

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

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

“Modelamiento de la Respuesta mecánica del cemento puzolanico
mediante la adición de 15% de zeolita y curado al aire”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Titulo de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

Hugo Miguel Avecillas Briones

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mi Director de Tesis Ing. Mauricio Cornejo Martínez M.Sc., al grupo de Profesores que guiaron de forma correcta la culminación de esta Tesis, y especialmente a mis padres por confiar en mí.

DEDICATORIA

ESTE TRABAJO
REALIZADO CON
ESFUERZO POR VARIOS
MESES, ESTÁ DEDICADO
A MIS PADRES Y
HERMANO, A MI
QUERIDA MAMI PIEDAD,
FAMILIARES Y AMIGOS.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



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



Dr. Mauricio Cornejo M.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Rodrigo Perugachi B.
VOCAL



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

DECLARACION EXPRESA

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



Hugo Miguel Avecillas Briones



ESCUELA "GONZALO ZEPALLOS G."
E. L. M. C. P.

RESUMEN

Múltiples investigaciones se han realizado para la mejora continua de las propiedades del Cemento, usar materiales locales para la elaboración del mismo posee el propósito primordial de disminuir costos de manufactura para poder competir a nivel Nacional con un producto de menor valor pero iguales propiedades mecánicas.

Propiedades mecánicas del cemento son obtenidas de los diferentes materiales puzolanicos que lo conforman.

Puzolanas son requeridas en la elaboración del cemento, obtener el mismo por parte de las empresas manufactureras de cemento, da un valor agregado a su proceso de fabricación, debido al costo de transportación que debe considerarse en el costo de procesamiento del cemento.

Material puzolanico seleccionado para esta investigación es la Zeolita, cuyo costo en comparación con otros materiales puzolanicos es relativamente mas bajo, así que si se llegara a demostrar que se alcanzan las mismas fuerzas de compresión que el cemento, se podría competir a nivel nacional con un producto de menor costo e iguales o incluso mejores propiedades mecánicas.

Para esta investigación Zeolita del Tipo Mordenita será extraída del Rio Bachiller en las cercanías de Guayaquil y será mezclada con cemento Tipo 1, a esta mezcla se le realizara un curado al aire, y observaremos como se afecta su Resistencia a la compresión uniaxial a lo largo de 28 días de experimentación.

Usando análisis estadístico a las medidas tomadas, se determinara como el porcentaje de Zeolita y el tiempo de fraguado afectan a la resistencia a la compresión uniaxial. También, se compararan los resultados obtenidos con otros datos obtenidos por otros compañeros y así estableceré las conclusiones debidas.

Este análisis que se realizará, aportará evidencia real y confiable de la Zeolita de esta zona, y mostrara como afecta a la Resistencia a la compresión uniaxial en la estructura del cemento, a lo largo del periodo de investigación.

También, procederé a realizar un Modelamiento matemático en base a las condiciones establecidas, este modelo será comprobado en base a datos experimentales tomados los días 4, 11,18 y 25. Este modelo matemático cuya variable de respuesta será la fuerza a la compresión uniaxial permitirá establecer el comportamiento del material a lo largo de esta investigación.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
INTRODUCCIÒN.....	1
 CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES.....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.1.1 Justificación.....	5
1.2 Hipótesis.....	8

1.3 Objetivos.....	9
1.4. Metodología.....	10
1.5. Estructura de la Tesis	12

CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO.....	16
2.1. Cemento Portland.....	16
2.2. Zeolita.....	20
2.3 Curado al Ambiente	30
2.4 Método Factorial.....	33
2.5 Estado del arte del Modelamiento de materiales compuestos.....	34

CAPITULO 3

3. METODOLOGIA ANÁLISIS ESTADISTICO.....	36
3.1. Diseño del Experimento.....	36
3.2. Recolección de datos.....	38
3.3. Cálculos Estadísticos.....	46

CAPÍTULO 4

4. ANALISIS Y RESULTADOS.....	55
4.1. Modelación del Comportamiento.....	56
4.2. Validación.....	66

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	109
5.1 Conclusiones.....	109
5.2 Recomendaciones.....	113

ANEXOS.....	116
-------------	-----

BIBLIOGRAFIA.....	141
-------------------	-----

ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
Hr	Horas
Km	Kilómetros
m	Metros
Min	Minutos
m ³	Metros cúbicos
σ_y	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_{\text{Experimental}}$	Esfuerzo experimental
$\sigma_{\text{Teórico}}$	Esfuerzo teórico
f'c	Esfuerzo de ruptura
M1	Muestra 1
M2	Muestra 2
M3	Muestra 3
ACI	American Concrete Institute
f'c	Esfuerzo de ruptura
HPC	High-Performance Concrete
BDS	Bulgarian State Standard

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1 Metodología de la tesis.....	10
Figura 2.1 Características Generales de la Zeolita.....	20
Figura 2.2 Estructura de la Zeolita Faujasita.....	22
Figura 2.3 Zeolita faujasita.....	23
Figura 2.4 Formación de Zeolitas en la naturaleza.....	25
Figura 2.5 Clasificación de algunas Zeolitas.....	26
Figura 3.1 Variaciones permisibles de los moldes.....	40
Figura 3.2 Cantidades para los especímenes.....	42
Figura 3.3 Tolerancia permisible en los ensayos.....	43
Figura 3.4 Precisión y sesgo permitido.....	45
Figura 3.5 Gráfico de dispersión.....	46
Figura 3.6 Interpretación del coeficiente de correlación lineal.....	48
Figura 3.7 Gráfica de método de los mínimos cuadrados.....	50
Figura 4.1 Resumen proceso de Molienda.....	58
Figura 4.2 Prensas de Ensayos.....	61
Figura 4.3 Aproximación del esfuerzo de fluencia y módulo de elástico..	70
Figura 4.4 Gráfica esfuerzo de ruptura vs días curado mezcla 15%.....	73
Figura 4.5 Gráfica esfuerzo vs días curado mezcla 17.5%.....	74
Figura 4.6 Gráfica esfuerzo vs días de curado general.....	75
Figura 4.7 Zona de rechazo estadístico.....	78
Figura 4.8 Resultados de regresión múltiple.....	80
Figura 4.9 Tendencia ruptura vs %zeolita.....	81
Figura 4.10 Tendencia ruptura vs días de curado.....	82
Figura 4.11 Regresión múltiple para los 7 días.....	84
Figura 4.12 Regresión polinomial cubica para los 7 días.....	86
Figura 4.13 Regresión múltiple para los 14 días.....	88

Figura 4.14	Regresión polinomial cubica para los 14 días.....	90
Figura 4.15	Regresión múltiple para los 21 días	92
Figura 4.16	Regresión polinomial cubica para los 21 días.....	94
Figura 4.17	Grafica de regresión polinómica cubica para los 21 días.....	94
Figura 4.18	Regresión múltiple para los 28 días	96
Figura 4.19	Regresión polinomial cubica para los 28 días.....	97
Figura 4.20	Superficie de respuesta del experimento.....	100
Figura 4.21	Grafica esfuerzo vs días de curado general.....	104
Figura 4.22	Análisis anova para los valores de “m” del 17.5% de zeolita	106
Figura 4.23	Análisis anova para los valores de “a” del 17.5% de zeolita	107
Figura A	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 15% a los 7 días de curado M1-M2-M3.....	124
Figura B	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 15% a los 14 días de curado M1-M2-M3.....	125
Figura C	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 15% a los 21 días de curado M1-M2-M3.....	126
Figura D	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 15% a los 28 días de curado M1-M2-M3.....	127
Figura E	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 17,5% a los 4 días de curado M1-M2-M3.....	128
Figura F	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 17,5% a los 11 días de curado M1-M2-M3.....	129
Figura G	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 17,5% a los 18 días de curado M1-M2-M3.....	130
Figura H	Grafica esfuerzo vs deformación mezcla 17,5% a los 25 días de curado M1-M2-M3.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1	Porcentajes de óxidos de las muestras en promedio..... 27
Tabla 2	Porcentaje de elementos en las muestras promedio..... 27
Tabla 3	Composición mineralógica de las muestras..... 27
Tabla 4	Primer tamizado..... 56
Tabla 5	Segundo tamizado..... 57
Tabla 6	Tercer tamizado..... 57
Tabla 7	Composición de mezclas..... 60
Tabla 8	Adquisición de datos para muestra del 15% de zeolita a los 7 días de curado..... 64
Tabla 9	Errores relativos y capacidad de predicción del algoritmo... 72
Tabla 10	Datos para el análisis..... 79
Tabla 11	Diferencia entre datos experimentales y obtenidos por regresión..... 83
Tabla 12	Grupo de datos para los 7 días..... 84
Tabla 13	Resultados estadísticos para los 7 días..... 85
Tabla 14	Resultados estadísticos regresión polinómica cubica para los 7 días..... 87
Tabla 15	Grupo de datos para los 14 días..... 87
Tabla 16	Resultados estadísticos para los 14 días..... 89
Tabla 17	Resultados estadísticos regresión polinómica cubica para los 14 días..... 91
Tabla 18	Grupo de datos para los 21 días..... 91
Tabla 19	Resultados estadísticos para los 21 días..... 93
Tabla 20	Resultados estadísticos regresión poli nómica cubica para los 21 días..... 95
Tabla 21	Grupo de datos para los 28 días..... 95
Tabla 22	Resultados estadísticos para los 28 días..... 96

Tabla 23	Resultados estadísticos regresión polinómica cubica para los 28 días.....	98
Tabla 24	Modelos de regresión.....	99
Tabla 25	Porcentaje de variación respecto cemento tipo I.....	101
Tabla 26	Porcentaje de variación respecto cemento tipo IV.....	103
Tabla 27	Valores de “m” y “a” para el 17,5% de zeolita.....	105
Tabla 28	Mezcla cemento y 15% de zeolita día 7.....	116
Tabla 29	Mezcla cemento y 15% de zeolita día 14.....	117
Tabla 30	Mezcla cemento y 15% de zeolita día 21.....	118
Tabla 31	Mezcla cemento y 15% de zeolita día 28.....	119
Tabla 32	Mezcla cemento y 17.5% de zeolita día 4.....	120
Tabla 33	Mezcla cemento y 17.5% de zeolita día 11.....	121
Tabla 34	Mezcla cemento y 17.5% de zeolita día 18.....	122
Tabla 35	Mezcla cemento y 17.5% de zeolita día 25.....	123
Tabla A	Tabla Fisher.....	132

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata del “Modelamiento de la respuesta mecánica del cemento puzolanico mediante la adición de 15% de Zeolita y curado al aire”, con el propósito primordial de establecer un Modelo Matemático que pueda representar de forma real y valedera el comportamiento del cemento bajo las condiciones establecidas, con énfasis principal en la resistencia a la compresión.

Para esto realizaremos ensayos experimentales que permitan establecer si mi modelo matemático es una buena aproximación de lo visto en las pruebas.

El uso de Zeolita del tipo Mordenita extraída del Rio Bachiller cerca de Guayaquil evitaría el costo de transporte de Zeolita de otras provincias, lo que disminuiría el costo de obtención de la misma, esto reduce de forma directa costos para la manufactura del cemento.

La obtención de la Zeolita en si posee un costo mucho menor de extracción que otras puzolanas usadas en la elaboración del cemento Tipo IP (Puzolanico), lo que es otro factor de reducción de costos para la elaboración del cemento. Comparar estos resultados con el cemento Portland puzolanico nos permitirá establecer conclusiones valederas acerca del comportamiento de la resistencia a la compresión uniaxial con esta puzolana conocida como Zeolita.

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del problema

El cemento que usamos en la actualidad, ha pasado por un sin numero de modificaciones en sus propiedades, tanto físicas como químicas. Esto ha ocurrido debido a la gran diversidad de aplicaciones que posee el cemento [1].

Aplicaciones como la elaboración de canales, bloques, diques de agua, estructuras en medio marino y muchas otras cosas en ingeniería civil. Todo esto ha llevado a múltiples investigaciones para que el cemento tenga un uso conveniente y práctico según la aplicación que se le quiera dar.

Por la diversidad de ambientes que presentan los diferentes países, se debe obtener cemento que resista sus condiciones climáticas, tales como el congelamiento o la salinidad del ambiente marino, esto sin perder sus otras propiedades necesarias para el tipo de construcción que se desee.

Actualmente, el cemento Pórtland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo. Como se cita en muchos artículos el cemento es el alma del hormigón, es tal la importancia que prácticamente este producto va mejorando en toda su producción por el bien de las obras en construcción civil.

El cemento Portland que se usa actualmente, adquiere sus propiedades mecánicas de los diferentes porcentajes de material puzolánico que se usan en su elaboración. La dificultad de obtener estos materiales puzolánicos, ocasiona un incremento en el costo de elaboración del cemento.

Materiales puzolánicos, como la Zeolita, son usados en la elaboración del cemento, pero existen muchos tipos de Zeolitas y varían en sus propiedades dependiendo del lugar de donde fueron extraídos.

Esta investigación se va a enfocar a un material en particular que pertenece al grupo de las puzolanas, este material es la Zeolita del Tipo Mordenita que gracias a su estructura molecular y propiedades químicas influye de forma directa en la dureza del cemento.

El costo de obtención de la zeolita en comparación a otros materiales puzolanicos es relativamente mas bajo, así que, si la mezcla de Cemento Portland Tipo 1 mas Zeolita alcanza las mismas fuerzas de compresión que el cemento puzolanico, se podría competir a nivel nacional con un producto de menor costo e iguales propiedades. Esta disminución del costo de elaboración reduciría el costo del saco de cemento y favorecería a una mejor competencia del producto.

Mantendremos como variables independientes al Tipo de Curado y al porcentaje de Zeolita en la mezcla. Nuestro valor dependiente será el Modulo de Elasticidad el cual variara para cada punto obtenido experimentalmente. De esta forma podremos cuantificar como varía la Resistencia a la compresión de esta mezcla al añadir un 15% de Zeolita y realizando un curado al aire.

Para realizar una comparación y obtener resultados para un correcto análisis, compañeros se encargaran de realizar este mismo estudio pero con diferentes porcentajes de Zeolita en la mezcla y realizando el mismo tipo de curado. Con estos datos podre concluir con que porcentaje obtengo mayor Resistencia a la compresión en el transcurso de los días de fraguado.

Así se aportara evidencia real y confiable de la Zeolita de esta zona, y se mostrara como afecta a la Resistencia a la compresión uniaxial en la estructura del cemento, a lo largo del periodo de investigación.

Para obtener buenos resultados experimentalmente existirán valores que se mantendrán constantes a lo largo del experimento, como la relación agua/cemento y la granulometría del material usado. Esto lo estableceremos así para reducir en lo más posible el número de variables y los errores de medición.

Si logramos igualar o mejorar las propiedades del Cemento Portland Tipo IV, implicaría que podemos reducir el costo de elaboración de este producto. La inclusión de una puzolana ecuatoriana le da un valor agregado a esta investigación dado que seria un producto nacional.

1.1.1 Justificación

La investigación propuesta se justifica plenamente si se considera que, la adición de zeolita y un curado al ambiente aumentan la dureza estructural del cemento.

Esta investigación es muy conveniente por que utilizamos Zeolita del tipo Mordenita extraída de una zona cercana a Guayaquil, esta

acción posee dos ventajas: primero por que se usarían recursos propios de la provincia y segundo por que se disminuiría el costo de transportar este material desde lugares más lejanos, de obtener los resultados esperados estos dos factores reducirían el costo de elaboración del cemento.

Con los resultados que se obtengan en esta investigación, contribuiremos al conocimiento del comportamiento de un 15% de Zeolita y un curado al aire en la dureza del cemento.

Durante este experimento mantendremos dos valores constantes, la relación agua/cemento y la granulometría del material, esto lo haremos así para reducir en lo mas posible, el numero de variables para las pruebas.

Después de haber terminado esta investigación, se podría constatar si verdaderamente la Zeolita posee una influencia directa en la dureza de la mezcla de cemento.

De acuerdo a los resultados de esta investigación, se podría generar estudios más enfocados a los días donde se obtenga la mayor dureza para este experimento. Este estudio y los de otras

personas, podrían formar un estudio completo y especializado de las propiedades de la Zeolita de esta zona.

Se escogió el uso de puzolanas para las mejoras del cemento por las siguientes razones:

MENOR CALOR DE HIDRATACIÓN

La reacción durante el fraguado es más lenta que para el cemento portland común y permite la disipación de calor en mayor tiempo, efecto muy favorable para el hormigón en masa.

RESISTENCIA MODERADA A LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS

Las sales, como los sulfatos, que se emplean en el tratamiento de aguas potables, o las que vienen disueltas en aguas a tratarse, reaccionan con la cal libre de los hormigones de cemento portland común, produciendo su deterioro. En el hormigón con Cemento Puzolanico, la cal libre esta controlada por la presencia de la puzolana, eliminándose la posibilidad de una reacción perjudicial en él.

IMPIDE LA ACTIVIDAD ALCALI-SILICE

Algunos áridos tienen la posibilidad de reaccionar químicamente con los álcalis del cemento, provocando expansiones peligrosas que pueden dañar seriamente las estructuras. La puzolana neutraliza esa acción, eliminándola o haciéndola inocua.

RESISTENCIA A AGENTES AGRESIVOS

El hormigón fabricado con Cemento Puzolanico, es más compacto e impermeable que el de cemento portland común, por tanto se impide y reduce el efecto dañino de agentes agresivos como: aguas salinas, suelos sulfatados, aguas servidas y desechos industriales.

1.2 Hipótesis

La adición de 15% de Zeolita al cemento Portland Tipo1 y un curado al aire aumenta la Resistencia a la compresión uniaxial.

1.3 Objetivos

- Determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 curado al ambiente cuando se le adiciona 15% de Zeolita Tipo 1.
- Identificar la Resistencia a la compresión del Cemento Tipo I con la adición de un 15% porcentaje de zeolita y un curado al ambiente en la pasta de cemento.
- Implementar la metodología experimental establecida en la Norma ASTM C109 a excepción de la inclusión de agregado fino.
- Implementar un algoritmo en MATLAB que mediante el ingreso del Módulo de Elasticidad y el Esfuerzo de fluencia obtenidos experimentalmente, nos permita aproximar la grafica Esfuerzo vs Deformación teórica, para posteriormente proceder a determinar el error entre esta curva Teórica y la curva obtenida experimentalmente.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente de los diferentes porcentajes de zeolita, haciendo uso del programa MINITAB para determinar cuál es el tratamiento que presenta la mayor resistencia a la compresión.

- Validar mediante pruebas experimentales el modelo matemático y obtener el error existente para establecer si el modelo matemático es una buena aproximación de lo que sucede experimentalmente.

1.4 Metodología

La metodología de la siguiente Tesis esta graficada en la figura 1.1 y se detalla a continuación:

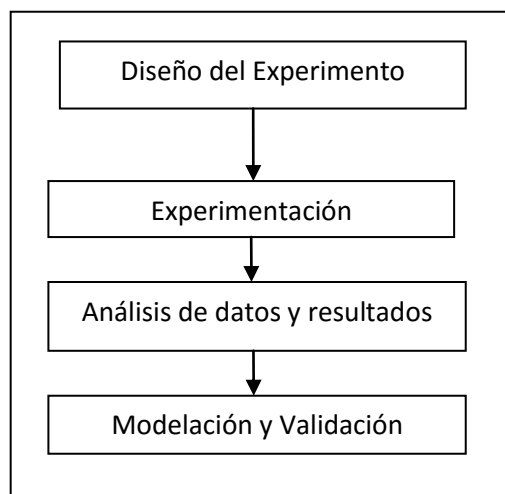


FIGURA 1,1 METODOLOGÍA DE LA TESIS

Se efectuará el Diseño del experimento de la siguiente forma, se mantendrá constante la relación agua/mezcla a lo largo de la investigación, otro valor que mantendremos constante es la granulometría

del material. Se efectuará un curado al aire, el aditivo a utilizar ocupará un 15% de la mezcla. El aditivo es Zeolita del tipo Mordenita extraída del Rio Bachiller cercano a Guayaquil.

Para la experimentación, se utilizará la Norma ASTM C109, la cual explicaré brevemente. Se realizará una mezcla de cemento Portland Tipo I donde la zeolita ocupe un 15% de la mezcla total. Esta mezcla se colocara en moldes cúbicos de 50 mm³, a los cuales se los someterá a un curado al aire siguiendo lo establecidos por las Normas ASTM, estos cubos serán nuestra unidad experimental, efectuado esto, se realizarán ensayos de dureza los días 7, 14, 21 y 28 de la investigación. Cada día de investigación se realizaran ensayos de dureza a 3 bloques y se obtendrá un valor promedio de los tres. Esto indicará la resistencia a la compresión uniaxial de ese día bajo esas condiciones.

Para el análisis de datos y resultados, haremos uso de un Software llamado MINITAB el cual nos permitirá establecer si los valores encontrados guardan una relación confiable entre ellos.

Se realizara con los datos de Resistencia a la compresión de 5, 10, 15, 20 y 25% de Zeolita curados al aire un análisis estadístico para determinar que porcentaje presenta una mayor Resistencia a la compresión.

Para la modelación y validación, realizare pruebas experimentales intermedias entre las ya establecidas para probar el modelo matemático que desarrollare, bajo la suposición que a lo largo del experimento se mantendrán variables constante como la relación agua/cemento, la granulometría del material utilizado, entre otras. Este estudio me permitirá saber si el modelo matemático es una buena representación para las condiciones establecidas. De esta forma validare el modelo.

1.5 Estructura de la Tesis

El Capitulo 1 se llama Generalidades, aquí se van a explicar varios puntos de importancia, el planteamiento del problema que hace referencia al objetivo de este estudio, que en nuestro caso es determinar el porcentaje de variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento tipo 1 curado al ambiente cuando se le adiciona 15% de Zeolita. Esta sección incluirá las justificaciones en donde se explicaran, las causas y razones de este estudio. La hipótesis planteada para esta investigación esta incluida en esta parte. En este capitulo se podrán observar los objetivos a cumplir durante esta investigación, en esta sección también se incluye Metodología la cual voy a seguir

en esta Tesis, para establecer una secuencia lógica e investigativa correctamente estructurada.

El Capítulo 2 se llama Marco Teórico, aquí se van a explicar los diferentes temas concernientes a esta investigación. Esta sección procura ampliar el horizonte técnico para realizar conclusiones con buenas referencias. Cada parte de este Capítulo ayudara a interpretar los resultados de una manera mas clara. Se trataran temas como clasificación y propiedades tanto del Cemento Portland como de la Zeolita, en esta sección haré un resumen de varios artículos leídos, para en base a esos criterios escoger que porcentaje de Zeolita usar para este experimento. También dedicaré una parte para explicar las ventajas y desventajas de realizar un Curado al Ambiente. Incluiré en este Capítulo una explicación clara y detallada de el método de Análisis Estadístico a usar. También incluye el estado del arte del Modelamiento de materiales compuestos, en el cual detallare mediante un Mapa conceptual datos como Normas utilizadas, puzolanas y porcentajes usados, esto me permitirá establecer conclusiones y similitudes que me servirán como una buena referencia para este estudio. También incluye los modelos matemáticos usados y la validación de los mismos en estas investigaciones.

El Capitulo 3 se llama Metodología Análisis Estadístico, en esta sección se explicara el diseño del experimento, en el cual aclarare de forma reducida como realizare este estudio. Dedicaré otra sección para explicar los equipos a utilizar y la preparación de los moldes según lo establecido por la Norma ASTM C 109 en la sección de recolección de datos.. La última parte de este capitulo la dedicaré a explicar los cálculos estadísticos y la forma en que lo llevare.

El capitulo 4 se llama Análisis y Resultados, como su nombre lo indica explicare de forma detallada como la propiedad de dureza de mi mezcla con Zeolita tipo 1 y curado al aire, varia con respecto a los días de fraguado. El capitulo se dividirá en dos partes: En la primera, presentare de una forma clara y ordenada los pasos seguidos para la recolección de datos a lo largo de esta investigación, aquí presentare los cálculos de dureza tanto experimentales como de mí modelo matemático la llamare Modelación del comportamiento. En la segundo parte, se cuantificara la veracidad de mi modelo matemático versus los resultados de dureza obtenidos a lo largo del experimento, de esta forma validare mi modelo matemático, a esta sección la llamare Validación.

El capítulo 5 se llama conclusiones y recomendaciones, aquí con los datos obtenidos a lo largo de los ensayos podré establecer en qué porcentaje de Mezcla de Zeolita obtengo una mayor Resistencia a la compresión uniaxial del cemento y si esa resistencia es mayor al cemento puzolánico. También, estableceré como mi modelo matemático varía con respecto a los datos obtenidos experimentalmente, de esta forma podré deducir si mi modelo matemático es una buena representación de lo que un 15% de Zeolita ocasiona a la resistencia a la compresión uniaxial. Dedicaré otra parte a las recomendaciones que yo considere deberían tomarse en cuenta para este tipo de investigación.

CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO

2.1 Cemento Portland

“El cemento Portland es un Cemento hidráulico producido mediante la pulverización del clinker, esta compuesto principalmente por silicatos de calcio hidráulicos y, varias formas de sulfato de calcio que se adicionan durante el proceso de molienda” [2].

Tipos de Cemento Portland

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

Tipo II.- De moderada resistencia a los sulfatos, es el cemento Portland destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se

requiera moderado calor de hidratación. (Puentes, tuberías de concreto).

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

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

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

El cemento portland por su contenido de puzolana se clasifica en [1]:

- **Portland Puzolanico tipo IP:** Donde la adición de puzolana es del 15 –40 % del total.
- **Portland Puzolánico tipo I (PM):** Donde la adición de puzolana es menos del 15 %.
- **Portland Puzolánico tipo P:** Donde la adición de puzolana es más del 40%.

PROPIEDADES

Varios compuestos son parte de la mezcla del cemento, el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricalcico y el aluminio ferrito tetracálcico los cuales conforman el 90% o mas del peso del cemento[2] .

