

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Estudio y simulación del comportamiento del cemento
Portland tipo I, con adición del 20% de zeolita
Ecuatoriana mediante el curado al aire”

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Jorge Octavio Jiménez Gaibor

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2009

AGRADECIMIENTO

A DIOS por guiarme en el camino. A la ESPOL por darme formación necesaria para poder ejercerme en el ámbito profesional, al Ing. Rodrigo Perugachi por su colaboración y paciencia en la elaboración de esta tesis.

DEDICATORIA

A mis padres, hermanas y familia, por brindarme total apoyo y confianza en mis proyectos.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Mauricio Cornejo M.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Juan Pindo M.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

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

Jorge Octavio Jiménez Gaibor

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1.1. Metodología de la Tesi.....	7
FIGURA 2.1. Esquema de las moléculas que forman una celda unitaria.....	22
FIGURA 3.1. Parámetros de regresión.	35
FIGURA 3.2. Desagregación de la zeolita.....	38
FIGURA 3.3 Molino de mandíbulas.....	38
FIGURA 3.4. Adición de la zeolita.....	39
FIGURA 3.5. Obtención de la zeolita en el molino de mandíbulas.....	39
FIGURA 3.6. Molino de tornillo.....	40
FIGURA 3.7. Zeolita trabajada en molino de tornillo.....	40
FIGURA 3.8. Material cuarteado.....	41
FIGURA 3.9 Tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo.....	41
FIGURA 3.10. Molino de discos.....	42
FIGURA 3.11. Segundo cuarteo de la zeolita.....	42
FIGURA 3.12. Segunda toma de peso.....	43
FIGURA 3.13. Nuevo tamizado de la zeolita.....	43
FIGURA 3.14. Zeolita en el molino de bolas.....	44
FIGURA 3.15. Zeolita obtenida después de 45 mit.	44
FIGURA 3.16. Tamizado # 325.....	45
FIGURA 3.17 Proceso de homogeneización zeolita + cemento tipo I.....	47

FIGURA 3.18. Homogeneización cemento+zeolita+agua.....	47
FIGURA 3.19. Preparación de moldes	48
FIGURA 3.20. Orden de aplastamiento.....	49
FIGURA 3.21. Primera capa de aplastamiento	50
FIGURA 3.22. Compactamiento de los moldes.....	50
FIGURA 3.23. Almacenamiento de los moldes	51
FIGURA 3.24. Balanza eléctrica.....	52
FIGURA 3.25. Moldes	55
FIGURA 3.26. Mezclador-tazón-paleta	55
FIGURA 3.27. Máquina de prueba.....	56
FIGURA 3.28. Curva esfuerzo deformacion.....	59
FIGURA 4.1. Histograma de esfuerzos para pastas de cemento con un 20% de Zeolita.....	72
FIGURA 4.2. Histograma de esfuerzos para pastas de cemento con un 22.5% de Zeolita.....	72
FIGURA 4.3. Residuos contra número de casos para pastas de cemento con una concentración de 20% de Zeolita.....	73
FIGURA 4.4. Residuos contra número de casos para pastas de cemento con una concentración de 22.5% de Zeolita.....	74
FIGURA 4.5. Probabilidad normal de los residuos para pastas de cemento con 20% de Zeolita.....	75
FIGURA 4.6. Probabilidad normal de los residuos para pastas de cemento con 22.5% de Zeolita	75
FIGURA 4.7. Prueba de significancia para esfuerzo último en pasta de cemento con 20% de Zeolita.....	76

FIGURA 4.8. Medias de la pasta cemento con 20% de zeolita, curado al aire.	78
FIGURA 4.9. Grafico Esfuerzo Último vs. Días (20% de zeolita)	79
FIGURA 4.10. Prueba de significancia para esfuerzo último en pasta de cemento con 22.5% de zeolita.	80
FIGURA 4.11 Medias de la pasta cemento con 22.5% de zeolita, curado al aire	80
FIGURA 4.12. Grafico Esfuerzo Último vs. Días (22.5% de zeolita)	81
FIGURA 4.13. Distribución normal de datos en análisis grupal (0-5-10-15- 20-25% Zeolita).....	84
FIGURA 4.14. Probabilidad normal de los residuos para pastas de cemento y diferentes porcentajes de Zeolita incluyendo el patrón.....	85
FIGURA 4.15. Residuos contra Número de casos para pastas de cemento y diferentes concentraciones de Zeolita incluyendo el patrón.....	85
FIGURA 4.16. Distribución Normal de datos en análisis grupal (0-7.5-12.5- 17.5-22.5-27.5% Zeolita).....	88
FIGURA 4.17. Probabilidad Normal de los residuos para pastas de cemento con diferentes porcentajes de Zeolita de validación incluyendo el patrón.	89
FIGURA 4.18. Análisis de covarianza de dos factores para el experimento	91
FIGURA 4.19. Análisis de covarianza de dos factores para la validación	91
FIGURA 4.20. Media de los tratamientos para los factores tiempo de curado y (0-5-10-15-20-25) % de zeolita.....	92

FIGURA 4.21. Media de los tratamientos para los factores tiempo de curado y (0-7.5-12.5-17.5-22.5-27.5) % de zeolita.....	92
FIGURA 4.22. Esfuerzo a la compresión para los factores tiempo de curado y porcentajes de zeolita.....	93
FIGURA 4.23. Esfuerzo a la compresión para los factores tiempo de curado y porcentajes de zeolita.....	93
FIGURA 4.24. Esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempos de curado	94
FIGURA 4.25. Curvas de nivel del esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempos de curado	95
FIGURA 4.26. Superficie de respuesta del esfuerzo de fluencia en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita	96
FIGURA 4.27. Curvas de nivel para el esfuerzo de fluencia en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	96
FIGURA 4.28. Superficie de respuesta del modulo de elasticidad en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita	97
FIGURA 4.29. Curvas de nivel para el modulo de elasticidad en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita	97
FIGURA 4.30. Superficie de respuesta de la deformación máxima en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita	98
FIGURA 4.31. Curvas de nivel para la deformación máxima en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	98
FIGURA 4.32. Superficie de respuesta del parámetro “a” en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.....	99

FIGURA 4.33. Curvas de nivel para el parámetro “a” en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita	99
FIGURA 4.34. Superficie de respuesta de la deformación inelástica total (parámetro “m”) en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita	100
FIGURA 4.35. Curvas de nivel para la deformación inelástica total (parámetro “m”) en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita	100
FIGURA 4.36. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 7 días de curado.....	102
FIGURA 4.37. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 14 días de curado.....	104
FIGURA 4.38. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 21 días de curado.....	105
FIGURA 4.39. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 28 días de curado.....	106
FIGURA 4.40. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 4 días de curado.....	108
FIGURA 4.41. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 11 días de curado.....	109
FIGURA 4.42. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 18 días de curado.....	110
FIGURA 4.43. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 25 días de curado.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1 Composiciones principales del cemento Pórtland.....	14
TABLA 2 Características generales de los materiales puzolánicos.....	17
TABLA 3 Características generales de las zeolitas.....	24
TABLA 4 Formato de toma de datos de resistencia a la compresión con respecto al tiempo de curado.	30
TABLA 5 Matriz de diseño.....	31
TABLA 6 Matriz de diseño para la validacion.	32
TABLA 7 Cantidades para la producción de morteros según la norma astm c 109/c 109m – 02.	37
TABLA 8 Relaciones para la mezcla con 20% de zeolita.....	46
TABLA 9 Relaciones para la mezcla con 22.5% de zeolita.....	46
TABLA 10 Tolerancia permitida en los moldes de las muestras.	54
TABLA 11 Variacion permitida en funcion de la edad.....	54
TABLA 12 Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 20% de zeolita ensayadas a los 7 dias.....	64
TABLA 13 Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 20% de zeolita ensayadas a los 14 dias.....	64
TABLA 14 Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 20% de zeolita ensayadas a los 21 dias.....	65

TABLA 15	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 20% de zeolita ensayadas a los 28 días	66
TABLA 16	Resultado general para cada muestra de 20% de zeolita a los días correspondientes de curado.....	66
TABLA 17	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 22.5% de zeolita ensayadas a los 4 días	67
TABLA 18	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 22.5% de zeolita ensayadas a los 11 días	67
TABLA 19	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 22.5% de zeolita ensayadas a los 18 días	68
TABLA 20	Datos experimentales y condiciones ambientales para las muestras de 22.5% de zeolita ensayadas a los 25 días	69
TABLA 21	Resultado general para cada muestra de 22.5% de zeolita a los días correspondientes de curado	69
TABLA 22	Esfuerzos de compresion para 20% de zolita con sus respectivos días de curado.....	71
TABLA 23	Esfuerzos de compresion para 22.5% de zeolita con sus respectivos días de curado.....	71
TABLA 24	Análisis de varianza 20% zeolita.....	78
TABLA 25	Datos de esfuerzo máximo de compresión para el control y diferentes porcentaje de zeolita a diferentes días de curado.....	82
TABLA 26	Errores estándar e intervalos de confianza del esfuerzo máximo para cada porcentaje de zeolita y día de curado.....	82

TABLA 27	Datos de esfuerzo máximo de compresión para el control y diferentes porcentaje de zeolita para la validacion a diferentes días de curado	86
TABLA 28	Errores estándar e intervalos de confianza del esfuerzo máximo para cada porcentaje de zeolita de validacion y día de curado.....	87
TABLA 29	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 20% de zeolita y curado a los 7 dias.....	102
TABLA 30	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 20% de zeolita y curado a los 14 dias.....	103
TABLA 31	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 20% de zeolita y curado a los 21 dias.....	105
TABLA 32	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 20% de zeolita y curado a los 28 dias.....	106
TABLA 33	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 22.5% de zeolita y curado a los 4 dias.....	107
TABLA 34	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 22.5% de zeolita y curado a los 11 dias.....	108
TABLA 35	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 22.5% de zeolita y curado a los 18 dias.....	109
TABLA 36	Datos introducidos en la simulacion de un pasta de cemento con 22.5% de zeolita y curado a los 25 dias.....	110

INTRODUCCIÓN

La presente tesis se trabajó entorno al cemento, el cual es un material durable y resistente pero, dado a que se trabaja en su forma líquida este podía adquirir cualquier forma. La representación de estudios realizados afirma, que agregarle al cemento materiales inorgánicos se da una mayor resistencia a la compresión y su buena adaptabilidad tiene relación directa con el porcentaje y características del aditivo únicas en todas las regiones del mundo.

Además, se analizó el efecto que produce en la resistencia a la compresión en el cemento Pórtland Tipo I, el estar expuesto a un proceso de curado y a la cual se le agregó 20% de zeolita. En este caso la zeolita utilizada fue obtenida de un yacimiento en Manglaralto, provincia ecuatoriana de Santa Elena, los datos de la resistencia a la compresión se tomaron a los 7, 14, 21 y 28 días de curado. También se analizó el efecto que produce en la misma resistencia a la compresión la adición de diferentes porcentajes de zeolita (5, 10, 15, 20 y 25%) cuyas mezclas han sido expuestas al mismo proceso de curado al aire y los ensayos de

compresión fueron realizados al mismo tiempo antes mencionado (desde el séptimo día a un intervalo de siete días hasta el día veinte y ocho).

El objetivo es desarrollar la aplicación de las zeolitas naturales como un componente básico de las mezclas de hormigones y morteros es, demostrar mediante ensayos y pruebas las bondades de la zeolita como una adición mineral para producir este material.

Con este estudio se demostró mediante análisis estadísticos que al utilizar zeolita de Manglaralto como aditivo del cemento, esta zeolita hace que la resistencia a la compresión de la pasta de cemento compuesta sea menor que la resistencia a la compresión de pastas de cemento con las mismas características pero sin zeolita agregada, siendo las muestras expuestas al mismo proceso y tiempo de curado, en este caso curado al aire. En el presente estudio, se implementó además un programa en "matlab", el cual mediante métodos numéricos permitió obtener la curva esfuerzo-deformación para pastas de cemento compuestas tomando datos de las pruebas experimentales para que el ajuste entre las curvas real y simulada tengan la menor diferencia posible.

RESUMEN

El cemento es un compuesto de carbonatos de calcio, arcilla y adicionalmente aditivos, tales como las puzolanas, que son sustancias que tienen como función principal la modificación de las propiedades normales del concreto. Para el estudio la puzolana fue la zeolita, adicionada en un 20% en la mezcla de cemento para mejorar su resistencia a la compresión.

