfuerzos	Error	Error	Error de

la ruptura f'c maximo		Experimentales	Teóricos	para cada punto	esfuerzo a la ruptura f'c	la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
116.2676	0.0000	0.000	0	0	1%	36%
	0.0025	6.043	21.4473	72%		
	0.0050	21.434	42.8946	50%		
	0.0075	38.821	64.3419	40%		
	0.0100	60.997	85.7893	29%		
	0.0125	91.496	103.688	12%		
	0.0149	107.742	114.1429	6%		
	0.0174	106.887	115.5797	8%		
	0.0199	115.438	116.2676	1%		

Las tablas y valores para el análisis del 15% de adición de zeolita y los restantes de días de curado 7, 14, 21 respectivamente se pueden apreciar en los apéndices (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7)

Para el 17.5% de adición de zeolita con 4, 11, 18 y 25 días de curado respectivamente en los apéndices (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7).

Una vez obtenidos los valores del esfuerzo a la compresión máximo o esfuerzo a la ruptura para el 15% y al porcentaje de validación del 17,5% de adición de zeolita, el siguiente análisis corresponde a la selección del mejor día de curado a través de la comparación entre medias aritméticas, empleando como herramienta para el análisis el software Statsoft Statistica v7.0.61.0 EN.

TABLA 12

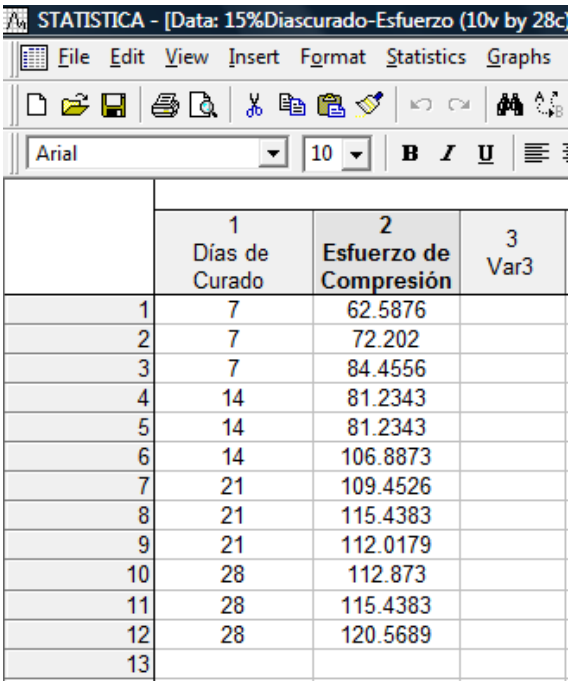
Esfuerzos de ruptura

Zeolita tipo I	Días de curado			
	7	14	21	28
15%	84.4556	106.8873	112.0179	120.5689
15%	62.5876	81.2343	109.4526	112.8730
15%	72.2020	81.2343	115.4383	115.4383

Análisis estadístico de los esfuerzos a la ruptura, para el 15% de zeolita ecuatoriana para los días de curado 7, 14, 21 y 28 respectivamente, a partir de la TABLA 10. Se ingresaron en el programa Statistica los respectivos valores indicados como se ve en la figura 4.6

Data >

Input spearsheet



	1 Días de Curado	2 Esfuerzo de Compresión	3 Var3
1	7	62.5876	
2	7	72.202	
3	7	84.4556	
4	14	81.2343	
5	14	81.2343	
6	14	106.8873	
7	21	109.4526	
8	21	115.4383	
9	21	112.0179	
10	28	112.873	
11	28	115.4383	
12	28	120.5689	
13			

Figura 4.6. Días de curado-esfuerzo a la ruptura

En la barra de herramientas se seleccionó "Statistics", cuya ventana da varias opciones a ser escogidas dependiendo del tipo de análisis que se necesite. Luego se procedió como se indica:

ANOVA >

One-way ANOVA >

Variables >ok

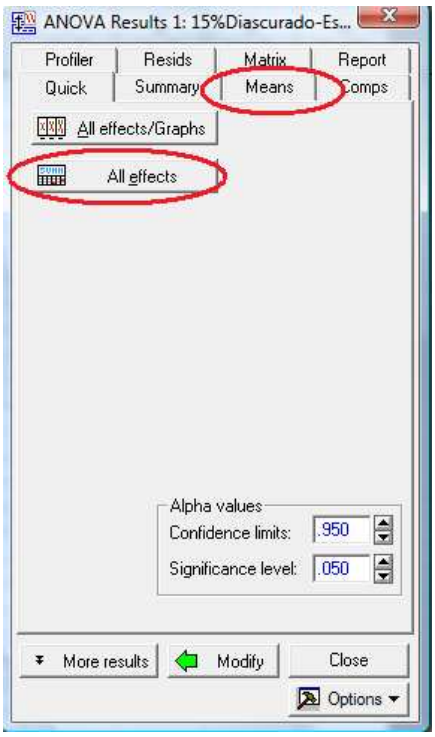


Figura 4.7. Ventana de anova

La ventana muestra varias opciones escogiendo "**All effects**" y "**Means**", esto permitió obtener las probabilidades de error y las medias de los datos ingresados, del día de curado y sus respectivos esfuerzos a la ruptura como se puede apreciar en las figuras 4.8 y 4.9 respectivamente.

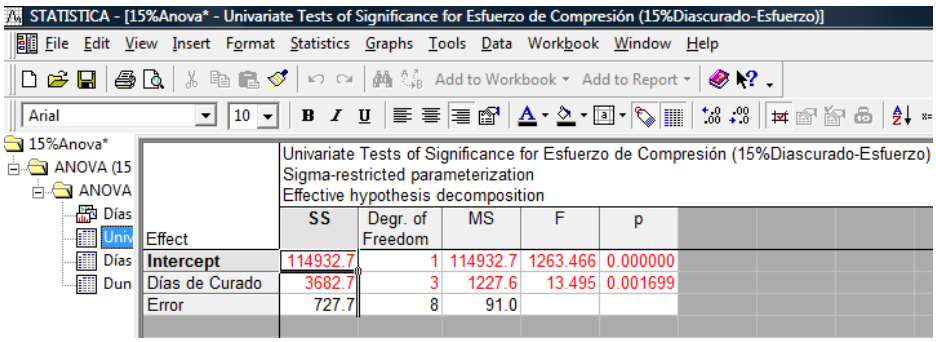


Figura 4.8. Probabilidad de error

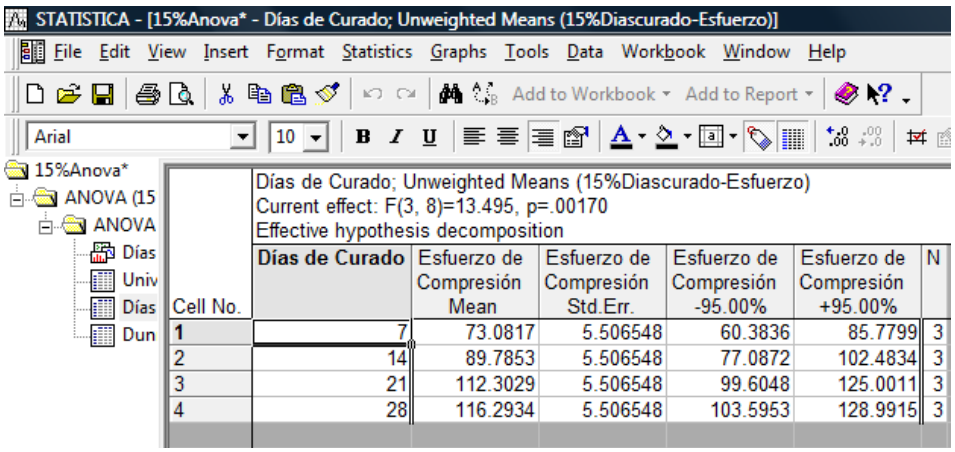


Figura 4.9. Medias de los esfuerzos e intervalo de confianza

El comportamiento de los valores de las medias para los días de curado estudiados se muestra de manera gráfica, en la misma se presentan las medias con sus respectivos intervalos de confianza (figura 4.9).

Luego de obtenidos los valores de medias aritméticas para los días de curado, se procedió a formular las hipótesis basadas en el resultado esperado, se determinó un aumento en el esfuerzo a la compresión o a la ruptura en cualquiera de los días de curado.

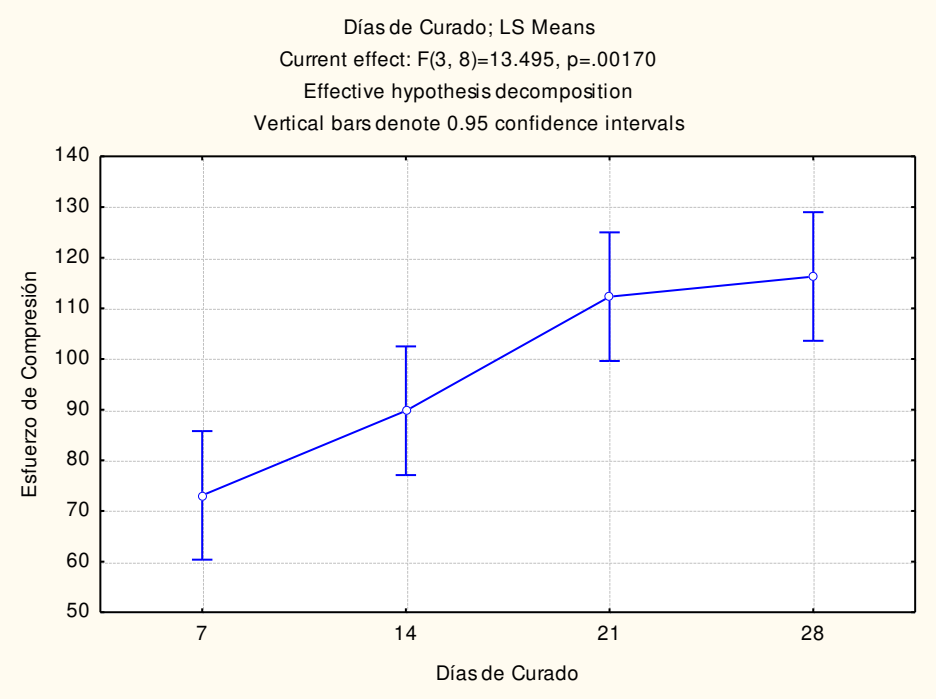


Figura 4.10. Gráfica de las medias

Para este fin, se hizo uso de uno de los tantos métodos estadísticos existentes, en este caso se escogió el procedimiento de Dunnett, en el cual se hace la comparación de los tratamiento con uno de control, el mismo que es escogido dependiendo del resultado a esperar.

Como se desea verificar, si durante cualquiera de los días de curado se manifiesta un aumento en el esfuerzo a la compresión, se escogió como parámetro de control al menor valor, para este caso corresponde al día 7.

Error de Tipo I: consiste en rechazar la hipótesis nula para aceptar la alterna.

La hipótesis nula que se seleccionó fue:

Existe por lo menos una media que es menor o igual a la media del control

H_0: $\mu_i \leq \mu_c$

Caso contrario se aceptó la hipótesis alterna:

H_a: $\mu_i > \mu_c$,

Se rechaza la hipótesis nula si no existiese una relación de significancia entre las muestras. Este criterio del análisis con un control y las mismas hipótesis fueron manejados para el porcentaje de validación del 17. 5% de adición de zeolita. Para lograr este objetivo se procedió de la siguiente manera en el programa Statistica:

Una vez que se tiene activada la ventana de "**Anova results**" se seleccionó:

ANOVA >

One-way ANOVA >

Variables >ok

More results

Post-Hoc >

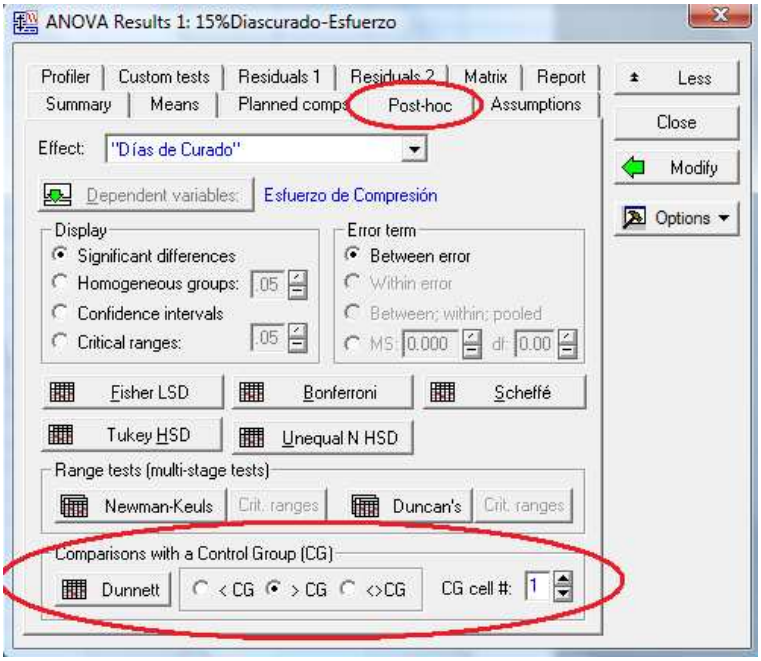


Figura 4.11. Comparación con un grupo de control

Se tuvo como resultado la siguiente ventana (figura. 4.12), donde se puede apreciar las diferencias significativas para los días de curado en comparación al día de control, y a su ves al día 28 se tiene la mayor diferencia significativa con respecto al del control. Por lo tanto se rechazó

la hipótesis nula y se aceptó la alterna, por lo menos uno de los días contiene el mayor valor del esfuerzo a la ruptura.

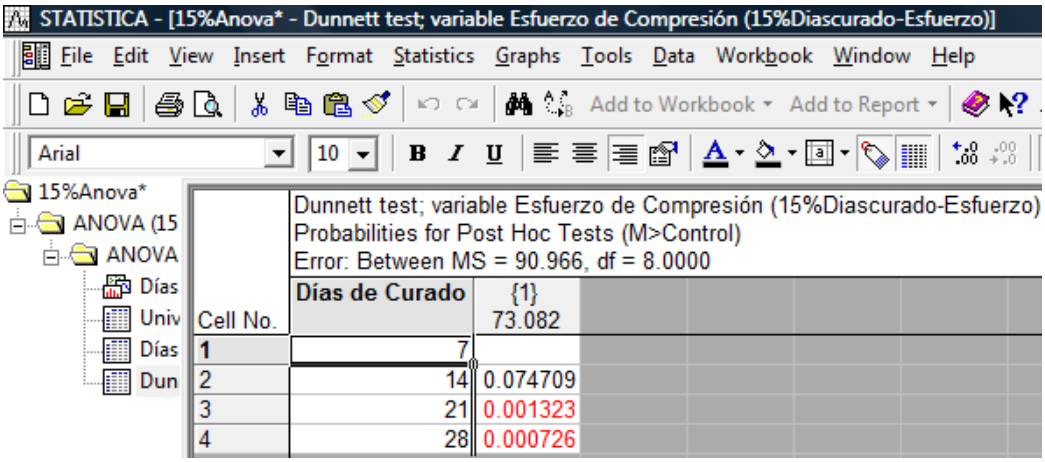


Figura 4.12. Método de Dunnett

El proceso que se ha indicado a lo largo del capítulo, es el mismo que se debe seguir para el resto de días de curado y para el porcentaje de validación del 17.5%, los mismos serán indicados en los apéndices (8 y 9).

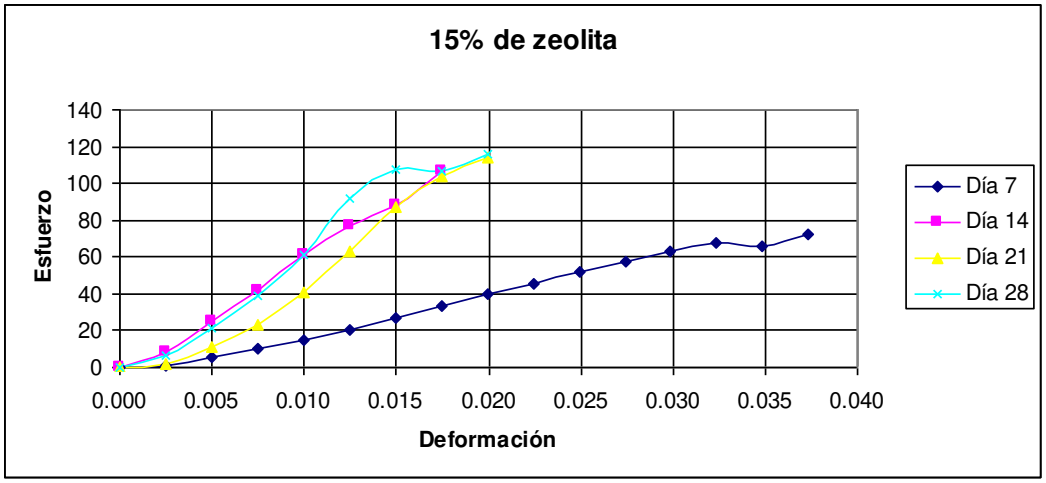


Figura 4.13. Curvas esfuerzo-deformación

Adición: 15% Días de curado: 7, 14,21 y 28

TABLA 13

Días de curado-esfuerzos de ruptura

Días de curado	Esfuerzo f'c promedio (MPa)
7	72.202
14	106.8873
21	113.7281
28	115.4383

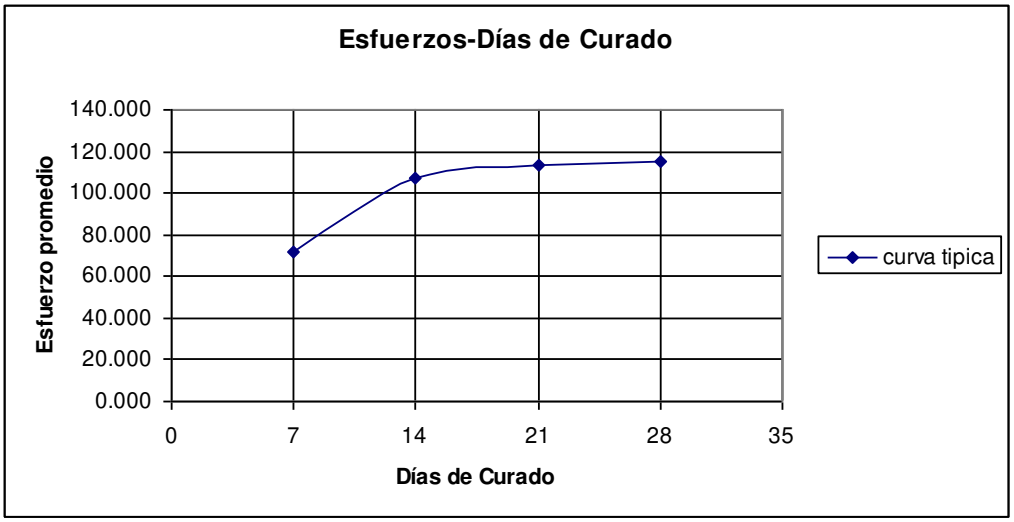


Figura 4.14. Esfuerzo-Días de curado

ANÁLISIS GRUPAL

El análisis de cada adición de zeolita para 5, 10, 15, 20, 25%, se estudió para cada uno de los 7, 14, 21, 28 días de curado, a través de un análisis estadístico factorial.