El gel del hidrato de silicato de calcio es uno de los componentes cementantes más importantes, propiedades ingenieriles como fraguado, endurecimiento y resistencia dependen principalmente de este compuesto [2].

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

La resistencia esta en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas .Entre menos porosa

sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Esto quiere decir que no debe usarse mas agua que la necesaria. La relación mínima Agua/Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25.

El calor que se produce cuando el concreto esta en el proceso de fraguado es conocido como calor de hidratación. El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción [2].

En invierno, el calor de hidratación ayudara a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación. En zonas cálidas, el calor en estructuras masivas, tales como presas, puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de endurecer [2].

La velocidad de reacción entre el cemento y el agua es un valor muy importante, porque la velocidad determinara el tiempo de fraguado y de endurecimiento. Factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

2.2 Zeolita

“Las zeolitas son minerales aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos, que al deshidratarse desarrollan, en el cristal ideal, una estructura porosa con diámetros de poro mínimos de 3 a 10 angstroms. Las zeolitas se encuentran constituidas por aluminio, silicio, hidrógeno, oxígeno, y un número variable de moléculas de agua” [4].

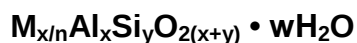
Algunas características de la Zeolita se muestran en la Figura 2.1. [5]

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

FIGURA 2,1 CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZEOLITA.

FUENTE: María T. Olguín G, Zeolitas Características y Propiedades

Como establece J.V. Smith, en su artículo "Definición de una zeolita" publicado en la revista *Zeolites*, se puede precisar lo que se debe entender por zeolita y propuso la siguiente fórmula [6]:



En la fórmula propuesta por Smith, M es un catión de valencia n (que por ejemplo podría ser sodio cuya valencia es 1, así que $M^{x/n}$ sería Na), "x" es el número de átomos de aluminio, "y" es el número de átomos de silicio. Y $2 \cdot (x+y)$ es el número de átomos de oxígeno.

El número de moléculas de agua es variable y es (wH_2O) , si de este análisis obtenemos la fórmula química ya explicada, podemos concluir que se trata de una zeolita.

Ahora que podemos identificar una zeolita por su composición química, se puede explicar de una forma más concisa las características de este material. Como la estructura cristalina de la Zeolita, la cual esta formada por una red de tetraedros arreglados periódicamente, en la que cada oxígeno es compartido por dos átomos de silicio.

Este tipo de arreglo le otorga a la zeolita la propiedad de absorber selectivamente moléculas en base a su tamaño, por esta razón son

consideradas como tamices moleculares. La estructura de un tipo de Zeolita podemos observarla en la Figura 2,3.

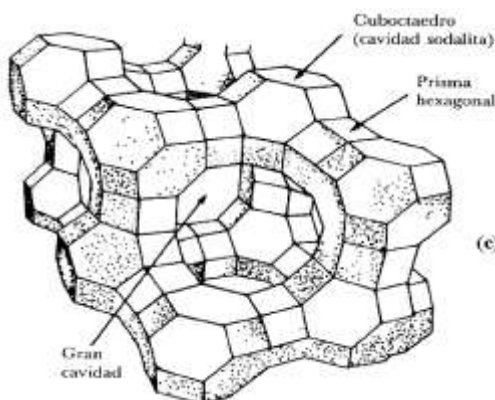


FIGURA 2,2 ESTRUCTURA DE UNA ZEOLITA FAUJASITA.

La estructura cristalina de la Zeolita es apreciada en el microscopio electrónico de barrido (Figura 2,4) con mucha claridad. Las propiedades físicas proveen aspectos únicos para una variedad amplia de aplicaciones prácticas.



FIGURA 2,3 ZEOLITA FAUJASITA. Observada en el microscopio electrónico de barrido. Los cristales son de 50 A° aproximadamente.

Según Breck (1974) las zeolitas son caracterizadas por las siguientes propiedades:

- 1) Alto grado de hidratación.
- 2) Baja densidad y un gran volumen de vacíos cuando es deshidratado.
- 3) La estabilidad de su estructura cristalina cuando se deshidrata.
- 4) Las propiedades de intercambio del catión.
- 5) Presenta canales moleculares uniformes clasificados en los cristales deshidratados.
- 6) Por su habilidad de absorber gases y vapores.
- 7) Por sus propiedades catalíticas.

FORMACION DE ZEOLITAS

Las Zeolitas son obtenidas de la naturaleza de fenómenos volcánicos. A medida que la lava fluida, homogénea y a muy alta temperatura, comienza a enfriar, aparecerán los primeros cristales sin silicatos (o sea, sin átomos de silicio, Si) como los cristales de magnetita (Fe_3O_4). Luego se detectaría la formación de orto silicatos, por ejemplo el olivino (Mg_2SiO_4 con contenido variable de Fe_2SiO_4) y secuencialmente vendrían los metasilicatos y los feldespatos que son los minerales más corrientes en la corteza terrestre [6].

Cuando el enfriamiento fuese tal, que la lava cristalizase suficientemente como para dar un magma basáltico rico en álcalis, sería probable que se formasen zeolitas por medios acuosos salinos y alcalinos, la Figura 2.5, muestra como la naturaleza produce Zeolita [5].

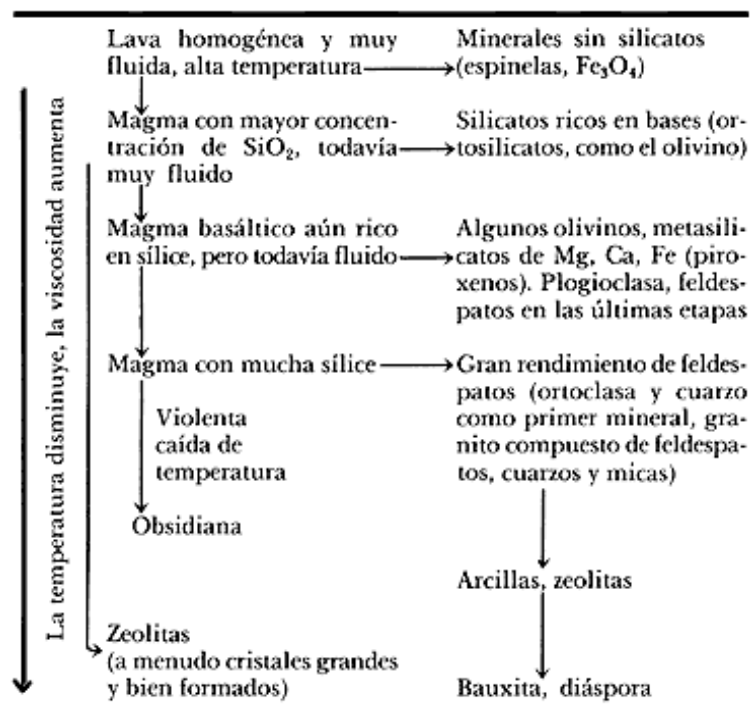


FIGURA 2.4 FORMACION DE ZEOLITAS EN LA NATURALEZA

La Figura 2,6 muestra una lista de algunas especies de zeolitas con su respectiva composición química.

Las zeolitas son caracterizadas por su habilidad para perder y ganar agua reversiblemente y por intercambiar constituyentes que presentan mejores cambios de estructura.

		Volumen de poro *
<i>Grupo de las analcimas</i>		
Analcimas	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Wairakita	$\text{Ca}_8 (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.18
Leucita	$\text{K}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96})$	0
<i>Grupo de las natrolitas</i>		
Natrolita	$\text{Na}_{16} (\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.21
Edingtonita	$\text{Ba}_2 (\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}) 6\text{H}_2\text{O}$	0.35
Thomsonita	$\text{Na}_4\text{Ca}_8 (\text{Al}_{20}\text{Si}_{20}\text{O}_{80}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.32
<i>Grupo de las filipsitas</i>		
Filipsita	$(\text{K},\text{Na})_5 (\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}) 10\text{H}_2\text{O}$	0.30
Garronita	$\text{NaCa}_{2.5} (\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}) 14\text{H}_2\text{O}$	0.41
Gismondina	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.47
<i>Grupo de las heulanditas</i>		
Heulandita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.35
Clinoptilolita	$\text{Na}_6 (\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.34
Estilbita	$\text{Na}_2\text{Ca}_4 (\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}) 32\text{H}_2\text{O}$	0.38
<i>Grupo de las mordenitas</i>		
Mordenita	$\text{Na}_8 (\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) 24\text{H}_2\text{O}$	0.26
Ferrierita	$\text{Na}_{1.5}\text{Mg}_2 (\text{Al}_{5.5}\text{Si}_{30.5}\text{O}_{72}) 18\text{H}_2\text{O}$	0.24
Epistilbita	$\text{Ca}_3 (\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.34
<i>Grupo de las chabasitas</i>		
Chabasita	$\text{Ca}_2 (\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}) 13\text{H}_2\text{O}$	0.48
Erionita	$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Na},\text{K})_{4.5} (\text{Al},\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 27\text{H}_2\text{O}$	0.36
Zeolita L	$\text{K}_6\text{Na}_3 (\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}) 21\text{H}_2\text{O}$	0.28
<i>Grupo de las faujasitas</i>		
Faujasitas (X, Y)	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11} (\text{Al}_{59}\text{Si}_{133}\text{O}_{384}) 26\text{H}_2\text{O}$	0.53
Zeolita A	$\text{Na}_{12} (\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}) 27\text{H}_2\text{O}$	0.47
Zeolita ZK-5	$\text{Na}_{30} (\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}) 98\text{H}_2\text{O}$	0.45
<i>Grupo de las laumontitas</i>		
Laumontita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.35
Yugawaralita	$\text{Ca}_4 (\text{Al}_8\text{Si}_{20}\text{O}_{56}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.30
<i>Grupo de las pentasil</i>		
Zeolita ZSM-5 } Zeolita ZSM-11 }	$\text{Na}_n (\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192}) 16\text{H}_2\text{O}$	0.32

* cm^3 de agua/ cm^3 de cristal.

FIGURA 2,5 CLASIFICACIÓN DE ALGUNAS ZEOLITAS

La zeolita que se usara para los diferentes ensayos será extraída de las cercanías del Campus Gustavo Galindo. De estudios anteriores se pudo establecer que la Zeolita extraída de este sitio es del Tipo Mordenita, y se obtuvo los siguientes porcentajes de oxido, porcentaje de elementos y composición mineralógica de las muestras.

TABLA 1

PORCENTAJES DE ÓXIDOS DE LAS MUESTRAS EN PROMEDIO

Muestra	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)
ZEO 1	73,87	10,86	1,67	2,34	1,08	0,189	0,268	--	0,477	--

TABLA 2

PORCENTAJE DE ELEMENTOS EN LAS MUESTRAS PROMEDIO

Muestra	Si (%)	Al (%)	Fe (%)	Ca (%)	K (%)	Mg (%)	Ti (%)	Mn (%)	Na (%)	P (%)	PPC (%)
ZEO 1	34,47	5,75	1,17	1,67	0,899	0,114	0,161	--	0,354	--	9,24

TABLA 3

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS MUESTRAS

Muestras	Fases mayoritarias	Porcentaj e de presencia	Fases minoritarias	Porcentaj e de presencia	Trazas
ZEO 1	Cuarzo Mordenita	50 – 55 % 45 – 50 %	Feldespatos	< 5 %	Heulandita

COSTOS

Los costos de los productos de la zeolita dependen en su mayor parte del tipo y grado de procesamiento que deben de hacerse para satisfacer las especificaciones del mercado [4].

Los costos del minado son equivalentemente bajos, generalmente de 3 a \$6/ton, a menos que el minado sea muy selectivo. Muchas zeolitas son vendidas a bajo valor industrial o al mercado de la agricultura, comúnmente se vende de 30 a \$70/ton de producto granular bajo 40 mallas, y de 50 a \$120/ton de material molido en un rango de a –40 a – 325 mallas.

PORCENTAJES A USAR EN LA INVESTIGACION

Después de haber leído algunos artículos citados en la bibliografía, he considerado dos investigaciones que me parecen son las que aportan datos aplicables y de mucha importancia para este estudio. De esta forma se puede tener una idea clara de cómo la cantidad de puzolanas en el cemento altera la resistencia a la compresión uniaxial. Sin embargo no solo se debe considerar ese factor, ya que la inclusión de puzolanas puede afectar a otras propiedades importantes que debe tener el

cemento, como lo son el tiempo de fraguado, el calor de hidratación o la velocidad de reacción por citar algunas propiedades. De estos estudios pude establecer que 25% de puzolana es el tope máximo en un proceso de mezclado y eso depende mucho del tipo de puzolana. Para nuestro estudio se usará Zeolita del tipo Mordenita, la zeolita como lo mencione anteriormente es una combinación de algunos compuestos, donde el sílice (SiO_2) ocupa aproximadamente el 74% de este compuesto, este compuesto al ser mezclado con el cemento posee la característica de endurecer el cemento. De los artículos leídos, presentare algunos resultados que podrían considerarse como referencia para este estudio. Por ejemplo en la investigación expuesta por J. Zelic [11], uso sílice como aditivo y lo vario hasta un 15%. De este análisis usando Normas Europeas, obtuvo 53.95 MPa como Dureza Máxima usando un 5% de sílice y con un 15% de Sílice alcanzo 49.10MPa todo esto a los 28 días del ensayo. Otra investigación que aporta datos importantes es la realizada por Nassif,H [12] uso ceniza volátil, sílice y escoria de alto horno mezclados en diferentes porcentajes hasta un 20% de la mezcla y con tres tipos diferentes de curado. De este análisis usando Normas ASTM, obtuvo 53.4 MPa como Dureza Máxima usando un 10% de sílice y con un 15% de Sílice alcanzo 50.1 MPa todo esto a los 28 días del

ensayo. Hago énfasis en estos resultados por que son los que me permitirán establecer el porcentaje en el que más o menos espero obtener los resultados deseados. Los mayores resultados de dureza se los encontré con un 5 y 10% de sílice respectivamente a los 28 días de ensayo. Lo que me indica que estos porcentajes son una buena referencia para realizar mi investigación. Es bueno recalcar que aquellos que realizaron estas investigaciones por sus referencias, establecieron desde un principio que estos porcentajes presentarían buenos resultados. También es bueno considerar que el tipo de curado afecta a la dureza del material, y que los curados realizados en estos ensayos fueron un curado húmedo y húmedo con yute respectivamente. En base a lo expuesto, decidí que un 15% de Zeolita del tipo Mordenita y un curado al ambiente puede dar información importante que aporte a este sin número de investigaciones relacionadas a las mejoras de las propiedades del cemento.

2.3 Influencia del Curado en la Resistencia a la Compresión

El curado del concreto es la parte del procedimiento constructivo que busca mantener el material en condiciones húmedas para promover que las reacciones químicas cemento-agua continúen para asegurar una

adecuada hidratación del cemento y un apropiado endurecimiento del concreto [1].

El saber escoger el curado adecuado previene el deterioro temprano y es vital para producir un concreto sano estructuralmente. El correcto tiempo de curado del concreto permite ejecutar acciones específicas para mantener condiciones favorables de humedad y temperatura.

El control de la temperatura es necesario a medida que la velocidad de hidratación del cemento se hace más lenta en temperaturas que se acercan al punto de congelación y tiende a aumentar conforme la temperatura se acerca al punto de ebullición del agua.

Para lograr la resistencia de diseño, el concreto debe manejarse para evitar una hidratación lenta o acelerada. Un curado adecuado logra este fin y mejora al concreto en múltiples formas. Durante el proceso de hidratación, la pasta de cemento se endurece, haciéndose mas fuerte y densa. La ganancia en densidad resulta en una superficie más dura, menos porosa, más impermeable al agua y sales, y consecuentemente más resistente a los ciclos de hielo/deshielo.

La ganancia en resistencia produce un aumento en las resistencias a la fisuración y el agrietamiento, tanto en el periodo de curado como después de este. Con una hidratación adecuada se mejoran la resistencia superficial, la durabilidad y la resistencia al desgaste.

El curado del concreto es imperativo por las siguientes razones [16 y 17]:

- 1) Una ganancia de resistencia predecible. Los ensayos de laboratorio muestran que el concreto en un ambiente seco puede perder tanto como un 50% de su resistencia potencial, comparado con un concreto similar que es curado en condiciones húmedas.
- 2) Durabilidad mejorada. El concreto bien curado tiene mejor dureza superficial y resistirá mejor la abrasión. El curado también hace al concreto mas impermeable al agua , lo que evita que la humedad y las sustancias químicas disueltas en agua entren dentro del concreto , en consecuencia incrementa la durabilidad y la vida de servicio.
- 3) Mejores condiciones de servicio y apariencia. Una losa de concreto a la que se le ha permitido que se seque demasiado temprano, tendrá una superficie frágil con pobre resistencia al desgaste y la abrasión. El curado apropiado reduce el resquebrajamiento o cuarteo, la pulverización y el descascaramiento.

4) Minimizar la fisuración, agrietamiento y pandeo.

2.4 Método Factorial

El método factorial nos permite estudiar el efecto que sobre una variable dependiente ejercen más de una variable independiente. Una forma de abordar este problema es por medio del diseño factorial [3].

En los diseños factoriales, cada factor (variable independiente) puede tomar dos o más valores y cada tratamiento o condición experimental consiste en la combinación de los valores seleccionados de las variables independientes. Cuando todas las combinaciones son utilizadas tenemos un diseño factorial completo.

TIPOS DE DISEÑOS FACTORIALES

McGuigan (1971) clasifica los diseños factoriales en función del número de variables independientes que participan en él, así:

Diseños factoriales con dos variables independientes

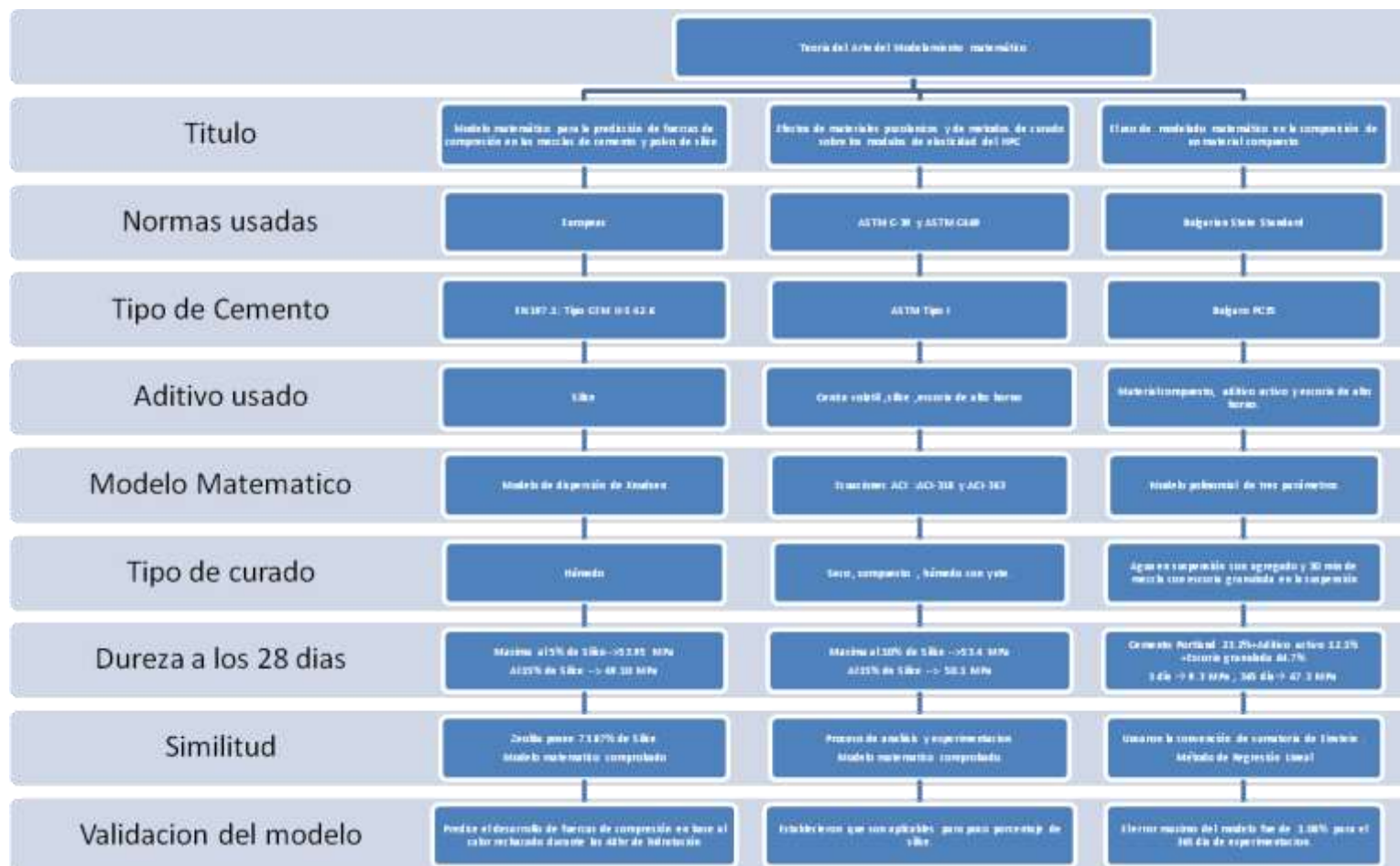
Tenemos los diseños 2×2 , cuando cada factor tiene dos niveles o valores; 2×3 cuando uno tiene dos valores y el otro tres; 3×3 cuando ambas toman tres valores; y, en general, diseños $K \times L$ donde K es el número de valores

que toma la primera variable independiente y L el número de valores que toma la segunda. En todos ellos habrá tantas condiciones experimentales como el producto de ambos números.

Las hipótesis que podemos probar en este tipo de diseño son el efecto principal del factor A, el efecto del factor principal B, y la interacción entre ambos $A \times B$.

1.5 Estado del arte del Modelamiento de Materiales compuestos

El siguiente mapa conceptual muestra puntos que considero importantes de tres diferentes investigaciones que seleccione por su similitud y aporte que pueden brindar al estudio que realicé [11,12y13].



CAPITULO 3

3. METODOLOGIA

3.1 Diseño del experimento

La Zeolita que recolectaremos de los alrededores de la ESPOL Campus Prosperina por previas investigaciones, es una Zeolita del Tipo Mordenita [10]. La recolección de este alumini-silicato será obtenida de tal forma que sea una muestra representativa del terreno del cual será extraído. Esta muestra será la Zeolita que usaremos en nuestros ensayos.

Después procedemos a mezclar el cemento portland (al granel) con un 15% de esta zeolita, este proceso y los subsecuentes como el tipo de curado, equipos a utilizar y la preparación para los ensayos los realizaré según la Norma ASTM C 109 los cuales explicaré mas adelante.

Usare moldes cúbicos de 125 cm^3 de volumen, los días 7, 14, 21 y 28 de ensayo se realizaran 3 ensayos de compresión por día. El valor medio de estos tres ensayos es el valor que consideraremos para nuestras pruebas y es el que utilizaremos para los análisis. De esta forma podre cuantificar

como afecta a la fuerza a la compresión uniaxial la adición de 15% de Zeolita.

Por medio de una prensa se procederá a realizar los respectivos ensayos de compresión a dichas muestras y estos datos serán recolectados para su posterior análisis.

Una vez recolectado los valores de dureza de los días de ensayo, procedemos a verificar por medio del programa MINITAB, si los datos obtenidos poseen un nivel de confianza que me permita validar lo realizado experimentalmente.

Después de obtener los datos, estableceré un modelo matemático, el cual será una representación de cómo la fuerza de compresión varia según los parámetros establecidos a lo largo de los días de experimentación, para esto hare uso de lo enseñado en mecánica del continuo, elementos finitos e inelásticidad. Este modelo matemático será validado en función de los datos recogidos experimentalmente los días 4, 11,18 y 25 con un 17.5% de Zeolita. Para comprobar que el modelo matemático es una buena representación de los datos experimentales, calcularé el error entre el valor observado y el valor calculado, de esta forma se podrá validar el modelo.

Mis datos obtenidos experimentalmente, serán anexados a los datos de compañeros, que usaron Zeolita del tipo Mordenita como aditivo pero en diferente porcentaje. De esta forma realizare un modelo Factorial en el cual, se observarán las diferentes interacciones entre la cantidad de puzolana y la resistencia a la compresión a lo largo de los días de experimentación.

En base, a estos resultados de fuerza de compresión, estableceré mis conclusiones tanto para mi porcentaje de aditivo como para los datos de mis otros compañeros.

3.2 Equipos y preparación de los moldes

Los pesos y dispositivos de medición serán basados en especificaciones según la norma C1005. La balanza será evaluada para la precisión e inclinación en una carga total de 2000g [10].

Se requerirá de probetas grandes para medir la mezcla de agua en una sola operación para trabajar con el volumen indicado a una temperatura promedio de 20 °C. La variación permisible de estas probetas es de ± 2 mL. La probeta debe tener subdivisiones de al menos 5 mL, a excepción de que la probeta sea de 250mL donde debería realizarse medidas de 10 mL o en el caso de probetas de 500 mL donde se puede realizar

medidas de 25 mL. Las líneas de graduación deben proveer una medida lo más cercana a lo que se requiere. Las líneas principales de graduación deben ser círculos y deben estar numerados. El resto de las líneas deberán al menos tener una extensión de $1/7$ de la circunferencia de la probeta y las intermedias deberán tener una extensión de al menos $1/5$ de la circunferencia de la probeta.

Los moldes serán muestras cubicas de 2 in o 50 mm se mantendrán iguales. Los moldes no deben tener más de tres compartimientos para los cubos y no deben ser separables en más de dos partes. Las partes de los moldes cuando se ensamblen deben mantenerse lo mas junto posible. Los moldes se harán de metal duro no atacado por el mortero de cemento. Para los nuevos moldes el número de dureza Rockwell del metal no será menos de 55 HRB. Los lados de los moldes estarán lo suficientemente rígidos para prevenir expansiones o deformaciones. Las caras interiores de los moldes deben ser planas y conforme a las tolerancias de la Figura 3.1 [10].