Debido a las características geológicas del suelo, existen en el país diversos bancos de puzolanas naturales, y entre las varias características con las que cuentan las puzolanas resaltan la actividad puzolánica y las resistencias que genera después del endurecimiento. Los posibles beneficios tecnológicos que aportan las puzolanas naturales en el cemento incluyen la reducción de la permeabilidad, la resistencia al ataque de sulfatos, la mejora de la resistencia al fisuramiento térmico y el incremento de la resistencia a edades tardías. Dada su disponibilidad en el país, la aplicación de materiales puzolánicos da lugar a la posibilidad de un nuevo aditivo.

Por lo que el objetivo principal de la presente tesis, versa sobre el estudio y análisis de un comportamiento del cemento al introducir material puzolánicos como la zeolita y por el efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión, desarrollado mediante un modelo computacional teórico y pruebas estadísticas de datos experimentales.

Al concluir la tesis se esperó cumplir con el objetivo principal planteado además, a través de un estudio estadístico se logró discernir acerca de cuál porcentaje de zeolita fue el óptimo para mejorar las propiedades del cemento con los datos proporcionados de estudios semejantes y bajo las mismas condiciones experimentales, pero diferente proporción de zeolita.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.1. Antecedentes y justificación.....	4
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivos generales.....	6

1.2.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Metodología.....	6
1.4. Estructura de la tesis.....	8

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO PUZOLÁNICO.....	11
2.1. Cemento Pórtland tipo I.....	11
2.2. Puzolanas.....	15
2.3. Zeolita.....	20
2.4. Métodos de Curado.....	23

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	27
3.1. Diseño Experimental.....	27
3.2. Preparación y Ensayo de las probetas.....	35
3.3. Simulación Computacional.....	55

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	62
4.1. Ensayo de compresión.....	62
4.2. Análisis estadístico.....	69
4.3. Resultados del modelo.....	100

CAPÍTULO 5

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	111
5.1. Recomendaciones.....	111
5.2. Conclusiones.....	112

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato Tricálcico
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Aluminoferrito Tetracálcico
ASTM	American Society of Testing Materials
ClH	Cloruro de Hidrógeno
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL
g	Gramos
NaOH	Hidróxido de Sodio
h	Horas
kg	Kilogramos
MPa	Mega Pascales
μm	Micro metros
mL	Mili litros
mm	Milímetros
mm^2	Milímetro Cuadrado
mm^3	Milímetro Cúbico
min	Minutos
CaO	Óxido de Calcio
MgO	Óxido de Magnesio
RPM	Revoluciones por minuto
s	Segundos
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato Dicálcico
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato Tricálcico
CaSO_4	Tetrasulfato de Calcio

SIMBOLOGÍA

A	Área
ε	Deformación de la Probeta
m	Deformación Inelástica Total
SS	Desviación Estándar
σ	Esfuerzo
σ_y	Esfuerzo de Fluencia
$\sigma_{\text{máx(Modelo)}}$	Esfuerzo Máximo del Modelo.
$\sigma_{\text{máx}}$	Esfuerzo Máximo Experimental
σ_u	Esfuerzo Último de Compresión
F	Fuerza de Compresión en Newton
$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
H_1	Hipótesis Alternativa
H_0	Hipótesis Nula
HR	Humedad Relativa
L_f	Longitud Final de Deformación
L_0	Longitud Inicial de Deformación
u	Media de los Tratamientos
E	Módulo de Elasticidad de Young
H'	Módulo de Plasticidad
α	Nivel de Significancia Probabilística
N	Número de Probetas o Replicas
$p_{\text{calculado}}$	Probabilidad Calculada
p	Probabilidad Estadística
$p_{\text{Teórico}}$	Probabilidad Teórica
σ_n^{tr}	Valor constante de la deformación del modelo
a	Valor constante del modelo
$F_{\text{calculado}}$	Valor Estadístico Calculado
F	Valor Estadístico de Fischer
$F_{\text{Teórico}}$	Valor Estadístico Teórico
W	Valor Tabulado de Shapiro Wilk

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema.

El enfoque a la cual esta investigación trató, es en el desarrollo de un modelo computacional que permita representar el comportamiento tanto, resistencia uniaxial a la compresión y el tiempo de fraguado de un material compuesto como el concreto, teniendo en cuenta que es el material que ha tenido el mayor uso en la construcción de edificios e infraestructura.

El cemento Pórtland tipo I es el más usado a nivel general por productores de hormigón. Este tipo de cemento proporciona niveles adecuados de resistencia y durabilidad, sin embargo, algunas aplicaciones requieren el uso de otros cementos para proporcionar niveles más altos de propiedades. La necesidad de obtener una alta

resistencia en el hormigón compromete a estudiar otros tipos de materiales que se puede agregar a este tipo de cemento.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó dos métodos de trabajo; realizar pruebas experimentales y mediante el computador modelar los datos que se obtuvieron, y dar un conocimiento de resultados que tienen las puzolanas en las mezclas, como también el efecto del medio de curado.

1.1.1. Antecedentes y Justificativos

El estudio de las propiedades y el comportamiento de diversos materiales y su aplicación, han permitido el avance tecnológico de las actividades humanas. Entre estos materiales, las zeolitas naturales presentan importantes características físico-químicas, y su estudio es un valioso aporte al desarrollo de aplicaciones industriales.

Por sus características estructurales, las zeolitas son utilizadas para importantes investigaciones. Esto conlleva que en nuestro

país, este mineral sea estudiado con gran interés, proporcionando información sobre sus diferentes sitios de extracción, sus características, propiedades y aplicaciones.

En la actualidad las áreas de estudios que incluyen la utilización de zeolitas en aplicaciones, van desde la industria de la construcción mezclando componentes tradicionales como cemento y agregados junto con materia orgánica e inorgánica, hasta composiciones de metales en matrices poliméricas o cementantes.

Cabe también mencionar que en la actualidad, tener un comportamiento mediante la simulación matemática es un factor importante, puesto que el desenvolvimiento de la ingeniería se debe a una estricta relación interdisciplinaria, en la cual las matemáticas son un factor de desempeño crucial, ya que, permiten tener simulaciones reales y de bajo costo, que resguardan la seguridad del investigador.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivos Generales.

La finalidad de la presente investigación científico-tecnológica del tópico de graduación, fue la de estudiar y simular mediante modelación matemática el comportamiento del cemento en su resistencia a la compresión variando su tiempo de fraguado y la concentración de zeolita en la mezcla.

1.2.2. Objetivos específicos.

La presente tuvo como objetivos específicos lo siguiente:

- Analizar los efectos que causó el tiempo de fraguado en la resistencia mecánica a la compresión de una pasta de cemento compuesta.
- Analizar los efectos que causó la adición de concentración de zeolita en la resistencia mecánica de

una pasta de cemento compuesta, mediante un modelo matemático óptimo del cual se utilizó matlab.

1.3. Metodología.

La metodología planteada en la presente tesis se detalla a continuación indicado en la figura 1.1., siguiendo un esquema que siguió cada uno de los objetivos propuestos.

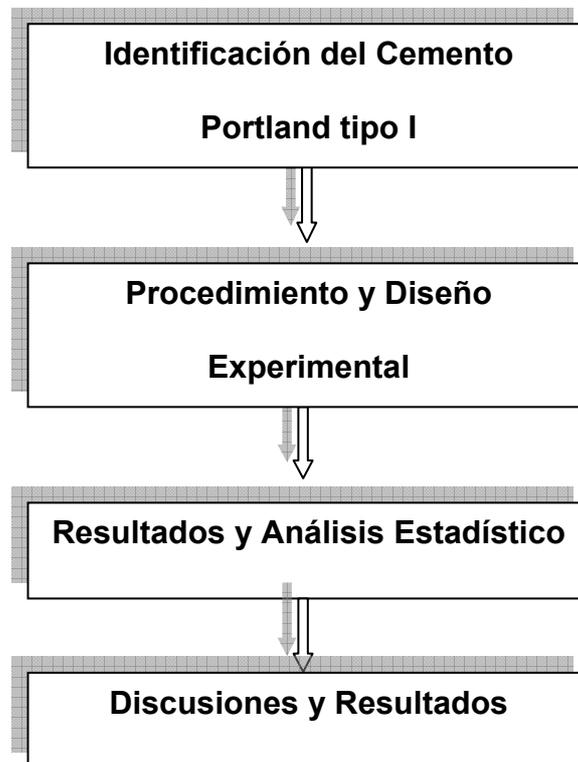


FIGURA. 1.1. Metodología de la Tesis

En el primer paso, denominado “**Identificación del Cemento Pórtland Tipo I**”, se describió un estudio del cemento base Pórtland Tipo I. Entre las cuales se estudiaron las propiedades mecánicas.

En el segundo paso, denominado como “**Procedimiento y Diseño Experimental**”, se realizó la planificación de los experimentos que se van a efectuar en el laboratorio durante distintos tiempos de ensayos que son 3, 7, 14, y 28 días tomando tres muestras por ensayo. También se revisaron los equipos y el material con los que se llevó a cabo la experimentación como el porcentaje de aditivo y la relación de la mezcla.

El tercer paso, denominado “**Resultados y Análisis Estadístico**”, contiene la modelación dada en software como Matlab. Este mostró el efecto que se le da al cemento al agregarle el porcentaje de aditivo dado. Donde finalmente fueron comparados con una muestra de control, es decir, una muestra sin porcentaje de aditivos.

El cuarto paso, denominado “**Discusiones y Resultados**” se compararon en como altera los datos obtenidos en nuestro

experimento con respecto a las ya establecidas. Además, se verificó si las hipótesis planteadas son alteradas con respecto a los resultados obtenidos en el estudio.

1.4 Estructura de la tesis.

La presente tesis esta compuesta por cinco capítulos, los cuales se detallan a continuación.

En el primer capítulo denominado “**Generalidades**”, se plantea el problema, el antecedente, su justificación y se plantea los alcances de la tesis, es decir, se establece objetivos generales y objetivos específicos. Además, la metodología que se siguió para alcanzar dichos objetivos y finalmente describe la estructura de este trabajo.

En el segundo capítulo, denominado “**Estado del Arte del Cemento Puzolánico**”, se encuentra la información acerca del cemento y las características de los agregados puzolánicos. Además, detalla los procedimientos para obtener este tipo de cemento, los tipos de curado y como afecta las propiedades mecánicas al añadir un aditivo diferente a los utilizados en su composición.

En el tercer capítulo, denominado “**Procedimiento y Diseño Experimental**”, muestra los procedimientos que se siguieron en la experimentación. Además del diseño que se utilizó para la obtención de datos (resistencia a la compresión en diferentes tiempos de fraguado) para su posterior modelación matemática basada en Matlab.

En el cuarto capítulo, denominado “**Resultado y Análisis Estadístico**”, presenta tanto los resultados obtenidos a través de la experimentación así como los resultados obtenidos a través del modelo mediante el computador. El análisis estadístico de los datos experimentales, se los realizó mediante el uso de la Anova, permitiendo saber si existieron diferencias significativas entre las medias de los tratamientos. Analizados los datos experimentales se procedió ajustar el modelo matemático para verificar que el efecto puzolánicos y el medio de curado se vean reflejados en los resultados de nuestro modelo.

En el quinto capítulo, denominado “**Discusiones de Resultados**”, se dan conclusiones de los objetivos propuestos durante esta investigación y dando a su vez recomendaciones de la práctica

válida del modelo, como así la mejoría de estudio a la investigación planteada.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE DEL CEMENTO PUZOLÁNICO

2.1. Cemento Pórtland tipo I.

El cemento Pórtland es, con diferencia, el más importante en lo que se refiere a la cantidad producida. Se fabrica a partir de una mezcla de alrededor de 80% de carbonato de calcio (caliza, creta o marga) y alrededor de 20% de arcilla (en forma de arcilla, esquisto o escoria). Después de mezclados íntimamente, los materiales se muelen a un grado muy fino, por un proceso húmedo o seco, luego se calcinan en hornos rotatorios a temperaturas de 1400 a 1650 °C (2600 a 2900 °F) hasta que se produzca el clinker. El producto, llamado clinker, se muele y se mezcla con un porcentaje pequeño de yeso. El clinker contiene cuatro fases principales: silicato tricálcico (C_3S), β -silicato dicálcico ($\beta-C_2S$), aluminato tricálcico (C_3A) y solución sólida de ferrito (con composición comprendida aproximadamente entre C_2F y C_6A_2F , y que se acerca con frecuencia a C_4AF). [1].

Se considera que el cemento se encuentra en un estado de equilibrio congelado, es decir, que los productos congelados reproducen el equilibrio existente durante la temperatura de formación del clinker. Esta suposición se la realiza para poder calcular la composición de compuestos de los cementos comerciales.