Primero se verificó que los datos obtenidos cumplan con la tendencia de normalidad, sus valores residuales y el comportamiento de los datos (figura 4.15 y 4.16), ver datos completos en apéndices 8 y 9. Se procedió como se indica:

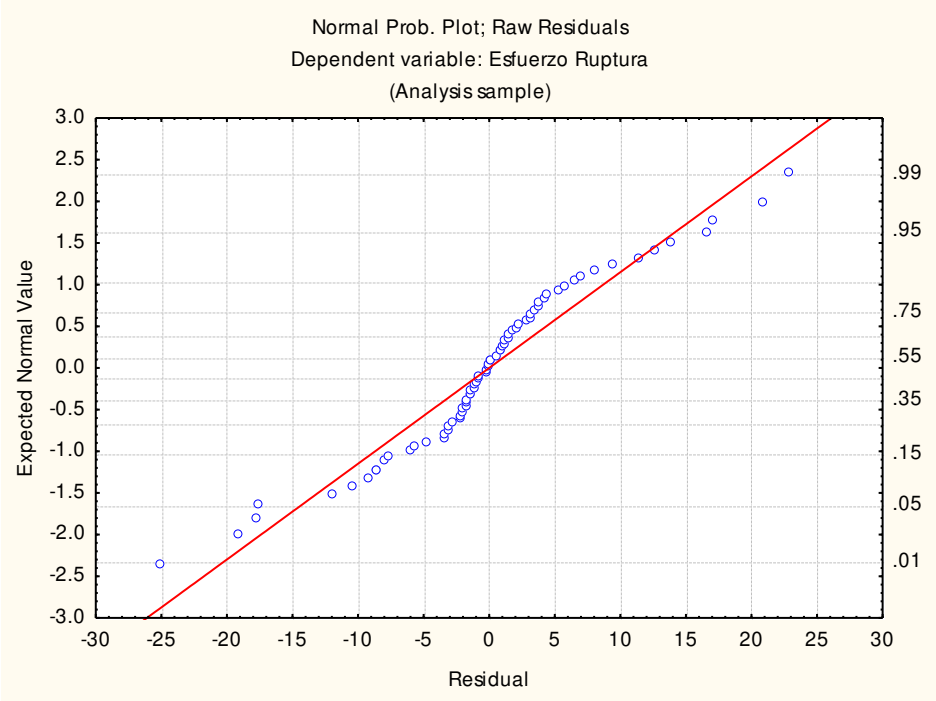


Figura 4.15. Probabilidad normal de los datos

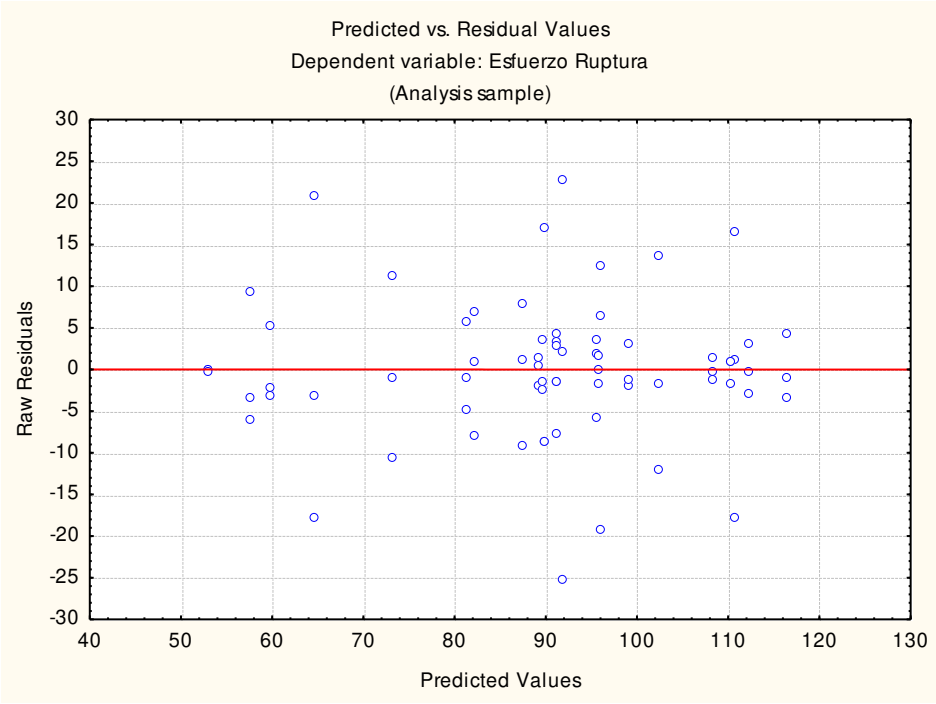
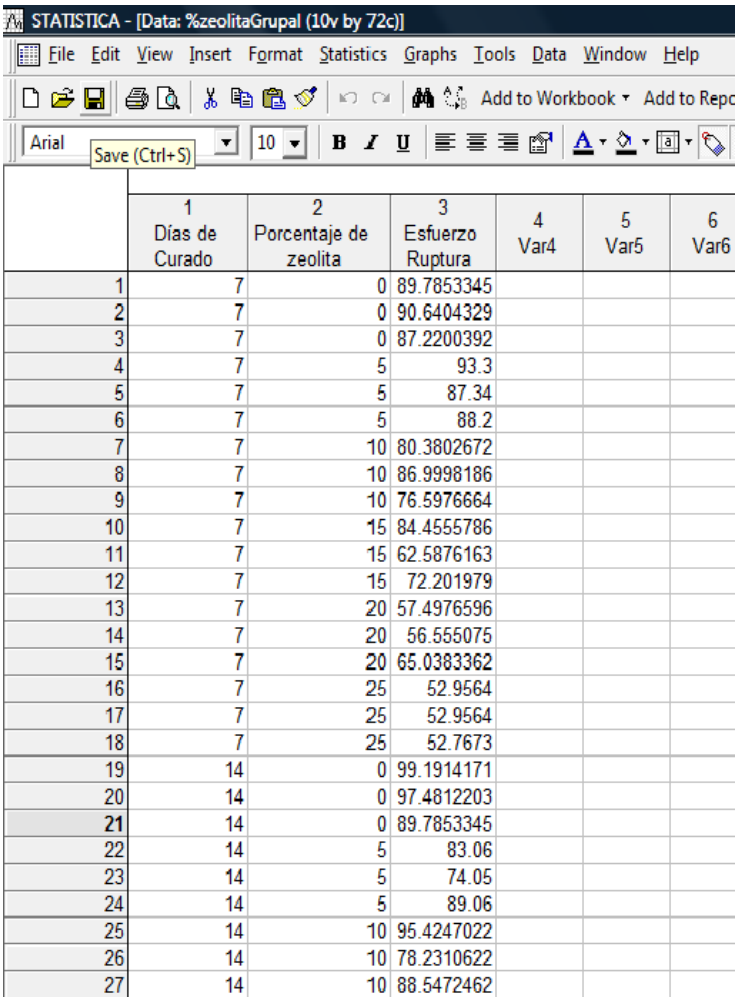


Figura 4.16. Valores predictivos y residuales

Con el programa Statistica, se ingresaron los datos y se siguieron los siguientes pasos:

Data >

Input spearsheet



	1 Días de Curado	2 Porcentaje de zeolita	3 Esfuerzo Ruptura	4 Var4	5 Var5	6 Var6
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			

Figura 4.17. Datos del día de curado-% de zeolita-esfuerzo a la ruptura

ANOVA >

One-way ANOVA >

Variables >ok

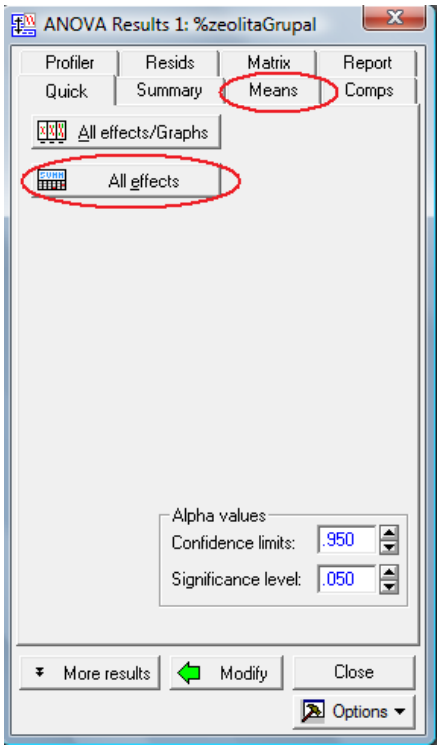


Figura 4.18. Ventana para selección de las medias aritméticas.

Al seleccionar “all effects” como ya se ha indicado se pudo obtener la tabla de probabilidad de errores para el análisis factorial de la combinación de los porcentajes de zeolitas y los días de curado (figura 4.19).

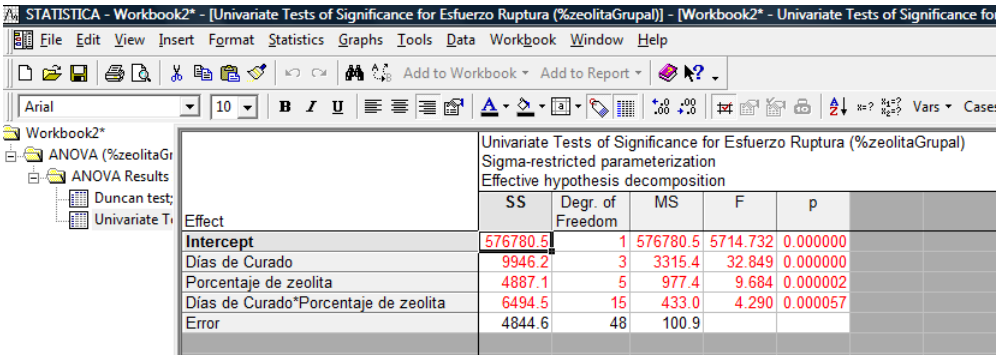


Figura. 4.19. Tabla de probabilidades de errores

La figura 4.20 presenta las medias aritméticas, bajo el análisis del porcentaje de zeolita y los esfuerzos de ruptura. Como se puede apreciar al 15% de adición de zeolita, se tiene el mayor valor del esfuerzo de ruptura siendo de 97.86 MPa. Gráficamente también se lo puede apreciar en la figura 4.21

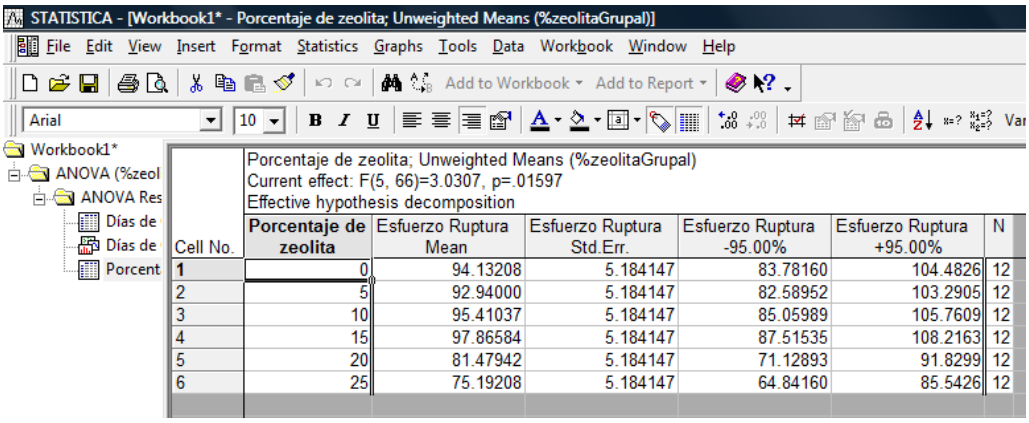


Figura 4.20. Tabla de las medias aritméticas

Porcentajes de zeolita-esfuerzos de ruptura

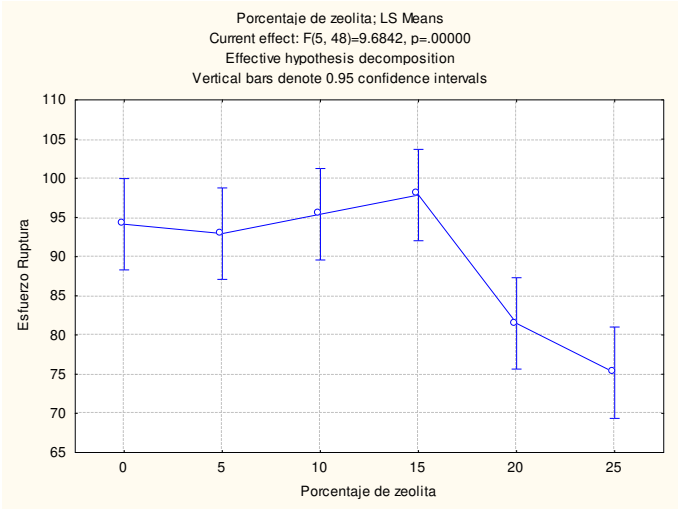
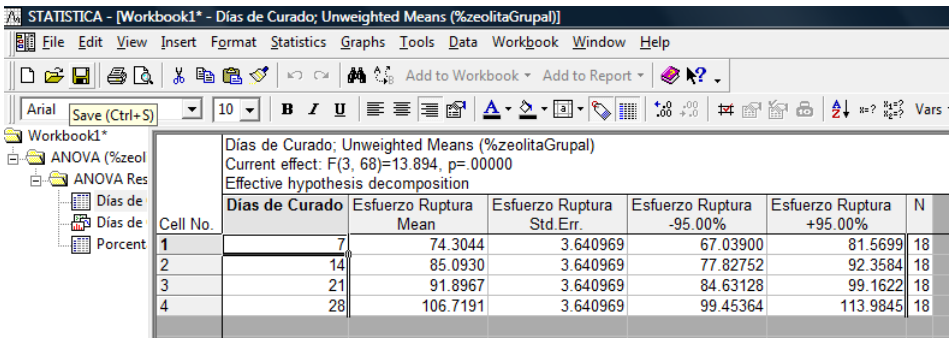


Figura 4.21. Esfuerzos de ruptura vs porcentajes de zeolita

Si ahora, se compara los valores de los esfuerzos de ruptura a los días de curado examinados 7, 14, 21 y 28 respectivamente, se puede notar en la figura 4.22, que a los 28 días de iniciado el proceso de curado en agua hay un considerable aumento en el esfuerzo a la ruptura. Gráficamente también es fácilmente apreciable (figura 4.23).



Días de Curado; Unweighted Means (%zeolitaGrupal)
Current effect: F(3, 68)=13.894, p=.00000
Effective hypothesis decomposition

Cell No.	Días de Curado	Esfuerzo Ruptura Mean	Esfuerzo Ruptura Std.Err.	Esfuerzo Ruptura -95.00%	Esfuerzo Ruptura +95.00%	N
1	7	74.3044	3.640969	67.03900	81.5699	18
2	14	85.0930	3.640969	77.82752	92.3584	18
3	21	91.8967	3.640969	84.63128	99.1622	18
4	28	106.7191	3.640969	99.45364	113.9845	18

Figura 4.22. Días de curado- esfuerzos de ruptura

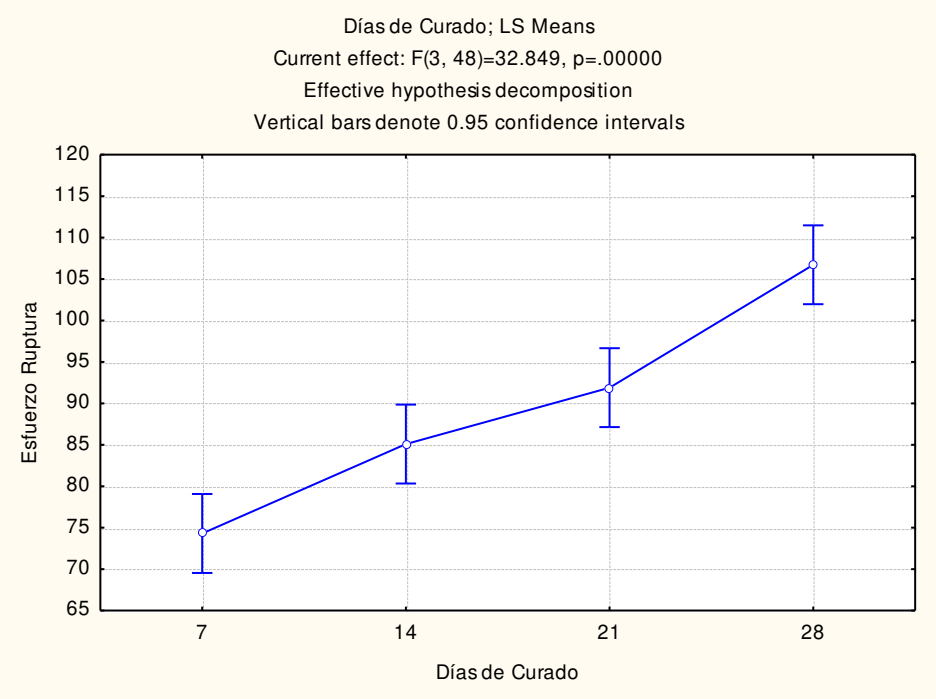
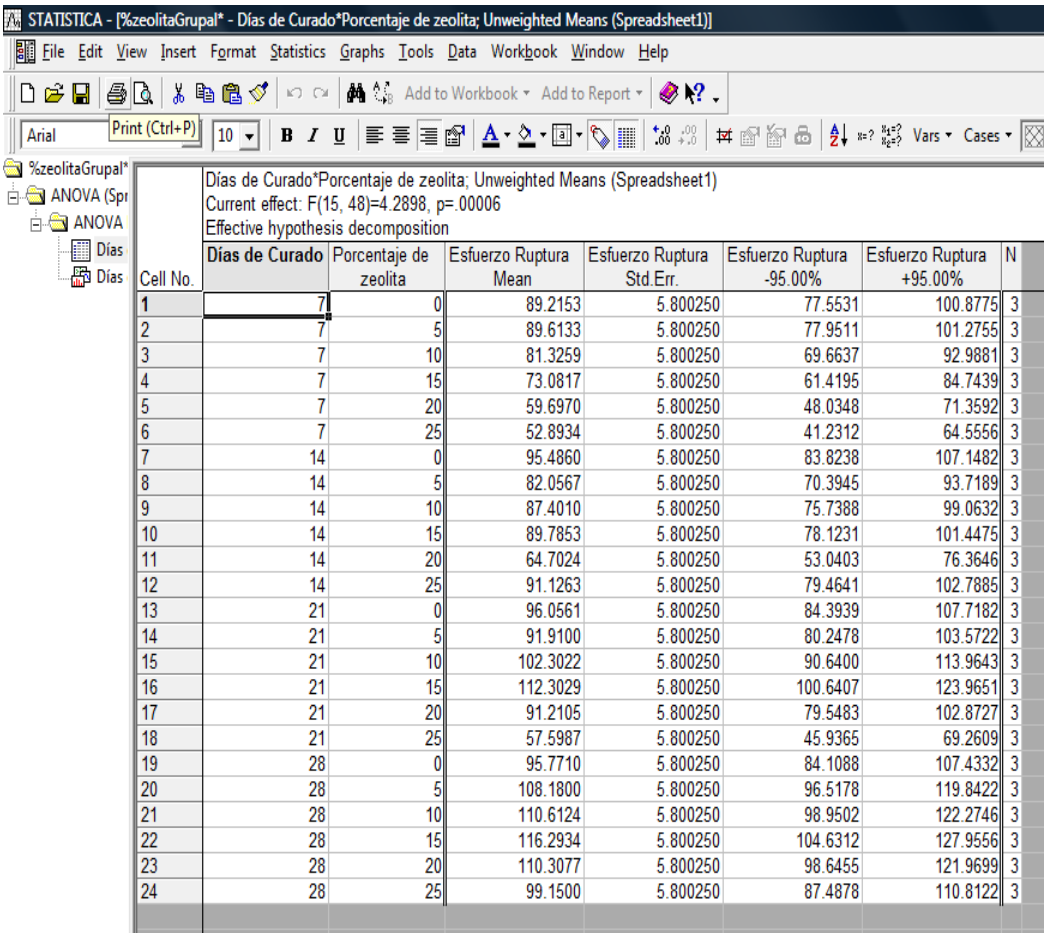


Figura 4.23. Días de curado- esfuerzos de ruptura

Al combinar los análisis individuales (figura 4.24) y emplear el método factorial del "Anova", se tuvo como resultado que al día 28 de curado y para el 15% de adición de zeolita el esfuerzo a la ruptura llega a su mayor valor, siendo de 116.29 MPa. De tal forma, que al seguir aumentando el porcentaje de adición de zeolita el esfuerzo a la ruptura tiende a disminuir; esto es apreciable en la figura 4.25.