Permissible Variations of Specimen Molds				
Parameter	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
	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. $\pm$ 0.005	2 in. $\pm$ 0.02	[50 mm $\pm$ 0.13 mm]	[50 mm $\pm$ 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 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 0.5°	90 $\pm$ 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 VARIACIONES PERMISIBLES DE LOS MOLDES

El equipo mezclador y la tabla de flujo según las especificaciones ASTM C305 y C230 respectivamente.

Se requerirá de una paleta hecha de hoja de acero de 4-6 in (100-150 mm) en longitud, con bordes rectos.

Para el proceso de curado de acuerdo con las especificaciones de la ASTM C511. La temperatura del aire en la vecindad de la losa de mezclado, los materiales secos, moldes, soportes, y el tazón de mezcla deberán ser mantenidos a 23 $\pm$ 3 C. La temperatura del agua de mezcla, cuarto húmedo y del agua en el tanque de depósito deberá estar a 23 $\pm$ 2C.

Máquina para el ensayo, hidráulica o de tornillo. Con suficiente espacio entre aberturas para colocar equipos de medición. La carga aplicada al

espécimen de la prueba debe indicarse con una exactitud del 61.0%. Si la carga aplicada por la máquina de compresión es registrada en un disco de marcar, el disco de marcar debe ser provisto con una escala graduada que pueda leerse por lo menos a un 0.1% de la escala a full carga. Si la maquina de prueba marca de forma digital, los datos entregados deben ser lo suficientemente grandes para que no exista confusión y debe verificarse que el incremento numérico sea menor de 0.1%.

La maquina para el ensayo de dureza será una máquina de ensayos universales marca SHIMADZU modelo UH-FI de 2000 KN.

Para la preparación de los moldes debe haber dos o tres especímenes para cada ensayo a cada edad de ensayo. Debe procurarse que todas las paredes estén libres de grasas y agentes de limpieza, debe retirarse con tela los excesos de agentes químicos sobre las caras de los moldes. Las superficies de unión de los moldes debe ser sellada con alguna sustancia como petrolatum, la suficientemente cantidad para que cuando se unan puedan empujarse y limpiarse con una franela los excesos.

3.3 Procedimiento para las pruebas

La proporción de materiales para el mortero normal será 1 parte de cemento a 2.75 partes de arena según lo establece la norma. Habrá una

relación de agua-cemento de 0.485 para la mezcla y 0.460 para la relación de aire que ingresa [10].

Las cantidades de materiales a ser mezclado una vez en el lote de mortero para hacer seis o nueve especímenes de prueba se muestran en la figura 3.2 [10]:

	Number of Specimens	
	6	9
Cement, g	500	740
Sand, g	1375	2035
Water, mL		
Portland (0.485)	242	359
Air-entraining portland (0.460)	230	340
Other (to flow of 110 ± 5)	---	---

FIGURA 3.2 CANTIDADES PARA LOS ESPECIMENES

Para la preparación de los morteros y la determinación del flujo usar las normas C 305 y C 1437 respectivamente. El moldeo de los especímenes debe llevarse a cabo de tal forma que el cubo posea los mismos ángulos y sus caras sean igual de planas y paralelas.

Después del proceso de amoldar, los especímenes deben ser llevados al cuarto húmedo por un periodo de 24 horas y luego ser retirados y colocados en un curado con agua y cal por otras 24 horas. Luego deberán guardarse de forma correcta hasta que se realicen los ensayos respectivos.

Después de este proceso las pruebas a realizarse tienen un tiempo de tolerancia permisible que debe respetarse y se detalla en la figura 3.3:

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	$\pm \frac{1}{2}$ h
3 days	± 1 h
7 days	± 3 h
28 days	± 12 h

FIGURA 3.3 TOLERANCIA PERMISIBLE EN LOS ENSAYOS

Para las pruebas debe tratarse con mucho cuidado lo especímenes de modo que no sufran maltratos que cambien su forma y debe ser colocado de forma cuidadosa y centrada correctamente en la maquina de ensayos.

La carga a aplicarse debe mantener una distancia relativa al movimiento entre las platinas superiores y las mas bajas, la carga debe estar en el rango de 200 a 400 Lbs/s o [900 a 1800 N/s].

Para los cálculos debemos obtener la carga máxima indicada por la maquina con la siguiente ecuación:

$$f_m = P/A$$

Donde:

f_m = Fuerza de compresión en Psi o MPa.

P = Máxima carga total en Lbf o N.

A = Área de la superficie de la cara in^2 o mm^2 .

Después de las pruebas debe informarse el flujo lo mas cerca 1% y el agua usada lo mas cercano a un 0.1%. La media de las fuerzas de compresión debe reportarse en un orden de 10 Psi ó 0.1 MPa.

Para especímenes defectuosos no debe considerarse los datos de los ensayos si representan un 8.7% de defecto entre los tres especímenes a la prueba. Y de un 7.6% de defecto promedio si se realizan dos especímenes. La precisión y el sesgo permitido son parámetros que han sido elaborados por el Laboratorio de Referencias para muestras de cemento y concreto, son mostrados en la figura 3.4:

TABLE 2 Precision

	Test Age, Days	Coefficient of Variation 1s % [^]	Acceptable Range of Test Results d2s % [^]
Portland Cements			
Constant water-cement ratio:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	<u>7</u>	<u>3.6</u>	<u>10.2</u>
	Av	3.8	10.7
Multi-lab	3	6.8	19.2
	<u>7</u>	<u>6.4</u>	<u>18.1</u>
	Av	6.6	18.7
Blended Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	<u>7</u>	<u>3.8</u>	<u>10.7</u>
	<u>28</u>	<u>3.4</u>	<u>9.6</u>
Multi-lab	3	7.8	22.1
	<u>7</u>	<u>7.6</u>	<u>21.5</u>
	<u>28</u>	<u>7.4</u>	<u>20.9</u>
Av		3.8	10.7
		7.6	21.5
		7.6	21.5
Masonry Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	7	7.9	22.3
	<u>28</u>	<u>7.5</u>	<u>21.2</u>
	Av	7.7	21.8
Multi-lab	7	11.8	33.4
	<u>28</u>	<u>12.0</u>	<u>33.9</u>
	Av	11.9	33.7

[^] These numbers represent, respectively, the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C 670.

FIGURA 3.4 PRECISION Y SESGO PERMITIDO

3.4 Cálculos estadísticos

Los cálculos que serán usados en el experimento tienen su base en la Regresión lineal, por lo cual se explicará a continuación los fundamentos de esta herramienta estadística [14]:

Se dispone de una muestra de observaciones formadas por pares de variables:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$$

A través de esta muestra, se desea estudiar la relación existente entre las dos variables X e Y . Es posible representar estas observaciones mediante un gráfico de dispersión, como el siguiente:

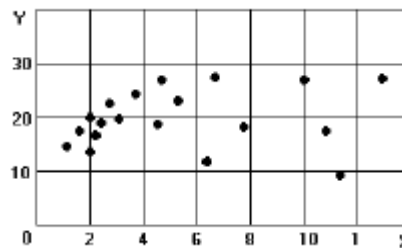


FIGURA3.5 GRAFICO DE DISPERSION

También se puede expresar el grado de asociación mediante algunos indicadores, que se verán a continuación.

MEDIDAS DE ASOCIACION DE VARIABLES

Covarianza entre las variables X e Y . Es una medida de la variación conjunta. Se define como;

$$\text{cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n} S_{xy}$$

Puede tomar valores positivos o negativos. Positivo, significa que ambas variables tienden a variar de la misma forma, hay una asociación positiva. Negativo, significa que si una aumenta, la otra tiende a disminuir, y vice versa. Covarianza cercana a cero indica que no hay asociación entre las variables.

Coeficiente de correlación lineal.

La covarianza tiene el inconveniente de que su valor no es acotado, por lo que, a partir de él es difícil juzgar si es grande o pequeña.

Se define la correlación, que es una medida de asociación lineal independiente de las unidades de medida. Es igual a la covarianza dividida por las desviaciones estándar:

$$\text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{dsX * dsY} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}}$$

El valor de la correlación entre cualquier par de variables es un número entre -1 y 1. n valor alto de correlación no indica que existe alguna relación de causa-efecto entre las variables .La interpretación del coeficiente de correlación puede ilustrarse mediante los siguientes gráficos.

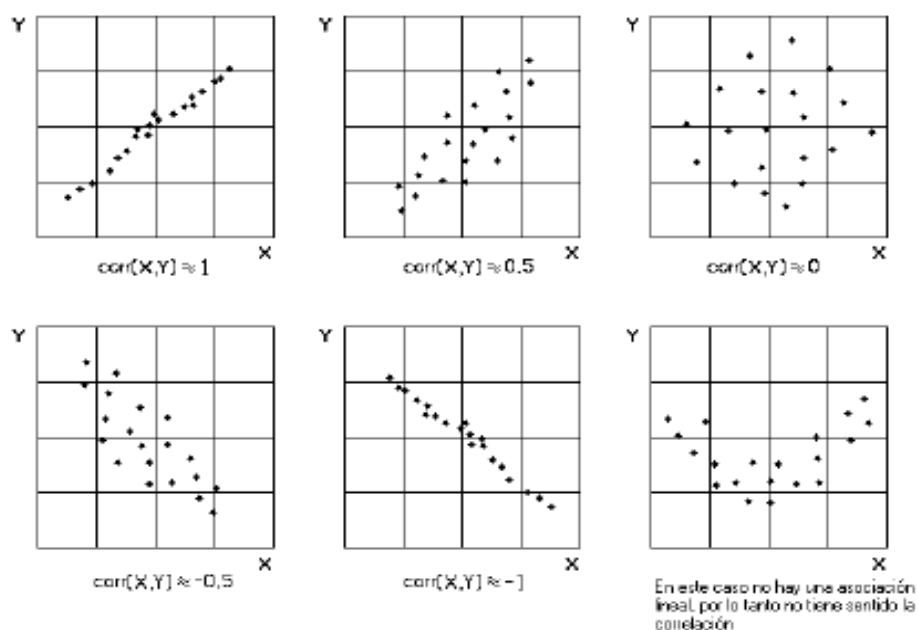


FIGURA3.6 INTERPRETACION DEL COEFICIENTE DE
CORRELACION LINEAL

REGRESION LINEAL SIMPLE

Ahora asumiremos que si hay una relación de causalidad de la variable X (causa) hacia la variable Y (efecto). Además, se sabe que esa relación es de tipo lineal, dentro del rango de los datos.

Estableceremos un modelo para explicar la causa (Y) en términos del efecto (X), del tipo siguiente:

$$Y_i = a + bX_i + e_i, \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

Donde a y b son dos cantidades fijas (*parámetros* del modelo) y los e_i son cantidades aleatorias que representan las diferencias entre lo que postula el modelo $a+bx$, y lo que realmente se observa.

Por esa razón a los e los llamaremos "errores" o "errores aleatorios". Se asume que tienen valor esperado 0 y desviación estándar común σ .

Para estimar a y b se utiliza el método de *Mínimos cuadrados*, que consiste en encontrar aquellos valores de a y de b que hagan mínima la suma de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones respecto de la recta que representa el modelo, en el sentido vertical.

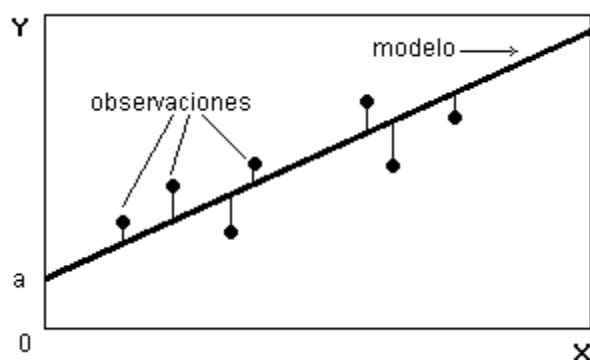


FIGURA 3.7 GRAFICA DE METODO DE LOS MINIMOS
CUADRADOS

En la figura 3.7, son los cuadrados de los segmentos verticales cuya suma de cuadrados se debe minimizar, para determinar a y b . Estos segmentos representan los errores e del modelo. b se llama *pendiente* de la recta que representa los datos y a se llama *intercepto* sobre el eje vertical.

La solución está dada por las siguientes fórmulas:

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x}$$

Valores ajustados al modelo.

El modelo de regresión lineal se puede utilizar para obtener valores de Y ajustados al modelo, Los valores puntuales se obtienen mediante la fórmula:

$$Y_i = a + bX_i$$

Donde a y b son los valores estimados por el procedimiento indicado anteriormente, y X_i toma los valores de la muestra. Los puntos que representan estos valores en el gráfico de dispersión, yacen sobre la recta.

Coeficiente de determinación

Es una medida de bondad de ajuste de los modelos de regresión lineal a los datos.

Es deseable que los valores de Y ajustados al modelo, sean lo más parecidos posible a los valores observados. Una medida de lo parecido que son es el coeficiente de correlación.

Se define el *coeficiente de determinación*, R^2 , como el cuadrado del coeficiente de correlación entre los valores de Y observados y los valores de Y ajustados. Sin embargo se puede demostrar que es igual a la siguiente expresión:

$$R^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_x S_y} = \frac{[\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{[\sum (x_i - \bar{x})^2][\sum (y_i - \bar{y})^2]}$$

El rango de R^2 es entre 0, cero ajuste, hasta 1, ajuste perfecto (cuando los puntos aparecen en una línea recta) [9].

REGRESION LINEAL MULTIPLE

Dispone de una ecuación con dos variables independientes adicionales:

$$Y' = a' + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

Se puede ampliar para cualquier número "m" de variables independientes:

$$Y' = a' + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \dots + b_m x_m$$

Para poder resolver y obtener a, b_1 y b_2 en una ecuación de regresión múltiple el cálculo se presenta muy tediosa porque se tiene atender 3 ecuaciones que se generan por el método de mínimo de cuadrados:

$$\sum y = na + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2$$

$$\sum x_1 y = a \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2$$

$$\sum x_2 y = a \sum x_2 + b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2$$

Para poder resolver se puede utilizar programas informáticos como AD+, SPSS, Minitab y Excel.

El error estándar de la regresión múltiple (S_{xy})

Es una medida de dispersión la estimación se hace más precisa conforme el grado de dispersión alrededor del plano de regresión se hace mas pequeño. Para medirla se utiliza la formula:

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{n - m - 1}}$$

Y : Valores observados en la muestra

$\hat{Y}$: Valores estimados a partir a partir de la ecuación de regresión

n : Número de datos

m : Número de variables independientes

El coeficiente de determinación múltiple (r^2)

Mide la tasa porcentual de los cambios de Y que pueden ser

explicados por x_1 , x_2 y x_3 simultáneamente [14].

$$r^2 = \frac{SC_{regresión}}{SC_{Total}}$$

CAPITULO 4

4. ANALISIS Y RESULTADOS

4.1 Modelación del comportamiento

Proceso de Molienda

Para los ensayos de compresión se utilizó Zeolita del tipo Mordenita con un tamaño de grano de 45 micras, con el fin de garantizar que la Zeolita y el cemento posean la misma granulometría, en este proceso se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Con un mazo se procedió a la fragmentación de 6.8 Kg de Zeolita, la cual fue extraída del Rio Bachiller en las cercanías de Guayaquil.
- 2) Estos fragmentos fueron colocados en el Triturador de Mandíbulas, de esta forma se consiguió reducir aún más su tamaño de grano, este proceso duro aproximadamente 15 minutos.
- 3) Con el fin de seguir disminuyendo el tamaño de grano, se ingresó el material en el Triturador de Rodillos por un período de 20 minutos, en este tiempo se ingresó el material dos veces en esta máquina.

- 4) Después de pasar por el Triturador de Rodillos, tomamos 100 gr de este material y procedimos a tamizarlo.
- 5) Este proceso se realizó en un tamizador, en el cual se utilizaron los tamices número 14, 18, 40 y 50 por un período de 15 minutos. La cantidad de material recogido en los tamices se aprecia en la Tabla 4:

TABLA 4

PRIMER TAMIZADO

MASA TAMIZADA	100 gr
TIEMPO	15 min
#TAMIZ	MATERIAL EN TAMIZ (gr)
14	40
18	10
40	20
50	9
FONDO	20

- 6) Después del primer Tamizado, se introdujo el material en el molino de Disco por un período de 20 minutos.
- 7) Luego se tomó 100 gr del proceso anterior, y se realizó un segundo tamizado con tamices de número 50 ,100 ,200 y 325 por un período de 15 minutos. La cantidad de material recogido en los tamices se aprecia en la Tabla 5.

TABLA 5

SEGUNDO TAMIZADO

MASA TAMIZADA	100 gr
TIEMPO	15 min
#TAMIZ	MATERIAL EN TAMIZ(gr)
50	60
100	12
200	10
325	8
FONDO	10

- 8) El último proceso para reducir el tamaño de grano a 45 micras, fue el Molino de Bolas, el cual consta de un tambor donde se colocó bolas de acero de diferente tamaño. Este proceso duro 210 minutos.
- 9) Culminado el proceso anterior se tomaron 100 gr del material resultante y se colocaron en el tamizador. Se hizo uso del tamiz número 325 y se obtuvieron los resultados de la Tabla 6, en la Figura 4.1 se puede apreciar el proceso de molienda resumido.

TABLA 6

TERCER TAMIZADO

MASA TAMIZADA	100 gr
TIEMPO	15 min
#TAMIZ	MATERIAL EN TAMIZ(gr)
325	33
FONDO	67

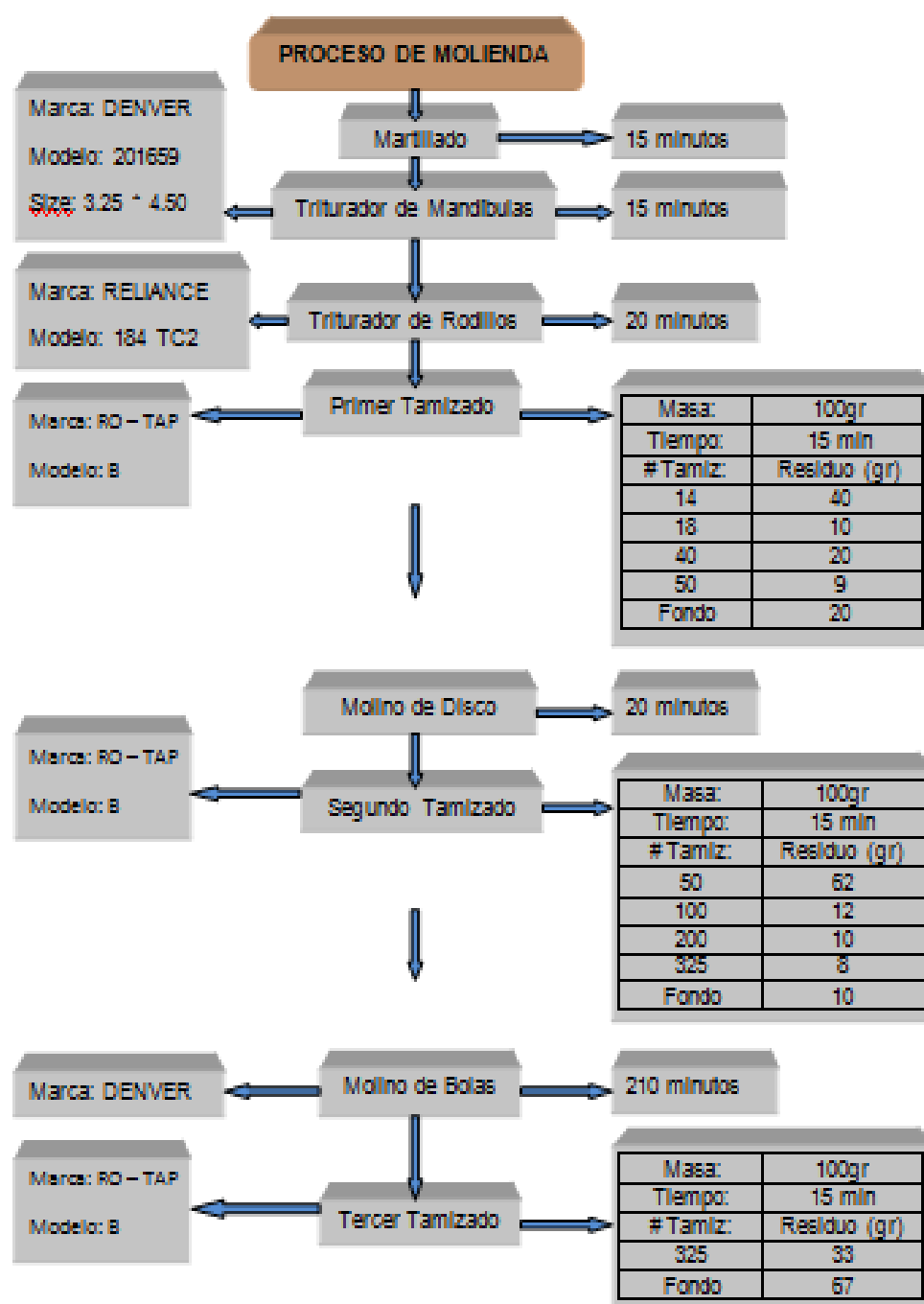


FIGURA 4.1 RESUMEN PROCESO MOLIENDA.

ELABORACION DE LAS MUESTRAS

Para la elaboración de las 12 muestras de forma cúbica, se requirió un total de 3000 gr de mezcla total, de esta mezcla entre cemento y zeolita, la zeolita ocupó el 15% total de la mezcla.

Para determinar la masa de puzolana se multiplicó 0.15×3000 , obteniendo así los 450 gr de Zeolita requeridos.

La masa de cemento se obtuvo de la diferencia entre 3000gr de mezcla y los 450 gr de Zeolita, obteniéndose así 2550 gr de cemento.

La relación agua/mezcla se mantuvo constante a lo largo del experimento a un valor de 0.3, para determinar la cantidad de agua se multiplicó 0.3×3000 gr de mezcla y se obtuvo 900 gr de Agua.

Para el 17.5% de Zeolita realizo los mismos cálculos que para 15%. Los datos los presento en la Tabla 7:

TABLA 7
COMPOSICION DE MEZCLAS

Porcentaje=	15 %
Numero de cubos=	12
Masa de cada cubo=	250 Gr
Agua/mezcla=	0,3
Peso de la mezcla=	3000 Gr
Gramos de Zeolita=	450 Gr
Gramos de Cemento=	2550 Gr
Gramos de Agua=	900 Gr

Porcentaje=	17,5 %
Numero de cubos=	12
Masa de cada cubo=	250 gr
Agua/mezcla=	0,3
Peso de la mezcla=	3000 gr
Gramos de Zeolita=	525 gr
Gramos de Cemento=	2475 gr
Gramos de Agua=	900 gr

Ya con el material pesado se procedió al mezclado en la batidora para cemento, primero se colocó los 3000 gramos de mezcla en seco y se los mezcló durante 5 minutos para que la mezcla sea homogénea. Luego se agregó los 900 gr agua y se procedió al mezclado por un período de dos minutos a dos diferentes velocidades.

Previamente se aseguró que los moldes a utilizar se encontraran bien ajustados para que no exista fuga de cemento por ninguna abertura, estos moldes fueron aceitados con una brocha para que el proceso de desmolde se realice de una manera fácil, se procuró quitar el exceso de aceite de los moldes.

Con los moldes armados, ajustados y aceitados, se procedió a colocar el cemento hasta la mitad de los moldes, luego con una barrita plástica se procuró por medio de ligeros golpes a la mezcla de cemento para que se

asiente correctamente y no queden burbujas, este proceso es conocido como apisonamiento. Luego se completó la otra mitad hasta el borde y se volvió a apisonar. A continuación se agitó el molde para eliminar las burbujas de aire que se formen. Después se retiró el exceso de cemento y se colocaron los moldes en un lugar seco y protegidos por un plástico para evitar la humedad.

Pasadas 24 horas se procedió a desmoldar las muestras y se las colocó en un lugar seco hasta su posterior ensayo.

MAQUINAS DE ENSAYO

Para los ensayos de compresión se hizo uso de las máquinas que se muestran en la Figura 4.2:

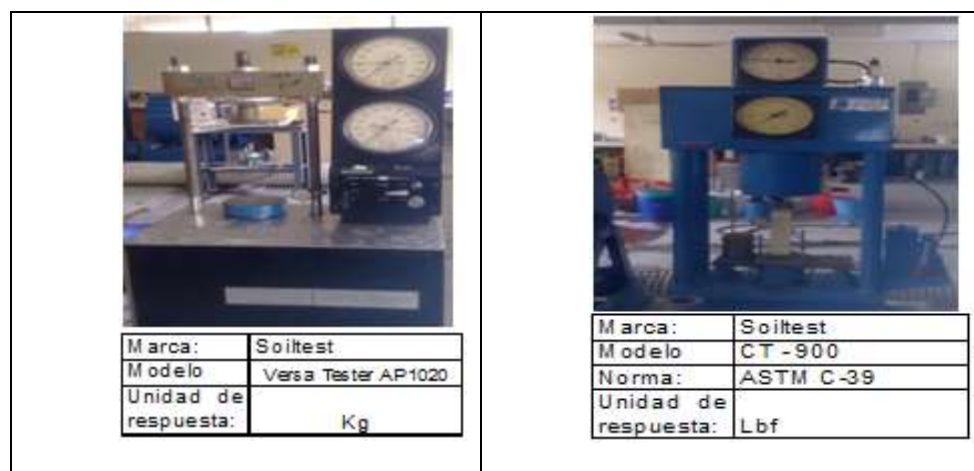


FIGURA 4.2 PRENSAS DE ENSAYOS

RECOLECCION DE DATOS

Para la elaboración de este informe se requirió 24 muestras cúbicas, 12 de ellas corresponden a la mezcla de cemento con un 15% de Zeolita, y las otras 12 para la validación del modelo matemático corresponden a la mezcla de cemento con un 17.5% de Zeolita.