El cemento Pórtland tiene características peculiares con respecto a otros materiales de construcción. Se requieren conocimientos en dos líneas principales para su explotación adecuada. En primer lugar sobre los procesos de fabricación, que involucran materias primas (selección y formulación), procesamiento térmico (calentamiento y enfriamiento), y molienda. Sólo un cemento bien procesado tiene buen potencial de desempeño. En segundo lugar vienen los problemas involucrados en la utilización del cemento, donde se requiere tener conocimientos sobre la química de hidratación, interacción con agregados y con fibras, reacciones nocivas, resistencia al ataque químico, etc.

El cemento Pórtland se divide básicamente en cuatro componentes principales que se indican en la tabla:

TABLA 1. Composiciones principales del cemento Pórtland

Compuesto	Fórmula química	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Los silicatos que se encuentran en el cemento en realidad no son compuestos puros, pues contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen un efecto importante en los ordenamientos atómicos, las formas cristalinas y las propiedades hidráulicas de estos silicatos.

Además, de los compuestos principales nombrados en la tabla 1, existen otros compuestos menores los cuales son: MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O y Na_2O , que por lo general no sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso del cemento. Pero dos de estos compuestos menores son de interés: los óxidos de sodio y de potasio, Na_2O y K_2O , conocidos como "álcalis", aunque también existen otros álcalis.

Procesos de Hidratación del Cemento.

Las mezclas de Cemento Hidráulico se clasifican según la Norma ASTM C 595 “Standard for Blended Hydraulic Cements” en:

- Tipo IS – Cemento Portland con escoria de fundición de alto horno.
- Tipo IP – Cemento Pórtland Puzolánico.
- Tipo P – Cemento Pórtland Puzolánico cuando no se requiere alta resistencia a edades tempranas.
- Tipo I(PM) – Puzolana – Cemento Portland modificado.
- Tipo I(SM) – Escoria – Cemento Portland modificado.
- Tipo S - Cemento escoria para uso en combinación con cemento Pórtland para hacer concreto y en combinación de cal hidratada para hacer morteros de mampostería.

2.2 Puzolanas.

Las puzolanas se han definido como materiales que, aunque por sí mismos no son aglomerantes contienen sustancias que, a temperatura ordinaria se combinan con la cal en medio acuosa, para formar sustancias insolubles que poseen propiedades cementantes. Las puzolanas se usan hoy en morteros, como adiciones directas al hormigón y, como cementos puzolánicos o mezclas finamente divididas de cemento Pórtland con puzolana.

Efectos de puzolanas en el cemento

La Tabla 1 presenta un resumen de algunas de sus características. Todos estos materiales pueden ser empleados como reemplazo parcial del cemento Pórtland y algunos como reemplazo total. Los materiales puzolánicos son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación del cemento, principalmente $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$; la reacción que describe tal proceso es llamada “reacción puzolánica”.

TABLA 2. Características generales de los materiales puzolánicos.

	Procesamiento adicional requerido	Características	Origen
Sílice condensada	Aglomeración para su manejo	Partículas esféricas de tamaño < 1 μm . Alta área superficial	Vapores condensados de la producción de carburo de silicio
Ceniza volcánica	Molienda	Reactividad variable, partículas de forma irregular	Emisiones volcánicas
Ceniza de cascarilla de arroz	Calcinación, se aprovecha el calor generado como combustible	Morfología irregular, tamaño muy fino, alta área superficial	Producción de grano de arroz

Las puzolanas se dividen y se clasifican en tres tipos según la norma ASTM C618-01 "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined. Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete" [2].

Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como diatomitas, tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas.

Clase F: Ceniza volante producida por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso.

Clase C: Ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza además de tener propiedades puzolánica, también tiene propiedades cementicias [2].

Puzolanas naturales.

La puzolana se puede definir como un silicio o un material silíceo alumínico, el cual posee poco o ningún poder cementante formado por partículas finamente divididas y en presencia de humedad, es químicamente reactivo con hidróxido de calcio a temperatura ordinaria que forma en el proceso un componente con propiedades cementantes.

Puede hacerse una tentativa de clasificación, basada en la naturaleza del constituyente que reacciona con el hidróxido cálcico.

Este puede ser:

- Rocas volcánicas, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, la piedra pómez, las tobas, la escoria.
- Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.

Los beneficios de usar puzolana natural en el concreto son la reducción de costos, reduce el aumento de la temperatura durante la hidratación inicial, mejora en trabajabilidad el concreto fresco, mejora la resistencia a los sulfatos, reduce directamente la expansión a la reacción álcali – sílice, contribuye a la durabilidad y resistencia del concreto endurecido. Además, es un excelente aislante térmico por lo tanto es resistente al frío, al fuego, a la intemperie y ayuda a que el concreto este libre de sales solubles en agua, que permite mejorar las condiciones de habitabilidad si se la emplea en la construcción de viviendas. También no tienen riesgos en la salud del ser humano, debido a que no poseen sílice libre.

Puzolanas artificiales.

Las puzolanas artificiales comprenden las arcillas y pizarras calcinadas, así como los residuos de productos cerámicos; y una serie de subproductos tanto industriales como agrícolas, entre los que se encuentran la *silca fume*, *fly ash*, residuo agrícolas e industriales quemado.

- Cenizas volantes: las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
- Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.
- Escorias de fundición: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

- Cenizas de residuos agrícolas: la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

2.3. Zeolita.

Se define a una zeolita como una sustancia cristalina con una estructura caracterizada por una red de tetraedros entrelazados, los cuales consisten de cuatro átomos de oxígeno que rodean a un catión. Esta estructura es menos compacta que la de los feldespatos (Silicato doble de aluminio y de un metal alcalino o alcalino-férreo, de estructura laminar y de coloración débil). En los huecos abiertos de la estructura se introducen las moléculas de agua sin participar en la cohesión de la red; se trata del "agua zeolítica", y por eso las zeolitas forman espuma al calentarse. A esta propiedad se debe su nombre: "piedra que hierve"; del griego, zeo: hiervo, y lithos: piedra [3].

La figura 1-2 muestra de forma esquemática una celda unitaria de zeolita.

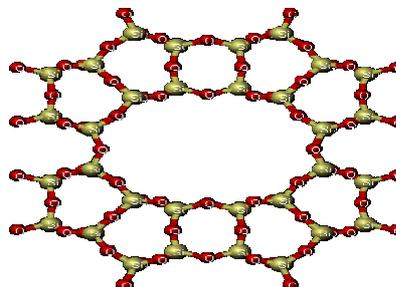


FIGURA 2.1. Esquema de una celda unitaria

Tomado de <http://crystals.ethz.ch/IZA-SC/3D-images/FWviewer>.

Entre las propiedades más importantes de las zeolitas son el de intercambiar los cationes que mantienen la neutralidad del sistema, la absorción y su actividad catalítica, por su tamiz molecular es ampliamente utilizada en la producción de gas en una amplia tecnología PSA (Pressure Swing Adsorption) [4].

Según Sand-Mumpton, los yacimientos de zeolita en función del criterio geológico y genético, se pueden clasificar de la siguiente forma [5]:

Tipo 1: Lagos salinos alcalinos

Tipo 2: Suelos y superficies pantanosas salinas y alcalinas

Tipo 3: Sedimentos del piso oceánico

Tipo 4: Aguas percolantes en un sistema hidrológico abierto.

Tipo 5: Alteración hidrotermal

El cumplimiento de especificaciones para el empleo de las zeolitas naturales como aditivo es regulado por normas internacionales. Para ésta investigación la clasificación de la zeolita se la determinó de acuerdo a la norma ASTM C 618-01. Dando como resultado una puzolana de clase N, ya que el material utilizado es una zeolita que es una puzolana natural [2].

Algunas características generales de las zeolitas se resumen en la tabla 3. Estas características dependen esencialmente de la estructura y de la composición química de los sólidos. (REED et. al, [6]).

TABLA 3.- CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ZEOLITAS

Características generales de las zeolitas
--

Diámetro de poro: 2 a 12 Å Diámetro de cavidades: 6 a 12 Å Superficie interna: varios cientos de m ² /g Capacidad de intercambio catiónico: 0 a 650 meq/100 g Capacidad de absorción: < 0,35 cm ³ /g Estabilidad térmica: 200 °C hasta más de 1000 °C
--

2.4. Métodos de Curado.

El término curado se utiliza tanto para describir el proceso natural por medio del cual el cemento hidráulico madura y desarrolla sus propiedades mecánicas típicas del material en estado endurecido. El curado es necesario para asegurar la hidratación apropiada. El concreto se debe mantener húmedo por 7 días cuando menos y no dejar que la temperatura descienda a menos de 50°F en 3 días. Para retener la humedad se pueden usar compuestos para curado con membranas rociadas sobre el concreto. Se debe tomar precauciones especiales en tiempo muy frío y caliente [7].

Las propiedades del hormigón, tales como la durabilidad frente a los ciclos de congelación y deshielo, resistencia mecánica,

impermeabilidad, estabilidad volumétrica y resistencia al desgaste mejoran con la edad mientras existan condiciones favorables para la continuidad del proceso de hidratación del cemento.

Los procedimientos de curado se agrupan en tres grandes categorías:

- a) Aquellos que previenen o impiden la evaporación del agua por interposición de un medio húmedo.
- b) Aquellos que tratan de impedir o reducen la pérdida de agua por interposición de un medio impermeable el cual controla la evaporación.
- c) Aquellos que aceleran el desarrollo de resistencia por aplicación artificial de calor, mientras el concreto es mantenido en condición húmeda.

El método o la combinación de los métodos elegidos dependen de factores tales como disponibilidad de curar los materiales, tamaño, forma, y la duración del concreto, las instalaciones de producción (en lugar o en una planta), del aspecto estético y de la economía.

Todo concreto debe curarse para obtener la máxima resistencia. El concreto curado correctamente es mejor desde todo punto de vista: se contrae menos, se agrieta menos y desprende menos polvo. Es más fuerte, más durable y tiene mayor resistencia al desgaste superficial [7].

La humedad del hormigón puede ser mantenida (en algunos casos a temperatura adecuada), mediante diversos métodos de curado que se pueden clasificar como:

1. Métodos que suministran humedad adicional a la superficie del hormigón durante el período inicial de endurecimiento. Estos incluyen la inundación o inmersión, el rociado o pulverización y el uso de cubiertas húmedas. Tales métodos proporcionan, por efecto de la evaporación cierto grado de enfriamiento, que es beneficioso en tiempo caluroso.
2. Métodos que impiden las pérdidas de humedad mediante el sellado o impermeabilización de la superficie del hormigón. Esto puede conseguirse empleando papel impermeable, películas plásticas, compuesto de curado y por medio de los moldes y encofrados dejados en su lugar.

3. Métodos que aceleran el endurecimiento del hormigón, suministrándole calor y humedad. Esto se lleva usualmente a cabo mediante vapor vivo o resistencias eléctricas.

En tanto que este caso fue empleado un sistema de “**curado al aire**”, que es el más cercano a lo que se realiza en la realidad en las diferentes construcciones a base de cemento. Debido a que este método, consiste en colocar las muestras de pasta cemento compuesto en un lugar seco (al ambiente) **[8]**.

CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Diseño Experimental.

El diseño experimental consistió en analizar su resistencia a la compresión, el efecto que causó el tiempo de fraguado con la introducción de un porcentaje de aditivo a la pasta de cemento mediante la experimentación en el laboratorio; llevándolo a cabo en la máquina de ensayos universal marca Versa Tester AP 1020, del laboratorio de Suelos Rocas y Materiales de la FICT (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra), la cual tiene como función comprimir muestras de cubos de morteros.

Los datos fueron analizados por medio del software para poder realizar la comparación de las medias de los tratamientos en los 7, 14, 21 y 28 días con un error tipo $\alpha=0.05$ mediante el método anova para ver si existió una diferencia significativa entre las medias de dichos tratamientos.

Pero un análisis exhaustivo del experimento no terminó con la evaluación de estas pruebas planeadas, por eso se tomaron los valores obtenidos en el ensayo a compresión de cada pasta en el tiempo específico, para luego realizar un modelamiento que me predijo la resistencia del material en cualquier tiempo. Así mismo, se hizo con la otra variable que es el 0% de zeolita con las condiciones de curado establecidas donde se realizó comparación de las diferencias que existieron, al tener aditivo, así también cuando no lo hubo.

En la **TABLA** siguiente se muestra la forma como se agruparon los datos.

TABLA 4.- FORMATO DE TOMA DE DATOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CON RESPECTO AL TIEMPO DE CURADO.