Días de Curado*Porcentaje de zeolita; Unweighted Means (Spreadsheet1)
Current effect: F(15, 48)=4.2898, p=.00006
Effective hypothesis decomposition

Cell No.	Días de Curado	Porcentaje de zeolita	Esfuerzo Ruptura Mean	Esfuerzo Ruptura Std.Err.	Esfuerzo Ruptura -95.00%	Esfuerzo Ruptura +95.00%	N
1	7	0	89.2153	5.800250	77.5531	100.8775	3
2	7	5	89.6133	5.800250	77.9511	101.2755	3
3	7	10	81.3259	5.800250	69.6637	92.9881	3
4	7	15	73.0817	5.800250	61.4195	84.7439	3
5	7	20	59.6970	5.800250	48.0348	71.3592	3
6	7	25	52.8934	5.800250	41.2312	64.5556	3
7	14	0	95.4860	5.800250	83.8238	107.1482	3
8	14	5	82.0567	5.800250	70.3945	93.7189	3
9	14	10	87.4010	5.800250	75.7388	99.0632	3
10	14	15	89.7853	5.800250	78.1231	101.4475	3
11	14	20	64.7024	5.800250	53.0403	76.3646	3
12	14	25	91.1263	5.800250	79.4641	102.7885	3
13	21	0	96.0561	5.800250	84.3939	107.7182	3
14	21	5	91.9100	5.800250	80.2478	103.5722	3
15	21	10	102.3022	5.800250	90.6400	113.9643	3
16	21	15	112.3029	5.800250	100.6407	123.9651	3
17	21	20	91.2105	5.800250	79.5483	102.8727	3
18	21	25	57.5987	5.800250	45.9365	69.2609	3
19	28	0	95.7710	5.800250	84.1088	107.4332	3
20	28	5	108.1800	5.800250	96.5178	119.8422	3
21	28	10	110.6124	5.800250	98.9502	122.2746	3
22	28	15	116.2934	5.800250	104.6312	127.9556	3
23	28	20	110.3077	5.800250	98.6455	121.9699	3
24	28	25	99.1500	5.800250	87.4878	110.8122	3

Figura 4.24. Medias aritméticas de los esfuerzos a la ruptura

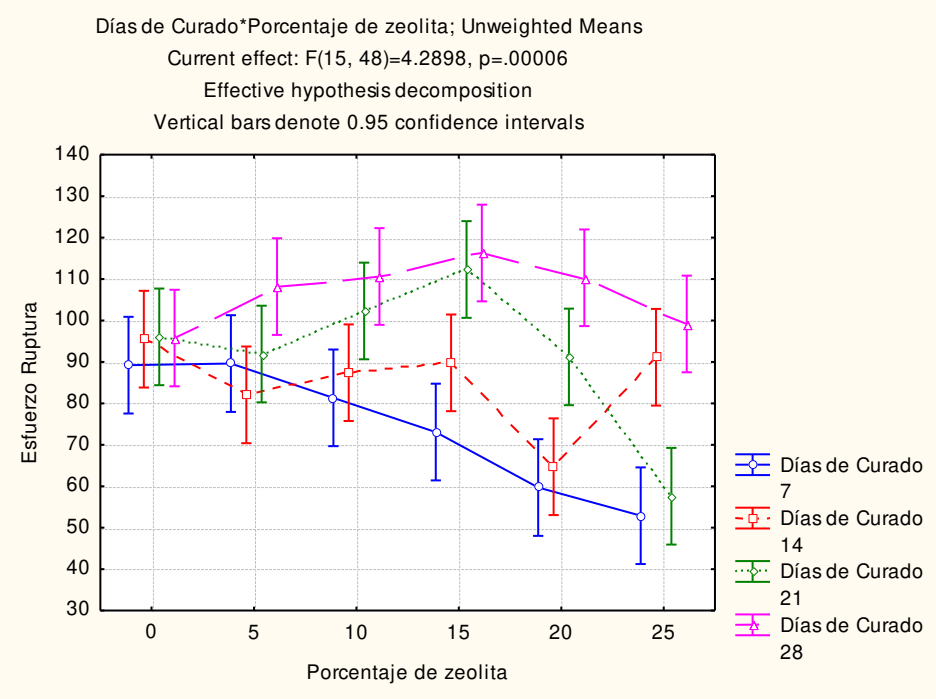


Figura 4.25. Curvas de las medias aritméticas

Esfuerzos a las rupturas-% de zeolita-días de curado

No solo, con el análisis de las medias aritmética de los esfuerzos a la ruptura se puede asegurar que, al 15% de zeolita y a los 28 días de curado se tiene el mayor esfuerzo a la ruptura, para lo cual se tuvieron que analizar estos valores por medio de un método estadístico, permitiendo relacionar los días de curado, los porcentajes de zeolitas y los esfuerzos de ruptura, a través del método de Duncan's.

Este método estadístico realiza una comparación múltiple de las medias aritméticas, esto quiere decir, que realiza una comparación entre cada

muestra entre sí, tanto para los días de curado, los porcentajes de zeolita y sus respectivos esfuerzos a la ruptura.

Se mantuvieron las mismas hipótesis planteadas para el análisis individual antes realizado.

La hipótesis nula:

Existe por lo menos una media que es menor o igual a las medias de las demás muestras.

H_0: $\mu_i \leq \mu_m$

Caso contrario

La hipótesis alterna:

H_a: $\mu_i > \mu_m$,

Si existen diferencias significativas entre las medias aritméticas, entonces se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna

Luego de aplicado el método de Duncan's, se pudo asegurar que efectivamente a los 28 días de curado y al 15% de adición de zeolita el esfuerzo a la ruptura es el mayor en comparación con el resto de porcentajes, ya que su media aritmética tiene diferencias significativa en relación con el resto de muestras. Ver el proceso del método y tabla de Duncan's en los apéndices 8 y 9.

Comparación entre los cementos tipo I, tipo IV y los porcentajes de adición de zeolita.

Mediante el análisis estadístico de los datos de los esfuerzos máximos a la compresión entre los cementos tipo I ó cemento sin aditivo, el cemento tipo IV y con cada uno de los porcentajes de adiciones de zeolita ecuatoriana estudiados, se puede ver en la figura 4.26 el comportamiento de los esfuerzos.

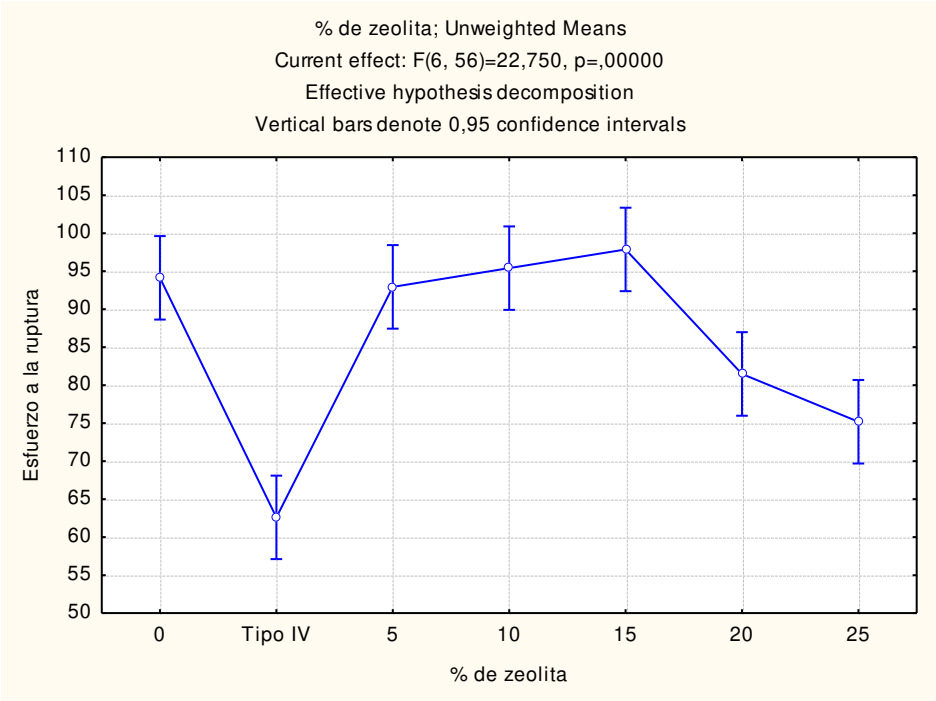


Figura 4.26. Esfuerzos-% de zeolita

TABLA 14

Datos de comparación Duncan's

Dias de curado*% de zeolita; Unweighted Means (análisis grupal) Current effect: F(18, 56)=4,4938, p=,00001
Effective hypothesis decomposition

	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%	N
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

También se puede apreciar la interacción entre los esfuerzos a la compresión máxima, su comportamiento dependiendo del tipo de cemento, del porcentaje adicionado a la mezcla agua – cemento y del tratamiento de curado al agua y sus respectivos días analizados. Donde es notorio que a los 28 días y al 15% de adición de zeolita ecuatoriana se tiene el mayor esfuerzo a la compresión para el estudio realizado (figuras 4.27 a y b).

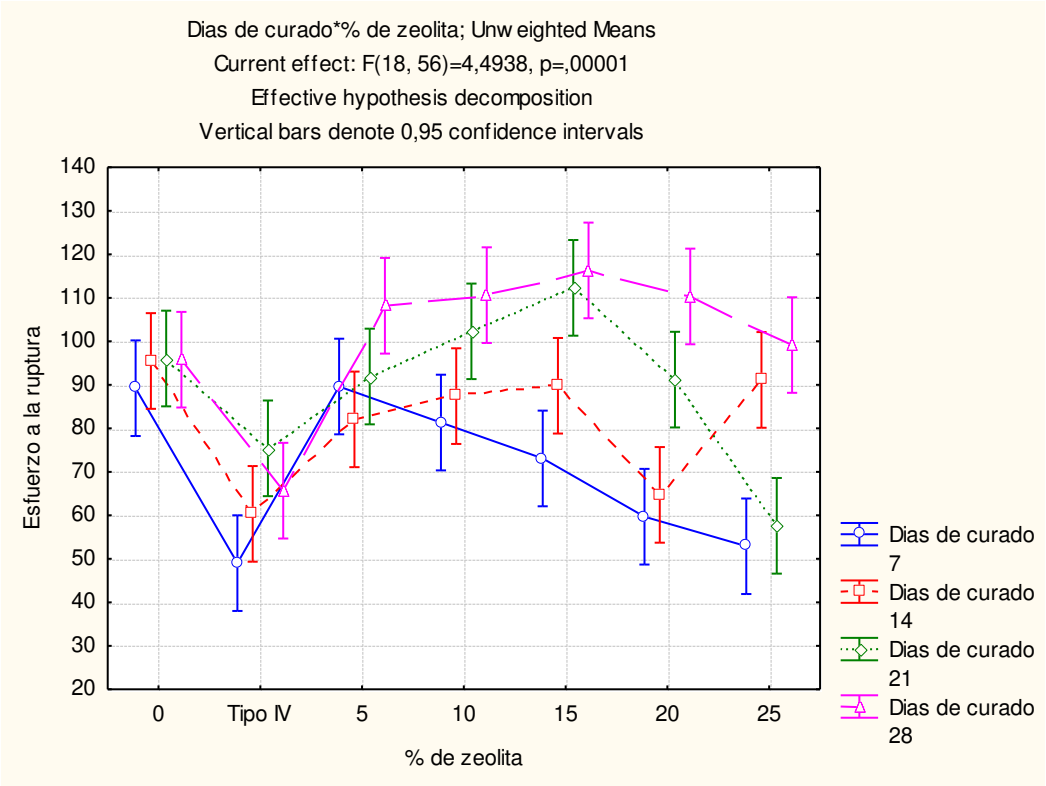


Figura 4.27a. Esfuerzos-Días de Curado- % de zeolita

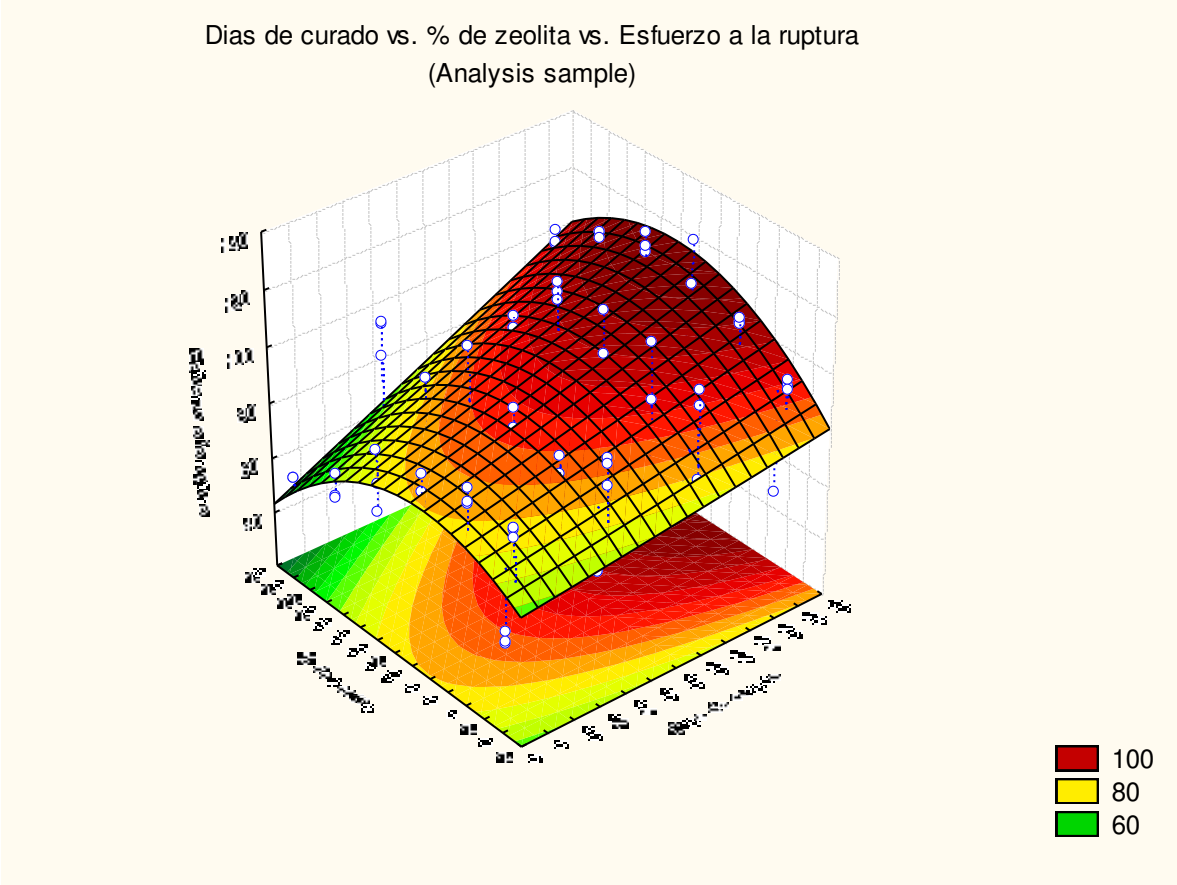


Figura 4.27b. Esfuerzos-Días de Curado- % de zeolita

CAPÍTULO 5

5. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

1. Se ha podido verificar que el proceso de adicionar a la pasta de cemento un 15% de zeolita ecuatoriana produce un aumento progresivo de la resistencia a la compresión, hasta llegar a un valor máximo a los 28 días de curado, cuyo valor fue de 116.29 MPa.

2. La comparación de las resistencias máximas a la compresión entre los porcentajes de 5, 10, 15, 20, 25% de adición de zeolita con respecto al cemento tipo I y el tipo IV, da como primer resultado que el esfuerzo a la ruptura del cemento tipo I es mayor que el del tipo IV y como segundo resultado las resistencias máximas a la compresión de los cementos con las diferentes adiciones de zeolita son mayores en comparación con el cemento tipo IV y el tipo I.

3. Se comprobó por medio de un histograma de frecuencias y la campana de gauss, la relación existente entre los datos de las muestras para un mismo tratamiento, obteniendo los valores de los correctores plásticos **"m"** y **"a"**.

4. Se verificó que al implementar el algoritmo, se puede ajustar los datos experimentales con los teóricos del comportamiento de la pasta de cemento en las curvas esfuerzos-deformaciones, el ajuste dió una aproximación del 64% para la adición de zeolita al 15% y del 79% para la adición del 17.5% de zeolita.

5. Mediante el método de Dunnett se comprobó que, para la adición del 15% y del 17.5% de zeolita ecuatoriana, el mayor día de curado resulta a los 28 días y a los 25 días respectivamente.

6. Se verificó que el comportamiento de la zeolita al ser adicionada a la pasta de cemento, es una buena alternativa como reemplazo de los materiales puzolánicos empleados en la industria cementera.

Recomendaciones

1. Al realizar los ensayos de compresión se debe tener en cuenta que al aplicar la carga sobre las probetas se lo debe hacer con una velocidad constante, para evitar que al tomar los datos del ensayo se acumulen errores del equipo.

2. Controlar el nivel de agua para asegurar que las muestras interactúen con el medio húmedo, una vez iniciado los ensayos de compresión.

3. No olvidarse de cubrir la muestra con una franela o trapo, para evitar el riesgo de que el operador sea golpeado con los pedazos que se producen en la ruptura.

4. Se recomienda extender el experimento por 45 ó 90 días de curado al agua, según el caso, para poder comprobar si se mantiene la tendencia ascendente de la resistencia a la compresión.