Con las 12 muestras con 15% de Zeolita, se realizaron ensayos de compresión a los 7, 14, 21 y 28 días después de su elaboración. Por cada uno de estos días se le realizaron a tres muestras cúbicas el ensayo de compresión correspondiente. Similar procedimiento se llevo a cabo para la mezcla de cemento con un 17,5 % de Zeolita a los 4, 11,18 y 25 días después de su elaboración.

Para los ensayos de compresión se hizo uso de dos prensas hidráulicas. Para los dos primeros días de experimentación se utilizo el modelo VERSA TESTER AP1020 cuya unidad de respuesta es en Kilogramo fuerza, este modelo posee una velocidad de aplicación de carga constante. Para el resto de días se utilizó la prensa de compresión modelo CT-900, la cual permite aplicar mucha más carga a los cubos de mortero. Este modelo de prensa no posee una velocidad de carga constante, ya que es de accionamiento manual. Ambas máquinas son

marca SOILTEST y cumplen con los requerimientos especificados en las normas ASTM C 39. El procedimiento que se siguió para realizar los ensayos de compresión y la posterior toma de datos fue el siguiente:

En primer lugar, con una lima se corrigieron imperfecciones para tener las caras de las muestras lo más lisas posibles, luego se colocó una de las 3 muestras cúbicas en la prensa, se procedió a encerrar la máquina, es decir, se agregó carga hasta que la muestra quedó sujeta entre las mordazas de la prensa y el medidor de la misma marcó 0 kg, luego, se encerró el medidor de desplazamiento el cual estaba sujeto a un soporte y el otro extremo del mismo a una de las mordazas, siendo este nuestro estado inicial.

En segundo lugar, se procedió a meter carga a la muestra y paralelamente se fue señalando en la escala de la prensa los valores de carga cada $12,7 \times 10^{-03}$ cm (5×10^{-03} in) que marcaba el medidor de desplazamiento hasta la fractura de la muestra. El último valor señalado correspondió a la carga máxima que soportó la muestra.

El procedimiento mencionado se lo realizó tres veces por día de experimentación, tanto para el 15% como para el 17,5% tal cual lo especifica la Norma ASTM C109. Fueron realizados tres ensayos de

compresión con el fin de obtener el Esfuerzo de Ruptura promedio para cada día de curado; las tablas de datos se muestran en la sección de ANEXOS.

A continuación se muestra en la Tabla 8 una tabla donde se presentan los datos obtenidos y se explicará de forma detallada como se realizaron los cálculos, se usará como ejemplo la mezcla con un 15% de Zeolita a los 7 días de curado.

TABLA 8
ADQUISICION DE DATOS PARA MUESTRA DEL 15% DE ZEOLITA A
LOS 7 DIAS DE CURADO

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad (MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	16013	4413	2452	6,41	1,77	0,98	2521,70	694,91	386,06	10,92	4,06	3,72	0,70	1,30	2,79
25,4	0,00508	57824	11277	8825	23,13	4,51	3,53	4553,07	887,94	694,91	21,86	8,13	7,44	0,05	0,80	1,11
38,1	0,00762	111200	21083	22064	44,48	8,43	8,83	5837,27	1106,71	1158,19	32,79	12,21	11,17	0,26	0,45	0,27
50,8	0,01016	151232	38243	38734	60,49	15,30	15,49	5954,02	1505,65	1524,95	43,72	16,28	14,89	0,28	0,06	0,04
63,5	0,0127	-	53933	56385	-	21,57	22,55	-	1698,68	1775,89	-	20,36	18,62	-	0,06	0,17
76,2	0,01524	-	71094	71094	-	28,44	28,44	-	1865,97	1865,97	-	24,43	22,35	-	0,14	0,21
88,9	0,01778	-	88254	85803	-	35,30	34,32	-	1985,47	1930,31	-	28,5	26,07	-	0,19	0,24
101,6	0,02032	-	102963	100512	-	41,19	40,20	-	2026,83	1978,57	-	32,62	29,8	-	0,21	0,26
114,3	0,02286	-	120124	107866	-	48,05	43,15	-	2101,90	1887,42	-	36,65	33,52	-	0,24	0,22
127	0,0254	-	137284	115221	-	54,91	46,09	-	2161,95	1814,50	-	40,73	37,25	-	0,26	0,19
139,7	0,02794	-	147090	-	-	58,84	-	-	2105,80	-	-	44,8	-	-	0,24	-

Los datos de Fuerza o carga se tomaron cada 12.7x10⁻⁰³cm, este valor indica la reducción del tamaño inicial que posee la muestra cúbica de 5

cm de arista. Esto quiere decir que la deformación para este valor como lo establece la formula es:

$$\text{Deformación} = (L_{\text{Final}} - L_{\text{Inicial}}) / L_{\text{Inicial}} = ((5\text{cm} - 12.7 \times 10^{-3}\text{cm}) - 5\text{cm}) / 5\text{cm}$$

$$\text{Deformación} = - 0.00254$$

El valor negativo indica que la Muestra esta reduciendo su tamaño debido a la compresión, este cálculo se lo repite para obtener los otros valores de deformación, pero considerando que la longitud final se incrementa 12.7×10^{-3} cm a la vez.

Por lo tanto, como se muestra en la tabla, para cada valor de deformación obtendremos un valor de fuerza para la muestra. Las máquinas de ensayo tienen como unidad de medida [Lbf] o [Kgf], en la tabla se aprecian los datos convertidos a [Newton] directamente para cada muestra.

Para calcular el esfuerzo se hizo uso de la siguiente fórmula:

$$\text{Esfuerzo } (\sigma) = \text{Fuerza} / \text{Área}$$

Por tanto, para la muestra 1 el valor del esfuerzo es:

$$\text{Esfuerzo} = 16013 \text{ N} / 2500 \text{ mm}^2 = 6.4052 \text{ MPA}$$

Los 2500 mm² representan el área de la superficie de la muestra, este cálculo se lo repite para todos los datos y así se obtiene los datos de esfuerzo; el Esfuerzo de ruptura se lo obtiene con la carga máxima.

El valor de Módulo de Elasticidad lo obtenemos de la siguiente formula:

$$E = \text{Esfuerzo} / \text{Deformación} = 6.4092 \text{ MPa} / 0,00254 = 2521.70 \text{ MPa}$$

Así se obtuvo el Modulo de Elasticidad, todos estos cálculos fueron repetidos para todas las muestras recolectadas. Estas tablas pueden ser observadas en los anexos, también se adjuntan datos de Temperatura y Humedad relativa, para mayor detalle revisar las tablas en la sección de ANEXOS.

4.2 Validación

MODELAMIENTO DE LA RESPUESTA MECANICA

Para la modelación del comportamiento se hizo uso de un algoritmo desarrollado en MATLAB que grafica el comportamiento del cemento sometido a una fuerza de compresión. Este algoritmo usa el Método de Newton-Raphson para converger cuadráticamente al resultado más óptimo.

Valores experimentales de Módulo de Elasticidad y el Esfuerzo de fluencia obtenidos experimentalmente para cada muestra fueron usados para ajustar las curvas del programa a las curvas obtenidas experimentalmente.

El programa desarrollado en MATLAB requiere de valores de Esfuerzo de Fluencia (σ_y) y Módulo de Elasticidad para graficar idealmente el comportamiento del cemento sometido a compresión. En este estudio los valores de Esfuerzo de Fluencia y Módulo de Elasticidad de cada muestra obtenida para el 15 y 17,5% fueron ingresados al programa para poder establecer a través del Error relativo si el Modelo matemático es una buena representación de lo que ocurre experimentalmente.

Para trabajar en el modelo matemático se requirió especificar varios puntos de importancia:

- A cada valor de esfuerzo le corresponde un valor de Módulo de Elasticidad.
- La carga a la cual se fractura la muestra indica que con dicha carga se encuentra el valor del esfuerzo de ruptura

- Por último, el módulo de elasticidad requerido en el algoritmo será el promedio de los módulos correspondientes a los puntos que se consideren que pertenecen a la Región elástica.

Con estos puntos claramente especificados, se requiere los valores del Módulo de elasticidad y del Esfuerzo de fluencia experimentales para ingresarlos en el algoritmo y así obtener una curva esfuerzo vs deformación del modelo matemático.

De los datos obtenidos solo se puede indicar con seguridad cual es el esfuerzo de ruptura, para aproximar el esfuerzo de fluencia se hizo uso del algoritmo desarrollado en MATLAB y se graficó las curvas esfuerzo vs deformación tanto del modelo matemático como de los datos experimentales, de esta forma se pudo comparar y acercar estas curvas lo más posible, es decir, limitar la zona elástica del modelo. El procedimiento fue el siguiente:

Para poder disminuir la distancia presente entre la curva del modelo y la experimental se observa que en la tabla de datos se posee el esfuerzo de máximo que resistió la muestra, y por tanto un correspondiente valor de Módulo de Elasticidad; basado en el criterio de que el Módulo de Elasticidad es la pendiente de la curva en la gráfica Esfuerzo vs

Deformación, se consideró que si el valor del módulo aumenta por ende lo haría la pendiente de dicha curva.

De tal forma que se comparó el valor de módulo de elasticidad correspondiente al esfuerzo de ruptura con el promedio de los valores de módulo de elasticidad correspondientes a los esfuerzos anteriores al de ruptura, con el fin de obtener el valor más alto resultante de los promedios de dichos valores ; una vez determinado cual es el mayor promedio , el último valor correspondiente a la lista de valores usados para obtener el promedio se lo define como ESFUERZO DE FLUENCIA y a partir de dicho valor , aquellos que estén debajo de él hasta llegar al esfuerzo de ruptura pertenecerán a la región PLASTICA.

En la figura 4.3 se muestra como considere los valores de Esfuerzo de fluencia y Modulo de Elasticidad tomando como ejemplo la muestra 2 con 17,5% de Zeolita a los 25 días de curado.

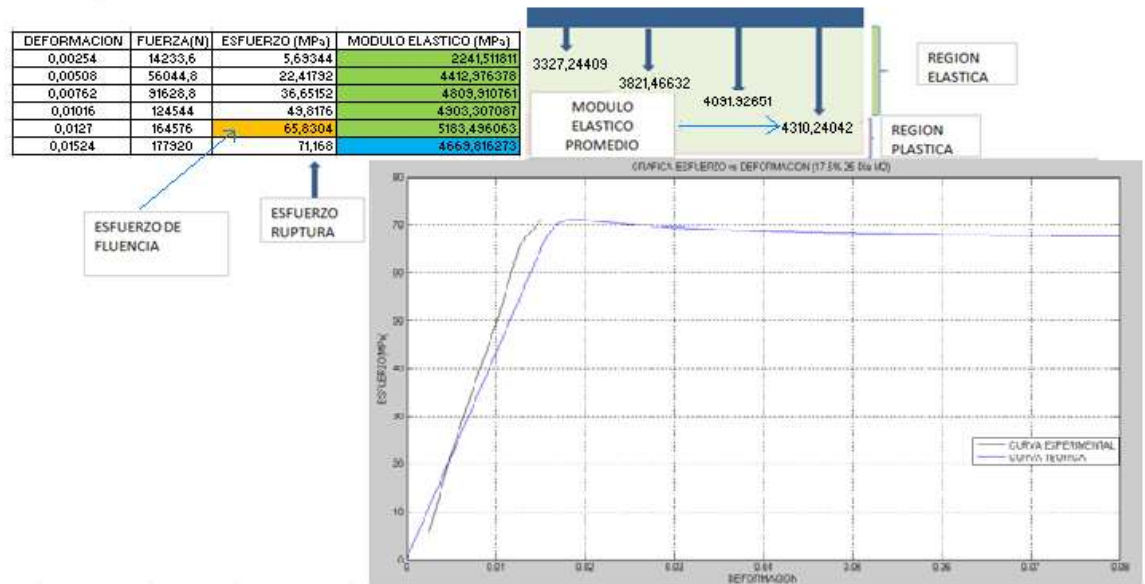


FIGURA 4.3 APROXIMACION DEL ESFUERZO DE FLUENCIA Y MODULO DE ELASTICO.

Este procedimiento se lo repite tantas veces sea necesario hasta obtener el mayor promedio para cada muestra, esto es tan solo una aproximación para poder determinar el esfuerzo de fluencia.

Otros valores muy importantes que se debió aproximar en nuestro modelo matemático son los valores de “m” y “a”. Estos valores capturan el esfuerzo óptimo en el modelo. De los cálculos desarrollados por el algoritmo, se desprende una ecuación que nos permitirá saber aproximadamente el valor de “a”. La ecuación establece que el esfuerzo

de ruptura es aproximadamente igual al producto del esfuerzo de fluencia más uno:

$$f'_c = \text{Esfuerzo de fluencia} * (1+a)$$

Dado que conocemos el esfuerzo de ruptura experimental y el esfuerzo de fluencia podemos calcular el valor de “a”, dicho valor nos servirá para acercar el esfuerzo de ruptura del modelo matemático al esfuerzo de ruptura obtenido experimentalmente.

Después de haber realizado estos procedimientos, se calcula el error relativo con la siguiente fórmula:

$$\text{Error relativo} = |(\sigma_{\text{Programa}} - \sigma_{\text{Máquina}}) / \sigma_{\text{Máquina}}| \times 100$$

Estos datos se calculan para cada valor de deformación experimental, de este modo se puede calcular el error relativo promedio por gráfica. Con este valor del error promedio se pudo establecer que las consideraciones antes expuestas tienen un tanto por ciento de validez.

A continuación se muestra en la Tabla 9 en la que se muestran los errores obtenidos en el proceso de Modelamiento matemático.

TABLA 9

ERRORES RELATIVOS Y CAPACIDAD DE PREDICCIÓN DEL
ALGORITMO

PORCENTAJE	DÍA CURADO	ERROR RELATIVO PROMEDIO POR DÍA (%)	ERROR RELATIVO PROMEDIO POR PORCENTAJE (%)
15%	7	41,15	29,00
	14	19,15	
	21	35,78	
	25	19,92	
17,50%	4	62,65	26,90
	11	9,48	
	18	12,82	
	25	22,66	
ERROR RELATIVO GENERAL			27,95
CAPACIDAD DE PREDICCIÓN			72,05

Lo cual muestra que la capacidad de predicción del algoritmo desarrollado es del 72%, cabe resaltar que este algoritmo no considera los múltiples factores que pueden afectar la resistencia de las muestras, tales como, temperatura, humedad, mal apisonamiento, errores de toma de recolección de datos, entre otros; además, muestra que las consideraciones que se hicieron antes de ingresar los datos son hasta cierto punto válidas.

EVOLUCION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DURANTE LOS DIAS DE CURADO

En esta sección se muestra la tendencia que presentó la resistencia a la compresión de las muestras durante los días de curado; cabe mencionar que para poder describir dichas tendencias se hizo uso del programa MATLAB y de la herramienta POLYFIT la cual permitió expresar los resultados obtenidos para cada porcentaje en términos de un polinomio de 2do grado como lo muestra Figura 4.4.

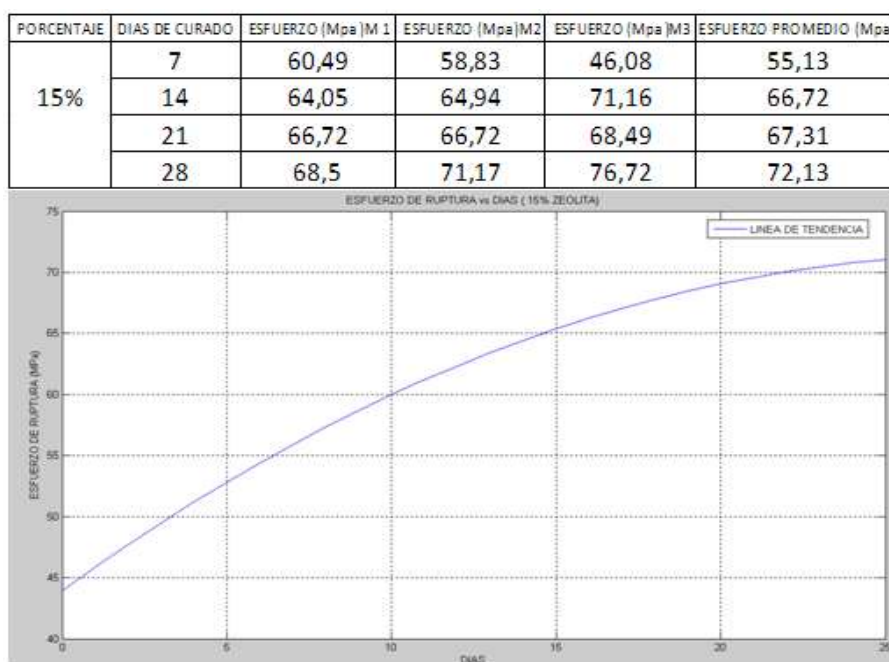


FIGURA 4.4 GRAFICA ESFUERZO DE RUPTURA VS DIAS CURADO
MEZCLA 15%

La relación entre el esfuerzo de ruptura y los días de curado es:

$$\text{ESFUERZO} = - 0.0345 * (\text{DIAS})^2 + 1.9446 * \text{DIAS} + 34.9725$$

Como se puede observar la mezcla del 15% incrementa su resistencia con el transcurso de los días.

Para el 17,5% se tuvo la tendencia que se muestra en la Figura 4.5:

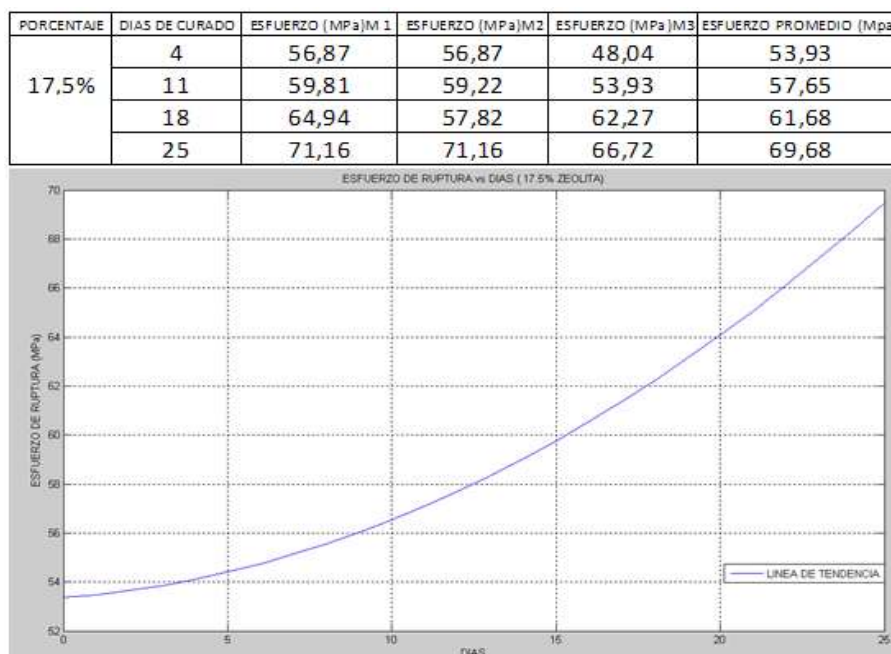


FIGURA 4.5 GRAFICA ESFUERZO VS DIAS CURADO MEZCLA 17.5%

La relación entre el esfuerzo de ruptura y los días de curado es:

$$\text{ESFUERZO} = + 0.0218 * (\text{DIAS})^2 + 0.0998 * \text{DIAS} + 53.3623$$

En contraste, la muestra de 17,5% presentó una tendencia creciente durante todos los días de curado. La Figura 4.6 muestra las curvas ESFUERZO vs. DIAS para todos los porcentajes de Zeolita.

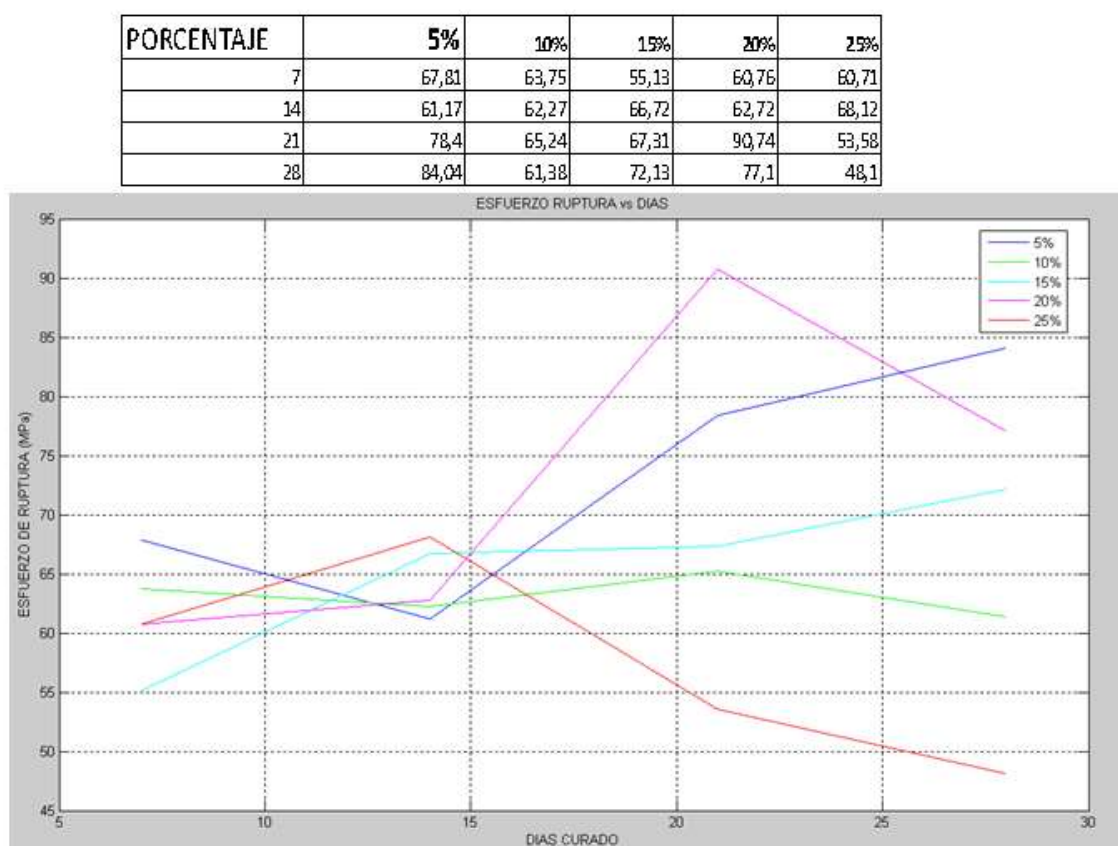


FIGURA 4.6 GRAFICA ESFUERZO VS DIAS DE CURADO GENERAL

Como se observa en la figura la mayor resistencia a la compresión se la obtuvo a los 21 días de curado para la mezcla con 20% de Zeolita, es decir 90,74 MPa, posteriormente a los 28 días donde disminuye

severamente, en contraste, la mezcla con 5% muestra una resistencia de 84 MPa al día 28.

ANALISIS ESTADISTICO

Para el siguiente análisis se hizo uso de la herramienta estadística MINITAB, los objetivos a cumplir son los siguientes:

1. Obtener una expresión matemática que permita obtener el esfuerzo máximo de compresión mediante el ingreso de los días de curado y el porcentaje de Zeolita.
2. Determinar el mejor tratamiento, es decir, con cuál porcentaje de Zeolita y a lo cuántos días de curado se obtiene la mayor resistencia a la compresión en comparación con un cemento que no posee adición alguna de este material.

Para comenzar con el análisis en primer lugar se establecieron las siguientes hipótesis, teniendo en cuenta que se espera obtener una ecuación de la forma:

$$\text{ESFUERZO DE RUPTURA} = \pm B1 \pm B2 * \text{DIAS CURADO} \pm B3 * \% \text{ZEOLITA}$$

Por lo tanto;

Ho: $B_j = 0$

Vs

H1: Algún $B_j \neq 0$

Donde **Ho** es la hipótesis nula, en la cual se expresa que todos los coeficientes de la ecuación son iguales a cero, es decir, no existe relación entre las variables independientes; **H1** es la hipótesis alterna, en la cual se expresa que al menos existe algún coeficiente diferente de cero, por tanto que existe una relación entre las variables.

Para poder rechazar **Ho** se debe observar los marcadores estadísticos **P** y **F**, donde **P** es la probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el valor observado, como resultado **Ho** se acepta; **F** es la variable de FISHER la cual se emplea para probar si dos muestras provienen de poblaciones que poseen varianzas iguales. Esta prueba es útil para determinar si una población normal tiene una mayor variación que la otra y también se aplica cuando se trata de comparar simultáneamente varias medias poblacionales, en ambas situaciones las

poblaciones deben ser normales, la Figura 4.7 muestra la zona de rechazo estadístico.

Los criterios para rechazar H_0 son:

$$P < \alpha = 0.05 \quad \text{o} \quad F > F_{\alpha} (\text{DF REGRESSION, DF RESIDUAL DEL ERROR})$$

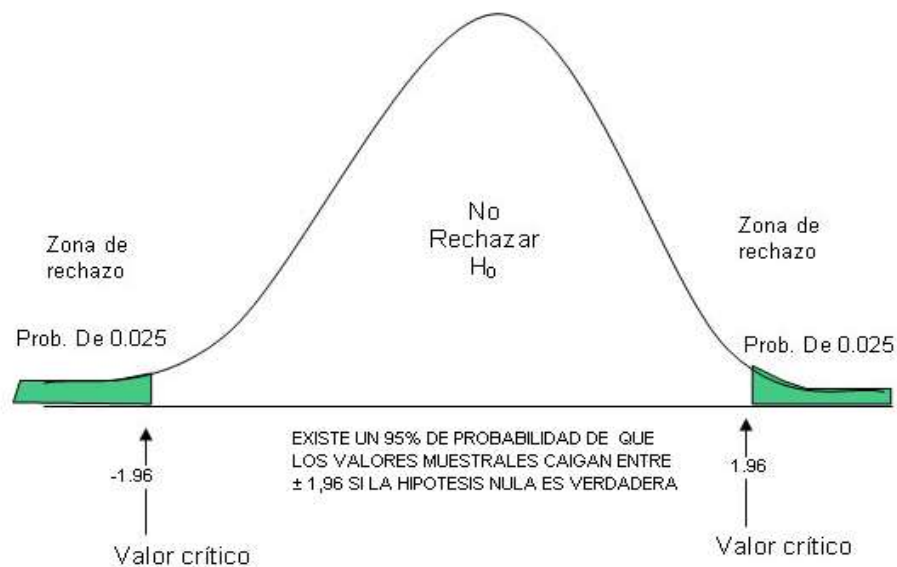


FIGURA 4.7 ZONA DE RECHAZO ESTADISTICO

El primer paso a seguir es determinar la normalidad de los datos obtenidos, para así, garantizar que los datos son aleatorios e inestanzados.