	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	7 Días	14 Días	21 Días	28 Días
Muestra 1	x1	x4	x7	x10
Muestra 2	x2	x5	x8	x11
Muestra 3	x3	x6	x9	x12

Además, se tomaron los datos de la temperatura y humedad relativa al momento de realizar los ensayos de compresión, puesto que son factores que influyeron en el experimento. También se trabajó con una tabla similar a la del comportamiento de la pasta de cemento sin aditivos y que fue sometida al mismo proceso de curado.

Las probetas de pasta de cemento compuesto cumplieron con los requerimientos de la norma C 109/C 109M - 02, la cual fue prevista de modificaciones; que en vez de implementar morteros (cemento + arena), se utilizó pasta de cemento compuesto (cemento + agua + aditivos). En la máquina de ensayos universal modelo Versa Tester AP 1020, del laboratorio de Suelos, Rocas y Materiales de la FICT (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la tierra).

Comportamiento Estadístico de las muestras.

Para un buen comportamiento estadístico, las muestras fueron agrupadas de manera correcta, para esto fue necesario armar una matriz de los experimentos, denominada también “matriz de diseño”, la cual es un objeto matemático que representó el conjunto de combinaciones de niveles de los factores a las que fueron efectuados

los experimentos. En el caso de este estudio la matriz de diseño se la presenta en la **TABLA 5**.

TABLA 5.- MATRIZ DE DISEÑO

Días de Curado	Porcentaje de Zeolita (%)				
	5	10	15	20	25
7	M1	M1	M1	M1	M1
7	M2	M2	M2	M2	M2
7	M3	M3	M3	M3	M3
14	M1	M1	M1	M1	M1
14	M2	M2	M2	M2	M2
14	M3	M3	M3	M3	M3
21	M1	M1	M1	M1	M1
21	M2	M2	M2	M2	M2
21	M3	M3	M3	M3	M3
28	M1	M1	M1	M1	M1
28	M2	M2	M2	M2	M2
28	M3	M3	M3	M3	M3

Al tener la matriz de diseño, se trabajó nuevamente la parte experimental para los valores mostrados en la Tabla 6 (Datos de Validación), el cual sirvió para comprobar que el modelo que se obtuvo de la matriz de diseño se ajustó para cualquier dato del rango obtenido en la misma matriz.

TABLA 6.- MATRIZ DE DISEÑO PARA LA VALIDACIÓN.

Días de Curado	Porcentaje de Zeolita (%)				
	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5
4	M1	M1	M1	M1	M1
4	M2	M2	M2	M2	M2
4	M3	M3	M3	M3	M3
11	M1	M1	M1	M1	M1
11	M2	M2	M2	M2	M2
11	M3	M3	M3	M3	M3
18	M1	M1	M1	M1	M1
18	M2	M2	M2	M2	M2
18	M3	M3	M3	M3	M3
25	M1	M1	M1	M1	M1
25	M2	M2	M2	M2	M2
25	M3	M3	M3	M3	M3

Una vez que se obtuvieron los datos de manera ordenada (en la matriz de diseño y para la validación), se procedió a graficar los valores de la resistencia a la compresión en función de los días de curado, para determinar el modelo que siguió la resistencia a la compresión de la pasta de cemento compuesto curada al aire y con el porcentaje de zeolita como aditivo.

Para este estudio el modelo estadístico que se encontró declaró la forma de distribución probabilística que tiene la resistencia a la

compresión las muestras, para especificar esta distribución fue necesario relacionar la variable aleatoria (resistencia a la compresión de las muestras), a la variable independiente en el experimento (tiempo de curado), el cual indicó a priori que la parte estadística fue el modelo de regresión, pudiendo ser lineal o cuadrático.

Para la obtención de un modelo de regresión, fue necesario inferir los valores de las medias obtenidas de la resistencia a la compresión de manera experimental. Las inferencias en los modelos de regresión lineal simple requirieron de la estimación de tres parámetros:

- Los parámetros de regresión β_0 y β_1 .
- La varianza del error σ^2 .

Los valores pronosticados, que fueron adquiridos de la inferencia de los datos en la resistencia a la compresión al ingresar algún valor del tiempo de curado fueron de la siguiente manera:

- $\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i$

Donde b_0 y b_1 fueron los valores estimados de los parámetros de regresión.

La ecuación $\hat{y}_i = b_0 + b_1x_i$ se la conoce también como ecuación de predicción. La línea representada por la ecuación de predicción se conoce como **línea de predicción** o **línea estimada de regresión**. La línea de predicción es un estimador de la línea verdadera de regresión, la cual describe la supuesta relación en línea recta entre la media de los esfuerzos de compresión y el tiempo de curado.

En la **FIGURA 3.1.**, se muestra la interpretación gráfica de la función de regresión lineal simple.

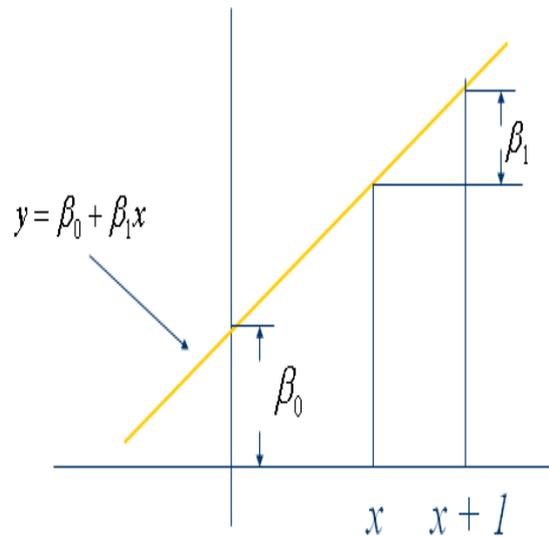


FIGURA 3.1. Parámetros de regresión.

La gráfica dice que β_0 es la respuesta esperada cuando la variable independiente es cero. Ahora, si se examina el cambio en la respuesta esperada resultante de incrementar en una unidad (de x a $x+1$) el valor de la variable independiente se puede encontrar que β_1 es el cambio en la media poblacional correspondiente a una unidad de incremento en el valor de la variable independiente, es la pendiente de la función de regresión [9].

3.2. Preparación y Ensayo de Probetas.

Tomando la norma ASTM C 109/C 109M, para así poder obtener resultados estandarizados. El material utilizado para la preparación de la pasta de cemento compuesto comprendió:

- Cemento Tipo I.
- Zeolita de Manglaralto.
- Agua.

Por otra parte la temperatura del medio en donde se efectuó el proceso de mezcla, moldes, embases debió mantenerse a una temperatura de entre 23.0 ± 3 °C, como también el agua para la mezcla. La humedad relativa del ambiente tuvo que ser de 60%.

En la **TABLA 7** se muestran las cantidades que se utilizaron en la mezcla para producir seis morteros de cemento según la norma ASTM C 109/C 109M – 02.

TABLA 7.- CANTIDADES PARA LA PRODUCCIÓN DE MORTEROS SEGÚN LA NORMA ASTM C 109/C 109M – 02.

Detalles	Cantidad.	
Numero de Morteros.	6	9
Cemento (g).	500	740
Arena (g).	1375	2035
Agua (mL).	242	359
Aire de arrastre.	230	340
Otros.	-	-

PROCESO DE MOLIENDA

1.- Una vez que se realizó el proceso de muestreo para obtención de la piedra, esta fue llevada al laboratorio respectivo para la molienda. La finalidad es de que la zeolita en bruto tenía que ser desagregada en piedras pequeñas (45 μm) que pudieran ingresar fácilmente al primer molino y además tenga la misma granulometría que el cemento tipo I, esto se hizo por medio de golpes con un combo.



FIGURA 3.2. Desagregación de la zeolita

2.- El primer molino al que ingresó el material fue el de mandíbulas, se agregó el material poco a poco y se fue repitiendo el proceso para todo el material.



FIGURA 3.3 Molino de mandíbulas



FIGURA 3.4. Adición de la zeolita

La figura a continuación muestra el resultado del trabajo que se realizó en el molino de mandíbulas.



FIGURA 3.5. Obtención de la zeolita en el molino de mandíbulas.

3. La zeolita fue llevada al siguiente molino, el cual es el de tornillo y se realizó el mismo procedimiento para todo el material.



FIGURA 3.6. Molino de tornillo

A continuación, se muestra el resultado de la obtención de la zeolita al pasar por el segundo molino.



FIGURA 3.7. Zeolita trabajada en molino de tornillo

4. Se cuarteó la zeolita y luego se tomó una porción de 100g, la cual sirvió para el primer tamizado.



FIGURA 3.8. Material cuarteado

5. Se llevó estos 100 gr., al tamizador, con tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo. Esto significa en el mismo orden: 1,4 cm, 40 mm, 425 μm , 300 μm .



FIGURA 3.9 Tamices # 14, 18, 40, 50 y fondo

6. Se retomó la molienda, llevando la zeolita al molino de disco.



FIGURA 3.10. Molino de discos

7. Se procedió a cuartear la zeolita nuevamente, y se tomó una porción para pesar 100 gr.



FIGURA 3.11. Segundo cuarteo de la zeolita



FIGURA 3.12. Segunda toma de peso

8. Se tomaron los 100 gr. y se los procedió a llevar a los tamices # 50, 100, 200, 325 y fondo, en el orden indicado.



FIGURA 3.13. Nuevo tamizado de la zeolita

9. Se regresó nuevamente al proceso de molienda y la zeolita fue llevada al molino de bolas y se trabajó en el, 45 minutos.



FIGURA 3.14. Zeolita en el molino de bolas



FIGURA 3.15. Zeolita obtenida después de 45 mit.

10. Se repitió nuevamente el proceso de cuarteo y la toma del peso de 100 gr. al salir del molino de bolas. Y se lo llevó al tamizado de #325 y fondo.



FIGURA 3.16. Tamizado # 325

11. Si el 60% de la muestra pasa al fondo, parar el procedimiento de molienda y usar la zeolita. Si no hubiese sido así, se debió repetir los pasos del 8 al 9.

PREPARACIÓN DE MOLDES

a) La preparación del mortero de cemento se la realizó con mezcla mecánica con el procedimiento según la norma ASTM C 305. Para la preparación de los moldes, fueron tomados datos de los pesos del cemento tipo I, porcentaje de zeolita y agua respectivamente. En las siguientes tablas se da a conocer las composiciones de las mezclas que se emplearon en el experimento tanto para los dos porcentajes como son 20% y la de validación 22.5% de **ZEOLITA**.

TABLA 8.- RELACIONES PARA LA MEZCLA CON 20% DE ZEOLITA

Puzolana en la mezcla(g)	600
Cemento en la mezcla(g)	2400
Agua (g)	900
Mezcla (puzolana + cemento) (g)	3000
Relación agua / mezcla	0,3

TABLA 9.- RELACIONES PARA LA MEZCLA CON 22.5% DE ZEOLITA

Puzolana en la mezcla(g)	675
Cemento en la mezcla(g)	2325
Agua (g)	900
Mezcla (puzolana + cemento) (g)	3000
Relación agua / mezcla	0,3

- b. Una vez obtenidas las relaciones, se homogeneizó los materiales, se mezcló el cemento y zeolita en seco en la mezcladora eléctrica por 10 minutos aproximadamente.



FIGURA 3.17 Proceso de homogeneización zeolita + cemento tipo I

- c. Se procedió a detener la mezcladora, para ponerla a velocidad uno, se la encendió y se agregó poco a poco el agua, una vez que le fue adicionada toda, se mantuvo la mezcladora a esta misma velocidad por 45 segundos.



FIGURA 3.18. Homogeneización cemento+zeolita+agua

d. Durante el proceso de homogeneización, se realizó la preparación de los moldes que dieron forma a la composición de las pastas de cemento. Se aplicó una delgada capa de un agente liberador para el interior de las caras de los moldes y un no absorbente en la base. Estos fueron aceites o grasas, utilizando para impregnarlos pedazos de ropa u otro medio conveniente. Al usar lubricantes con aerosoles, se roció directamente dentro de las caras del molde desde una distancia de 150 ó 200mm hasta cubrir todas las caras.



FIGURA 3.19. Preparación de moldes

- e. El moldeado de la muestras se lo realizó en un tiempo no mayor a 2min y 30s después de haber finalizado la mezcla original del lote de pastas.

La primera capa del molde que se obtuvo fue de 25mm en todos los compartimentos cúbicos (la mitad del cubo).

Se realizó el aplastamiento al mortero en cada compartimiento cúbico 32 veces en unos 10 segundos en 4 rondas, cada ronda era perpendicular a las otras y cada ronda constó de 8 golpes, como se muestra en la siguiente figura [10].