APÉNDICES

APÉNDICE 1

TABLA 1.1

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 15% Días de curado: 7

G1/15/7						
Deformación (mm)	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.002	1.044	419.095	0.754	302.815	1.697	681.333
0.005	5.844	1927.718	5.090	1741.184	4.901	1286.962
0.007	12.442	2649.628	9.049	1589.777	8.672	1514.073
0.010	19.794	2952.442	12.819	1514.073	13.196	1816.887
0.012	26.392	2649.628	16.967	1665.480	17.909	1892.591
0.015	36.384	4012.293	21.679	1892.591	23.188	2119.702
0.017	45.244	3558.071	26.392	1892.591	29.220	2422.517
0.020	52.408	2876.738	31.671	2119.702	34.876	2271.109
0.022	59.383	2801.035	36.761	2043.998	40.531	2271.109
0.025	66.924	3028.146	42.416	2271.109	47.129	2649.628
0.027	72.579	2271.109	47.129	1892.591	52.785	2271.109
0.030	79.177	2649.628	51.842	1892.591	58.440	2271.109
0.032	84.456	2119.702	56.555	1892.591	62.776	1741.184
0.035			62.588	2422.517	68.432	2271.109
0.037					72.202	1514.073

TABLA 1.2

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 15% Días de curado: 14

G1/15/14						
Deformación (mm)	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.003	10.945	4395.340	7.867	3159.151	7.012	2815.765
0.005	27.705	6730.365	20.522	5082.112	25.653	7485.814
0.008	44.807	6867.719	44.123	9477.452	37.624	4807.403
0.010	60.199	6180.947	60.712	6661.688	63.619	10438.933
0.013	81.234	8447.294	77.301	6661.688	72.683	3639.891
0.015	102.612	8584.649	81.234	1579.575	81.234	3433.860
0.017	106.887	1716.930	0.000			

TABLA 1.3

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 15% Días de curado: 21

G1/15/21						
Deformación (mm)	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0025	1.1971	480.7403	1.7102	686.7719	2.0522	824.1263
0.0050	5.1306	1579.5754	13.6816	4807.4033	14.7077	5082.1121
0.0075	15.3918	4120.6314	27.5342	5562.8524	27.3631	5082.1121
0.0100	29.4154	5631.5296	48.7406	8515.9716	44.4651	6867.7190
0.0125	48.9116	7829.1997	71.8283	9271.4207	68.4079	9614.8066
0.0149	76.9589	11263.0592	94.0608	8928.0347	89.7853	8584.6488
0.0174	94.0608	6867.7190	109.4526	6180.9471	106.8873	6867.7190
0.0199	112.0179	7211.1050			115.4383	3433.8595

TABLA 1.4

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 15% Días de curado: 28

G1/15/28						
Deformación (mm)	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0025	10.6032	4257.9858	5.4726	2197.6701	2.0522	824.1263
0.0050	30.0995	7829.1997	19.4962	5631.5296	14.7077	5082.1121
0.0075	47.0304	6799.0418	42.0708	9065.3891	27.3631	5082.1121
0.0100	70.1181	9271.4207	68.4079	10576.2873	44.4651	6867.7190
0.0125	106.0322	14422.2100	100.0465	12705.2802	68.4079	9614.8066
0.0149	120.5689	5837.5612	112.8730	5150.7893	89.7853	8584.6488
0.0174					106.8873	6867.7190
0.0199					115.4383	3433.8595

TABLA 1.5

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 17.5% Días de curado: 4

G1/17.5/4						
Deformación (mm)	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0025	0.9049	363.3775	0.9803	393.6590	1.2819	514.7848
0.0050	2.1868	514.7848	3.0163	817.5990	3.2048	772.1772
0.0075	5.8440	1468.6507	6.0325	1211.2600	5.6555	984.1474
0.0100	10.9340	2043.9984	10.9340	1968.2900	9.4258	1514.0729
0.0125	16.9665	2422.5166	16.5895	2271.1100	15.4584	2422.5166
0.0149	23.5646	2649.6275	23.5646	2801.0300	20.7369	2119.7020
0.0174	28.6546	2043.9984	30.1627	2649.6300	28.2775	3028.1457
0.0199	37.7034	3633.7749	37.7034	3028.1500	35.8182	3028.1457
0.0224	46.7522	3633.7749	46.3752	3482.3700	42.4163	2649.6275
0.0249	47.5063	302.8146	54.6699	3330.9600	49.0144	2649.6275
0.0274	48.2603	302.8146	56.5551	757.0360	53.7273	1892.5911
0.0299	58.4402	4087.9968	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0324	65.6039	2876.7385	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

TABLA 1.6

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 17.5% Días de curado: 11

G1/17.5/11						
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación (mm)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0025	12.4844	5013.4349	1.0261	412.0630	1.3682	549.4175
0.0050	22.5746	4051.9542	1.7102	274.7090	3.7624	961.4807
0.0075	35.7431	5288.1437	3.0784	549.4180	12.4844	3502.5367
0.0100	46.6884	4395.3402	15.7338	5082.1100	30.7835	7348.4594
0.0125	62.4222	6318.3015	29.9284	5700.2100	46.5174	6318.3015
0.0149	70.1181	3090.4736	41.8998	4807.4000	61.5671	6043.5927
0.0174	81.2343	4464.0174	51.3059	3777.2500	72.6834	4464.0174
0.0199	85.5098	1716.9298	72.6834	8584.6500	81.2343	3433.8595
0.0224	0.0000	0.0000	81.2343	3433.8600	0.0000	0.0000

TABLA 1.7

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 17.5% Días de curado: 18

G1/17.5/18						
	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
Deformación (mm)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0025	1.5392	618.0947	1.3682	549.4180	1.7102	686.7719
0.0050	5.0451	1407.8824	4.2755	1167.5100	7.1828	2197.6701
0.0075	11.2873	2506.7175	10.0902	2335.0200	19.6673	5013.4349
0.0100	17.9571	2678.4104	15.3918	2128.9900	26.5080	2747.0876
0.0125	25.4819	3021.7964	21.8905	2609.7300	36.4272	3983.2770
0.0149	41.3868	6386.9787	32.8358	4395.3400	55.5814	7691.8453
0.0174	50.4508	3639.8911	46.6884	5562.8500	60.7120	2060.3157
0.0199	61.5671	4464.0174	47.0304	137.3540	65.8426	2060.3157
0.0224	64.1324	1030.1579	51.3059	1716.9300	0.0000	0.0000

TABLA 1.8

Deformación-esfuerzo-módulo de elasticidad E

Adición: 17.5% Días de curado: 25

G1/17.5/25						
Deformación (mm)	Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)	Esfuerzo (MPa)	E (MPa)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0025	4.9596	1991.6385	15.5628	6249.6200	4.2755	1716.9298
0.0050	16.4179	4601.3718	34.8880	7760.5200	13.6816	3777.2455
0.0075	29.5864	5288.1437	55.5814	8309.9400	24.2848	4257.9858
0.0100	47.0304	7005.0734	81.2343	10301.6000	42.7549	7417.1366
0.0125	68.4079	8584.6488	100.9016	7897.8800	57.2916	5837.5612
0.0149	91.4955	9271.4207	104.3220	1373.5400	66.6977	3777.2455
0.0174	99.1914	3090.4736	0.0000	0.0000	77.8139	4464.0174

APÉNDICE 2

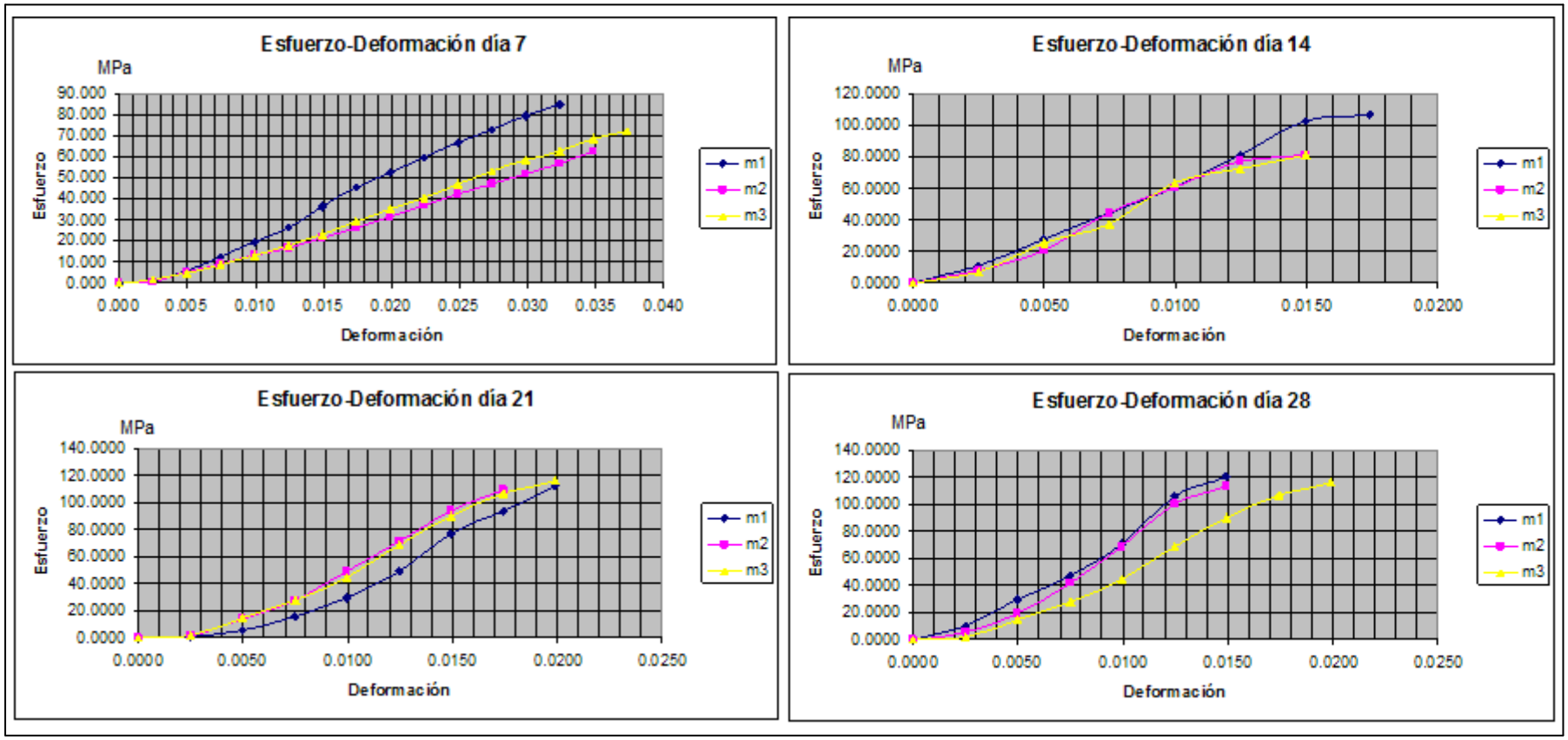


Figura 2.1 Esfuerzo-Deformación 7, 14, 21 y 28 días

Adición: 15%

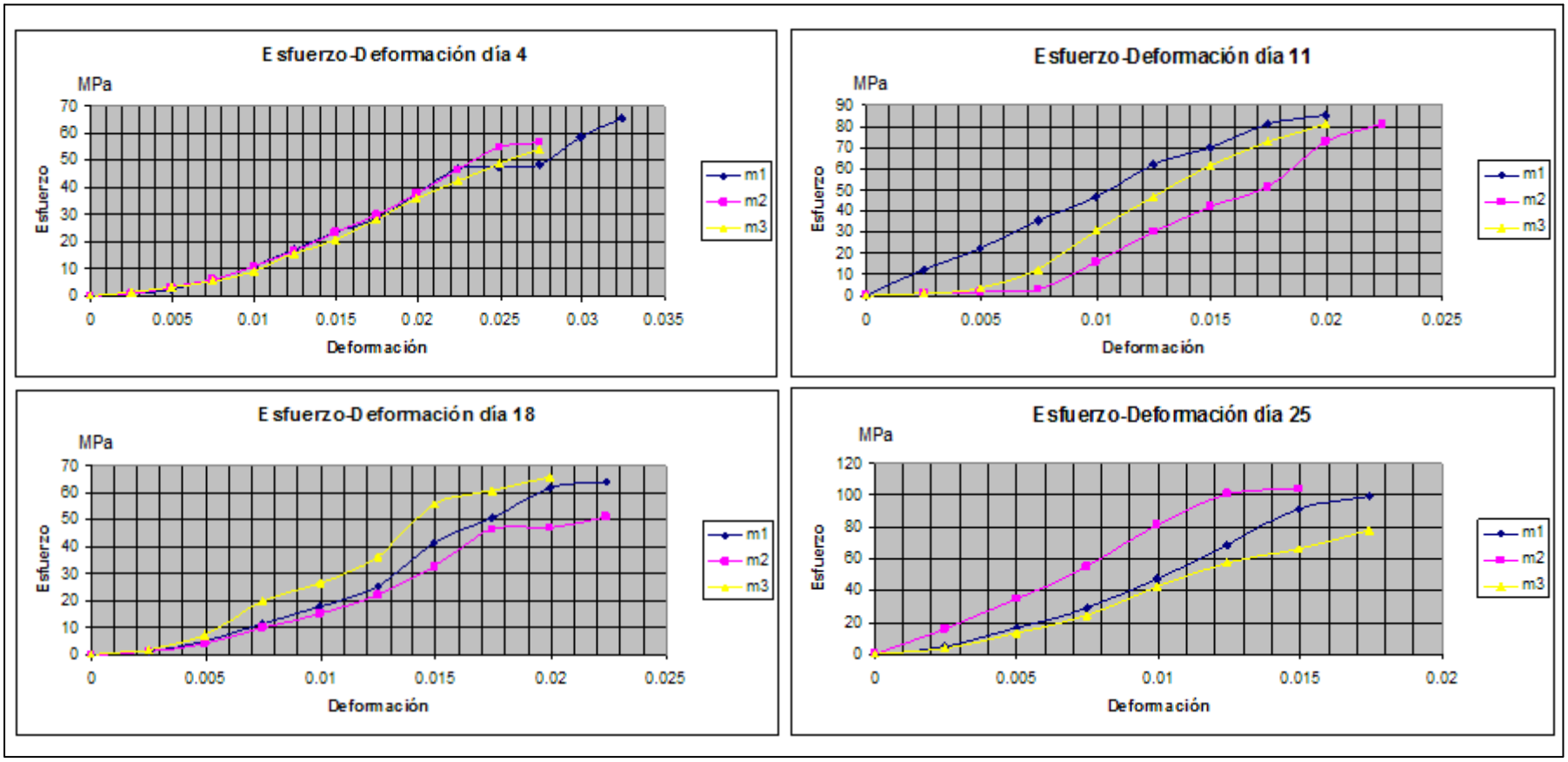


Figura 2.2 Esfuerzo-Deformación 4, 11, 18 y 25 días

Adición: 17.5%

APÉNDICE 3

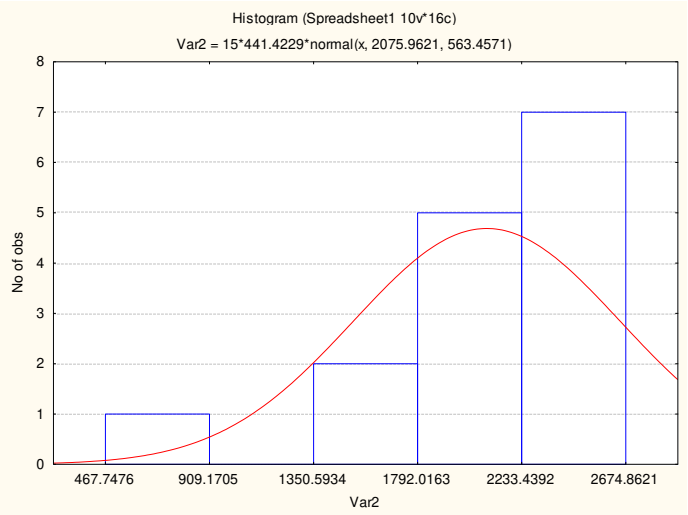


Figura 3.1 Histogramas de los módulos de elasticidad

Adición: 15% Días de curado: 7

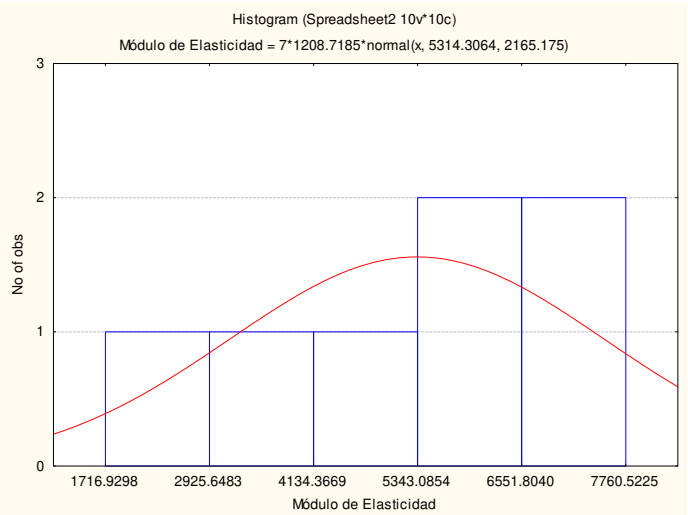


Figura 3.2 Histogramas de los módulos de elasticidad
Adición: 15% Días de curado: 14

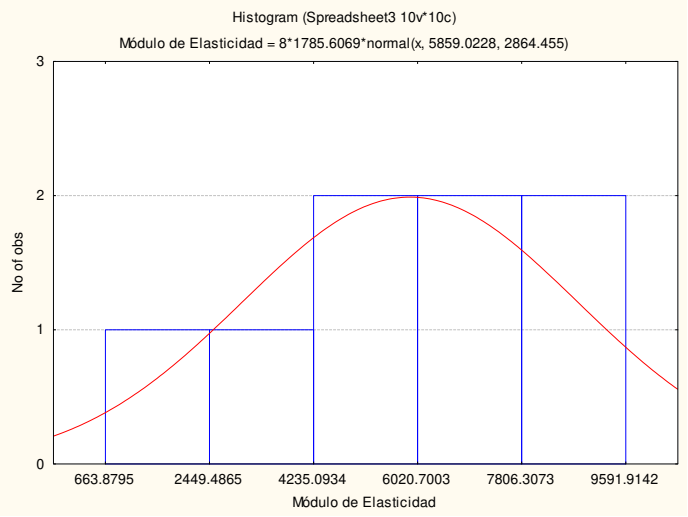


Figura 3.3 Histogramas de los módulos de elasticidad
Adición: 15% Días de curado: 21

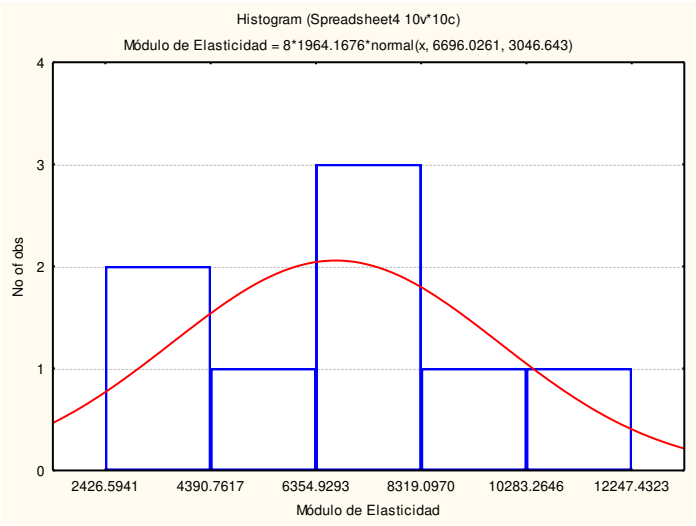


Figura 3.4 Histogramas de los módulos de elasticidad
Adición: 15% Días de curado: 28

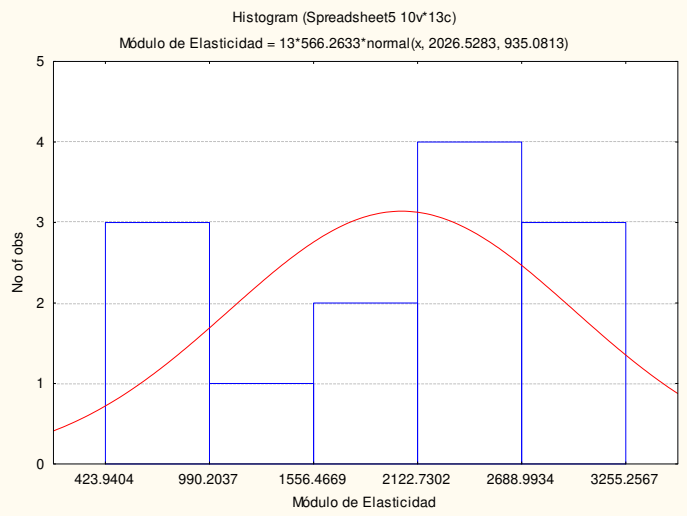


Figura 3.5 Histogramas de los módulos de elasticidad
Adición: 17.5% Días de curado: 4