La Tabla 10 muestra los datos obtenidos en la experimentación:

TABLA 10
DATOS PARA EL ANALISIS

Ruptura (Mpa)	Días de curado	%zeolita
67,81	7	5
61,17	14	5
78,4	21	5
84,04	28	5
63,75	7	10
62,27	14	10
65,24	21	10
61,38	28	10
55,13	7	15
66,72	14	15
67,31	21	15
72,13	28	15
60,76	7	20
62,72	14	20
90,74	21	20
77,1	28	20
60,71	7	25
68,12	14	25
53,58	21	25
48,1	28	25

Se procedió a realizar la regresión múltiple por medio de MINITAB, teniendo en cuenta que la variable dependiente es **Ruptura** y las independientes **Días de curado** y **%Zeolita**, cuyo resultado se muestra en la Figura 4.8:

Regression Analysis: ruptura versus dias; %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 65,7 + 0,394 \text{ dias} - 0,416 \% \text{zeolita}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	65,693	7,072	9,29	0,000
dias	0,3944	0,2789	1,41	0,175
%zeolita	-0,4157	0,3086	-1,35	0,196

S = 9,75991 R-Sq = 18,3% R-Sq(adj) = 8,7%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	363,32	181,66	1,91	0,179
Residual Error	17	1619,35	95,26		
Total	19	1982,66			

FIGURA 4.8 RESULTADOS DE REGRESION MULTIPLE

Se tiene que la expresión matemática que relaciona las variables es:

$$\text{ESFUERZO} = 65.7 + 0.394 \cdot \text{DIAS} - 0.416 \cdot \% \text{ZEOLITA}$$

En donde se observa por medio de los valores de P que la probabilidad para que los días de curado tengan una influencia en el esfuerzo de compresión del cemento es de 0.176 y para el porcentaje de zeolita es de 0.196; según el criterio de rechazo ninguno es menor a 0.05, por lo tanto la hipótesis nula no puede ser rechazada.

Otra observación muy importante la brinda el R-SQ, que indica el porcentaje en que ésta regresión se aproxima a los datos experimentales, valor que fue del 18.3% y los valores generales de $F=1.91$ y $P=0.179$ aplicando los criterios de rechazo se tiene:

Para $P=0.179>0.05$, por lo tanto no se rechaza H_0 ; por otro lado, $F=1.91$ valor que debe ser mayor al valor que expresa la tabla de FISHER para los grados de libertad que son (2,17), el programa los expresa como DF (Degrees of freedom), de la tabla $F(2,17)=19.44$; por lo tanto $1.91<19.44$; H_0 no puede ser rechazada.

A continuación se muestra en las figuras 4.9 y 4.10 la tendencia que se obtuvo entre las variables independientes y la variable dependiente:

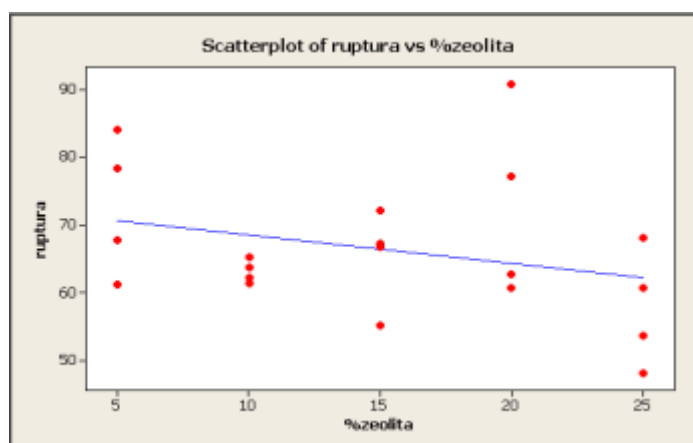


FIGURA 4.9 TENDENCIA RUPTURA VS %ZEOLITA

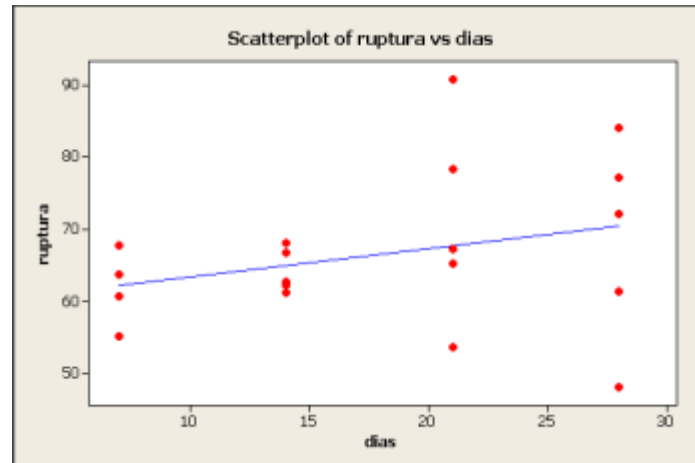


FIGURA 4.10 TENDENCIA RUPTURA VS DIAS DE CURADO

Mediante los datos estadísticos podemos decir con seguridad que la expresión de Regresión de la figura 4.8 no responde mas haya del 18,3% de los datos obtenidos.

La Tabla 11 muestra la diferencia existente entre los datos experimentales y los obtenidos por la regresión:

TABLA 11

DIFERENCIA ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y OBTENIDOS POR

REGRESION

Ruptura (Mpa)	Días de curado	%zeolita	REGRESION	RESIDUAL
67,81	7	5	66,378	1,43
61,17	14	5	69,136	-7,97
78,4	21	5	71,894	6,51
84,04	28	5	74,652	9,39
63,75	7	10	64,298	-0,55
62,27	14	10	67,056	-4,79
65,24	21	10	69,814	-4,58
61,38	28	10	72,572	-11,19
55,13	7	15	62,218	-7,08
66,72	14	15	64,976	1,74
67,31	21	15	67,734	-0,42
72,13	28	15	70,492	1,64
60,76	7	20	60,138	0,62
62,72	14	20	62,896	-0,18
90,74	21	20	65,654	25,09
77,1	28	20	68,412	8,69
60,71	7	25	58,058	2,65
68,12	14	25	60,816	7,30
53,58	21	25	63,574	-9,99
48,1	28	25	66,332	-18,23

Con el fin de obtener una expresión que responda mejor a los datos, se procedió a separar por grupos de días de curado, de tal manera que para cada grupo se obtenga una correspondiente ecuación como lo muestra la Tabla 12:

TABLA 12

GRUPO DE DATOS PARA LOS 7 DIAS

DIAS	Ruptura (Mpa)	PORCENTAJE
7	67,81	5
	63,75	10
	55,13	15
	60,76	20
	60,71	25

Se muestra en la figura 4.11 el modelo de regresión múltiple para este conjunto de datos.

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is
 ruptura = 66,8 - 0,344 %zeolita

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	66,790	4,570	14,62	0,001
%zeolita	-0,3438	0,2756	-1,25	0,301

S = 4,35688 R-Sq = 34,2% R-Sq(adj) = 12,2%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	29,55	29,55	1,56	0,301
Residual Error	3	56,95	18,98		
Total	4	86,50			

FIGURA 4.11 REGRESION MULTIPLE PARA LOS 7 DIAS

Para estos datos se observa que la ecuación es:

$$\text{ESFUERZO} = 66.8 - 0.344 * \% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la Tabla 13:

TABLA 13

RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 7 DIAS

TABLA DE RESULTADOS			
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,301	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F	1,56	F>F(DFR,DFRS)	
DF	1;3	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F(1,3)	215,71		
R-SQ	34,20%		

Se observa que la ecuación de regresión múltiple responde en un 34.20% de los valores y que la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial cúbica obteniéndose lo que se muestra en la Figura 4.12:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 79,49 - 2,693 \% \text{zeolita} + 0,0972 \% \text{zeolita}^2 - 0,000747 \% \text{zeolita}^3$$

S = 4,62793 R-Sq = 75,2% R-Sq(adj) = 1,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	65,0791	21,6930	1,01	0,606
Error	1	21,4177	21,4177		
Total	4	86,4967			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	29,5496	1,56	0,301
Quadratic	1	35,4040	3,29	0,212
Cubic	1	0,1254	0,01	0,951

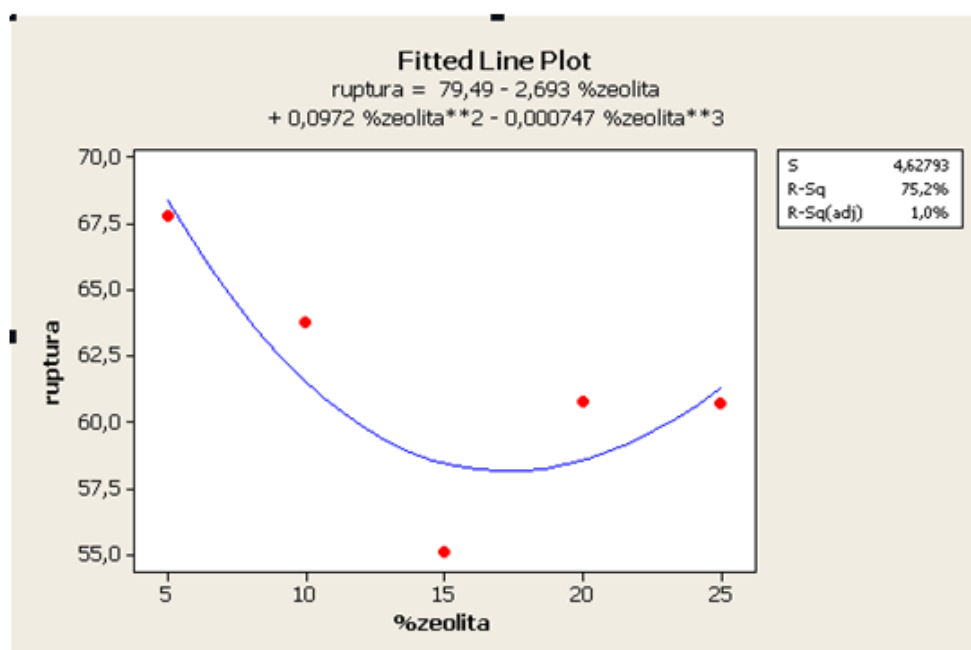


FIGURA 4.12 REGRESION POLINOMIAL CUBICA PARA LOS 7 DIAS

TABLA 14

RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA
CUBICA PARA LOS 7 DIAS

TABLA DE RESULTADOS			
PARAMETROS	VALORES	$P < 0,05$	Ho
P	0,951	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F	0,01	$F > F(DFR, DFRS)$	
DF	3;1	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F(1,3)	10,128		
R-SQ	75,20%		

S observa en la Tabla 14 que el polinomio obtenido responde en un 75.2% de los datos.

Para los 14 días de curado como se muestra en la Tabla 15:

TABLA 15

GRUPO DE DATOS PARA LOS 14 DIAS

DIAS	Ruptura (Mpa)	PORCENTAJE
14	61,17	5
	62,27	10
	66,72	15
	62,72	20
	68,12	25

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is
 ruptura = 59,9 + 0,287 %zeolita

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	59,894	2,438	24,57	0,000
%zeolita	0,2870	0,1470	1,95	0,146

S = 2,32407 R-Sq = 56,0% R-Sq(adj) = 41,3%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	20,592	20,592	3,81	0,146
Residual Error	3	16,204	5,401		
Total	4	36,796			

FIGURA 4.13 REGRESION MULTIPLE PARA LOS 14 DIAS.

Para estos datos se observa que la ecuación es:

$$\text{ESFUERZO} = 59.9 - 0.287 * \% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la Tabla 16;

TABLA 16

RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 14 DIAS.

TABLA DE RESULTADOS			
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,146	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F	3,81	F>F(DFR,DFRS)	
DF	1;3	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F(1,3)	215,71		
R-SQ	56,00%		

Se observa que la ecuación de regresión múltiple responde en un 56% de los valores y que la resistencia a la compresión aumenta al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial Cúbica obteniendo lo que se muestra en la figura 4.14:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 51,50 + 2,653 \% \text{zeolita} - 0,1811 \% \text{zeolita}^2 + 0,004033 \% \text{zeolita}^3$$

S = 3,54146 R-Sq = 65,9% R-Sq(adj) = 0,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	24,2543	8,0848	0,64	0,699
Error	1	12,5420	12,5420		
Total	4	36,7962			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	20,5923	3,81	0,146
Quadratic	1	0,0018	0,00	0,990
Cubic	1	3,6602	0,29	0,685

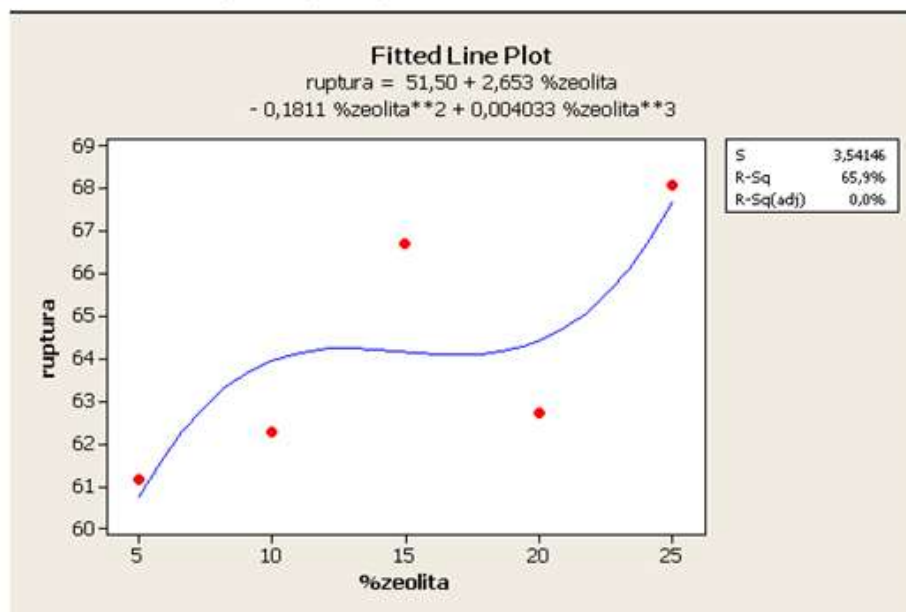


FIGURA 4.14 REGRESION POLINOMIAL CUBICA PARA LOS 14 DIAS

TABLA 17

RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA
CUBICA PARA LOS 14 DIAS

TABLA DE RESULTADOS			
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,685	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F	0,29	F>F(DFR,DFRS)	
DF	3;1	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F(1,3)	10,128		
R-SQ	65,90%		

En la Tabla 17 se observa que el polinomio obtenido responde en un 65.9% de los datos.

Para los 21 días de curado se muestra la Tabla 18:

TABLA 18

GRUPO DE DATOS PARA LOS 21 DIAS

DIAS	Ruptura (Mpa)	PORCENTAJE
21	78,4	5
	65,24	10
	67,31	15
	90,74	20
	53,58	25

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is
 ruptura = 78,3 - 0,483 %zeolita

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	78,29	16,43	4,76	0,018
%zeolita	-0,4827	0,9909	-0,49	0,660

S = 15,6678 R-Sq = 7,3% R-Sq(adj) = 0,0%

|
 Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	58,3	58,3	0,24	0,660
Residual Error	3	736,4	245,5		
Total	4	794,7			

FIGURA 4.15 REGRESION MULTIPLE PARA LOS 21 DIAS.

Para estos datos se observa en la Figura 4.15 que la ecuación es:

$$\text{ESFUERZO} = 78.3 - 0.483 \cdot \% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la Tabla 19:

TABLA 19

RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 21 DIAS

TABLA DE RESULTADOS			
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,66	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F	0,24	F>F(DFR,DFRS)	
DF	1;3	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F(1,3)	215,71		
R-SQ	7,30%		

Se observa en la que la ecuación responde en un 7.3% de los valores y que la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial cúbica obteniéndose lo que se muestra en la Figura 4.16:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 171,1 - 28,02 \% \text{zeolita} + 2,199 \% \text{zeolita}^2 - 0,05055 \% \text{zeolita}^3$$

$$S = 10,5260 \quad R\text{-Sq} = 86,1\% \quad R\text{-Sq}(\text{adj}) = 44,2\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	683,906	227,969	2,06	0,464
Error	1	110,796	110,796		
Total	4	794,702			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	58,258	0,24	0,660
Quadratic	1	50,679	0,15	0,738
Cubic	1	574,968	5,19	0,263

FIGURA 4.16 REGRESION POLINOMIAL CUBICA PARA LOS 21 DIAS

Se observa en la Tabla 20 que el polinomio obtenido responde en un 86.1% de los datos.

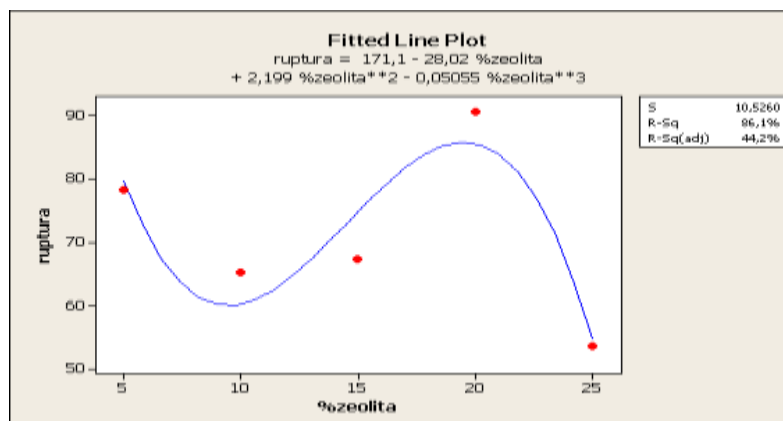


FIGURA 4.17 GRAFICA DE REGRESION POLINOMIAL CUBICA PARA
LOS 21 DIAS

TABLA 20

RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA
CUBICA PARA LOS 21 DIAS.

TABLA DE RESULTADOS			
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,263	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F	5,19	F>F(DFR,DFRS)	
DF	3;1	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F(1,3)	10,128		
R-SQ	86,10%		

La Tabla 21 muestra los datos para los 28 días de curado:

TABLA 21

GRUPO DE DATOS PARA LOS 28 DIAS.

DIAS	Ruptura (Mpa)	PORCENTAJE
28	84,04	5
	61,38	10
	72,13	15
	77,1	20
	48,1	25

Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is
 ruptura = 85,4 - 1,12 %zeolita

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	85,40	13,27	6,44	0,008
%zeolita	-1,1232	0,8001	-1,40	0,255

S = 12,6501 R-Sq = 39,6% R-Sq(adj) = 19,5%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	315,4	315,4	1,97	0,255
Residual Error	3	480,1	160,0		
Total	4	795,5			

FIGURA 4.18 REGRESION MULTIPLE PARA LOS 28 DIAS.

Para los datos de la figura 4.18 se observa que:

$$\text{ESFUERZO} = 85.4 - 1.12 \cdot \% \text{ZEOLITA}$$

El análisis de los parámetros a consideración se muestra en la Tabla 22:

TABLA 22

RESULTADOS ESTADISTICOS PARA LOS 28 DIAS

	TABLA DE RESULTADOS		
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,255	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F	1,97	F>F(DFR,DFRS)	
DF	1;3	NO CUMPLE	NO SE RECHAZA
F(1,3)	215,71		
R-SQ	39,60%		

Se

observa que la ecuación responde en un 39.6% de los valores y que la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el porcentaje de Zeolita; como también no se cumplen los criterios para rechazar H_0 .

Para mejorar la respuesta se aproximó por medio de una regresión polinomial cúbica obteniéndose lo que se muestra en la Figura 4.19:

Polynomial Regression Analysis: ruptura versus %zeolita

The regression equation is

$$\text{ruptura} = 170,5 - 26,04 \% \text{zeolita} + 1,969 \% \text{zeolita}^2 - 0,04492 \% \text{zeolita}^3$$

S = 1,31475 R-Sq = 99,8% R-Sq(adj) = 99,1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	793,742	264,581	153,06	0,059
Error	1	1,729	1,729		
Total	4	795,470			

Sequential Analysis of Variance

Source	DF	SS	F	P
Linear	1	315,395	1,97	0,255
Quadratic	1	24,341	0,11	0,775
Cubic	1	454,006	262,65	0,039

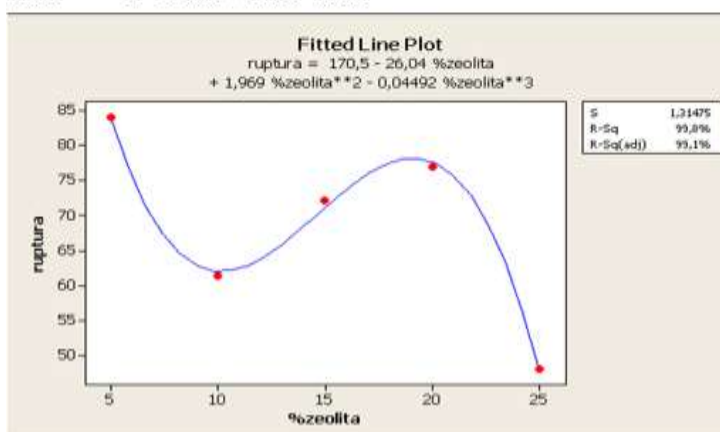


FIGURA 4.19 REGRESION POLINOMIAL CUBICA PARA LOS 28 DIAS

TABLA 23

RESULTADOS ESTADISTICOS REGRESION POLINOMICA CUBICA
PARA LOS 28 DIAS

TABLA DE RESULTADOS			
PARAMETROS	VALORES	P<0,05	Ho
P	0,039	CUMPLE	SE RECHAZA
F	262,65	F>F(DFR,DFRS)	
DF	3;1	CUMPLE	SE RECHAZA
F(1,3)	10,128		
R-SQ	99,80%		

De la tabla 23 se observa que el polinomio obtenido responde en un 99.8% de los datos y se cumplen los criterios para rechazar Ho.

Las formulas de Regresión obtenidas las muestro en la Tabla 23, donde se puede apreciar el valor de R-SQ.

TABLA 24

MODELOS DE REGRESIÓN

			R-SQ
7	Regresión Polinomial	$f'c=66.8-0.344*Z$	34,20%
	Modelo Polinómica cubica	$f'c=79.49-2.693*Z+0.0972*Z^2-0.000747*Z^3$	75,20%
14	Regresión Polinomial	$f'c=59.9-0.287*Z$	56%
	Modelo Polinómica cubica	$f'c=51.50+2.653*Z-0.1811*Z^2+0.004033*Z^3$	66%
21	Regresión Polinomial	$f'c=78.3-0.483*Z$	7,30%
	Modelo Polinómica cubica	$f'c=171.1-28.02*Z+2.199*Z^2-0.05055*Z^3$	86,10%
28	Regresión Polinomial	$f'c=85.4-1.12*Z$	39,60%
	Modelo Polinómica cubica	$f'c=170.5-26.04*Z+1.969*Z^2-0.04492*Z^3$	99,80%

Con Tabla 24 puedo concluir que la regresión polinomial se aproxima a los datos experimentales en un 82%.

Con estos resultados previos se puede entender de mejor forma la superficie de respuesta en 3-D de la Figura 4.20 que presenta el modelo general de regresión múltiple que se estableció al inicio.

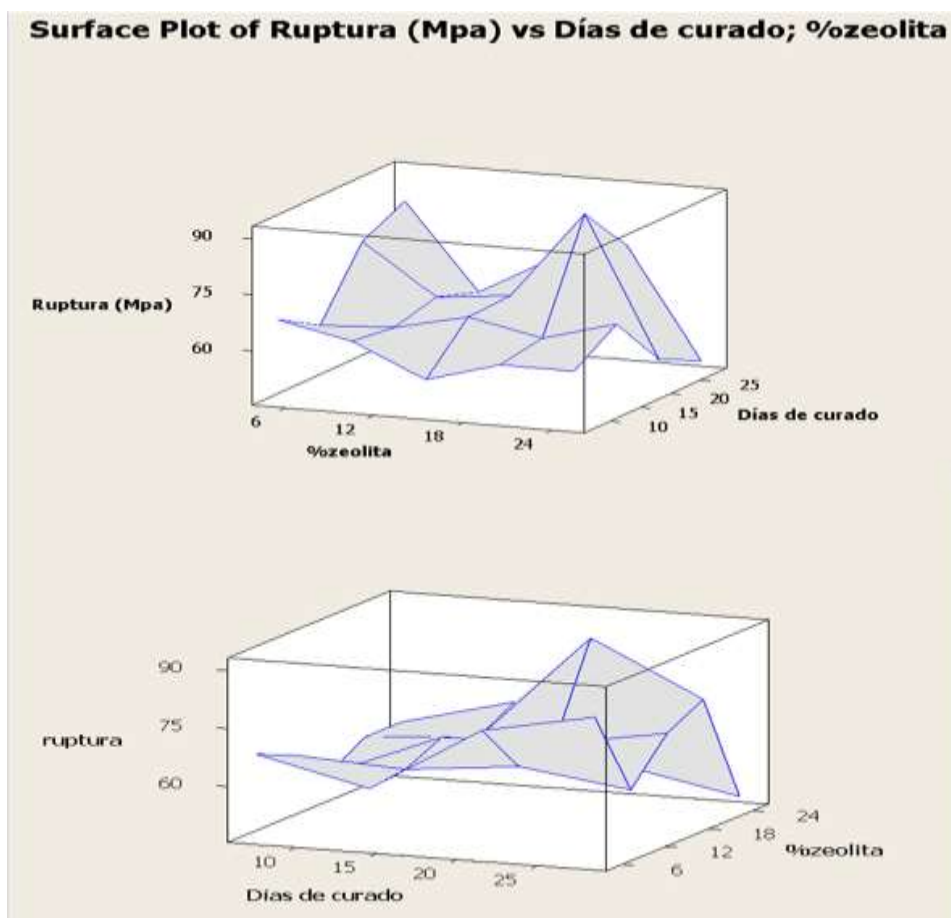


FIGURA 4.20 SUPERFICIE DE RESPUESTA DEL EXPERIMENTO.