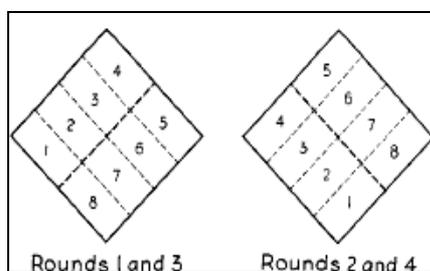


FIGURA 3.20. Orden de aplastamiento



FIGURA 3.21. Primera capa de aplastamiento

- f. Cuando el aplastamiento de la primera capa en todos los compartimentos estuvo completa, se llenó los compartimentos con el mortero sobrante y se volvió a aplastar de la misma forma. Mientras se estuvo llenando los moldes, no se tenía que dejar de mover la mezcla.



FIGURA 3.22. Compactamiento de los moldes

Una vez que se realizó el procedimiento anterior, se procedió almacenar las muestras dejándolas en el laboratorio manteniendo una temperatura de $23^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$., tapándolas con un plástico dentro del molde sobre las platinas base entre 20 y 72 horas con su superficie superior expuesta al aire húmedo pero estuvieron protegidas del agua.



FIGURA 3.23. Almacenamiento de los moldes

El análisis de las probetas se las realizó inmediatamente después. Se tomó a consideración que si la probeta presentaba curvaturas en la superficie, ésta tuvo que ser lijada hasta obtener caras planas, caso contrario la probeta se la descartaba. Después que fueron sometidas al método de curado en aire, y con la siguiente tolerancia: $24\text{h} \pm 0.5\text{h}$, $3\text{días} \pm 1\text{h}$, $7\text{días} \pm 3\text{h}$, $28\text{días} \pm 12\text{h}$., se trabajó en las pruebas realizadas cada $7\text{días} \pm 3\text{h}$, $14\text{días} \pm 6\text{h}$, $21\text{días} \pm 9\text{h}$, $28\text{días} \pm 12\text{h}$, interpolando los valores de tolerancia en los días intermedios.

La razón de la carga que se aplicó fue con respecto a la razón relativa del movimiento entre la platina superior e inferior correspondiente a un rango de entre 900 y 1800 N/s. Esta razón se obtuvo mediante el movimiento de las platinas durante la primera mitad de las máximas cargas y no se realizaron ningún tipo de calibraciones de las platinas en la segunda mitad de la prueba, especialmente si el cubo estaba siendo sometido antes de la falla.

Implementos utilizados para la preparación y ensayo de las probetas.

- **Balanza** las mismas que se catalogan como dispositivos de precisión para una carga total de 2000 gramos.



FIGURA 3.24. Balanza eléctrica

- Así mismo, el **vaso de precipitación** que entregó el volumen indicado, teniendo las medidas para una temperatura de 20° C, con una variación permisible de 2 ml. Dicho recipiente tiene graduaciones subdivididas de al menos 5 ml siendo éstas circulares al contorno del recipiente y numeradas.
- **Los moldes de las muestras**, para los cubos de 50mm tenían un ajuste apropiado. Los moldes no debían exceder de 3 compartimientos para los cubos. Las partes de los moldes cuando se ensamblaron tenían que estar muy juntos. Los moldes eran de metal duro para que no sean atacados por los morteros de cemento. Para moldes nuevos la dureza Rockwell del metal deberá ser no menos de 55 HRB. Los lados de los moldes estaban suficientemente rígidos para prevenir la propagación o las rompeduras. Las caras interiores del molde eran superficies planas y se ajustaron a las tolerancias de la **TABLA 10**.

TABLA 10.- TOLERANCIA PERMITIDA EN LOS MOLDES DE LAS MUESTRAS.

Molde de cubos de 50 mm		
Parámetro	Nuevo	En uso
Inclinación de caras	+/- 0,025 mm	+/- 0,050 mm
Distancias entre caras opuestas	50 mm +/- 0,13 mm	50 mm +/- 0,50 mm
Altura de cubo	50 mm + 0,25 mm a -0,13 mm	50 mm + 0,25 mm a -0,38 mm
Ángulo entre caras adyacentes	90° +/- 0,5°	90° +/- 0,5°

TABLA 11.- VARIACIÓN PERMITIDA EN FUNCIÓN DE LA EDAD.

Edad de la muestra	Tolerancia Permisible
24 horas	± ½ hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas



FIGURA 3.25. Moldes

- **Mezclador, Tazón y Paleta**, El mezclador funcionó con corriente eléctrica y estaba provisto de una paleta y un tazón para el mezclado de los materiales de las muestras.



FIGURA 3.26. Mezclador-tazón-paleta

- **Máquina de Pruebas**, esta fue una máquina de ensayos de compresión universal, con suficiente abertura entre las

caras superior e inferior para utilizar aparatos de verificación.



FIGURA 3.27. Máquina de prueba

Las características de las máquinas con las que se trabajó se denotan en el apéndice A.

3.3 Simulación Computacional.

Se requirió ingresar los datos de la resistencia a la compresión a un algoritmo, con el fin de modelar una prueba a la compresión estándar. Por lo que el teorema del límite inferior dice que la fatiga en el elemento debe cumplir con las ecuaciones de equilibrio estático.

Una fatiga discontinua es admisible estáticamente siempre y cuando si la fatiga normal que actúa en el plano de discontinuidad es continua. Enfocándose en lo anterior, las condiciones del límite de fatiga se reducen para imponer limitaciones adicionales de igualdad en la fatiga de nodos, por lo que la fatiga es permitida únicamente para variar linealmente.

La segunda parte del teorema del límite inferior es la compatibilidad del campo de fatiga con el dominio de la resistencia del material por una función de fluencia. La condición del límite de fatiga es dada por el elemento, de la suma de la fatiga de nodos de todos los elementos situados. (El cubo se descompone en 6 tetraedros, lo que nos da 24 nodos) **[10]**.

El objetivo de la aplicación presentada es comprobar que el algoritmo es capaz de lidiar con complejos materiales heterogéneos. Se escogió pasta de cemento que es altamente heterogéneo y está compuesta de diferentes capas sólidas.

Para utilizar el algoritmo se tomaron en consideración las medias en cada deformación

El algoritmo que se utilizó consta de los siguientes pasos.

Se consideró un intervalo en el tiempo $t \in [t_n, t_{n+1}]$, y se asume que:

σ_n y $\sigma_{Y,n}$ son conocidos.

Entonces se debió encontrar σ_{n+1} y $\sigma_{Y,n+1}$ los cuales tenían que satisfacer la condición de Kuhn – Tucker para un incremento de deformación $\Delta \epsilon$

También σ_{n+1}^{el} se conoce como el predictor del esfuerzo elástico y $E\Delta \epsilon^p$ es el corrector del esfuerzo plástico

Paso 1: Calcular $\sigma_{n+1}^{el} = \sigma_n + E\Delta \epsilon$

Paso 2: $F_{n+1}^{el} = |\sigma_{n+1}^{el}| - \sigma_{Y,n} > 0?$

No, $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{el}$ $\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n}$ y salir.

Paso 3: Si, empieza Newton – Raphson e itere hasta

$$F_{n+1}(\Delta \lambda) = F_{n+1}^{el} - \Delta \lambda (E + H'_{n+1}(\Delta \lambda)) = 0$$

Paso 4: $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{el} - E\Delta \lambda \text{sgn}(\sigma_{n+1}^{el})$ y

$$\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n} + H'_{n+1}(\Delta\lambda) \text{ y salir. [4]}$$

En el programa también implementó las siguientes fórmulas que se las obtiene de la siguiente figura.

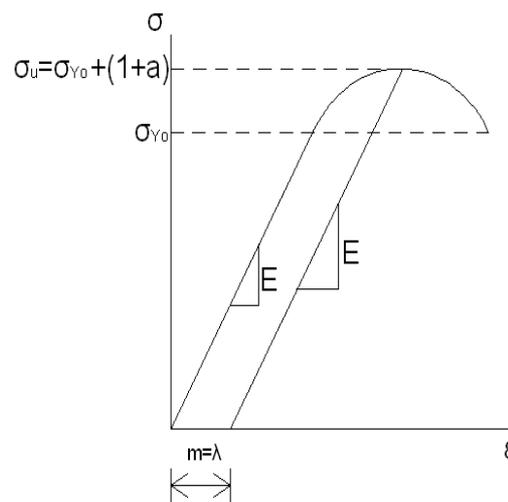


FIGURA 3.28. Curva esfuerzo deformación

$$\sigma_u = \sigma_{Y0}(1+a) \quad \text{y} \quad \sigma_y = \sigma_{Y0} \left(1 + \frac{2a}{m+\lambda} \sqrt{m\lambda} \right)$$

El algoritmo desarrollado indicó el comportamiento del material y a continuación se muestra el algoritmo

Datos del algoritmo

$\sigma(1)$: El valor inicial del esfuerzo en el origen. [MPa].

σ_{tr} : Predictor del esfuerzo elástico. [MPa].

$S_y(1)$: Esfuerzo de Fluencia. [MPa]

E : El módulo elástico o módulo de Young. [MPa].

ϵ : Es el rango de deformación

$d\epsilon$: Es la variación de la deformación.

H' : Es el módulo plástico del material.

λ : Es la magnitud de ϵ^p , este valor fue cambiando al ingresar a la zona plástica.

$\Delta \lambda$: Variación de λ

$\lambda(1)$: Es el valor inicial de λ el cual es cero, ya que se empezó de la región elástica.

a, m : constantes del material.

La constante “ m ” se la pudo determinar trazando una paralela a la parte elástica de la curva experimental que corte con el eje x .

Este corrector plástico también se lo pudo determinar mediante la siguiente fórmula:

$$m = \varepsilon - \left(\frac{\sigma_u}{E_{prom}} \right)$$

Donde ε es la deformación unitaria última, σ_u es el esfuerzo promedio último y E_{prom} es el módulo de elasticidad promedio.

La constante “a” la determinó también con los datos experimentales:

$$a = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \right) - 1$$

Donde σ_u es el esfuerzo promedio último, σ_y es el esfuerzo de fluencia promedio [11].

Después de haber determinados estas constantes, se procedió a ejecutar el algoritmo de simulación, el cual brindo como resultado una curva modelo. Esta curva modelo fue diferente para cada día de curado y dio una pauta para determinar el error del modelo y para analizar si hubo un buen ajuste.

El uso de modelos discretos para estudiar el comportamiento no lineal de materiales como rocas y concreto ha aumentado. El modelo de este estudio combina modelos existentes y algunos detalles suplementarios. El medio mas utilizado por investigadores en el comportamiento del material y sobre todo en procesos de fractura es el de criterio de falla para determinar el colapso de elementos discretos, después del cual, los elementos son removidos.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

4.1 Ensayo de Compresión.

A continuación, se da a conocer en las siguientes tablas, los resultados obtenidos en los datos experimentales tanto para 20% como 22.5% de zeolita, con sus respectivos días de curado. Trabajo realizado en el laboratorio de suelos, rocas y materiales de la FICT (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra).