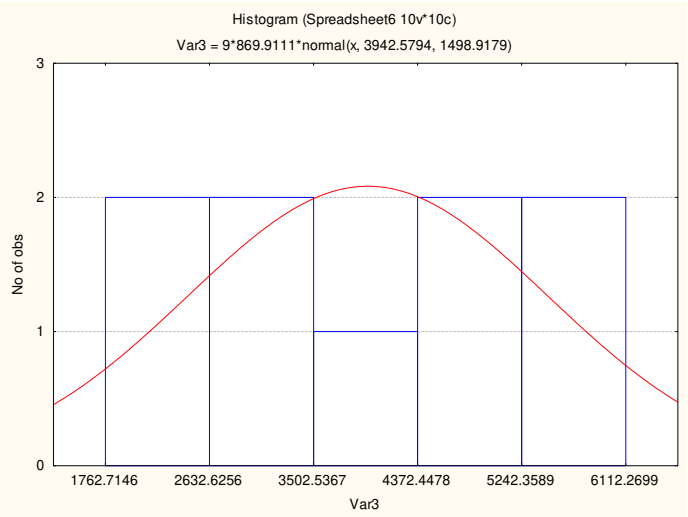


Figura 3.6 Histogramas de los módulos de elasticidad
Adición: 17.5% Días de curado: 11

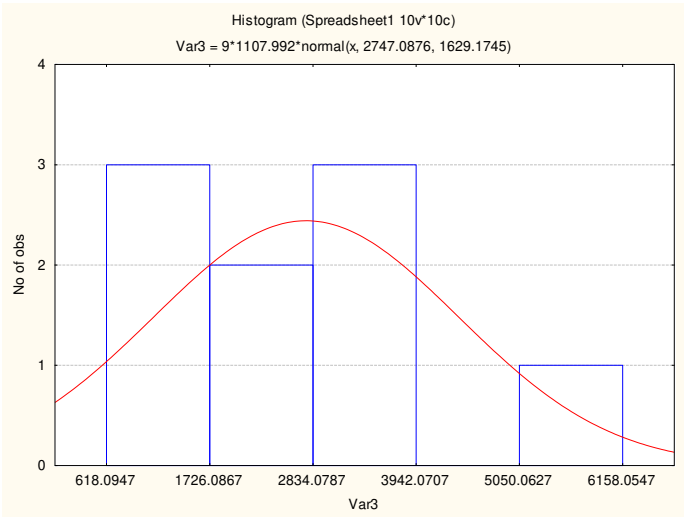


Figura 3.7 Histogramas de los módulos de elasticidad
Adición: 17.5% Días de curado: 18

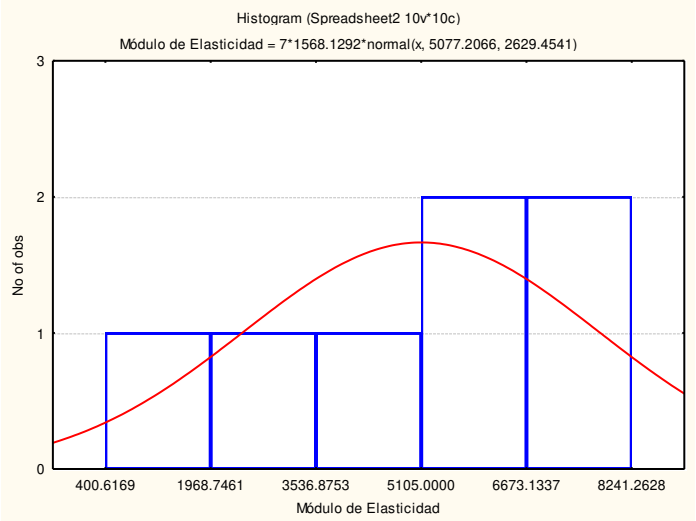


Figura 3.8 Histogramas de los módulos de elasticidad
Adición: 17.5% Días de curado: 25

APÉNDICE 4

TABLA 4.1

Medias del módulo de elasticidad, desviación estándar e intervalos

E (MPa) 15% 7 días	media	St.dv	intervalo	
	2075.9621	563.4571	1512.505	2639.4192

E (MPa) 15% 14 días	media	St.dv	intervalo	
	5314.3064	2165.175	3149.1314	7479.4814

E (MPa) 15% 21 días	media	St.dv	intervalo	
	5859.0228	2864.455	2994.5678	8723.4778

E (MPa) 17.5%/4 días	media	St.dv	intervalo	
	2026.5283	935.0813	1091.447	2961.6096

E (MPa) 17.5%/11días	media	St.dv	intervalo	
	3942.5794	1498.9179	2443.6615	5441.4973

E (MPa) 17.5%/18días	media	St.dv	intervalo	
	2747.0876	1629.1745	1117.9131	3865.0007

E (MPa) 17.5%/25días	media	St.dv	intervalo	
	5077.2066	2629.4541	2447.7525	7706.6607

APÉNDICE 5

TABLA 5.1

Esfuerzos-módulo de elasticidad E promedios

Adición: 15% Días de curado: 7

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0.000	0.000	
0.002	1.165	467.748
0.005	5.278	1651.954
0.007	10.054	1917.826
0.010	15.270	2094.467
0.012	20.423	2069.233
0.015	27.084	2674.862
0.017	33.619	2624.393
0.020	39.651	2422.517
0.022	45.558	2372.048
0.025	52.156	2649.628
0.027	57.498	2144.937
0.030	63.153	2271.109
0.032	67.929	1917.826
0.035	65.510	-971.530
0.037	72.202	2687.479

TABLA 5.2

Esfuerzos-módulo de elasticidad E promedios

Adición: 15% Días de curado: 14

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0	0	
0.0025	8.6080	3456.75191
0.0050	24.6268	6432.76349
0.0075	42.1849	7050.8582
0.0100	61.5101	7760.5225
0.0125	77.0729	6249.62432
0.0149	88.3602	4532.69456
0.0174	106.8873	7440.02895

TABLA 5.3

Esfuerzos-módulo de elasticidad E promedios

Adición: 15% Días de curado: 21

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0	0	
0.0025	1.6532	663.879506
0.0050	11.1733	3823.03026
0.0075	23.4297	4921.8653
0.0100	40.8737	7005.07341
0.0125	63.0493	8905.14234
0.0149	86.9350	9591.91424
0.0174	103.4669	6638.79506
0.0199	113.7281	4120.63142

TABLA 5.4

Esfuerzos-módulo de elasticidad E promedios

Adición: 17.5% Días de curado: 4

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0.0000	0	
0.0025	1.0557	423.9404
0.0050	2.8026	701.5204
0.0075	5.8440	1221.3521
0.0100	10.4313	1842.1220
0.0125	16.3381	2372.0475
0.0149	22.6220	2523.4548
0.0174	29.0316	2573.9239
0.0199	37.0750	3230.0221
0.0224	45.1812	3255.2567
0.0249	50.3969	2094.4675
0.0274	52.8476	984.1474
0.0299	58.4402	2245.8748
0.0324	65.6039	2876.7385

TABLA 5.5

Esfuerzos-módulo de elasticidad E promedios

Adición: 17.5% Días de curado: 11

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0	0.000	
0.0025	4.960	1991.6385
0.0050	9.349	1762.7146
0.0075	17.102	3113.3660
0.0100	31.069	5608.6372
0.0125	46.289	6112.2699
0.0149	57.862	4647.1565
0.0174	68.408	4235.0934
0.0199	79.809	4578.4794
0.0224	81.234	572.3099

TABLA 5.6

Esfuerzos-módulo de elasticidad E promedios

Adición: 17.5% Días de curado: 18

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0	0.000	
0.0025	1.539	618.0947
0.0050	5.501	1591.0216
0.0075	13.682	3285.0589
0.0100	19.952	2518.1636
0.0125	27.933	3204.9355
0.0149	43.268	6158.0547
0.0174	52.617	3754.3531
0.0199	58.147	2220.5625
0.0224	57.719	-171.6930

TABLA 5.7

Esfuerzos-módulo de elasticidad E promedios

Adición: 17.5% Días de curado: 25

Deformación (mm)	Esfuerzo promedio (MPa)	E promedio (MPa)
0	0	
0.0025	8.2660	3319.3975
0.0050	21.6625	5379.7132
0.0075	36.4842	5952.0232
0.0100	57.0066	8241.2628
0.0125	75.5337	7440.0289
0.0149	87.5051	4807.4033
0.0174	88.5027	400.6169

APÉNDICE 6

TABLA 6.1

Variables para “Adición: 15% Días de curado: 7”

m=0.0056
a=0.38
E=2275.214
deltaeps=0.003
def_total=0.037
sigmay=ones(n,1)*52.156

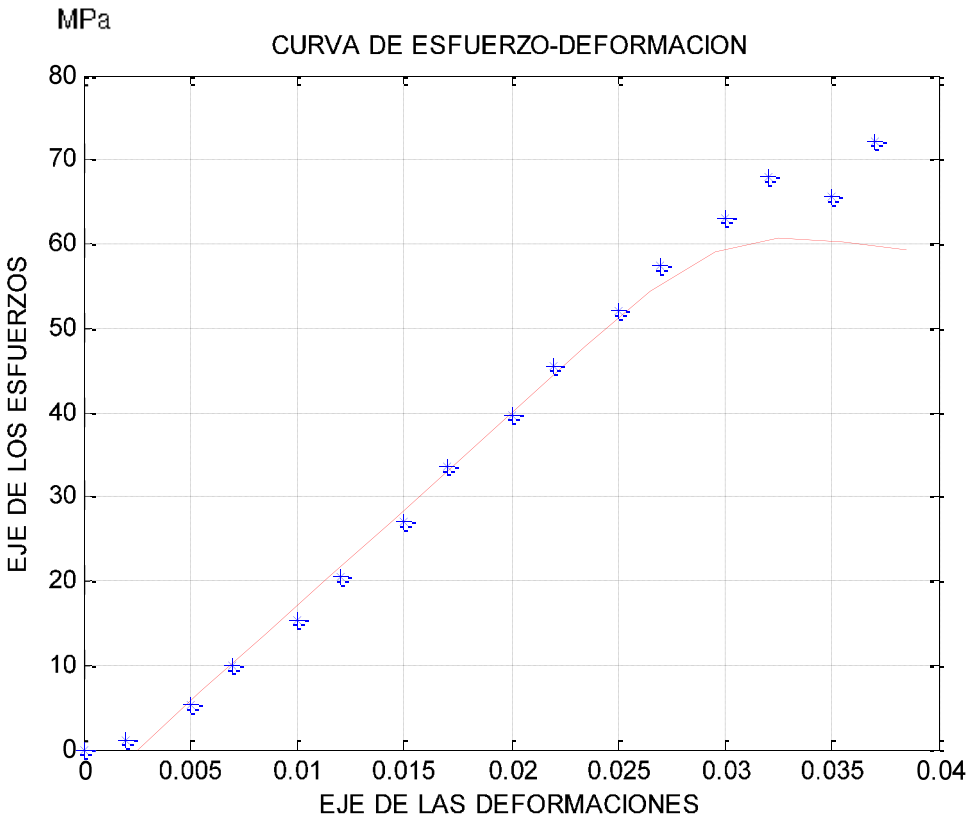


Figura 6.1 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.2

Valores de “m” y “a”

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
52.156	72.202	**2275.214**	0.037	0.00561879	0.38433735

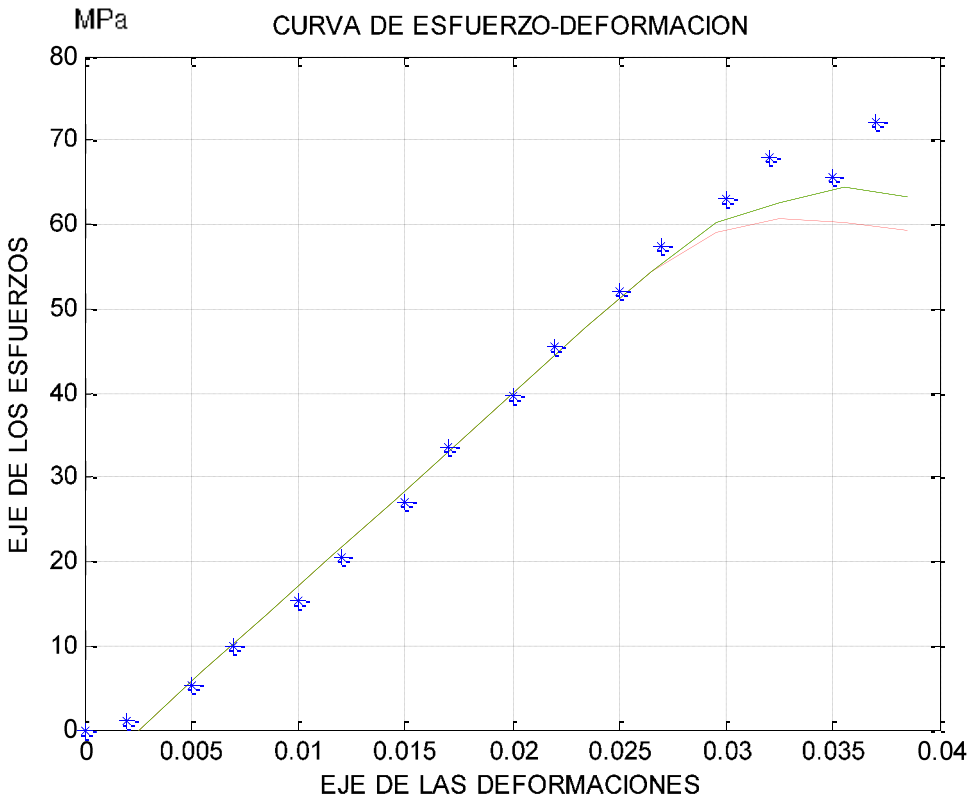


Figura 6.2 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.3

Valores de “m” y “a”

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
52.156	72.202	**2275.214**	0.037	0.00561879	0.5

TABLA 6.4

Variables para “Adición: 15% Días de curado: 14”

m=0.0023
a=0.73
E=7081.381
deltaeps=0.001
def_total=0.017
sigmay=ones(n,1)*61.510

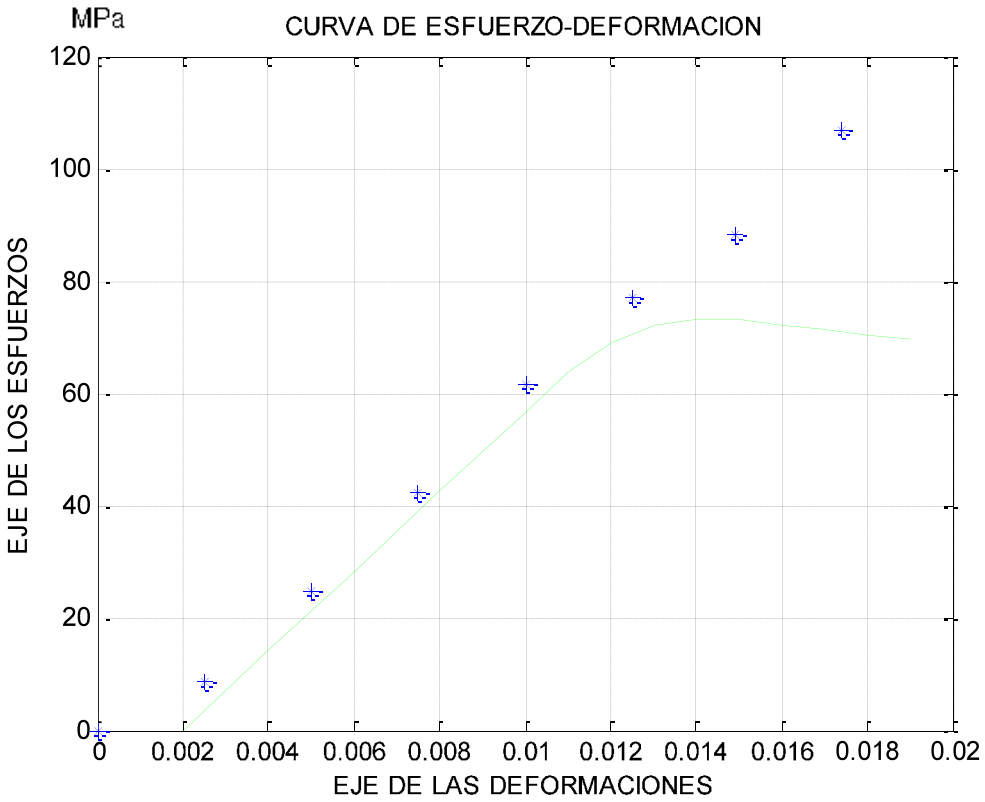


Figura 6.3 Aproximación de las curvas Teórica + experimental

TABLA 6.5

Valores de "m" y "a"

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
61.510	106.887	**7081.381**	0.017	0.00233724	0.73772011

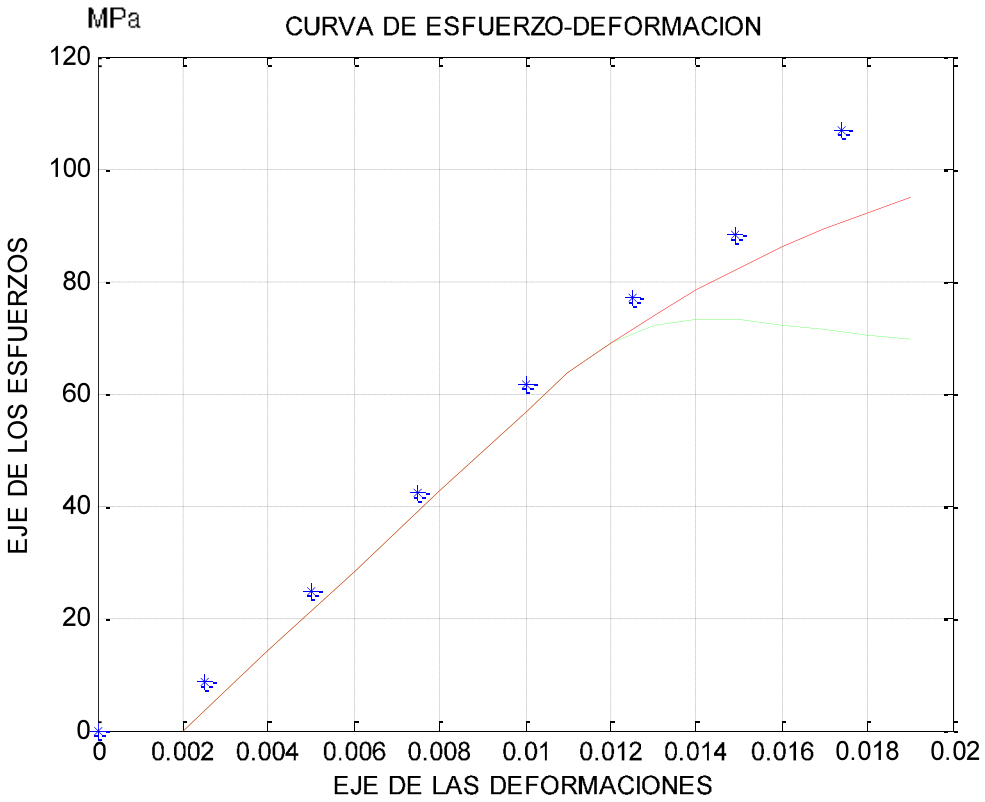


Figura 6.4 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.6

Valores de "m" y "a"