Claramente se observa en la superficie de respuesta que la relación entre el esfuerzo de ruptura y el porcentaje de zeolita no presentó un aumento constante, de hecho, se observa en la superficie de respuesta inferior que para ciertos porcentajes de zeolita se dio un aumento en la resistencia a la compresión hasta un aproximado del 15%, de ahí en adelante la resistencia a la compresión disminuyó.

Los valores señalados en color amarillo son los correspondientes al cemento TIPO I, aquellos resaltados en color rosa son los valores de ruptura más altos para cada día de curado para cada porcentaje.

A los 7 días de curado se obtuvieron 77.81 MPa y 67.81 MPa, por tanto el valor correspondiente al cemento TIPO I fue mayor en un 14.75%; a los 14 días de curado se tuvo que el cemento TIPO I fue mayor en un 23.85% al mayor valor de resistencia obtenido entre los cinco porcentajes a comparar; para los 21 días de curado el valor obtenido en la mezcla de 20% fue mayor en un 28.81% y finalmente a los 28 días se tuvieron dos valores de resistencia a la compresión correspondientes al 5% y 20% respectivamente, estos valores se muestran ya que si se escoge la mezcla al 5% se tiene que es mayor en un 11.82% sin embargo desde el punto de vista empresarial no involucra un mayor ahorro debido a la poca cantidad de zeolita, en contraste la mezcla con 20% de zeolita fue mayor en un 3.88% al final del proceso de curado y representaría un ahorro de un 20% menos de cemento.

En conclusión comparando con el cemento TIPO I el mejor tratamiento es la mezcla con 20% de zeolita.

A continuación se muestra el porcentaje de variación respecto al cemento TIPO IV en la tabla 26:

TABLA 26

PORCENTAJE DE VARIACION RESPECTO CEMENTO TIPO IV

PORCENTAJE	TIPO IV	0%	5%	10%	15%	20%	25%	%variación TIPO IV
7	47,76	77,81	67,81	63,75	55,13	60,76	60,71	-29,57
14	49,96	84,37	61,17	62,27	66,72	62,72	68,12	-26,66
21	42,73	64,60	78,4	65,24	67,31	90,74	53,58	-52,91
28	16,30	74,11	84,04	61,38	72,13	77,1	48,1	-80,60
								-78,86

A los 7 días de curado se tuvo que la resistencia a la compresión de la mezcla con 5% fue mayor en un 29.57% respecto al TIPO IV; a los 14 días la mezcla con 25% fue mayor en un 26.66%, de igual forma a los 21 y 28 días de curado, sin embargo, cabe resaltar que en el mismo caso anterior del cemento TIPO I al observar de un punto de vista económico se llega a la conclusión que a los 28 días con la mezcla de 20% de zeolita se obtuvo la mejor resistencia a la compresión.

En la Figura 4.21 se muestra la gráfica Esfuerzo vs Días de curado para todos los porcentajes:

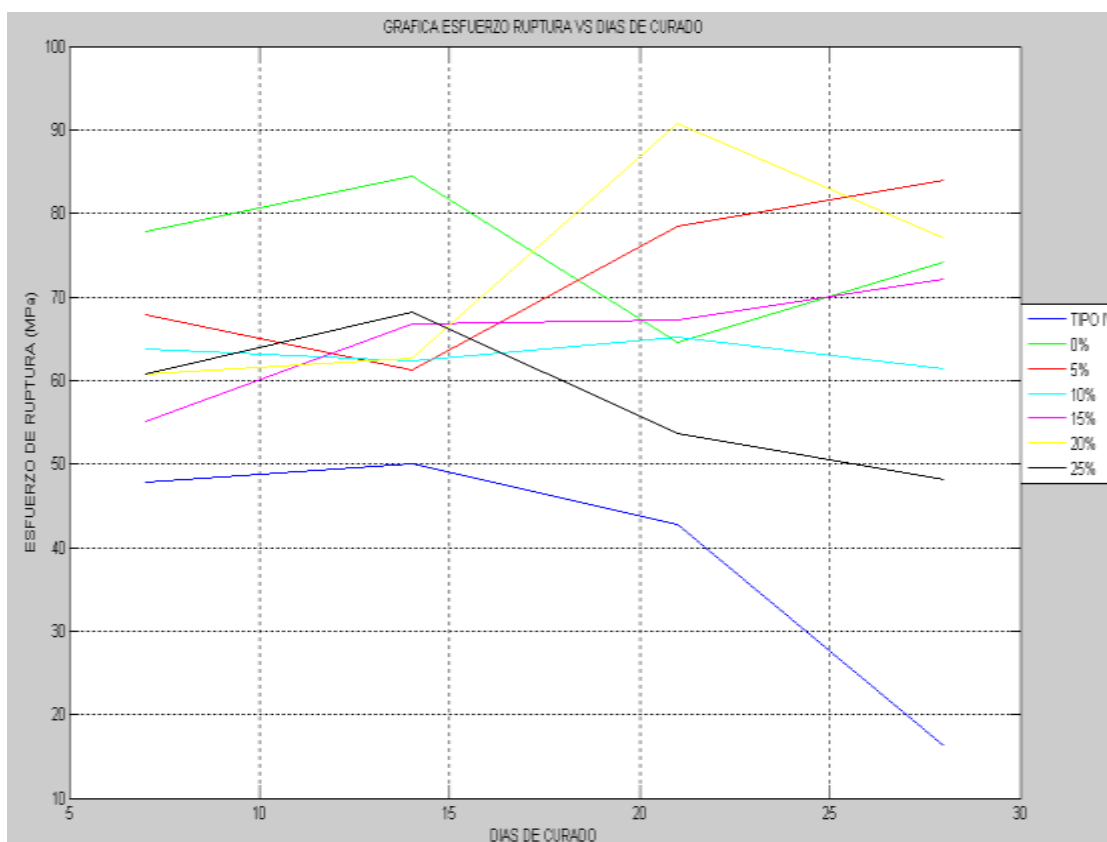


FIGURA 4.21 GRAFICA ESFUERZO VS DIAS DE CURADO GENERAL

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

De los errores promedios obtenidos entre los datos experimentales y el modelo matemático de la mezcla al 15 y 17,5% de Zeolita obtuve un error promedio del 29 y 26.90% respectivamente. Estos valores me indican que el Modelo matemático posee en promedio un 28% de error con respecto a los datos experimentales. Lo que quiere decir que el modelo matemático concuerda con los datos experimentales en un 72%.

- Al comparar los datos de Esfuerzo de ruptura obtenidos los días 7 ,14 ,21 y 28 para el 15% de Zeolita y el Testigo(0% Zeolita), puedo notar que existe un único incremento el día 21 del ensayo como lo muestra la tabla. Esto indica que la adición de 15% de Zeolita a la mezcla de cemento no produce un aumento favorable de la Resistencia a la compresión los otros días de curado. Manteniéndose entre los datos obtenidos una diferencia promedio del 11.25MPa.

- De las graficas obtenidas se puede notar claramente que el mejor tratamiento en comparación con el cemento TIPO I y TIPO IV fue la mezcla con un 20% de Zeolita. Este tratamiento se lo considero como el mejor ya que la variable de respuesta o el enfoque de este estudio es obtener el porcentaje de zeolita que ofrezca un mayor valor de resistencia a la compresión a lo largo de los días de curado.
- Claramente se puede apreciar que el modelo de regresión polinomial múltiple es el que mejor, por que se adapta en un 82% al comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente.
- Un incremento de Zeolita a la pasta de Cemento no involucra un aumento proporcional a la resistencia a la compresión, esto lo verificamos con los datos obtenidos con un 25% de Zeolita.
- En las superficies de Respuesta se puede entender que a edades tempranas la Resistencia a la compresión aumenta debido a la hidratación durante el proceso de mezclado.
- La superficie de respuesta también muestra como la Resistencia a la compresión disminuye hasta el 15% de Zeolita, y a partir de este porcentaje existe un aumento de la Resistencia a la compresión hasta el 20% de Zeolita, y de ahí para el 25% de zeolita decae nuevamente. Esto se debe a que para el 20% de Zeolita la mezcla ha alcanzado a

hidratarse completamente y por esta razón muestra el máximo valor de Resistencia a la compresión al 20% de Zeolita.

- Existen dos porcentajes que deben considerarse en este estudio, el primero, al 20% de Zeolita donde se obtuvo una resistencia a la compresión de 90.71 MPa a los 21 días de curado y el segundo con el 5 % de Zeolita donde se obtuvo 84.04 MPa a los 28 días de curado. Con estos datos puedo determinar que la inclusión de zeolita en el cemento si mejora la Resistencia a la Compresión uniaxial para la pasta de Cemento.
- La figura 4.20 en la cual se encuentra la superficie de respuesta, indica que al transcurso de los días, la resistencia de las muestras aumenta, esto lo confirmamos con la tendencia positiva que muestra la figura 4.10.
- La tendencia negativa de la figura 4.9 indica que no necesariamente por incrementar el porcentaje de zeolita se incrementa la resistencia de las muestras durante el tiempo de ensayo.
- Opte por hacer el modelo matemático de cada muestra por que las muestras rompen en diferentes puntos de deformación y además en algunos días de experimentación se usaron ambas maquinas para los ensayos.

- Pude establecer que los valores de “m” y “a” son constantes que permiten capturar el esfuerzo optimo de las curvas Esfuerzo vs deformación del modelo matemático.
- Los valores de “m” para el 17,5% de Zeolita no mantienen una buena relación, apenas el 45.8% de estos datos siguen la misma tendencia.
- Los valores de “a” para el 17,5% de Zeolita poseen una relación entre ellos del 61.28% como lo establecí en el análisis.
- Este valor de “a” en el Modelo matemático se encarga de acercar el esfuerzo de ruptura del Modelo al esfuerzo de ruptura obtenido experimentalmente.
- Utilizando el Método de Tukey de comparación entre medias pude establecer que el 20% de zeolita ofrece mayor resistencia a la compresión que los otros porcentajes e incluso mayor que el Cemento Tipo I con un 95% de confianza, y que a los 28 días de curado es cuando se muestran los mayores valores de Resistencia a la Compresión.

5.1 Recomendaciones

- La mayoría de los errores en este proyecto de investigación fue el proceso de adquisición de datos, debido a que en algunas ocasiones mientras se realizaban los ensayos de compresión se cambió de una máquina que

aplicaba una velocidad de carga constante a una velocidad de carga variable; dando así valores aberrantes.

- Tener especial cuidado en el apisonamiento de los especímenes de prueba, ya que un mal apisonamiento llevará a la permanencia de aire dentro del cubo las cuales debilitarán su estructura y por ende su resistencia a la compresión.
- Tener cuidado con la variación de temperatura y humedad relativa, pues afectarán directamente al proceso de curado y con esto al posible deterioro de la resistencia a la compresión.
- En el momento de colocar los bloques ya desmoldados, hacerlo en un recipiente que permita que todas las caras del cubo se sequen de forma uniforme, caso contrario se tendrán caras húmedas y eso puede producir fallas en el ensayo.
- Una vez que se realiza el desmolde, tomar en cuenta la hora a la que es realizado, pues a esa misma hora deberá ser realizado el ensayo el correspondiente día de curado.
- Las maquinas usadas para los ensayos de compresión a pesar de estar calibradas muestran en los resultados obtenidos errores muy grandes, que

no permiten un correcto análisis de los datos obtenidos, conveniente sería realizar los ensayos en una máquina con display digital.

- Un estudio con más días de experimentación permitiría establecer con toda seguridad como afecta la adición de Zeolita al cemento. Considero que deben hacerse más días de investigación por la propiedad de absorción de humedad que posee la zeolita y para darle tiempo a la zeolita para que reaccione por completo con el cemento.
- Para todas las conclusiones se considero que la propiedad que nos interesa evaluar es la resistencia a la compresión de las mezclas, en base a esto pude realizar las conclusiones respectivas.

ANEXOS

La fuerza de compresión obtenida de los ensayos la convertí en Newton para trabajar este estudio con el Sistema Internacional de unidades. A lo largo de las pruebas se trabajo con una temperatura promedio de 23 °C y una humedad relativa de 70 % cumpliendo de esta forma el requerimiento de Temperatura y Humedad relativa especificado por la norma ASTM C109. La longitud de arista del cubo es de 5 cm, lo que quiere decir que el área de cada cara del cubo es 2500 mm².

TABLA 28

MEZCLA CEMENTO Y 15% DE ZEOLITA DÍA 7

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad (MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	16013	4413	2452	6,41	1,77	0,98	2521,70	694,91	386,06	10,92	4,06	3,72	0,70	1,30	2,79
25,4	0,00508	57824	11277	8825	23,13	4,51	3,53	4553,07	887,94	694,91	21,86	8,13	7,44	0,05	0,80	1,11
38,1	0,00762	111200	21083	22064	44,48	8,43	8,83	5837,27	1106,71	1158,19	32,79	12,21	11,17	0,26	0,45	0,27
50,8	0,01016	151232	38243	38734	60,49	15,30	15,49	5954,02	1505,65	1524,95	43,72	16,28	14,89	0,28	0,06	0,04
63,5	0,0127	-	53933	56385	-	21,57	22,55	-	1698,68	1775,89	-	20,36	18,62	-	0,06	0,17
76,2	0,01524	-	71094	71094	-	28,44	28,44	-	1865,97	1865,97	-	24,43	22,35	-	0,14	0,21
88,9	0,01778	-	88254	85803	-	35,30	34,32	-	1985,47	1930,31	-	28,5	26,07	-	0,19	0,24
101,6	0,02032	-	102963	100512	-	41,19	40,20	-	2026,83	1978,57	-	32,62	29,8	-	0,21	0,26
114,3	0,02286	-	120124	107866	-	48,05	43,15	-	2101,90	1887,42	-	36,65	33,52	-	0,24	0,22
127	0,0254	-	137284	115221	-	54,91	46,09	-	2161,95	1814,50	-	40,73	37,25	-	0,26	0,19
139,7	0,02794	-	147090	-	-	58,84	-	-	2105,80	-	-	44,8	-	-	0,24	-

Esfuerzo de ruptura promedio	55,14 MPa
Error relativo M1	32,50 %
Error relativo M2	35,88 %
Error relativo M3	55,08 %
Error relativo promedio	41,15 %

TABLA 29
MEZCLA CEMENTO Y 15% DE ZEOLITA DÍA 14

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad(MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	25798	27578	17347	10,32	11,03	6,94	4062,74	4342,93	2731,84	14,3	14,3	12,29	0,39	0,30	0,77
25,4	0,00508	66720	71168	62272	26,69	28,47	24,91	5253,54	5603,78	4903,31	28,61	28,6	24,59	0,07	0,00	0,01
38,1	0,00762	144560	131216	106752	57,82	52,49	42,70	7588,45	6887,98	5603,78	42,93	42,9	36,89	0,26	0,18	0,14
50,8	0,01016	160128	144560	155680	64,05	57,82	62,27	6304,25	5691,34	6129,13	57,246	57,2	49,18	0,11	0,01	0,21
63,5	0,0127	-	162352	177920	-	64,94	71,17	-	5113,45	5603,78	-	64,85	61,49	-	0,01	0,21

Esfuerzo de ruptura promedio	66,72 MPa
Error relativo M1	20,54 %
Error relativo M2	10,10 %
Error relativo M3	26,81 %
Error relativo promedio	19,15 %

TABLA 30

MEZCLA CEMENTO Y 15% DE ZEOLITA DÍA 21

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad(MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	8896	12454	17792	3,56	4,98	7,12	1400,94	1961,32	2801,89	8,47	11,16	12,27	1,38	1,24	0,72
25,4	0,00508	26688	56934	58714	10,68	22,77	23,49	2101,42	4483,02	4623,12	16,95	22,33	24,54	0,59	0,02	0,04
38,1	0,00762	74726	97856	106752	29,89	39,14	42,70	3922,65	5136,80	5603,78	25,42	33,49	36,82	0,15	0,14	0,14
50,8	0,01016	108976	137888	160128	43,59	55,16	64,05	4290,39	5428,66	6304,25	33,9	44,66	49,09	0,22	0,19	0,23
63,5	0,0127	157904	157904	171248	63,16	63,16	68,50	4973,35	4973,35	5393,64	42,38	55,83	61,38	0,22	0,19	0,23
76,2	0,01524	166800	166800	-	66,72	66,72	-	4377,95	4377,95	-	50,86	65,72	-	0,33	0,12	-

Esfuerzo de ruptura promedio	67,31 MPa
Error relativo M1	48,19 %
Error relativo M2	31,68 %
Error relativo M3	27,48 %
Error relativo promedio	35,78 %

TABLA 31

MEZCLA CEMENTO Y 15% DE ZEOLITA DÍA 28

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad (MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	15569	17348	18682	6,23	6,94	7,47	2451,76	2731,97	2942,12	11,91	10,91	12,25	0,91	0,57	0,64
25,4	0,00508	56937	56492	63609	22,77	22,60	25,44	4483,23	4448,20	5008,60	23,81	21,83	24,5	0,05	0,03	0,04
38,1	0,00762	102753	93412	101864	41,10	37,36	40,75	5393,88	4903,53	5347,18	35,73	32,75	36,75	0,13	0,12	0,10
50,8	0,01016	149015	117877	146791	59,61	47,15	58,72	5866,72	4640,84	5779,16	47,64	43,67	49	0,20	0,07	0,17
63,5	0,0127	166808	149015	160135	66,72	59,61	64,05	5253,78	4693,38	5043,63	59,56	54,6	61,26	0,20	0,07	0,17
76,2	0,01524	171256	166808	166808	68,50	66,72	66,72	4494,90	4378,15	4378,15	68,35	65,51	66,7	0,11	0,08	0,04
88,9	0,01778	-	177928	-	-	71,17	-	-	4002,88	-	-	71,12	-	-	0,02	-

Esfuerzo de ruptura promedio	68,80 MPa
Error relativo M1	26,62 %
Error relativo M2	13,99 %
Error relativo M3	19,15 %
Error relativo promedio	19,92 %

TABLA 32
MEZCLA CEMENTO Y 17.5% DE ZEOLITA DÍA 4

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad(MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	4903	3432	1471	1,96	1,37	0,59	772,13	540,49	231,64	3,79	3,83	2,16	0,93	1,79	2,67
25,4	0,00508	11277	10296	2452	4,51	4,12	0,98	887,94	810,73	193,03	7,58	7,67	4,32	0,68	0,86	3,41
38,1	0,00762	22064	23044	4413	8,83	9,22	1,77	1158,19	1209,66	231,64	11,38	11,51	6,48	0,29	0,25	2,67
50,8	0,01016	34321	37263	9806	13,73	14,91	3,92	1351,22	1467,04	386,06	15,18	15,35	8,64	0,11	0,03	1,20
63,5	0,0127	47559	51482	24025	19,02	20,59	9,61	1497,92	1621,46	756,68	18,98	19,2	10,8	0,11	0,03	1,20
76,2	0,01524	63739	63739	38734	25,50	25,50	15,49	1672,94	1672,94	1016,63	22,77	23,03	12,97	0,00	0,07	0,12
88,9	0,01778	78448	78448	56385	31,38	31,38	22,55	1764,86	1764,86	1268,49	26,56	26,87	15,13	0,11	0,10	0,16
101,6	0,02032	90706	93157	85803	36,28	37,26	34,32	1785,54	1833,80	1689,03	30,36	30,71	17,29	0,15	0,14	0,33
114,3	0,02286	102963	107866	107866	41,19	43,15	43,15	1801,63	1887,42	1887,42	34,16	34,5	19,45	0,16	0,18	0,50
127	0,0254	117672	120124	120124	47,07	48,05	48,05	1853,10	1891,71	1891,71	37,96	38,4	21,61	0,17	0,20	0,55
139,7	0,02794	132381	134833	-	52,95	53,93	-	1895,22	1930,31	-	41,75	42,23	-	0,19	0,20	-
152,4	0,03048	142187	142187	-	56,87	56,87	-	1865,97	1865,97	-	45,55	46,07	-	0,21	0,22	-

Esfuerzo de ruptura promedio	53,93	MPa
Error relativo M1	25,96	%
Error relativo M2	33,86	%
Error relativo M3	128,15	%
Error relativo promedio	62,65	%

TABLA 33

MEZCLA CEMENTO Y 17.5% DE ZEOLITA DÍA 11

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad(MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	7355	12748	10296	2,94	5,10	4,12	1158,19	2007,53	1621,46	4,61	5,86	5,5	0,57	0,15	0,34
25,4	0,00508	18141	28437	26476	7,26	11,37	10,59	1428,43	2239,17	2084,74	9,27	11,74	11,02	0,28	0,03	0,04
38,1	0,00762	30399	42166	38734	12,16	16,87	15,49	1595,73	2213,43	2033,27	13,85	17,6	16,53	0,14	0,04	0,07
50,8	0,01016	44617	58836	56385	17,85	23,53	22,55	1756,59	2316,38	2219,86	18,47	23,48	22,05	0,03	0,00	0,02
63,5	0,0127	58836	73545	71094	23,53	29,42	28,44	1853,10	2316,38	2239,17	23,1	29,36	27,56	0,03	0,00	0,02
76,2	0,01524	73545	90706	90706	29,42	36,28	36,28	1930,31	2380,72	2380,72	27,7	35,22	33,07	0,02	0,00	0,03
88,9	0,01778	90706	107866	105415	36,28	43,15	42,17	2040,62	2426,68	2371,53	32,34	41,1	38,58	0,06	0,03	0,09
101,6	0,02032	107866	125027	122575	43,15	50,01	49,03	2123,35	2461,15	2412,89	36,96	46,97	44,1	0,11	0,05	0,09
114,3	0,02286	122575	139736	134833	49,03	55,89	53,93	2144,79	2445,07	2359,27	41,58	52,84	49,59	0,14	0,06	0,10
127	0,0254	137284	148071	-	54,91	59,23	-	2161,95	2331,82	-	46,21	58,12	-	0,15	0,05	-
139,7	0,02794	149542	-	-	59,82	-	-	2140,89	-	-	50,82	-	-	0,16	-	-

Esfuerzo de ruptura promedio	57,66 MPa
Error relativo M1	15,39 %
Error relativo M2	4,24 %
Error relativo M3	8,81 %
Error relativo promedio	9,48 %

TABLA 34

MEZCLA CEMENTO Y 17.5% DE ZEOLITA DÍA 18

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad(MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	25798	17792	44480	10,32	7,12	17,79	4062,74	2801,89	7004,72	12,71	9,68	17,96	0,23	0,36	0,01
25,4	0,00508	62272	44480	90739	24,91	17,79	36,30	4903,31	3502,36	7144,82	25,48	19,1	35,93	0,02	0,07	0,01
38,1	0,00762	102304	97856	128992	40,92	39,14	51,60	5370,29	5136,80	6771,23	38,15	29,05	50,58	0,07	0,26	0,02
50,8	0,01016	144560	144560	151232	57,82	57,82	60,49	5691,34	5691,34	5954,02	50,87	38,73	59,15	0,12	0,33	0,02
63,5	0,0127	162352	-	155680	64,94	-	62,27	5113,45	-	4903,31	62,48	-	62,07	0,12	-	0,02

Esfuerzo de ruptura promedio	61,09 MPa
Error relativo M1	11,26 %
Error relativo M2	25,54 %
Error relativo M3	1,67 %
Error relativo promedio	12,82 %

TABLA 35

MEZCLA CEMENTO Y 17.5% DE ZEOLITA DÍA 25

MARCA(10 ⁻³ cm)	DEFORMACION	FUERZA(N)			$\sigma_{\text{Experimental}}$ (MPa)			Modulo de Elasticidad(MPa)			$\sigma_{\text{Teórico}}$ (MPa)			Error relativo		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
12,7	0,00254	12454,4	14234	18682	4,98	5,69	7,47	1961,32	2241,51	2941,98	10,53	10,94	11,08	1,11	0,92	0,48
25,4	0,00508	49817,6	56045	62272	19,93	22,42	24,91	3922,65	4412,98	4903,31	21,07	21,89	22,18	0,06	0,02	0,11
38,1	0,00762	88960	91629	92518	35,58	36,65	37,01	4669,82	4809,91	4856,61	31,61	32,83	33,28	0,11	0,10	0,10
50,8	0,01016	128992	124544	111200	51,60	49,82	44,48	5078,43	4903,31	4377,95	42,15	43,78	44,38	0,18	0,12	0,00
63,5	0,0127	162352	164576	151232	64,94	65,83	60,49	5113,45	5183,50	4763,21	52,69	54,74	55,48	0,18	0,12	0,00
76,2	0,01524	177920	177920	166800	71,17	71,17	66,72	4669,82	4669,82	4377,95	63,22	65,68	64,79	0,19	0,17	0,08

Esfuerzo de ruptura promedio	69,69 MPa
Error relativo M1	30,63 %
Error relativo M2	24,34 %
Error relativo M3	13,01 %
Error relativo promedio	22,66 %