TABLA 12.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 20% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 7 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 7 DÍAS DE CURADO					
T	24,7°C	HUMEDAD	71,3 HR	MAQUINA	EM
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 7 DÍAS DE CURADO AL AIRE					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	1,1760	0,00254	0,9016	0,00254	0,784
0,00508	4,1944	0,00508	2,3912	0,00508	1,372
0,00762	8,6632	0,00762	5,1744	0,00762	3,136
0,01016	14,3864	0,01016	9,604	0,01016	6,664
0,01270	19,5216	0,01270	14,6608	0,0127	10,976
0,01524	26,0680	0,01524	20,1488	0,01524	16,3072
0,01778	31,3600	0,01778	25,48	0,01778	22,148
0,02032	37,6320	0,02032	31,36	0,02032	27,44
0,02286	42,9240	0,02286	37,24	0,02286	30,968
0,02611	49,0000	0,02540	42,14	0,0254	32,732
		0,02794	45,08	0,02794	38,22
		0,03048	47,04	0,03048	43,12
				0,031	44,1

TABLA 13.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 20% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 14 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 14 DÍAS DE CURADO					
T	23,3 °C	HUMEDAD	68,8 HR	MAQUINA	
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 14 DÍAS DE CURADO AL AIRE					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	1,1760	0,00254	0,784	0,00254	0,784
0,00508	2,3520	0,00508	2,156	0,00508	2,744
0,00762	4,5080	0,00762	5,292	0,00762	6,272
0,01016	8,6240	0,01016	9,996	0,01016	10,976
0,01270	13,5240	0,01272	15,228	0,0127	16,464
0,01524	19,6000	0,01524	21,56	0,01524	23,52
0,01778	24,5000	0,01778	28,42	0,01778	29,4

MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,0229	36,26	0,02286	41,748	0,02286	41,748
0,0254	40,18	0,0254	48,02	0,0254	48,608
0,02794	43,12	0,02794	49	0,02794	54,488
0,03048	44,1			0,03048	55,86

TABLA 14.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 20% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 21 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 21 DÍAS DE CURADO					
T	26,2 °C	HUMEDAD	68,9 HR	MAQUINA	
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 21 DÍAS DE CURADO					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	0,9016	0,00254	0,784	0,00254	1,176
0,00508	1,9600	0,00508	2,156	0,00508	2,744
0,00762	3,5280	0,00762	3,528	0,00762	6,468
0,01016	9,8000	0,01016	7,84	0,01016	12,74
0,01270	16,6600	0,01272	13,72	0,0127	18,816
0,01524	24,5000	0,01524	19,6	0,01524	26,46
0,01778	32,3400	0,01778	25,48	0,01778	33,32
0,02032	38,2200	0,02032	33,32	0,02032	40,18
0,02286	43,7080	0,02286	40,18	0,02286	48,02
0,02540	48,0200	0,02540	47,04	0,02613	54,88
0,02794	51,9400	0,02794	48,02		

TABLA 15.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 20% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 28 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 28 DÍAS DE CURADO					
T	25,4 °C	HUMEDAD	69,2 HR	MAQUINA	
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 28 DÍAS DE CURADO					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	3,0228	0,00254	2,845	0,00254	2,845
0,00508	7,4681	0,00508	12,8024	0,00508	5,8678
0,00762	18,8480	0,00762	26,3161	0,00762	12,4468
0,01016	28,0942	0,01016	43,2081	0,01016	28,0942
0,01270	44,8084	0,01272	61,3449	0,0127	46,2309
0,01524	57,7886	0,01524	68,4573	0,01524	56,8996
0,01782	67,5683			0,01778	65,7901

TABLA 16.- RESULTADO GENERAL PARA CADA MUESTRA DE 20% DE ZEOLITA A LOS DÍAS CORRESPONDIENTES DE CURADO

Variables independientes		Variables Dependientes o Resultados					
(%)	días	Esf. de Fluencia (Mpa)	Esf. Máximo (Mpa)	Def. Máxima	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
20	7	42,924	49	0,02611	1877,69	0,1416	0,000015
20	7	42,14	47,04	0,03048	1659,06	0,1163	0,002127
20	7	43,12	44,1	0,03119	1414,7	0,0227	0,000018
20	14	36,26	44,1	0,03048	1586,18	0,2162	0,002677
20	14	48,02	49	0,02794	1890,55	0,0204	0,002022
20	14	54,488	55,86	0,03048	1950,18	0,0252	0,001836
20	21	43,708	51,94	0,02794	1911,99	0,1883	0,000775
20	21	47,04	48,02	0,02794	1851,97	0,0208	0,002011
20	21	48,02	54,88	0,02613	2100,61	0,1429	0,000001
20	28	57,7886	67,568	0,0178	3791,91	0,1692	0,000002
20	28	61,3449	68,457	0,0152	4830,3	0,1159	0,001068
20	28	46,2309	65,79	0,0178	3733,57	0,4231	0,000159

TABLA 17.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 22.5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 4 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 4 DÍAS DE CURADO					
T	27,4 °C	HUMEDAD	69,4 HR	MAQUINA	
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 4 DÍAS DE CURADO					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	1,1760	0,00254	0,9800	0,00254	0,9800
0,00508	2,7440	0,00508	2,5480	0,00508	2,3520
0,00762	6,4680	0,00762	6,2720	0,00762	5,2920
0,01016	11,7600	0,01016	12,5440	0,01016	10,7800
0,01270	17,6400	0,01270	17,0520	0,01270	16,0720
0,01524	23,5200	0,01524	23,5200	0,01524	22,5400
0,01778	30,3800	0,01778	29,4000	0,01778	28,4200
0,02032	36,8480	0,02032	35,2800	0,02032	34,3000
0,02286	42,7280	0,02286	41,1600	0,02286	40,1800
0,02540	49,0000	0,02540	48,0200	0,02540	46,0600
0,02794	55,4680	0,02794	54,8800	0,02865	51,9400
0,03048	57,8200	0,03048	59,7800		

TABLA 18.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 22.5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 11 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 11 DÍAS DE CURADO					
T	26,2 °C	HUMEDAD	68,9 HR	MAQUINA	
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 11 DÍAS DE CURADO					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	1,1760	0,00254	0,9016	0,00254	0,9800
0,00508	1,5680	0,00508	2,1560	0,00508	1,9600

Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,01016	6,6640	0,01016	9,8000	0,01016	7,4480
0,01270	11,7600	0,01270	16,6600	0,01270	11,5640
0,01524	17,0520	0,01524	24,5000	0,01524	17,0520
0,01778	23,5200	0,01778	31,3600	0,01778	21,5600
0,02032	28,4200	0,02032	39,2000	0,02032	27,4400
0,02286	34,3000	0,02286	45,0800	0,02286	33,3200
0,02540	40,1800	0,02540	51,9400	0,02540	41,1600
0,02794	46,0600	0,02794	57,8200	0,02794	52,9200
0,03048	51,9400	0,03048	64,6800	0,03211	60,7600
0,03302	56,8400	0,03302	70,5600		
0,03556	59,7800	0,03556	75,4600		

TABLA 19.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 22.5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 18 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 18 DÍAS DE CURADO					
T	25,4 °C	HUMEDAD	69,5 HR	MAQUINA	
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 18 DÍAS DE CURADO					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	2,6672	0,00254	6,4012	0,00254	1,7781
0,00508	8,8906	0,00508	13,8693	0,00508	8,3571
0,00762	21,5152	0,00762	25,6048	0,00762	23,2933
0,01016	30,7613	0,01016	49,7871	0,01016	40,1853
0,01270	53,3434	0,01270	68,4573	0,01270	63,1230
0,01524	65,7901	0,01600	86,2384	0,01524	80,0150
0,01778	71,1245			0,01778	86,2384
0,02032	83,5713				

TABLA 20.- DATOS EXPERIMENTALES Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LAS MUESTRAS DE 22.5% DE ZEOLITA ENSAYADAS A LOS 25 DÍAS

CONDICIONES DE ENSAYO A LOS 25 DÍAS DE CURADO					
T	26,5 °C	HUMEDAD	68,4 HR	MAQUINA	
DATOS OBTENIDOS POR CADA MUESTRA A LOS 25 DÍAS DE CURADO					
MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)	Def. Unitaria	Esfuerzo (Mpa)
0,00254	4,4453	0,00254	7,8237	0,00254	10,3130
0,00508	15,1140	0,00508	20,6261	0,00508	25,9604
0,00762	24,0045	0,00762	34,4954	0,00762	43,5637
0,01016	41,7856	0,01016	59,5668	0,01016	59,5668
0,01270	61,3449	0,01270	70,2354	0,01275	74,6807
0,01638	79,1260				

TABLA 21.- RESULTADO GENERAL PARA CADA MUESTRA DE 22.5% DE ZEOLITA A LOS DÍAS CORRESPONDIENTES DE CURADO

Variables Independientes		Variables Dependientes o Resultados					
(%)	días	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Def. Máxima	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
22,5	4	55,468	57,82	0,0304	1985,254	0,0424	0,001355
22,5	4	54,88	59,78	0,0304	1964,209	0,0893	0,000045
22,5	4	46,06	51,94	0,0286	1813,385	0,1277	0,000009
22,5	11	56,84	59,78	0,0355	1721,381	0,0517	0,000832
22,5	11	70,56	75,46	0,0355	2136,886	0,0694	0,000247
22,5	11	52,92	60,76	0,0321	1894,058	0,1481	0,000026
22,5	18	65,7901	83,5713	0,0203	4316,938	0,2703	0,000961
22,5	18	68,4573	86,2384	0,016	5390,339	0,2597	0,000003
22,5	18	80,015	86,2384	0,0177	5250,33	0,0778	0,001355
22,5	25	61,3449	79,126	0,0164	4830,304	0,2899	0,000001
22,5	25	59,5668	70,2354	0,0127	5862,869	0,1791	0,00072
22,5	25	59,5668	74,6807	0,0128	5862,869	0,2537	0,000013

4.2 Análisis Estadístico.

Se procedió a realizar el análisis en estadística descriptiva para constatar la normalidad de los datos experimentales (debido a que es prioridad para luego trabajar en el análisis de varianza), usando el método de Shapiro y Wilk.

Para el análisis a priori, se tienen la siguiente hipótesis:

- ❖ Ho: Datos experimentales muestran distribución normal.
- ❖ H1: Datos experimentales no muestran distribución normal.

El desarrollo del análisis mediante el método ya mencionado, permitió calcular el estadístico de prueba W_{grafica} y poder compararlo con W_{tabla} tabulado mostrado en el anexo I donde se especifica el valor estimado a comparar, teniendo un nivel de significancia $\alpha=0.05$ para $N = 12$. Si el $W_{\text{grafica}} < W_{\text{tabla}}$ se rechazó la hipótesis de la normalidad de los datos.

La tabla 11 y 12 muestran los parámetros que se utilizaron para el cálculo de $W_{grafica}$ donde fueron ingresados al programa STATISTICA y previamente analizados.

TABLA 22.- ESFUERZOS DE COMPRESIÓN PARA 20% DE ZOLITA CON SUS RESPECTIVOS DÍAS DE CURADO

Variables Independientes		Variable Dependientes
%	Días de curado	Esfuerzo (Mpa)
20	7	49
20	7	47,04
20	7	44,1
20	14	44,1
20	14	49
20	14	55,86
20	21	51,94
20	21	48,02
20	21	54,88
20	28	67,568256
20	28	68,457312
20	28	65,790144

TABLA 23.- ESFUERZOS DE COMPRESIÓN PARA 22.5% DE ZEOLITA CON SUS RESPECTIVOS DÍAS DE CURADO

Variables Independientes		Variable Dependientes
%	Días de curado	Esfuerzo (Mpa)
22,5	4	57,82
22,5	4	59,78
22,5	4	51,94
22,5	11	59,78
22,5	11	75,46
22,5	11	60,76
22,5	18	83,571264
22,5	18	86,238432
22,5	18	86,238432
22,5	25	79,125984
22,5	25	70,235424
22,5	25	74,680704

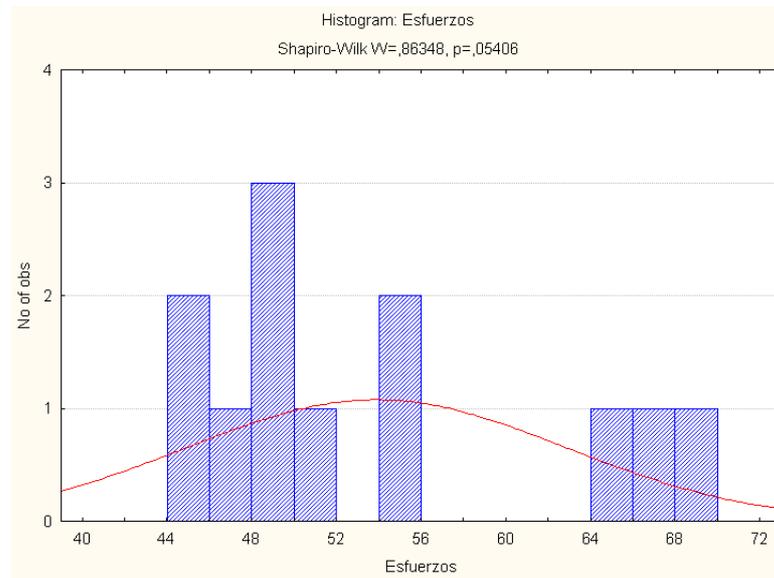


FIGURA 4.1. Histograma de esfuerzos para pastas de cemento con un 20% de Zeolita.

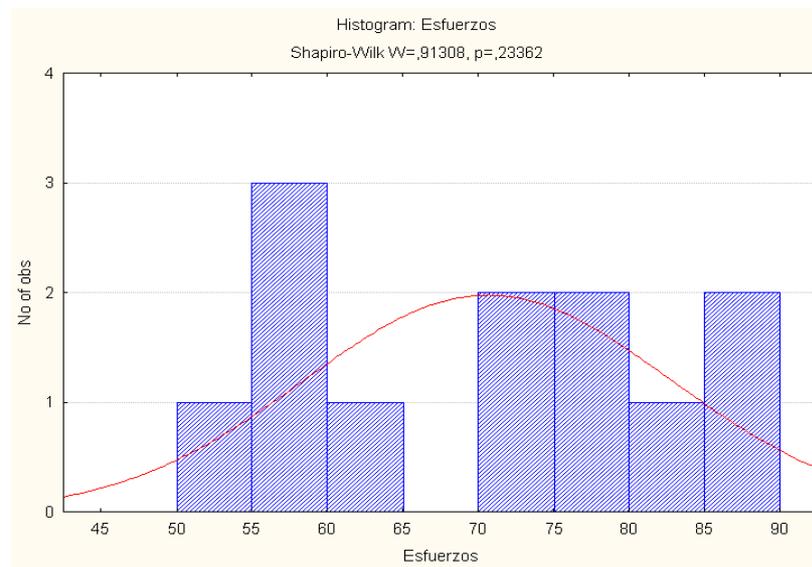


FIGURA 4.2. Histograma de esfuerzos para pastas de cemento con un 22.5% de Zeolita.