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
61.510	106.887	**7081.381**	0.017	0.023	1

TABLA 6.7

Variables para "Adición: 15% Días de curado: 21"

m=0.0033
a=0.30
E=6849.405
deltaeps=0.001
def_total=0.0199
sigmay=ones(n,1)*86.935

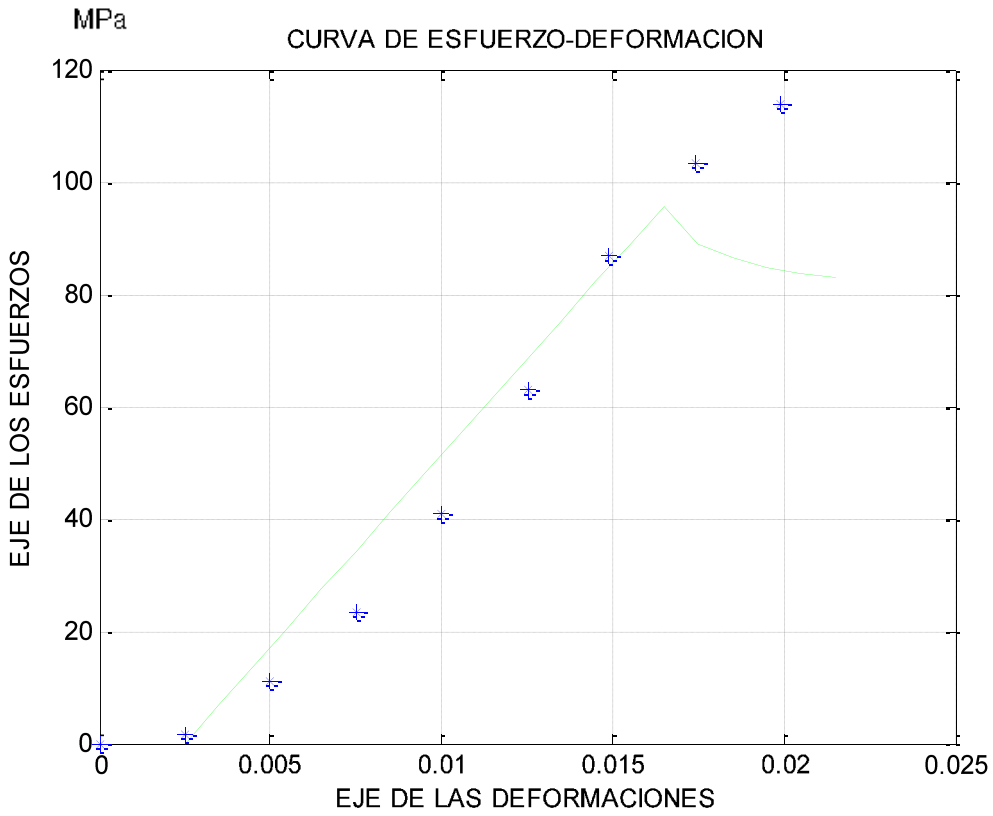


Figura 6.5 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.8

Valores de “m” y “a”

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
	0		0		
86.935	113.728	**6849.405**	0.020	0.00331749	0.30819672

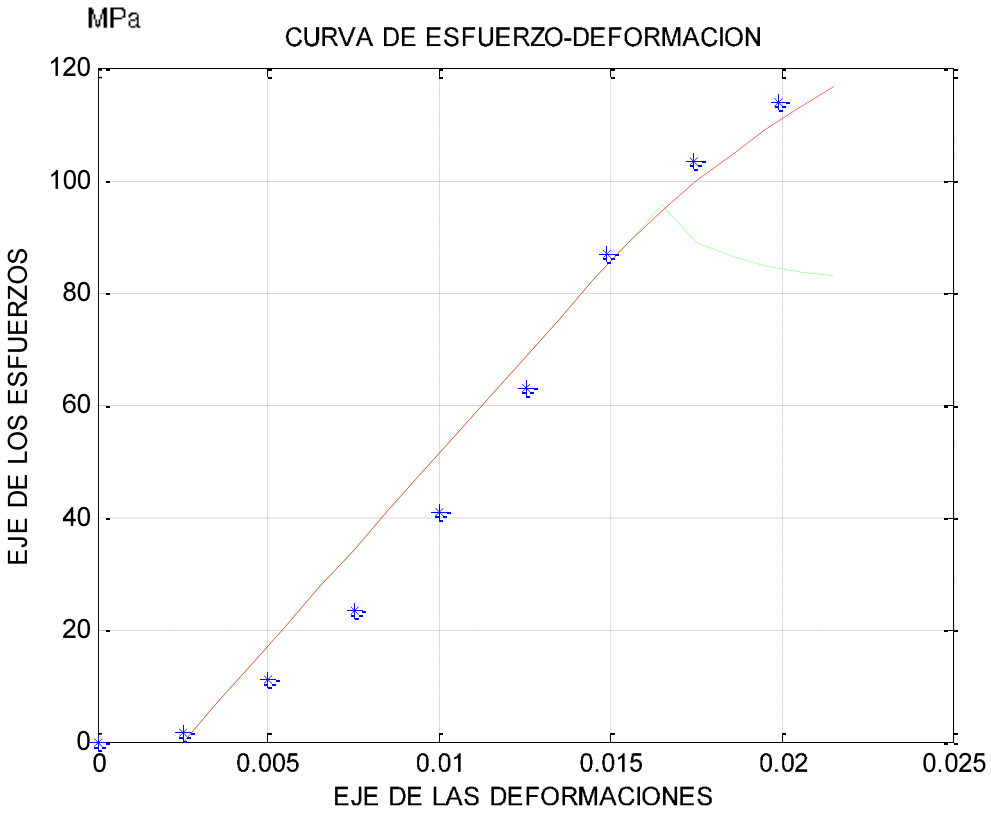


Figura 6.6 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.9

Valores de “m” y “a”

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
	0		0		
86.935	113.728	**6849.405**	0.020	0.037	1

TABLA 6.10

Variables para “Adición: 17.5% Días de curado: 4 ”

m=0.0053
a=0.45
E=2431.168
deltaeps=0.006
def_total=0.0324
sigmay=ones(n,1)*45.1812

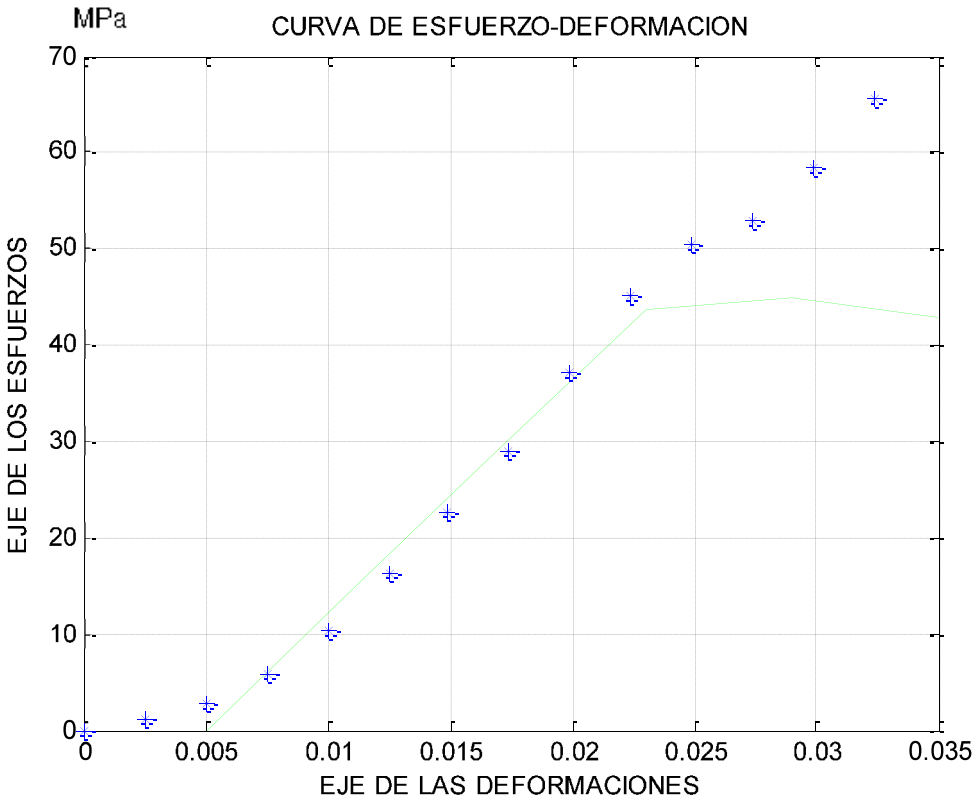


Figura 6.7 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.11

Valores de "m" y "a"

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
45.1812	65.6039	**2431.168**	0.0324	0.00538804	0.45201669

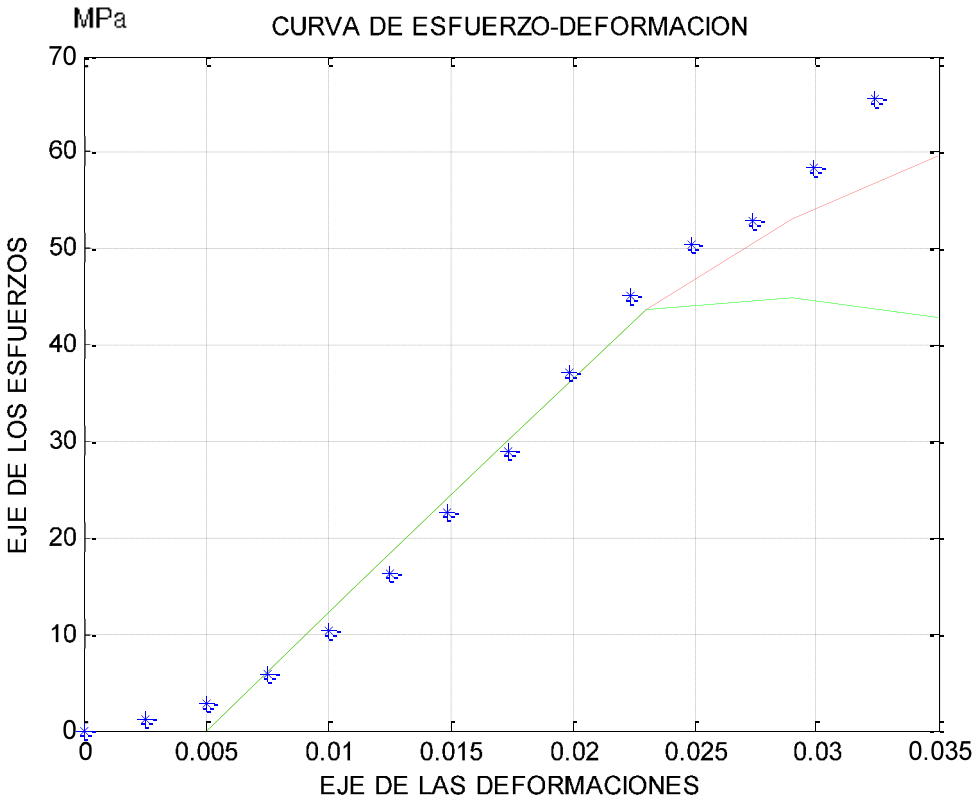


Figura 6.8 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.12

Valores de "m" y "a"

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
45.1812	65.6039	**2431.168**	0.0324	0.053	1

TABLA 6.13

Variables para "Adición: 17.5% Días de curado: 11"

m=0.00056
a=0.75
E=3717.725
deltaeps=0.004
def_total=0.022
sigmay=ones(n,1)*3717.725

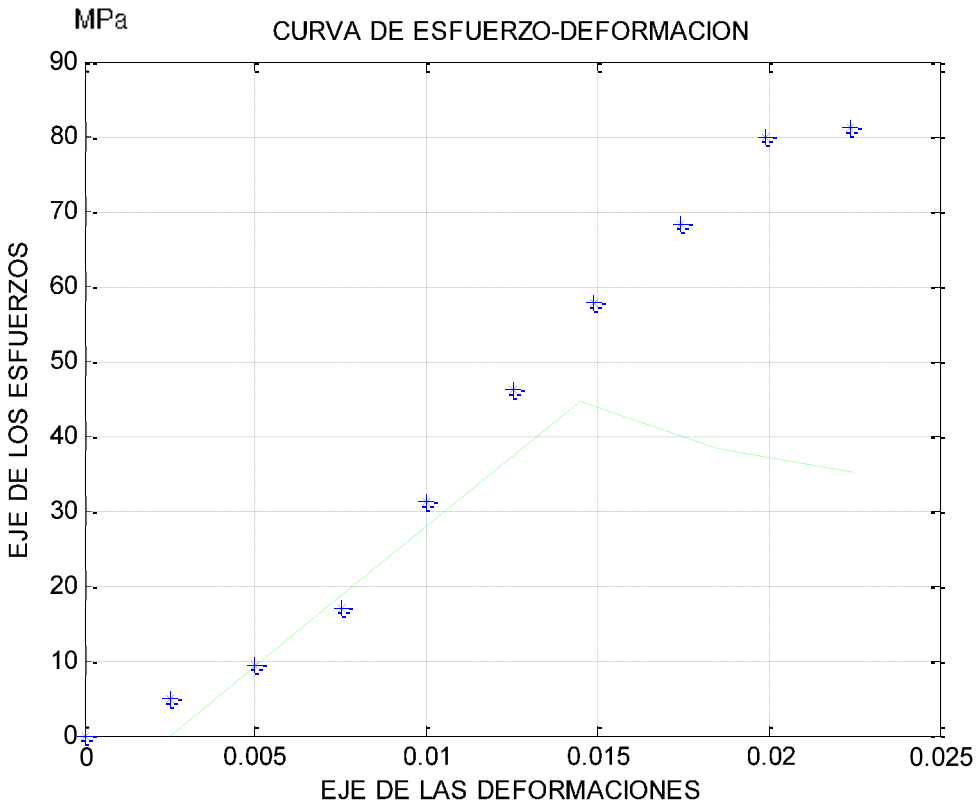


Figura 6.9 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.14

Valores de "m" y "a"

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
46.2893	81.2343	**3717.725**	0.0224	0.00056121	0.75492611

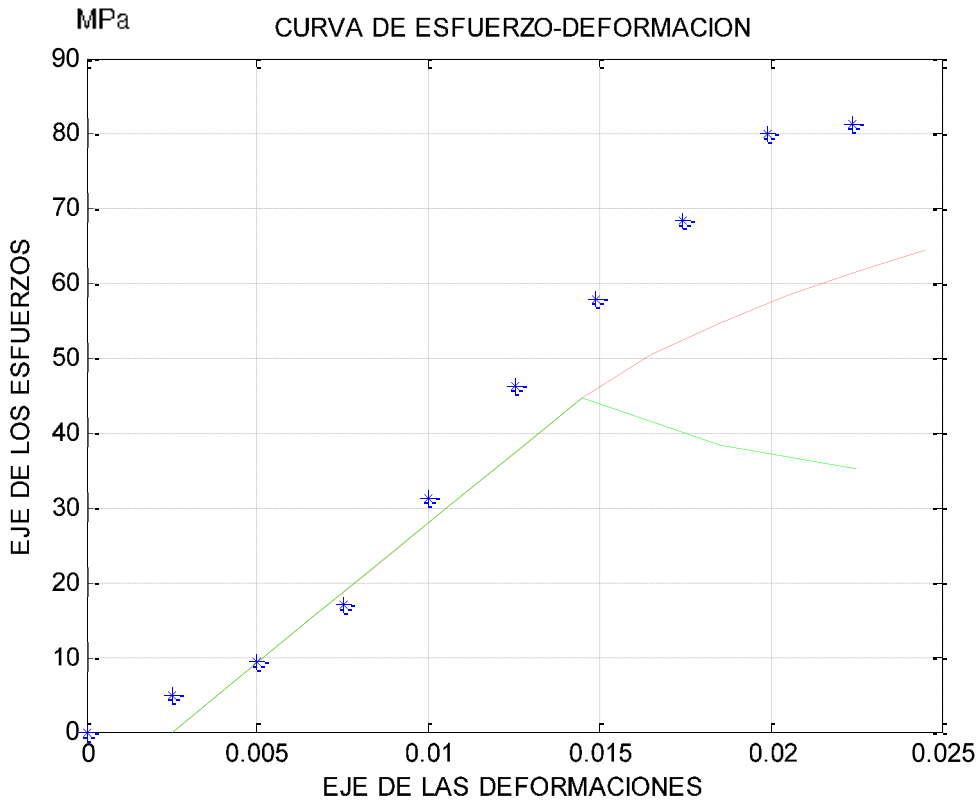


Figura 6.10 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.15

Valores de “m” y “a”

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
46.2893	81.2343	**3717.725**	0.0224	0.056	1

TABLA 6.16

Variables para “Adición: 17.5% Días de curado: 18”

m=0.0051
a=0.33
E=3351.447
deltaeps=0.002
def_total=0.0224
sigmay=ones(n,1)*43.2680

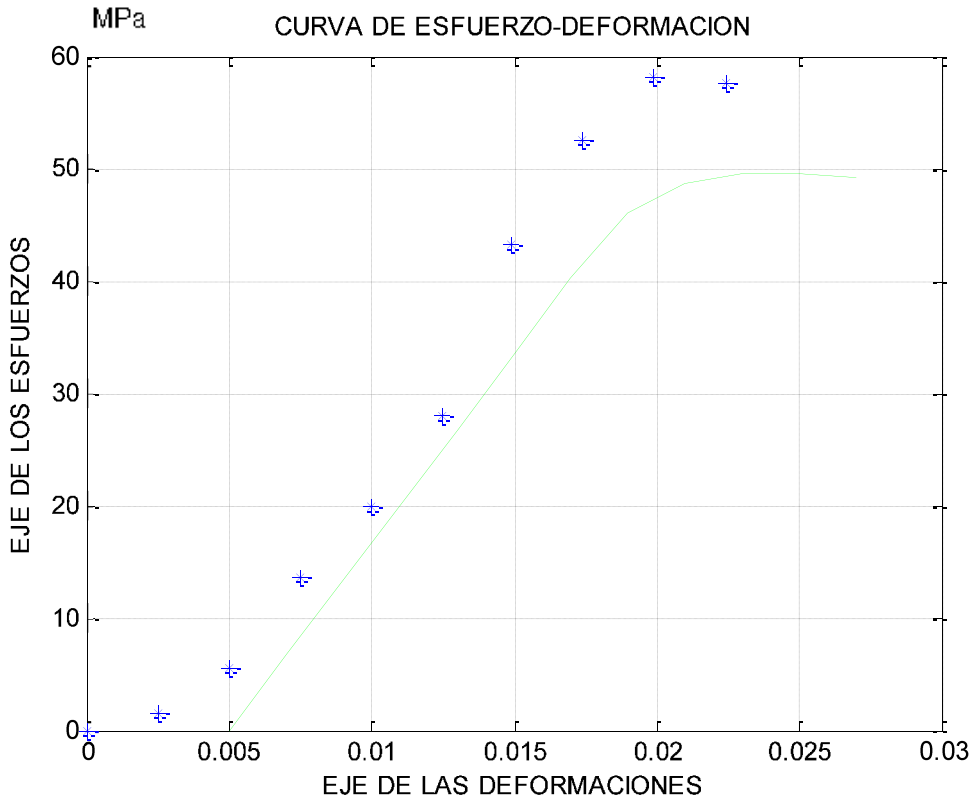


Figura 6.11 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.17

Valores de "m" y "a"

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
43.2680	57.7191	**3351.447**	0.0224	0.00518961	0.33399209