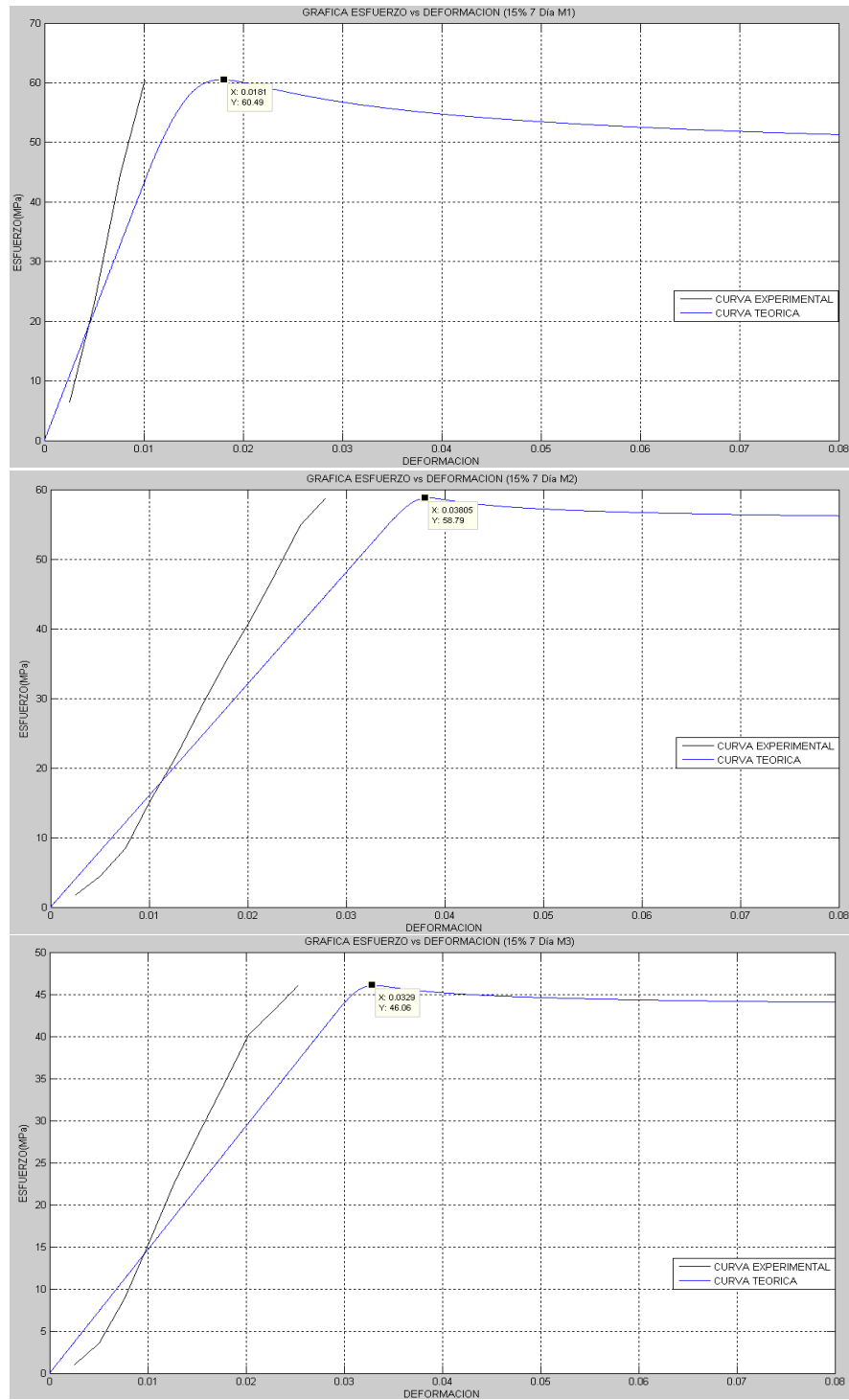


FIGURA A. GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 15% A LOS 7 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

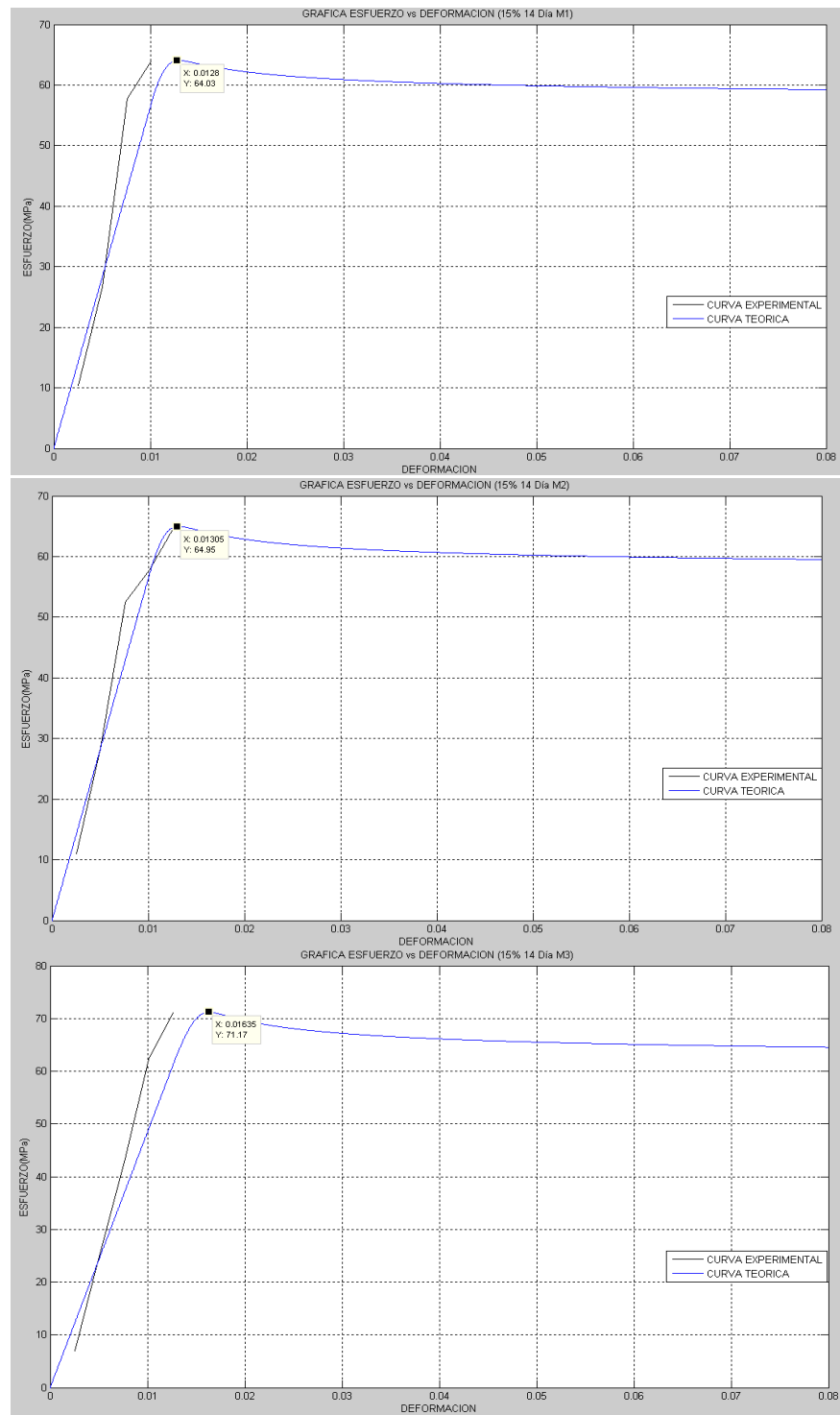


FIGURA B. GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 15% A LOS 14 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

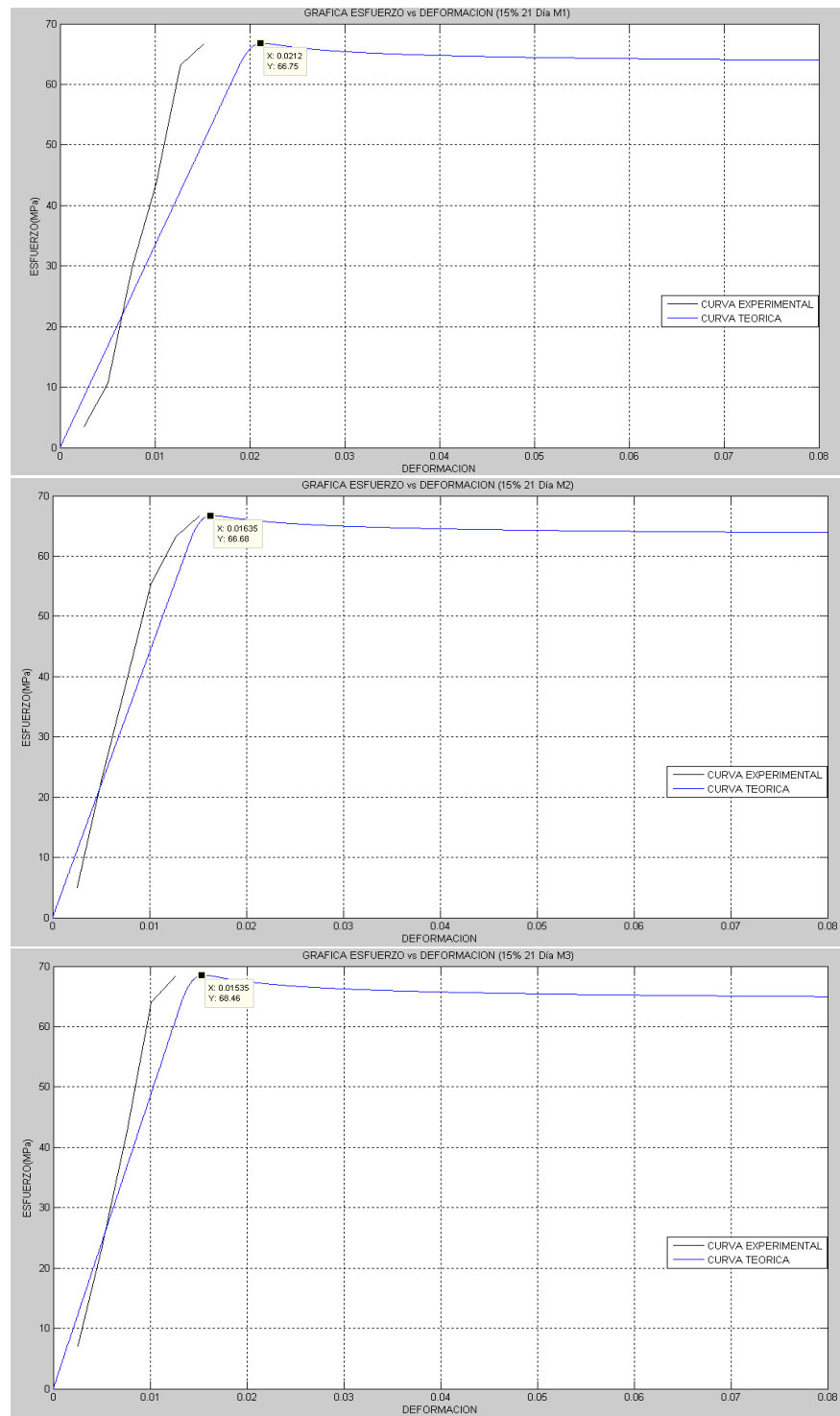


FIGURA C: GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 15% A LOS 21 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

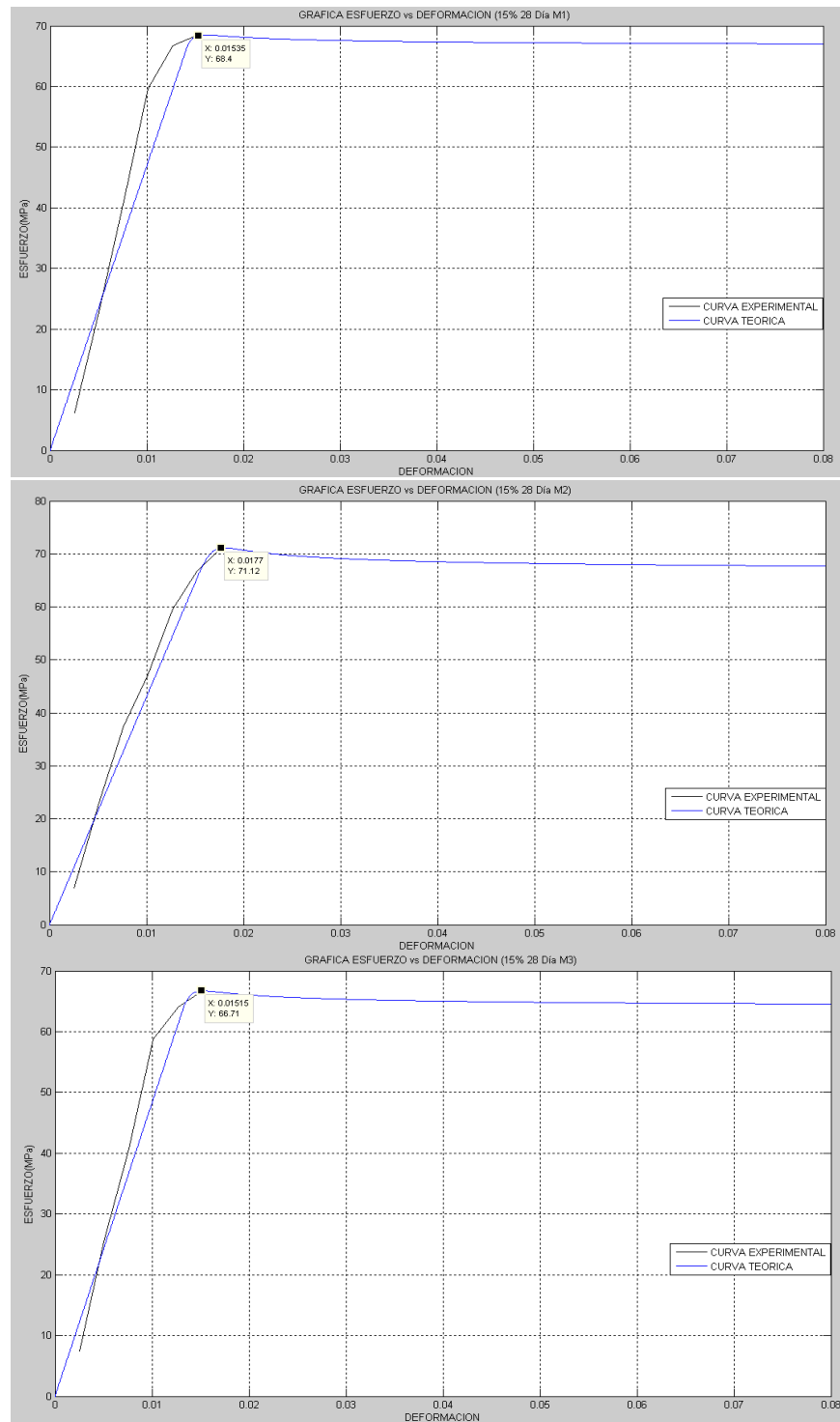


FIGURA D. GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 15% A LOS 28 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

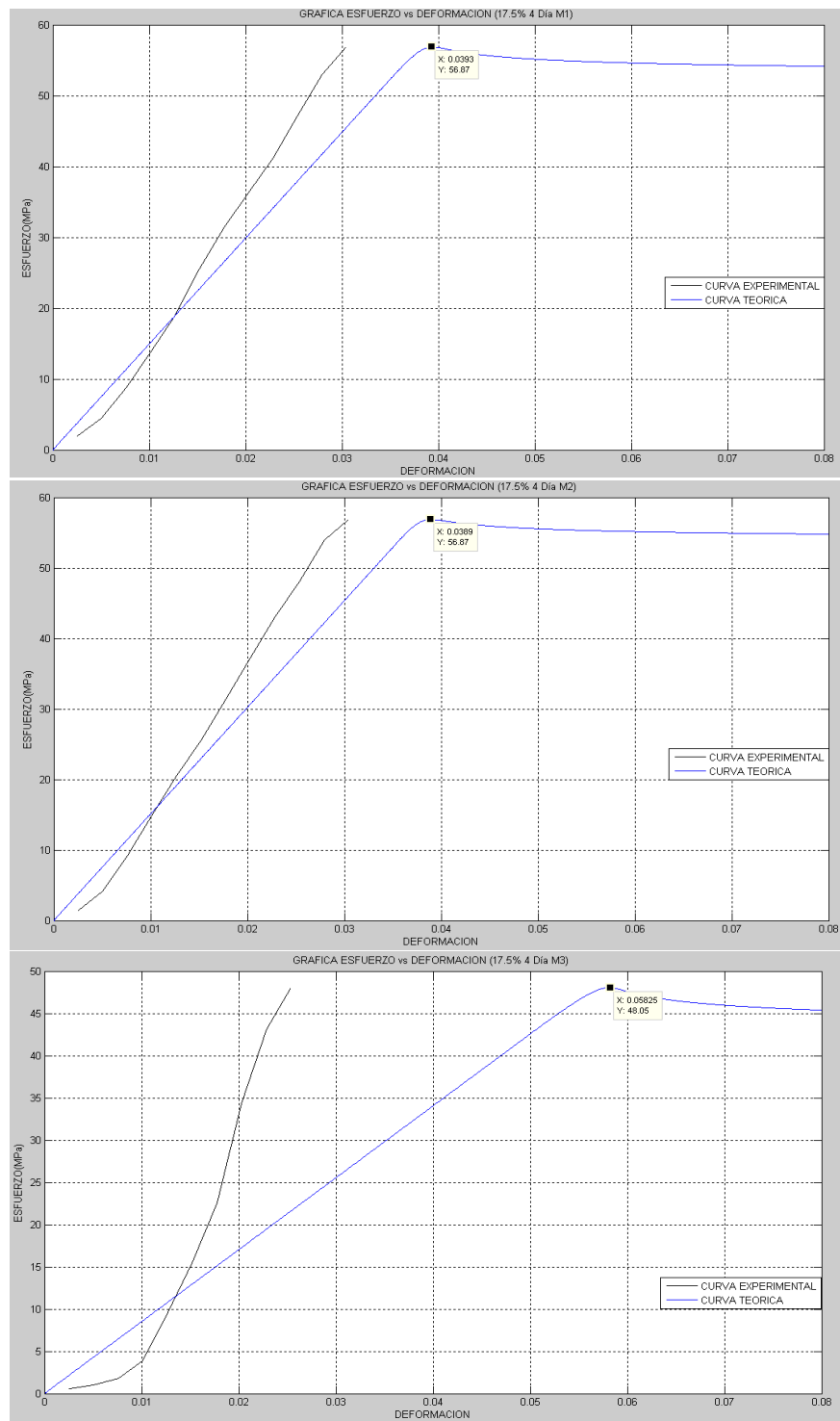


FIGURA E. GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 17,5% A LOS 4 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

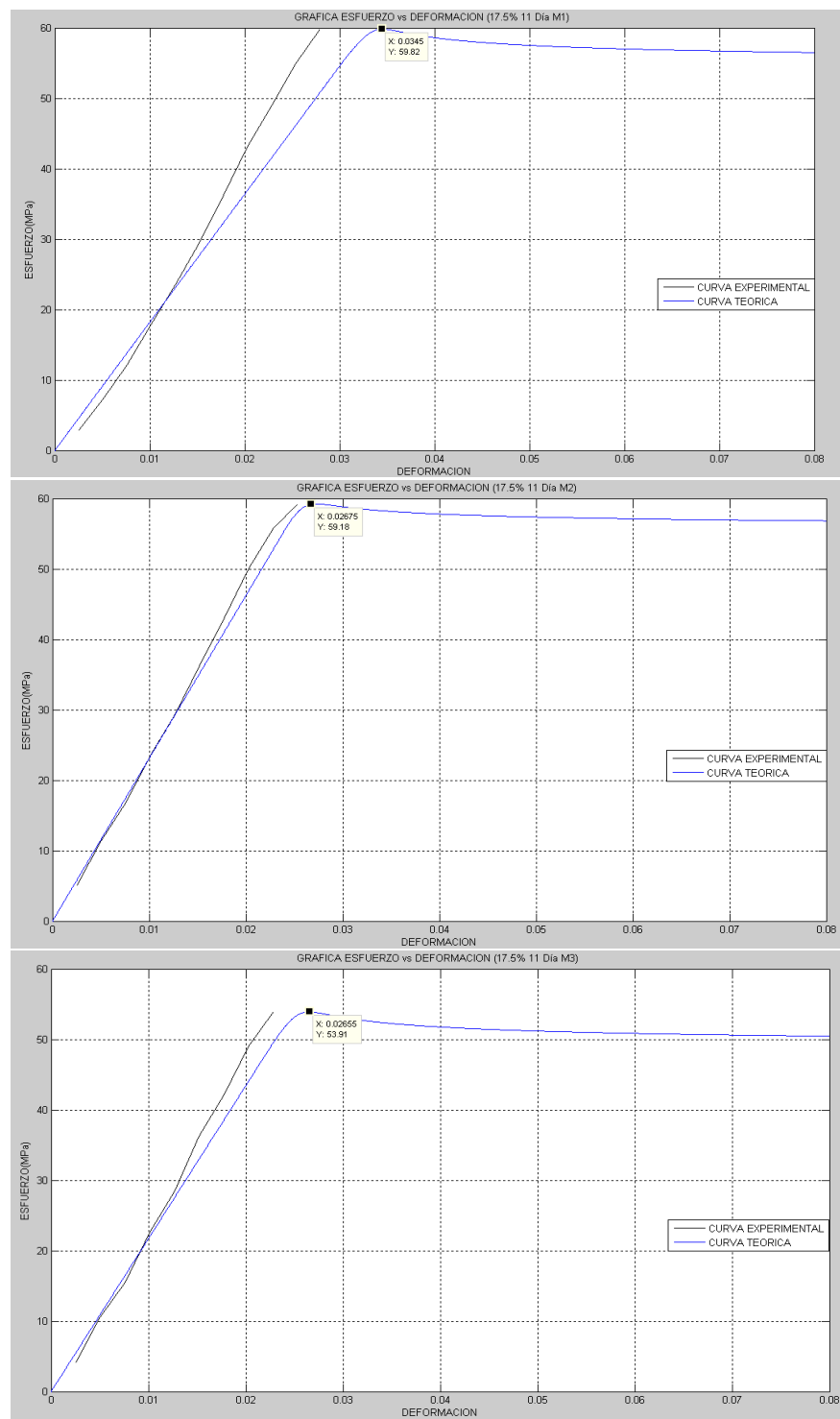


FIGURA F. GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 17,5% A LOS 11 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

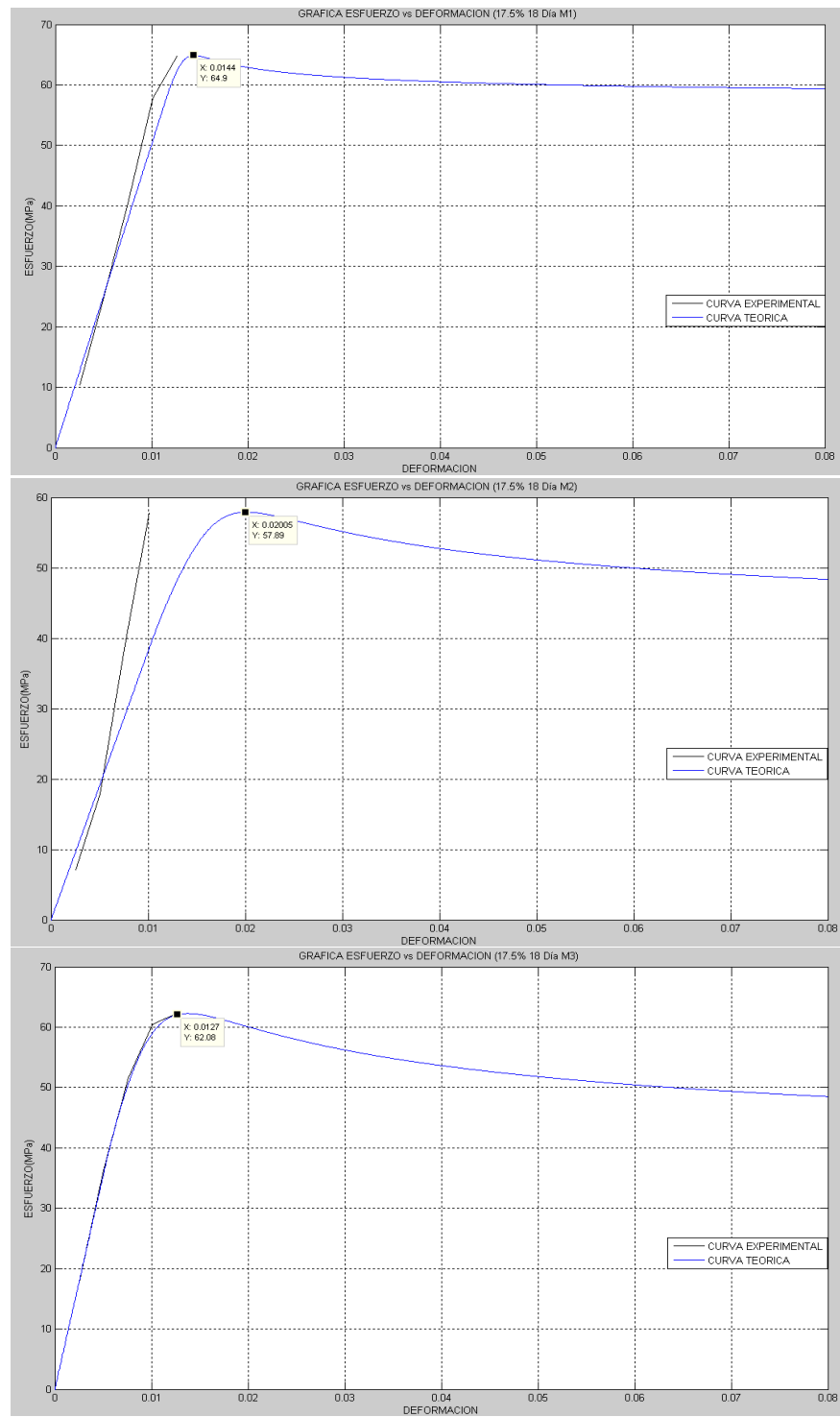


FIGURA G. GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 17,5% A LOS 18 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