La figura 4.1 muestra que $W_{\text{grafica}} = 0.86348$ es mayor que W_{tabla} tabulado entonces se aceptó la hipótesis planteada, también se observó que la probabilidad $p = 0.05406$ es mayor a 0.05. Asimismo, la figura 4.2 que es para el trabajo de validación, da que $W_{\text{grafica}} = 0.91308$ es mayor que W_{tabla} tabulado. Por lo tanto los datos son normales y se pudo aplicar ANOVA (análisis de varianza).

Esto indica que, mientras mas cercano a uno es el estadístico W , existirá un mejor ajuste en la distribución normal de datos.

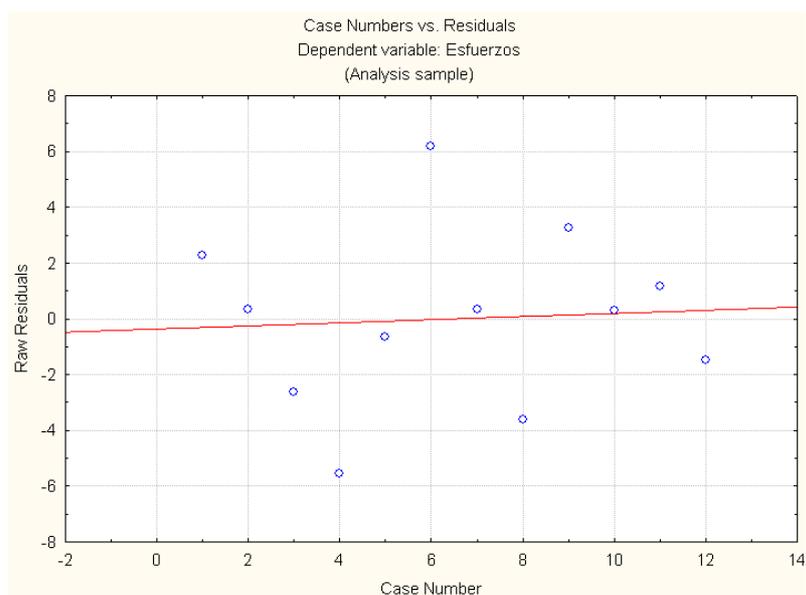


FIGURA 4.3. Residuos contra Número de casos para pastas de cemento con una concentración de 20% de Zeolita.

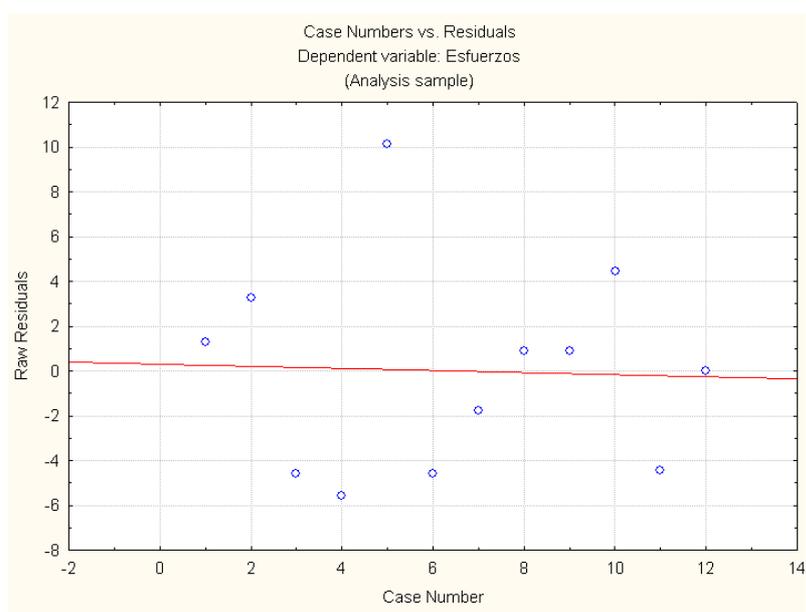


FIGURA 4.4. Residuos contra Número de casos para pastas de cemento con una concentración de 22.5% de Zeolita.

En la figura 4.3 y 4.4 se muestra el análisis de los residuos contra el número de casos para una distribución normal esfuerzo de compresión, esto da a conocer como se comportaron los residuos con respecto a la media de los esfuerzos para las pastas de cemento con 20% y 22.5% de Zeolita.

En la figura 4.5 y 4.6 se muestra las suposiciones de varianza homogénea y distribución de errores normales, respectivamente para las pastas de cemento con 20% y 22.5% de Zeolita.

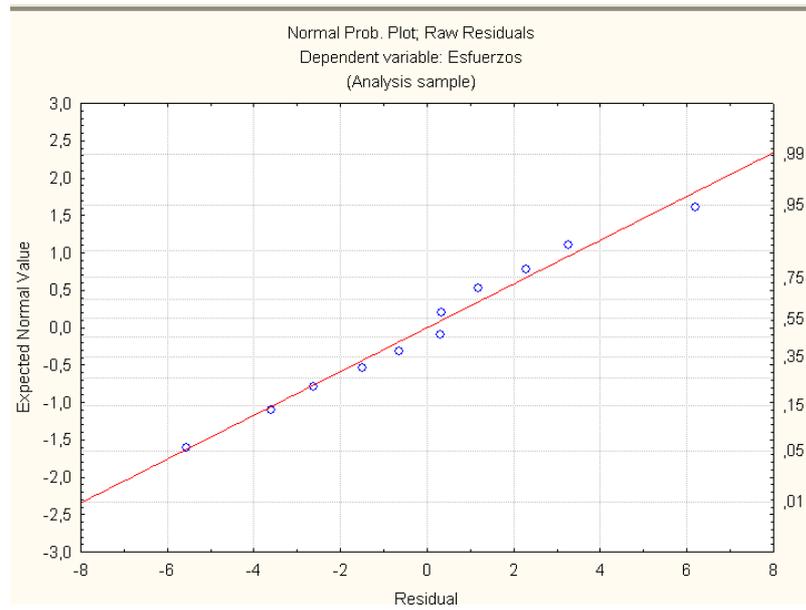


FIGURA 4.5. Probabilidad Normal de los residuos para pastas de cemento con 20% de Zeolita.

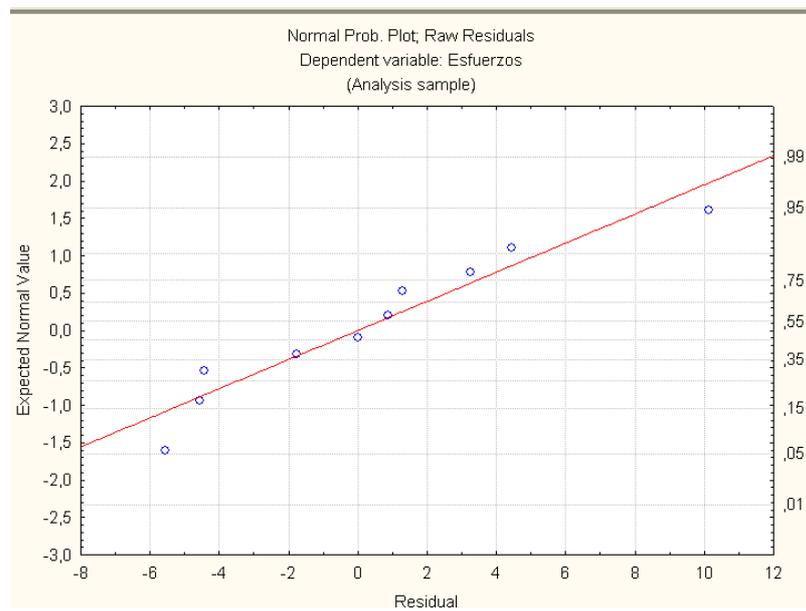


FIGURA 4.6. Probabilidad Normal de los residuos para pastas de cemento con 22.5% de Zeolita.

Análisis de Varianza

Una vez que se comprobó la homogeneidad de los datos, se trabajó nuevamente en el software STATISTICA que permitió mediante ONE WAY ANOVA realizar un análisis de varianza simple (de una variable), en función de los días de curado. El método sirvió para hallar cifras significativas entre los tratamientos (días de curado).

Univariate Tests of Significance for Esfuerzo (Sheet4 in datos.stw)					
Sigma-restricted parameterization					
Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	34750,04	1	34750,04	2542,702	0,000000
Días	761,07	3	253,69	18,563	0,000581
Error	109,33	8	13,67		

FIGURA 4.7. Prueba de significancia para esfuerzo último en pasta de cemento con 20% de zeolita.

La figura 4.7 da a conocer el estadístico de Fisher F que indica si existen diferencias significativas entre las medias con sus respectivos días de curado.

Para la existencia de aquella diferencia ya mencionada, se debió tomar en cuenta la siguiente relación:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

De donde F_0 fue calculado mediante el software STATISTICA, en tanto que $F_{(v1, v2)}$ se la obtuvo de la tabla de Fisher en el anexo J. Se trabajó como datos $N = 12$ muestras, y $t = 4$ grados de libertad, representado por los días de curado.

De la figura 4.7 desarrollada en STATISTICA se realizó un análisis de los cuadrados medios requeridos que muestran un valor de CMT = 253.69 y tres grados de libertad, también un CME = 13.67 con ocho grados de libertad.

La tabla 13, que fue trabajada en Excel muestra los mismos resultados pero dando también el valor crítico de F. Se observa que $F > F_{\text{critico}}$, por lo que la hipótesis que fue planteada para este caso se debió rechazar, con esto se llegó a determinar que hay cifras significativas entre las medias con sus respectivos días de curado mostrado en la tabla 14.

$$F = 18.56 > F_{\text{critico}} = 4.06$$

TABLA 24.- ANALISIS DE VARIANZA 20% ZEOLITA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	761	3	253,7	18,5627	0,000581	4,066
Dentro de los grupos	109	8	13,67			
Total	870	11				

Días; LS Means (Sheet4 in datos.stw)						
Current effect: F(3, 8)=18,563, p=,00058						
Type I decomposition						
Cell No.	Días	Esfuerzo Mean	Esfuerzo Std.Err.	Esfuerzo -95,00%	Esfuerzo +95,00%	N
1	7	46,71333	2,134368	41,79147	51,63519	3
2	14	49,65333	2,134368	44,73147	54,57519	3
3	21	51,61333	2,134368	46,69147	56,53519	3
4	28	67,27190	2,134368	62,35004	72,19377	3

FIGURA 4.8. Medias de la pasta cemento con 20% de zeolita, curado al aire

La figura 4.9 también indica que a los 28 días el esfuerzo promedio último es mayor, llegando a una conclusión temprana de que para el día ya indicado existió un mejor tratamiento.

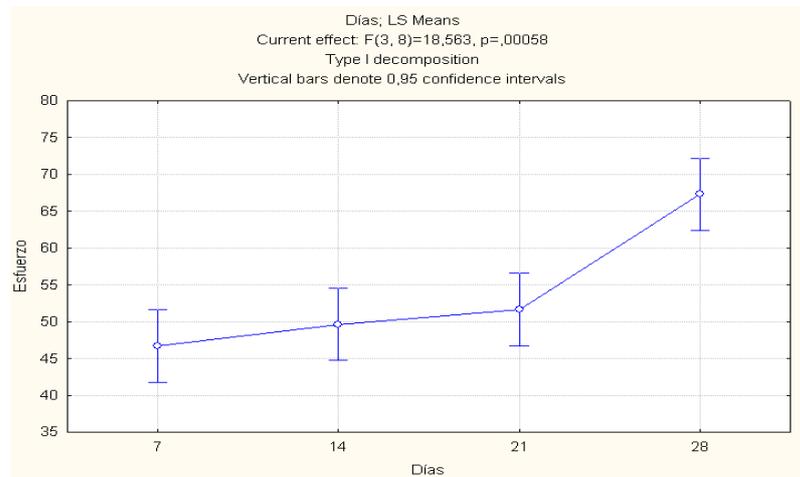


FIGURA 4.9. Grafico Esfuerzo Último vs. Días (20% de zeolita)

Se procedió a realizar el mismo trabajo de análisis para los datos de validación 22.5% de zeolita. Tomando en cuenta nuevamente la relación:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

De la figura 4.10 desarrollada en STATISTICA se realizó un análisis de los cuadrados medios requeridos que muestran un valor de CMT = 460.30 y tres grados de libertad, también un CME = 28.98 con ocho grados de libertad. Las siguientes tablas muestran los resultados que se obtuvieron para la respectiva validación.