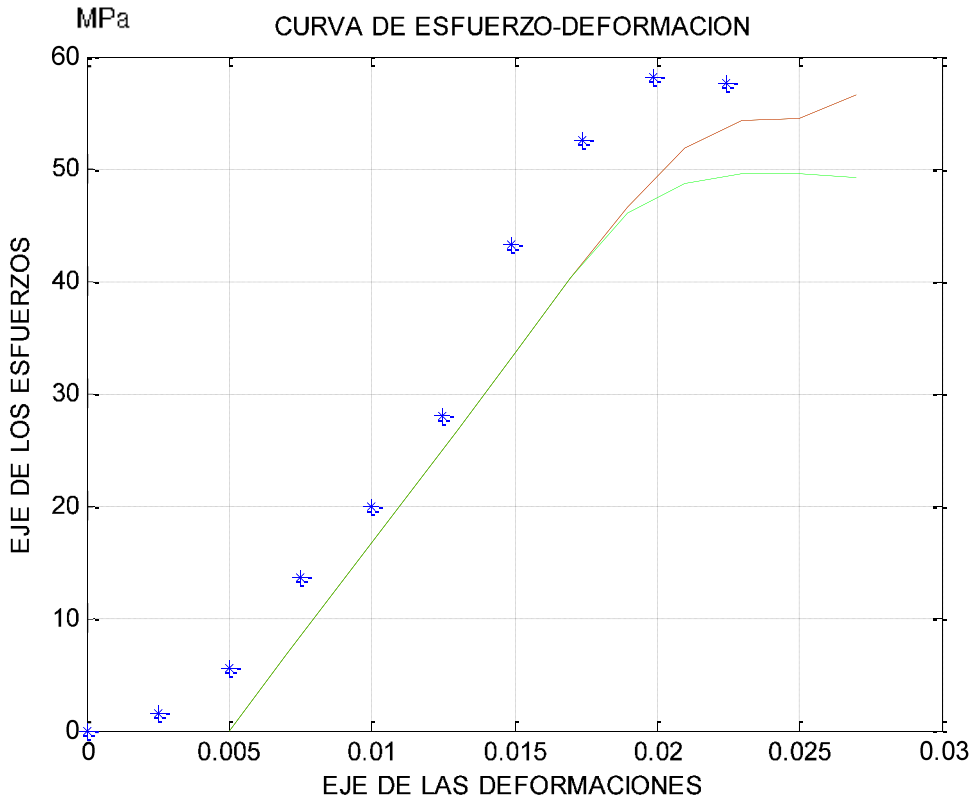


Figura 6.12 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.18

Valores de "m" y "a"

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
43.2680	57.7191	**3351.447**	0.0224	0.00518961	0.6

TABLA 6.19

Variables para "Adición: 17.5% Días de curado: 25"

m=0.0043
a=0.171
E=6753.257
deltaeps=0.002
def_total=0.0174
sigmay=ones(n,1)*75.5337

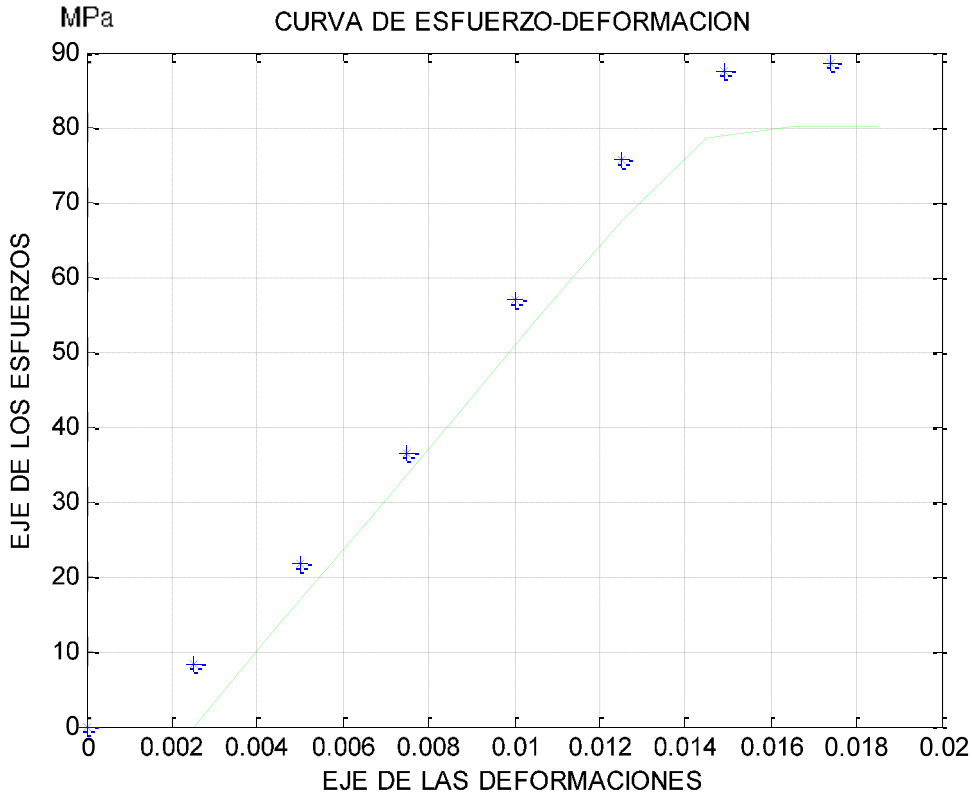


Figura 6.13 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.20

Valores de “m” y “a”

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
75.5337	88.5027	**6753.257**	0.0174	0.00432619	0.17169811

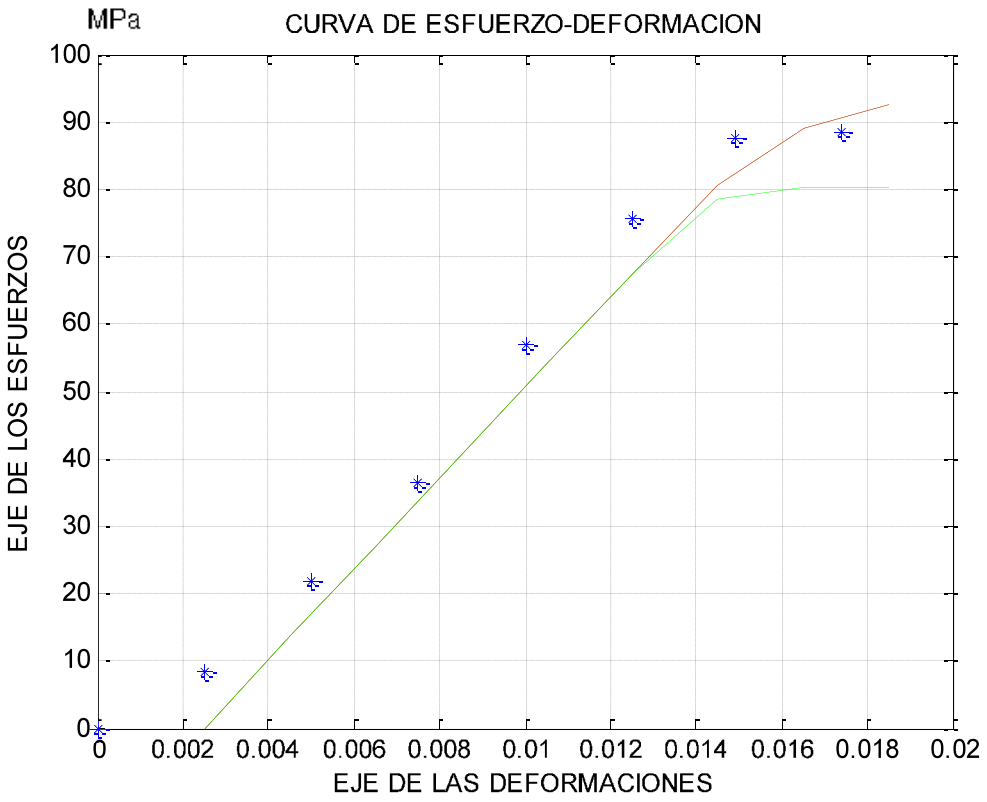


Figura 6.14 Aproximación de las curvas teórica + experimental

TABLA 6.21

Valores de “m” y “a”

Esfuerzo Promedio	Esfuerzo f'c Promedio	E Promedio	Deformación Promedio	m	a
75.5337	88.5027	**6753.257**	0.0174	0.00432619	0.5

APÉNDICE 7

TABLA 7.1

DE ERRORES

	15% día 7					
Esfuerzo a la ruptura f'c maximo	Deformación	Esfuerzos Exprimentales	Esfuerzos Teóricos	Errores	Error esfuerzo a la ruptura f'c	Error de la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
64.3549	0.000	0.000	0.000		12%	31%
	0.002	1.165	5.688	80%		
	0.005	5.278	10.239	48%		
	0.007	10.054	17.064	41%		
	0.010	15.270	21.615	29%		
	0.012	20.423	28.440	28%		
	0.015	27.084	32.991	18%		
	0.017	33.619	39.816	16%		
	0.020	39.651	44.367	11%		
	0.022	45.558	51.138	11%		
	0.025	52.156	55.437	6%		
	0.027	57.498	60.562	5%		
	0.030	63.153	62.261	1%		
	0.032	67.929	64.077	6%		
	0.035	65.510	63.805	3%		
	0.037	72.202	64.355	12%		

TABLA 7.2

DE ERRORES

	15% día 14					
Esfuerzo a la ruptura f'c maximo	Deformación	Esfuerzos Exprimentales	Esfuerzos Teóricos	Errores	Error esfuerzo a la ruptura f'c	Error de la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
94.8513	0.0000	0.000	0	0	13%	25%
	0.0025	8.608	21.2441	59%		
	0.0050	24.627	38.9476	16%		
	0.0075	42.185	56.6511	8%		
	0.0100	61.510	71.5079	9%		
	0.0125	77.073	81.9626	8%		
	0.0149	88.360	90.4232	8%		
	0.0174	106.887	94.8513	18%		

TABLA7.3

DE ERRORES

	15% día 21					
Esfuerzo a la ruptura f'c maximo	Deformación	Esfuerzos Exprimentales	Esfuerzos Teóricos	Errores	Error esfuerzo a la ruptura f'c	Error de la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
116.8112	0.0000	0.000	0	0	3%	48%
	0.0025	1.653	17.1235	90%		
	0.0050	11.173	34.247	67%		
	0.0075	23.430	51.3705	54%		
	0.0100	40.874	68.4941	40%		
	0.0125	63.049	84.8801	26%		
	0.0149	86.935	99.1721	12%		
	0.0174	103.467	110.4978	6%		
	0.0199	113.728	116.8112	3%		

TABLA 7.4

DE ERRORES

	17.5% día 4					
Esfuerzo a la ruptura f'c maximo	Deformación	Esfuerzos Exprimentales	Esfuerzos Teóricos	Errores	Error esfuerzo a la ruptura f'c	Error de la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
59.7188	0.000	0.0000	0.0000		10%	29%
	0.002	0.0000	0			
	0.005	2.8026	6.0779	54%		
	0.007	5.8440	12.1558	52%		
	0.010	10.4313	18.2338	43%		
	0.012	16.3381	24.0686	32%		
	0.015	22.6220	30.1465	25%		
	0.017	29.0316	36.2244	20%		
	0.020	37.0750	42.3023	12%		
	0.022	45.1812	46.7496	3%		
	0.025	50.3969	50.682	1%		
	0.027	52.8476	54.1767	2%		
	0.030	58.4402	56.8934	3%		
	0.032	65.6039	59.7188	10%		

TABLA 7.5

DE ERRORES

	17.5% día 11					
Esfuerzo a la ruptura f'c maximo	Deformación	Esfuerzos Exprimentales	Esfuerzos Teóricos	Errores	Error esfuerzo a la ruptura f'c	Error de la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
64.2458	0.0000	0.000	0		26%	31%
	0.0025	4.960	9.2943	47%		
	0.0050	9.349	18.5886	50%		
	0.0075	17.102	27.8829	39%		
	0.0100	31.069	37.1772	16%		
	0.0125	46.289	45.7618	1%		
	0.0149	57.862	52.2871	11%		
	0.0174	68.408	57.201	20%		
	0.0199	79.809	61.3089	30%		
	0.0224	81.234	64.2458	26%		

TABLA 7.6

DE ERRORES

	17.5% día 18					
Esfuerzo a la ruptura f'c maximo	Deformación	Esfuerzos Exprimentales	Esfuerzos Teóricos	Errores	Error esfuerzo a la ruptura f'c	Error de la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
56.5719	0.0050	5.501	8.3786	34%	2%	17%
	0.0075	13.682	16.7572	18%		
	0.0100	19.952	25.1358	21%		
	0.0125	27.933	33.1793	16%		
	0.0149	43.268	41.4949	4%		
	0.0174	52.617	48.9254	8%		
	0.0199	58.147	53.5877	9%		
	0.0224	57.719	56.5719	2%		

TABLA 7.7

DE ERRORES

	17.5% día 25					
Esfuerzo a la ruptura f'c maximo	Deformación	Esfuerzos Exprimentales	Esfuerzos Teóricos	Errores	Error esfuerzo a la ruptura f'c	Error de la media cuadrática
MPa	**mm**	MPa	MPa			
	0.0025	8.2660	16.883	51%		
	0.0050	21.6625	33.766	36%		
92.4188	0.0075	36.4842	50.649	28%	4%	27%
	0.0100	57.0066	67.533	16%		
	0.0125	75.5337	82.174	8%		
	0.0149	87.5051	90.510	3%		
	0.0174	88.5027	92.4188	4%		

APÉNDICE 8

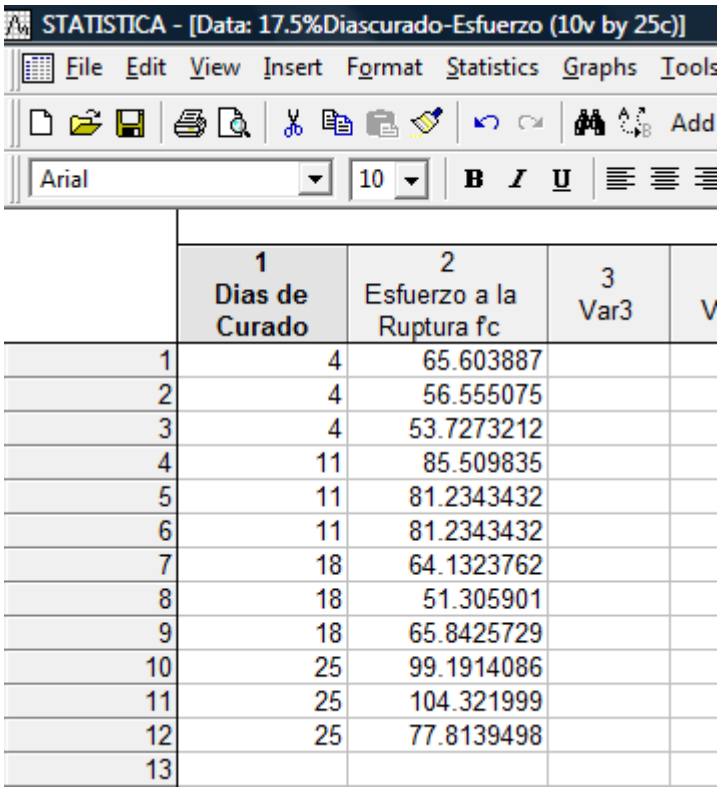
TABLA 8.1

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Esfuerzos de ruptura

Zeolita Tipo I (mordenita)	Días de Curado			
	4	11	18	25
17.5%	65.6039	85.5098	64.1324	99.1914
17.5%	56.5551	81.2343	51.3059	104.3220
17.5%	53.7273	81.2343	65.8426	77.8139

Data >
Input spearsheet



	1 Dias de Curado	2 Esfuerzo a la Ruptura f'c	3 Var3	V
1	4	65.603887		
2	4	56.555075		
3	4	53.7273212		
4	11	85.509835		
5	11	81.2343432		
6	11	81.2343432		
7	18	64.1323762		
8	18	51.305901		
9	18	65.8425729		
10	25	99.1914086		
11	25	104.321999		
12	25	77.8139498		
13				