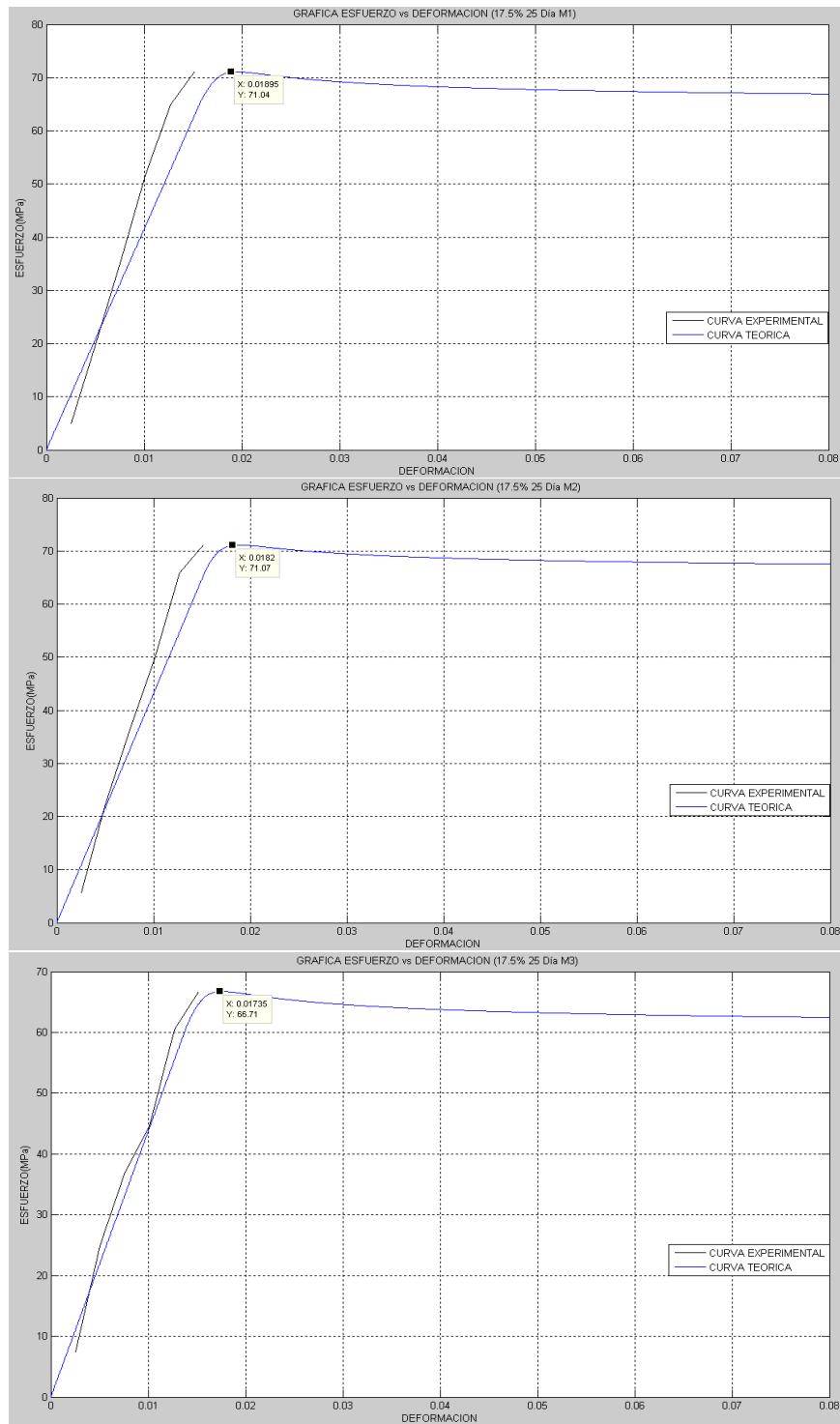


FIGURA H. GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACION MEZCLA 17,5% A LOS 25 DIAS DE CURADO M1-M2-M3

alfa =	0,05	grados de libertad del numerador												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	60	100	10000
1	161,45	199,5	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88	248,02	252,2	253,04	254,3
2	18,513	19	19,164	19,247	19,296	19,329	19,353	19,371	19,385	19,396	19,446	19,479	19,486	19,496
3	10,128	9,5521	9,2766	9,1172	9,0134	8,9407	8,8867	8,8452	8,8123	8,7855	8,6602	8,572	8,5539	8,5267
4	7,7086	6,9443	6,5914	6,3882	6,2561	6,1631	6,0942	6,041	5,9988	5,9644	5,8025	5,6878	5,664	5,6284
5	6,6079	5,7861	5,4094	5,1922	5,0503	4,9503	4,8759	4,8183	4,7725	4,7351	4,5581	4,4314	4,4051	4,3654
6	5,9874	5,1432	4,7571	4,5337	4,3874	4,2839	4,2067	4,1468	4,099	4,06	3,8742	3,7398	3,7117	3,6693
7	5,5915	4,7374	4,3468	4,1203	3,9715	3,866	3,7871	3,7257	3,6767	3,6365	3,4445	3,3043	3,2749	3,2302
8	5,3176	4,459	4,0662	3,8379	3,6875	3,5806	3,5005	3,4381	3,3881	3,3472	3,1503	3,0053	2,9747	2,9281
9	5,1174	4,2565	3,8625	3,6331	3,4817	3,3738	3,2927	3,2296	3,1789	3,1373	2,9365	2,7872	2,7556	2,7072
10	4,9646	4,1028	3,7083	3,478	3,3258	3,2172	3,1355	3,0717	3,0204	2,9782	2,774	2,6211	2,5884	2,5384
11	4,8443	3,9823	3,5874	3,3567	3,2039	3,0946	3,0123	2,948	2,8962	2,8536	2,6464	2,4901	2,4566	2,405
12	4,7472	3,8853	3,4903	3,2592	3,1059	2,9961	2,9134	2,8486	2,7964	2,7534	2,5436	2,3842	2,3498	2,2967
13	4,6672	3,8056	3,4105	3,1791	3,0254	2,9153	2,8321	2,7669	2,7144	2,671	2,4589	2,2966	2,2614	2,207
14	4,6001	3,7389	3,3439	3,1122	2,9582	2,8477	2,7642	2,6987	2,6458	2,6022	2,3879	2,2229	2,187	2,1313
15	4,5431	3,6823	3,2874	3,0556	2,9013	2,7905	2,7066	2,6408	2,5876	2,5437	2,3275	2,1601	2,1234	2,0664
16	4,494	3,6337	3,2389	3,0069	2,8524	2,7413	2,6572	2,5911	2,5377	2,4935	2,2756	2,1058	2,0685	2,0102
17	4,4513	3,5915	3,1968	2,9647	2,81	2,6987	2,6143	2,548	2,4943	2,4499	2,2304	2,0584	2,0204	1,961
18	4,4139	3,5546	3,1599	2,9277	2,7729	2,6613	2,5767	2,5102	2,4563	2,4117	2,1906	2,0166	1,978	1,9175
19	4,3808	3,5219	3,1274	2,8951	2,7401	2,6283	2,5435	2,4768	2,4227	2,3779	2,1555	1,9795	1,9403	1,8787
20	4,3513	3,4928	3,0984	2,8661	2,7109	2,599	2,514	2,4471	2,3928	2,3479	2,1242	1,9464	1,9066	1,8438
21	4,3248	3,4668	3,0725	2,8401	2,6848	2,5727	2,4876	2,4205	2,3661	2,321	2,096	1,9165	1,8761	1,8124
22	4,3009	3,4434	3,0491	2,8167	2,6613	2,5491	2,4638	2,3965	2,3419	2,2967	2,0707	1,8894	1,8486	1,7838
23	4,2793	3,4221	3,028	2,7955	2,64	2,5277	2,4422	2,3748	2,3201	2,2747	2,0476	1,8648	1,8234	1,7577
24	4,2597	3,4028	3,0088	2,7763	2,6207	2,5082	2,4226	2,3551	2,3002	2,2547	2,0267	1,8424	1,8005	1,7338
25	4,2417	3,3852	2,9912	2,7587	2,603	2,4904	2,4047	2,3371	2,2821	2,2365	2,0075	1,8217	1,7794	1,7117
26	4,2252	3,369	2,9752	2,7426	2,5868	2,4741	2,3883	2,3205	2,2655	2,2197	1,9898	1,8027	1,7599	1,6913
27	4,21	3,3541	2,9603	2,7278	2,5719	2,4591	2,3732	2,3053	2,2501	2,2043	1,9736	1,7851	1,7419	1,6724
28	4,196	3,3404	2,9467	2,7141	2,5581	2,4453	2,3593	2,2913	2,236	2,19	1,9586	1,7689	1,7251	1,6548
29	4,183	3,3277	2,934	2,7014	2,5454	2,4324	2,3463	2,2782	2,2229	2,1768	1,9446	1,7537	1,7096	1,6384
30	4,1709	3,3158	2,9223	2,6896	2,5336	2,4205	2,3343	2,2662	2,2107	2,1646	1,9317	1,7396	1,695	1,623
40	4,0847	3,2317	2,8387	2,606	2,4495	2,3359	2,249	2,1802	2,124	2,0773	1,8389	1,6373	1,5892	1,5098
50	4,0343	3,1826	2,79	2,5572	2,4004	2,2864	2,1992	2,1299	2,0733	2,0261	1,7841	1,5757	1,5249	1,4392
60	4,0012	3,1504	2,7581	2,5252	2,3683	2,2541	2,1665	2,097	2,0401	1,9926	1,748	1,5343	1,4814	1,3903
70	3,9778	3,1277	2,7355	2,5027	2,3456	2,2312	2,1435	2,0737	2,0166	1,9689	1,7223	1,5046	1,4498	1,354
80	3,9604	3,1108	2,7188	2,4859	2,3287	2,2142	2,1263	2,0564	1,9991	1,9512	1,7032	1,4821	1,4259	1,3259
90	3,9469	3,0977	2,7058	2,4729	2,3157	2,2011	2,1131	2,043	1,9856	1,9376	1,6883	1,4645	1,407	1,3032
100	3,9362	3,0873	2,6955	2,4626	2,3053	2,1906	2,1025	2,0323	1,9748	1,9267	1,6764	1,4504	1,3917	1,2845
200	3,8884	3,0411	2,6498	2,4168	2,2592	2,1441	2,0556	1,9849	1,9269	1,8783	1,6233	1,3856	1,3206	1,1903
300	3,8726	3,0258	2,6347	2,4017	2,2441	2,1288	2,0402	1,9693	1,9112	1,8623	1,6057	1,3634	1,2958	1,1521
400	3,8648	3,0183	2,6272	2,3943	2,2366	2,1212	2,0325	1,9616	1,9033	1,8544	1,5969	1,3522	1,2831	1,1303
500	3,8601	3,0138	2,6227	2,3898	2,232	2,1167	2,0279	1,9569	1,8986	1,8496	1,5916	1,3455	1,2753	1,1159
600	3,857	3,0107	2,6198	2,3868	2,229	2,1137	2,0248	1,9538	1,8955	1,8465	1,5881	1,341	1,2701	1,1055
700	3,8548	3,0086	2,6176	2,3847	2,2269	2,1115	2,0226	1,9516	1,8932	1,8442	1,5856	1,3377	1,2664	1,0976
800	3,8531	3,007	2,616	2,3831	2,2253	2,1099	2,021	1,95	1,8916	1,8425	1,5837	1,3353	1,2635	1,0912
900	3,8518	3,0057	2,6148	2,3818	2,224	2,1086	2,0197	1,9487	1,8903	1,8412	1,5822	1,3334	1,2613	1,0861
1000	3,8508	3,0047	2,6138	2,3808	2,2231	2,1076	2,0187	1,9476	1,8892	1,8402	1,5811	1,3318	1,2596	1,0818
1500	3,8477	3,0017	2,6108	2,3779	2,2201	2,1046	2,0157	1,9446	1,8861	1,837	1,5775	1,3273	1,2542	1,0675
2000	3,8461	3,0002	2,6094	2,3764	2,2186	2,1031	2,0142	1,943	1,8846	1,8354	1,5758	1,325	1,2516	1,0593
10000	3,8424	2,9966	2,6058	2,3728	2,215	2,0995	2,0105	1,9393	1,8808	1,8316	1,5716	1,3194	1,2451	1,0334

TABLA A. TABLA FISHER

DETRMINACION DEL MEJOR TRATAMIENTO (METODO DE TUKEY)

Para determinar el mejor tratamiento en comparación con el control, use el Método de Tukey. Los resultaos obtenidos del análisis los mostrare a continuación y los explicare brevemente.

El Método de Tukey compara las medias de todos los porcentajes de Zeolita obtenidos para determinar cual es el valor que posee más variación.

Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals

Response Variable Ruptura

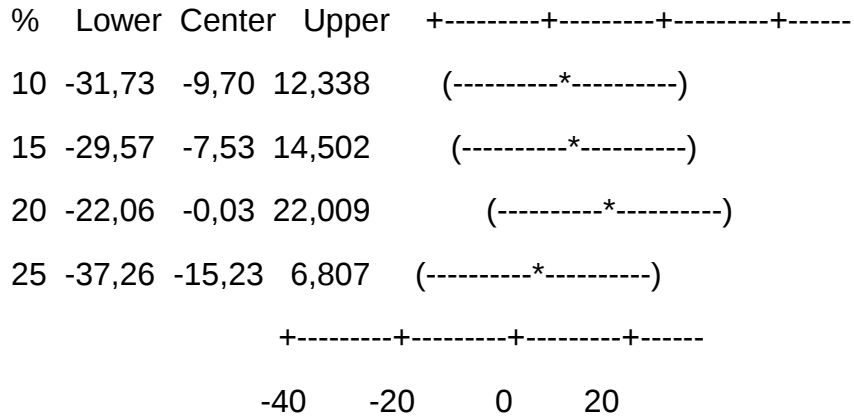
All Pairwise Comparisons among Levels of %

% = 0 subtracted from:

%	Lower	Center	Upper	+-----+-----+-----+-----
5	-24,40	-2,37	19,667	(-----*-----)
10	-34,10	-12,06	9,971	(-----*-----)
15	-31,93	-9,90	12,134	(-----*-----)
20	-24,43	-2,39	19,642	(-----*-----)
25	-39,63	-17,59	4,439	(-----*-----)
				+-----+-----+-----+-----
	-40	-20	0	20

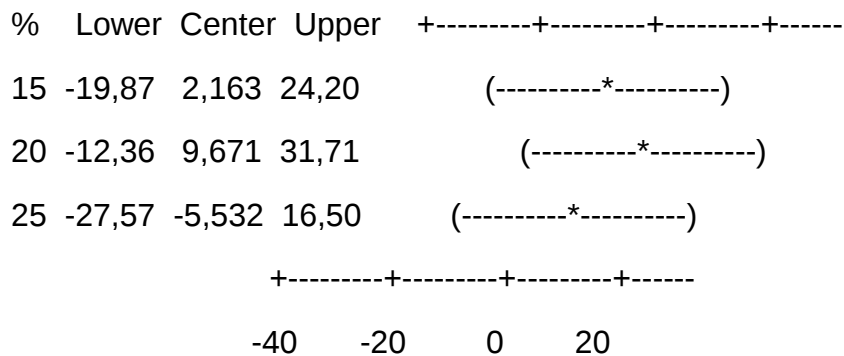
En este caso compara el 0% con 5, 10,15,20 y 25% de Zeolita, se observa en la columna "CENTER" que la diferencia de medias es mayor para los porcentajes con 5 y 20% , esto ocurre por que estos valores poseen una mejor Resistencia a la compresión en comparación con el 0%, este mismo análisis se repite variando el porcentaje que se desee evaluar. Debemos seguir comparando para obtener el mejor tratamiento.

% = 5 subtracted from:



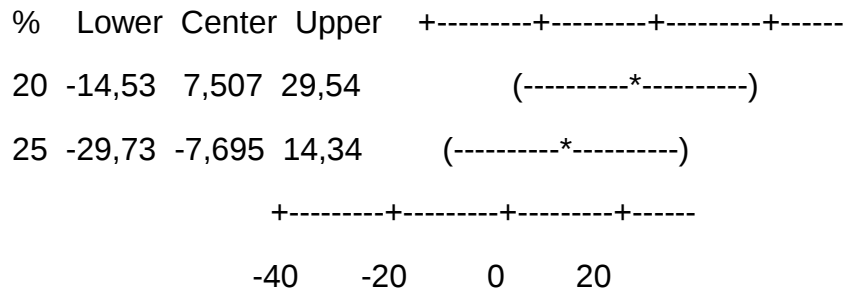
Ahora se compara el 5% con el resto y se aprecia como el 20% posee mejor resistencia a la compresión que el 5%.

% = 10 subtracted from:



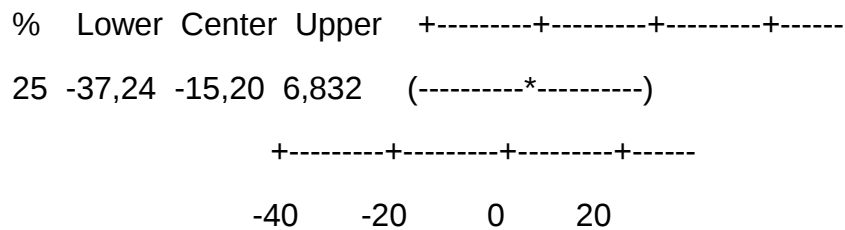
Ahora se compara el 10% con el resto y se aprecia como el 25% posee mejor resistencia a la compresión que al 10%.

% = 15 subtracted from:



Ahora se compara el 15% con el resto y se aprecia como el 25% posee mejor resistencia a la compresión que el 15%%.

% = 20 subtracted from:



Ahora se compara el 20% con el resto y se aprecia como el 20% posee mejor resistencia a la compresión que el 25%.

Al mantener los días constantes y al realizar el análisis podemos establecer que el mejor tratamiento en comparación con el resto es la adición de 20% de Zeolita.

Ahora realizare el análisis manteniendo los porcentajes de zeolita constantes.

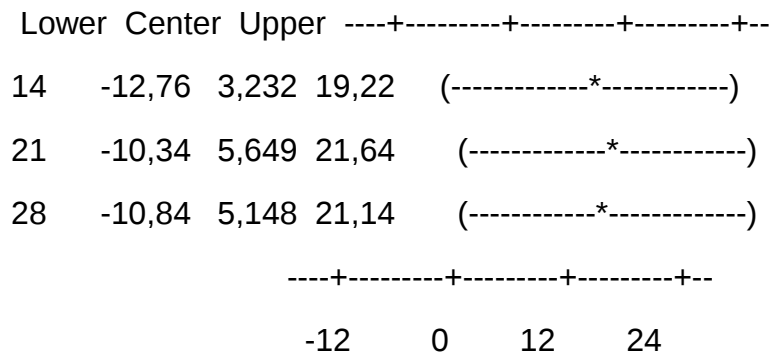
Tukey 95,0% Simultaneous Confidence Intervals

Response Variable Ruptura

All Pairwise Comparisons among Levels of Dias de curado

Dias de curado = 7 subtracted from:

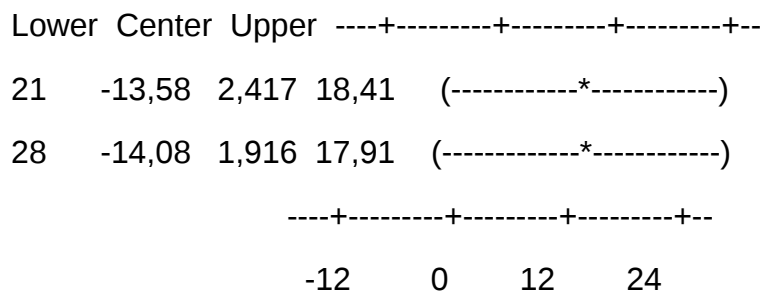
Dias De curado



Notamos que la diferencia de medias para los días 14 , 21 y 28 es mayor que para 7 días.

Dias de curado = 14 subtracted from:

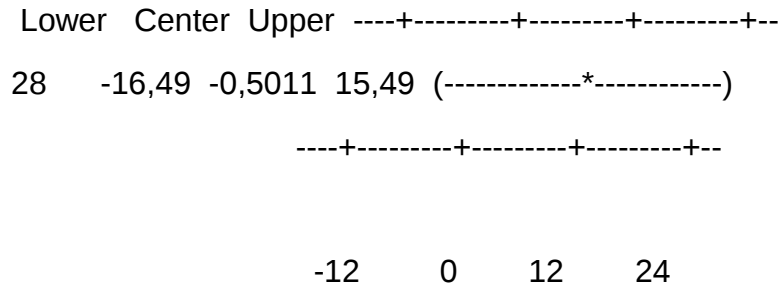
Dias de curado



Al comparar el día 14 con el 21 y el 28, podemos notar que existe una diferencia menor para el día 28 , esto quiere decir que el día 28 se observa mayor resistencia a la compresión que lo0s días 14 y 21.

Dias de curado = 21 subtracted from:

Dias De curado



Se puede apreciar como el día 28 ofrece mejor resistencia a la compresión que el día 21 en promedio.

Entonces puedo establecer que a los 28 días es cuando se dan los mayores resultados de resistencia a la compresión.

PREPARACION Y RUPTURA DE MUESTRAS



DESCRIPCION ALGORITMO EN MATLAB.

Este código trata de representar de la mejor manera posible el comportamiento del endurecimiento no lineal de un material.

```

clc;
clear all;
E=2000 ; → Módulo de YOUNG
m=0.03;
a=1;
de=0.00005; → Delta épsilon

epsilon=0:de:1; → Matriz de épsilon

ntotal=1/de; → Número de pasos totales

sigma=zeros(ntotal,1); → Matriz de sigma

sigma(1,1)=0; → Sigma inicial

sigmay=zeros(ntotal,1); → Matriz del esfuerzo de fluencia

sigmay(1,1)=100; → Esfuerzo de fluencia inicial

tol=1e-15; → Tolerancia

L(1,1)=0; → valor de Lambda inicial para el paso n=1

for n=1:ntotal

    st(n,1)=sigma(n,1)+E*de; → Sigma trial
    Ft(n,1)=abs(st(n,1))-sigmay(n,1); → Fuerza trial

    if Ft(n,1)>0; → %DEFORMACION PLASTICA%

        kdl(1,1)=tol; → Delta lambda de la iteración "k"
        for k=1:20

            KL(k,1)=kdl(k,1)+L(n,1); → Lambda de la iteración "k"
            H(n,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/KL(k,1))*((m-KL(k,1))/(m+KL(k,1))^2);

            r(k,1)=Ft(n,1)-kdl(k,1)*(E+H(n,1)); → Residuo de la iteración "k"

            nr(k,1)=norm(r(k,1)); → Norma del residuo en "k"

```

```

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

```

```

A=-

```

```

1/2*(2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^2*kdl(k,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(
3/2)*m^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)^2+12*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)*
L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)^3+6*E*(m*KL(
k,1))^(3/2)*kdl(k,1)^2*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,1))^(
3/2)*L(n,1)^3+kdl(k,1)*m^4*a*sigmay(1,1)+2*m^4*a*sigmay(1,1)*L(n,1)-
3*kdl(k,1)*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^2-2*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^3-
6*kdl(k,1)^2*m^3*a*sigmay(1,1)-
6*kdl(k,1)*m^3*a*sigmay(1,1)*L(n,1)+kdl(k,1)^3*m^2*a*sigmay(1,1))/(m+kdl(k,1)+L(n,1))
^3/(m*KL(k,1))^(3/2);
rdl(k+1,1)=-(r(k,1)/A);
kdl(k+1,1)=kdl(k,1)+rdl(k+1,1); ➔ Jacobiano en función del lambda y delta lambda
en “k”, del esfuerzo de fluencia inicial y del lambda inicial

```

```

end

```

```

dl(n+1,1)=kdl(k,1); ➔ Delta lambda de “n”

```

```

L(n+1,1)=KL(k,1); ➔ Lambda de “n”

```

```

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

```

```

else

```

```

    L(n+1,1)=0;
    sigma(n+1,1)=st(n,1);
    sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1);

```

```

end

```

```

end

```

```

a=size(sigma)
b=size(epsilon)
plot(epsilon',sigma)

```

BIBLIOGRAFIA

- [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.

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

- [10] ASTM, "STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF HYDRAULIC CEMENT MORTARS", American Society for Testing and Materials, Mayo 2008.

[11] Zelic,J.Rosic,D.Krstulović,R."A MATHEMATICAL MOEL FOR PREDICTION OF COMPRESSIVE STRENGTH IN CEMENT-SILICA FUME BLENDS",

www.sciencedirect.com, Mayo 2008.

[12] Nassif,H.Najm,H.Suksawang,N."EFFECT OF POZZOLANIC MATERIALS AND CURING METHODS ON THE ESLASTIC MODULUS OF HPC",

www.sciencedirect.com, Mayo 2008.

[13] Petkova,V.Ivanov,Y."THE USE OF MATHEMATICAL MODELLING IN THE COMPOSITION OF A COMPOSITE MATERIAL", www.sciencedirect.com, Mayo 2008.

[14] Robles, D. "REGRESION MULTIPLE",

<http://www.monografias.com/trabajos30/regresion-multiple/regresion-multiple.shtml>, Junio 2008.

[15] Adams N. y Chrisman J. "OPCIONES Y SOLUCIONES PARA EL CURADO Y SELLADO DEL CONCRETO ",

<http://www.tamms.com/filesshare/elit/curingsealing.pdf>, Julio, 2008.

[16] Solís R. "INFLUENCIA DEL CURADO HÚMEDO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO ",

<http://www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen9/influencia.pdf>, Julio, 2008.

- [17] Solis R. "¿QUE?, ¿POR QUE? Y ¿COMO? CURADO DEL CONCRETO EN EL LUGAR ", www.nrmca.org. Julio, 2008.