Figura 8.1 Días de curado-esfuerzo a la ruptura

ANOVA >

One-way ANOVA >

Variables >ok

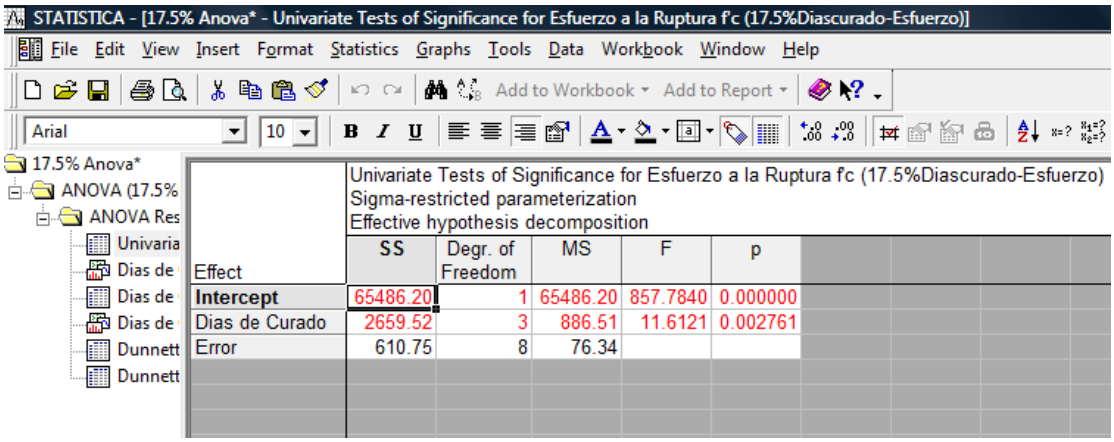


Figura 8.2 Probabilidad de error

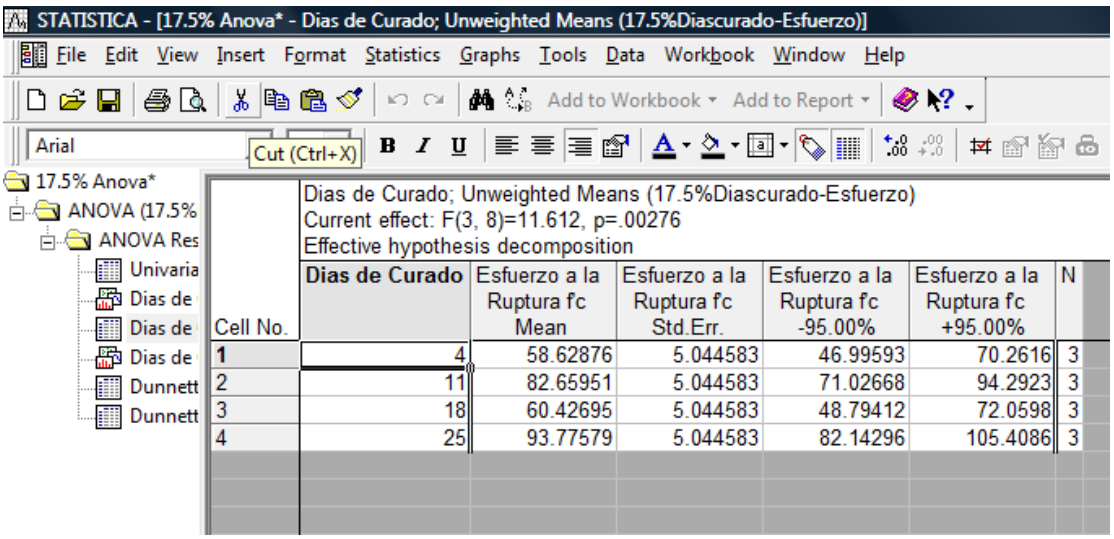


Figura 8.3 Medias de los esfuerzos e intervalo de confianza

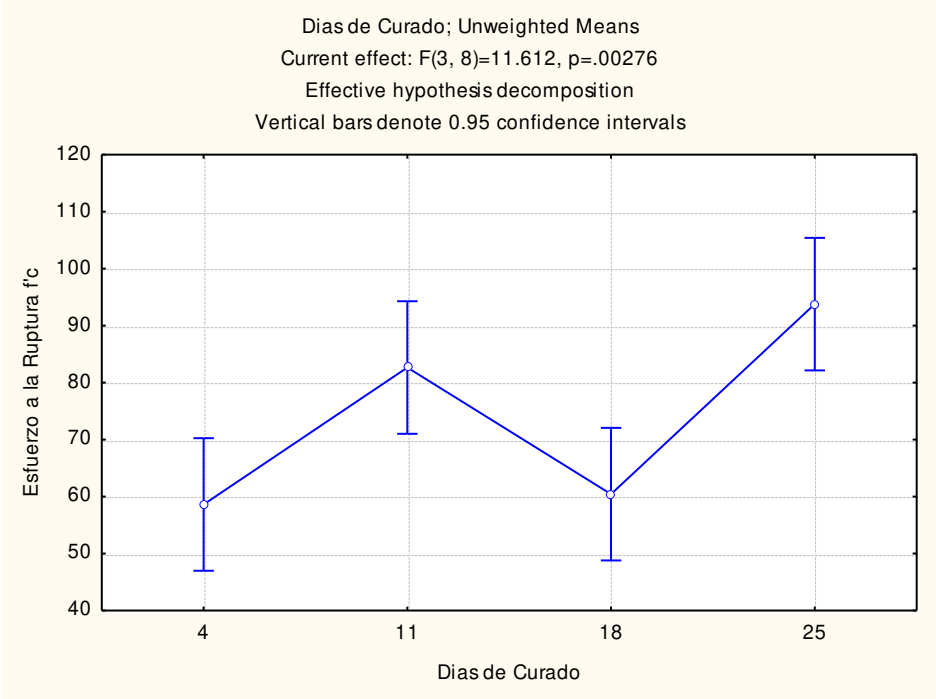


Figura 8.4 Gráfica de las medias

ANOVA >

One-way ANOVA >

Variables >ok

More results

Post-Hoc >

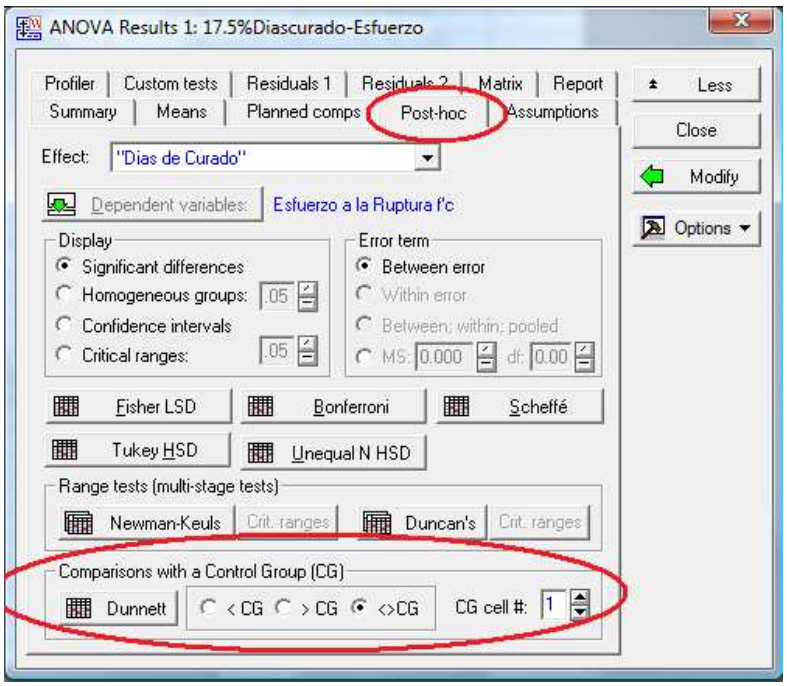


Figura 8.5 Comparación con un grupo de control

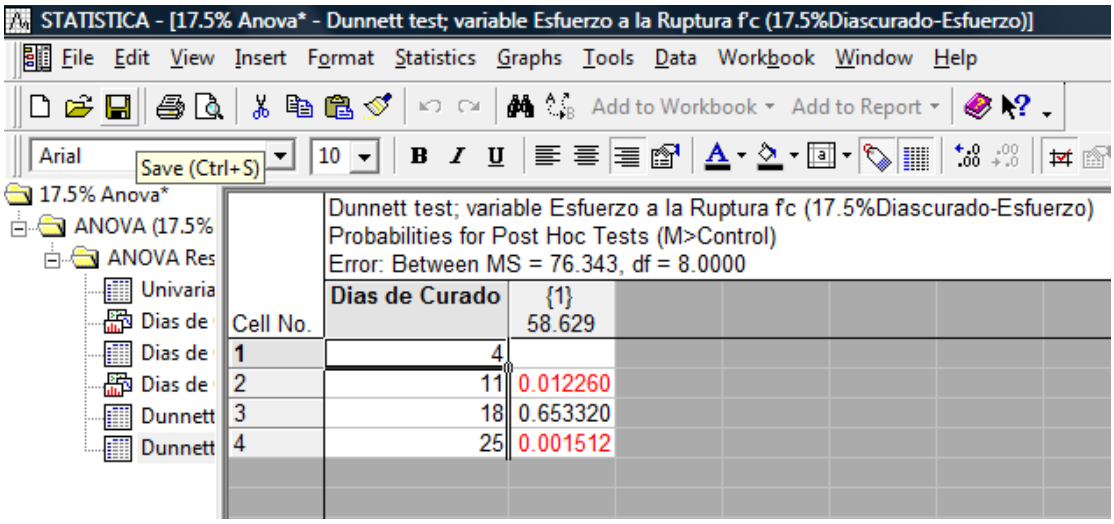


Figura 8.6 Método de Dunnett

APÉNDICE 9

TABLA 9.1

ANÁLISIS ESTADÍSTICO GRUPAL

	Días de Curado	Porcentaje de zeolita	Esfuerzo Ruptura (MPa)
1	7	0	89.785
2	7	0	90.640
3	7	0	87.220
4	7	5	93.300
5	7	5	87.340
6	7	5	88.200
7	7	10	80.380
8	7	10	87.000
9	7	10	76.598
10	7	15	84.456
11	7	15	62.588
12	7	15	72.202
13	7	20	57.498
14	7	20	56.555
15	7	20	65.038
16	7	25	52.956
17	7	25	52.956
18	7	25	52.767
19	14	0	99.191
20	14	0	97.481
21	14	0	89.785
22	14	5	83.060
23	14	5	74.050
24	14	5	89.060
25	14	10	95.425
26	14	10	78.231
27	14	10	88.547
28	14	15	106.887
29	14	15	81.234
30	14	15	81.234
31	14	20	47.030
32	14	20	61.567
33	14	20	85.510
34	14	25	94.565
35	14	25	95.425

	Días de Curado	Porcentaje de zeolita	Esfuerzo Ruptura (MPa)
36	14	25	83.389
37	21	0	102.612
38	21	0	108.597
39	21	0	76.959
40	21	5	66.790
41	21	5	114.750
42	21	5	94.190
43	21	10	116.057
44	21	10	90.267
45	21	10	100.583
46	21	15	112.018
47	21	15	109.453
48	21	15	115.438
49	21	20	89.785
50	21	20	94.061
51	21	20	89.785
52	21	25	67.055
53	21	25	51.581
54	21	25	54.160
55	28	0	95.771
56	28	0	97.481
57	28	0	94.061
58	28	5	107.890
59	28	5	107.040
60	28	5	109.610
61	28	10	92.846
62	28	10	127.233
63	28	10	111.759
64	28	15	120.569
65	28	15	112.873
66	28	15	115.438
67	28	20	111.163
68	28	20	111.163
69	28	20	108.597
70	28	25	102.302
71	28	25	97.144
72	28	25	98.004

ANOVA >

Factorial ANOVA >

Variables >ok

More results

Post-Hoc >

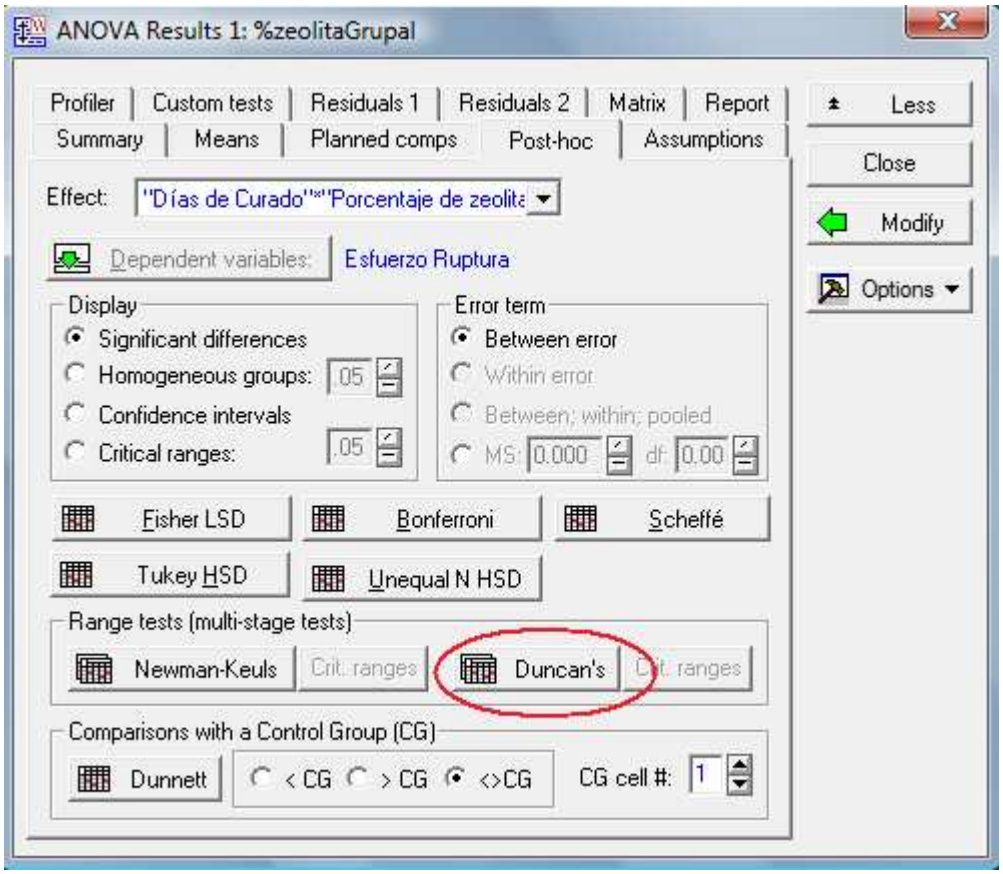


Figura 9.1 Selección del método de Duncan's

TABLA 9.2

Diferencias significativas de las medias aritméticas datos grupales

Método de Duncan's

Duncan test; variable Esfuerzo Ruptura (%zeolitaGrupal)
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests
Error: Between MS = 100.93, df = 48.000

Cell No.	Días de Curado	Porcentaje de zeolita	{1} 89.215	{2} 89.613	{3} 81.326	{4} 73.082	{5} 59.697	{6} 52.893	{7} 95.486	{8} 82.057	{9} 87.401	{10} 89.785	{11} 64.702	{12} 91.128	{13} 96.056	{14} 91.910	{15} 102.30	{16} 112.30	{17} 91.210	{18} 57.599	{19} 95.771	{20} 108.18	{21} 110.61	{22} 116.29	{23} 110.31	{24} 99.150
1	7	0		0.96160	0.38878	0.08452	0.00210	0.00022	0.51696	0.41692	0.82601	0.94910	0.00971	0.83556	0.48690	0.78175	0.18873	0.02261	0.83522	0.00111	0.50223	0.05815	0.03401	0.00757	0.03585	0.31548
2	7	5	0.96160		0.37708	0.08229	0.00201	0.00020	0.53881	0.40912	0.80205	0.98346	0.00942	0.86398	0.50968	0.80922	0.20013	0.02450	0.86280	0.00104	0.52454	0.06225	0.03669	0.00827	0.03857	0.33232
3	7	10	0.38878	0.37708		0.32002	0.01802	0.00273	0.15286	0.92948	0.49084	0.37557	0.06025	0.31073	0.14105	0.28204	0.03771	0.00235	0.31134	0.01104	0.14700	0.00785	0.00395	0.00061	0.00421	0.07633
4	7	15	0.08452	0.08229	0.32002		0.12981	0.03062	0.02414	0.30890	0.11722	0.08323	0.31224	0.06390	0.02213	0.05706	0.00376	0.00012	0.06502	0.09023	0.02315	0.00052	0.00023	0.00003	0.00025	0.00960
5	7	20	0.00210	0.00201	0.01802	0.12981		0.44039	0.00035	0.01661	0.00349	0.00205	0.54472	0.00138	0.00031	0.00119	0.00003	0.00000	0.00144	0.79931	0.00033	0.00001	0.00001	0.00000	0.00001	0.00010
6	7	25	0.00022	0.00020	0.00273	0.03062	0.44039		0.00003	0.00237	0.00039	0.00021	0.19663	0.00013	0.00003	0.00011	0.00001	0.00000	0.00013	0.56901	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
7	14	0	0.51696	0.53881	0.15286	0.02414	0.00035	0.00003		0.17232	0.40770	0.54375	0.00196	0.63422	0.94910	0.66495	0.46774	0.08716	0.62775	0.00016	0.97253	0.18303	0.12094	0.03525	0.12465	0.68930
8	14	5	0.41692	0.40912	0.92948	0.30890	0.01661	0.00237	0.17232		0.51794	0.41016	0.05753	0.34203	0.15985	0.31287	0.04404	0.00289	0.34380	0.00987	0.16619	0.00944	0.00482	0.00076	0.00512	0.08778
9	14	10	0.82601	0.80205	0.49084	0.11722	0.00349	0.00039	0.40770	0.51794		0.79522	0.01504	0.69210	0.38167	0.64234	0.13651	0.01419	0.69092	0.00190	0.39481	0.03872	0.02188	0.00447	0.02314	0.23776
10	14	15	0.94910	0.98346	0.37557	0.08323	0.00205	0.00021	0.54375	0.41016	0.79522		0.00966	0.87092	0.51696	0.81726	0.20337	0.02497	0.87188	0.00106	0.53099	0.06307	0.03733	0.00843	0.03913	0.33749
11	14	20	0.00971	0.00942	0.06025	0.31224	0.54472	0.19663	0.00196	0.05753	0.01504	0.00966		0.00684	0.00178	0.00600	0.00020	0.00001	0.00707	0.42050	0.00187	0.00003	0.00001	0.00001	0.00001	0.00062
12	14	25	0.83556	0.86398	0.31073	0.06390	0.00138	0.00013	0.63422	0.34203	0.69210	0.87092	0.00684		0.60615	0.92973	0.25233	0.03422	0.99195	0.00070	0.62100	0.08277	0.05027	0.01207	0.05250	0.40671
13	21	0	0.48690	0.50968	0.14105	0.02213	0.00031	0.00003	0.94910	0.15985	0.38167	0.51696	0.00178	0.60615		0.65097	0.47873	0.09209	0.60597	0.00015	0.97253	0.18493	0.12646	0.03742	0.12790	0.70783
14	21	5	0.78175	0.80922	0.28204	0.05706	0.00119	0.00011	0.66495	0.31287	0.64234	0.81726	0.00600	0.92973	0.65097		0.27610	0.03912	0.93249	0.00060	0.66148	0.09162	0.05688	0.01399	0.05881	0.44045
15	21	10	0.18873	0.20013	0.03771	0.00376	0.00003	0.00001	0.46774	0.04404	0.13651	0.20337	0.00020	0.25233	0.47873	0.27610		0.28619	0.25115	0.00002	0.47569	0.47724	0.36394	0.14198	0.36402	0.70259
16	21	15	0.02261	0.02450	0.00235	0.00012	0.00000	0.00000	0.08716	0.00289	0.01419	0.02497	0.00001	0.03422	0.09209	0.03912	0.28619		0.03394	0.00000	0.08988	0.65279	0.83770	0.62896	0.82115	0.16761
17	21	20	0.83522	0.86280	0.31134	0.06502	0.00144	0.00013	0.62775	0.34380	0.69092	0.87188	0.00707	0.99195	0.60597	0.93249	0.25115	0.03394		0.00072	0.61865	0.08162	0.04981	0.01191	0.05179	0.40568
18	21	25	0.00111	0.00104	0.01104	0.09023	0.79931	0.56901	0.00016	0.00987	0.00190	0.00106	0.42050	0.00070	0.00015	0.00060	0.00002	0.00000	0.00072		0.00016	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005
19	28	0	0.50223	0.52454	0.14700	0.02315	0.00033	0.00003	0.97253	0.16619	0.39481	0.53099	0.00187	0.62100	0.97253	0.66148	0.47569	0.08988	0.61865	0.00016		0.18532	0.12414	0.03644	0.12697	0.70158
20	28	5	0.05815	0.06225	0.00785	0.00052	0.00001	0.00000	0.18303	0.00944	0.03872	0.06307	0.00003	0.08277	0.18493	0.09162	0.47724	0.65279	0.08162	0.00001	0.18532		0.78278	0.38720	0.79656	0.30594
21	28	10	0.03401	0.03669	0.00395	0.00023	0.00001	0.00000	0.12094	0.00482	0.02188	0.03733	0.00001	0.05027	0.12646	0.05688	0.36394	0.83770	0.04981	0.00000	0.12414	0.78278		0.51942	0.97063	0.22132
22	28	15	0.00757	0.00827	0.00061	0.00003	0.00000	0.00000	0.03525	0.00076	0.00447	0.00843	0.00001	0.01207	0.03742	0.01399	0.14198	0.62896	0.01191	0.00000	0.03644	0.38720	0.51942		0.51339	0.07535
23	28	20	0.03585	0.03857	0.00421	0.00025	0.00001	0.00000	0.12465	0.00512	0.02314	0.03913	0.00001	0.05250	0.12790	0.05881	0.36402	0.82115	0.05179	0.00000	0.12697	0.79656	0.97063	0.51339		0.22254
24	28	25	0.31548	0.33232	0.07633	0.00960	0.00010	0.00001	0.68930	0.08778	0.23776	0.33749	0.00062	0.40671	0.70783	0.44045	0.70259	0.16761	0.40568	0.00005	0.70158	0.30594	0.22132	0.07535	0.22254	

BIBLIOGRAFÍA

[1] Jimenez, H."TECNOLOGIA DEL CONCRETO".UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA DEL PERU". www.fic.uni.edu.pe. Febrero, 2008.

[2] Reyes,G."MANUFACTURA DEL CEMENTO PORTLAND". www.monografias.com. Marzo, 2008.

[3] Anton, A."EL EXPERIMENTO FACTORIAL", www.uned.es.Marzo, 2008

[4] Servin , J. "METALURGIA DE MINERALES NO METÁLICOS" ,www.monografias.com. Marzo, 2008.

[5] Gutiérrez, M. "ZEOLITAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES", Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares , Marzo, 2008.

[6] _____,"QUE ES UNA ZEOLITA", www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx, Febrero, 2008.

[8] ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, Mayo 2008.

[9] Galbiati, J. "REGRESION LINEAL SIMPLE", http://www.jorgegalbiati.cl/enero_07/Regresion.pdf, Mayo, 2008