Univariate Tests of Significance for Esfuerzos (Sheet4 Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	59590,87	1	59590,87	2056,082	0,000000
Dias	1380,90	3	460,30	15,882	0,000989
Error	231,86	8	28,98		

FIGURA 4.10. Prueba de significancia para esfuerzo último en pasta de cemento con 22.5% de zeolita.

Se tiene que $F = 15.882 > F_{\text{critico}} = 4.06$, por lo tanto existieron diferencias significativas. La figura 4.11 da a conocer el intervalo de confianza del esfuerzo último para cada tratamiento con el 95% de confianza.

Dias; Unweighted Means (Sheet4 in Imported from E:\dx Current effect: F(3, 8)=15,882, p=,00099 Effective hypothesis decomposition					
Dias	Esfuerzos Mean	Esfuerzos Std.Err.	Esfuerzos -95,00%	Esfuerzos +95,00%	N
4	56,51333	3,108200	49,34581	63,68086	3
11	65,33333	3,108200	58,16581	72,50086	3
18	85,34937	3,108200	78,18184	92,51689	3
25	74,68070	3,108200	67,51318	81,84822	3

FIGURA 4.11 Medias de la pasta cemento con 22.5% de zeolita, curado al aire

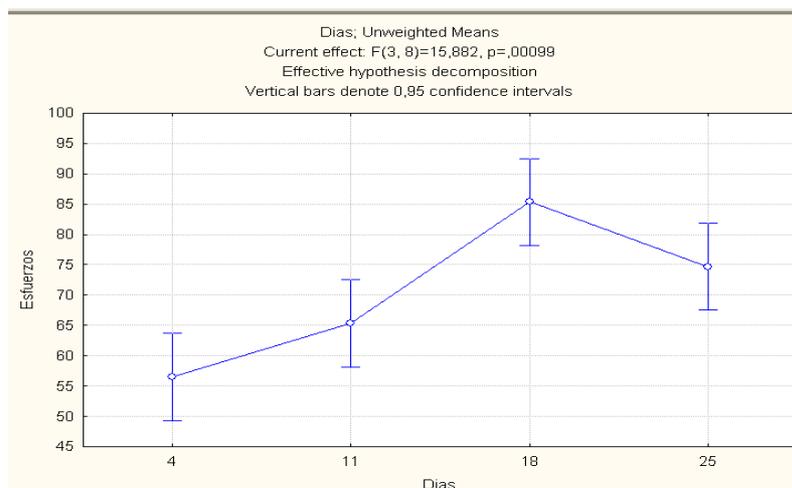


FIGURA 4.12. Grafico Esfuerzo Último vs. Días (22.5% de zeolita)

El grafico indica que el mayor esfuerzo es a los 18 días, por lo que el tratamiento del 20% no fue respaldado por la validación. Esta no coincidencia de resultados al día de esfuerzo máximo, pudo estar dado por cambios externos.

Análisis Grupal.

Primeramente, se utilizó estadística descriptiva para analizar la normalidad de los datos incluyendo los del experimento patrón, teniendo como factores los días de curado y los porcentaje de zeolita dados. La tabla 16 y 17 da a conocer los datos del experimento y los de validación, con las cuales se trabajó.

TABLA 25.- DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO DE COMPRESIÓN PARA EL CONTROL Y DIFERENTES PORCENTAJE DE ZEOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO

días	Porcentaje de Zeolita (%)						Tipo IV
	0	5	10	15	20	25	
	Control						
7	80,015	46,06	62,132	49,98	49	33,32	499.570
7	80,015	59,78	57,82	57,82	47,04	45,668	452.441
7	82,6822	57,82	56,252	52,92	44,1	47,236	452.441
14	87,1275	64,012	53,9	59,78	44,1	41,16	508.996
14	88,0165	66,679	57,82	55,86	49	45,08	499.570
14	88,0165	67,568	59,78	47,04	55,86	50,96	490.144
21	63,7	66,679	40,18	48,02	51,94	42,14	452.441
21	63,308	66,679	44,1	51,94	48,02	43,12	405.311
21	66,64	76,459	45,08	51,94	54,88	49,98	424.163
28	77,3479	67,568	62,72	59,78	67,568	54,88	405.311
28	76,4588	68,457	65,66	47,04	68,457	45,08	424.163
28	77,3479	73,792	71,54	54,88	65,79	50,96	429.819

TABLA 26.- ERRORES ESTÁNDAR E INTERVALOS DE CONFIANZA DEL ESFUERZO MÁXIMO PARA CADA PORCENTAJE DE ZEOLITA Y DÍA DE CURADO

%	días	Esfuerzo Máximo (Mpa)				Nº
		Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
				-95.00%	+95.00%	
0	7	80,904	2,465	75,9484	85,86	3
0	14	87,72	2,465	82,7645	92,676	3
0	21	64,549	2,465	59,5937	69,505	3
0	28	77,052	2,465	72,0958	82,007	3
5	7	54,553	2,465	49,5977	59,509	3
5	14	66,087	2,465	61,1308	71,042	3
5	21	69,939	2,465	64,9834	74,895	3
5	28	69,939	2,465	64,9834	74,895	3

%	días	Media	Error	-95.00%	+95.00%	Nº
10	7	58,735	2,465	53,779	63,69	3
10	14	57,167	2,465	52,211	62,122	3
10	21	43,12	2,465	38,1643	48,076	3
10	28	66,64	2,465	61,6843	71,596	3
15	7	53,573	2,465	48,6177	58,529	3
15	14	54,227	2,465	49,271	59,182	3
15	21	50,633	2,465	45,6777	55,589	3
15	28	53,9	2,465	48,9443	58,856	3
20	7	46,713	2,465	41,7577	51,669	3
20	14	49,653	2,465	44,6977	54,609	3
20	21	51,613	2,465	46,6577	56,569	3
20	28	67,272	2,465	62,3162	72,228	3
25	7	42,075	2,465	37,119	47,03	3
25	14	45,733	2,465	40,7777	50,689	3
25	21	45,08	2,465	40,1243	50,036	3
25	28	50,307	2,465	45,351	55,262	3
Tipo IV	7	4.681.504	272.102	1.570.980	4.005.566	3
Tipo IV	14	4.995.698	0.94258	0.544201	4.761.547	3
Tipo IV	21	4.273.050	237.212	1.369.544	3.683.783	3
Tipo IV	28	4.197.643	128.321	0.740861	3.878.877	3

La figura 4.13 muestra que los datos tuvieron una distribución normal; así también que la varianza es homogénea y que los residuos dieron una distribución normal.

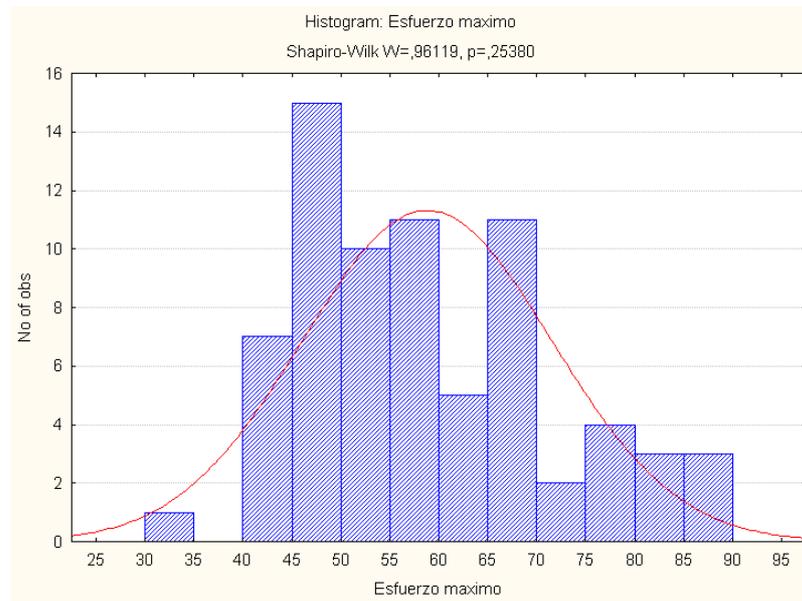


FIGURA 4.13. Distribución Normal de datos en análisis grupal (0-5-10-15-20-25% Zeolita)

En la figura 4.14., se ilustra una grafica de probabilidad normal de los residuales, observando que los residuos caen aproximadamente sobre la recta, se pudo determinar que no hay desviación importante de la normalidad.

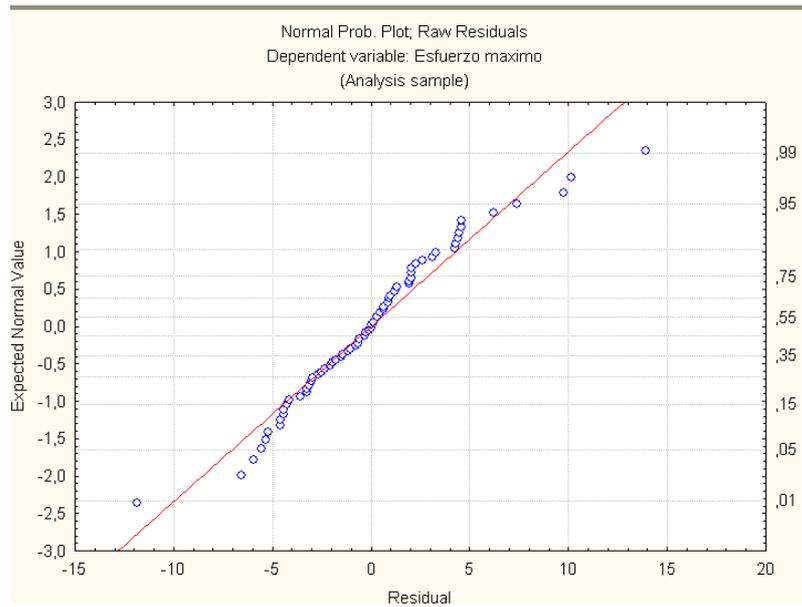


FIGURA 4.14. Probabilidad Normal de los residuos para pastas de cemento con diferentes porcentajes de Zeolita incluyendo el patrón.

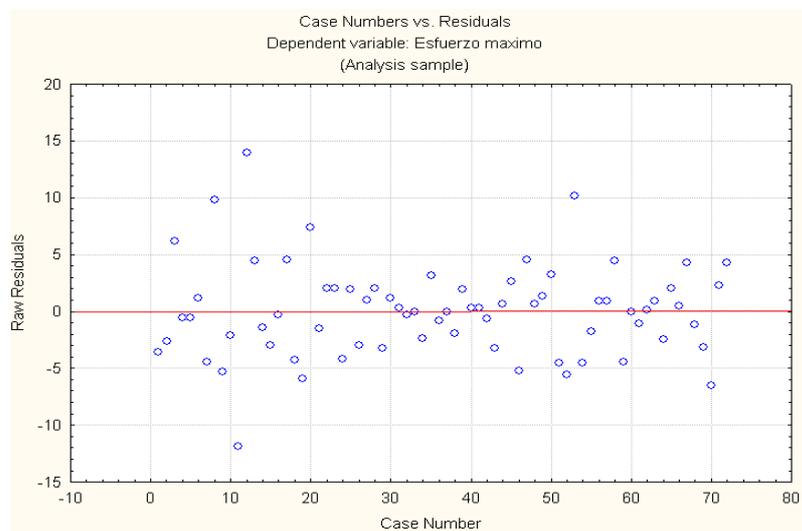


FIGURA 4.15. Residuos contra Número de casos para pastas de cemento con diferentes concentraciones de Zeolita incluyendo el patrón.

Se hizo el mismo análisis para los datos de validación con las cuales se trabajó. A continuación, se presenta lo realizado.

TABLA 27.- DATOS DE ESFUERZO MÁXIMO DE COMPRESIÓN PARA EL CONTROL Y DIFERENTES PORCENTAJE DE ZEOLITA PARA LA VALIDACIÓN A DIFERENTES DÍAS DE CURADO

Tiempo de Curado (días)	Porcentaje de Zeolita (%)					
	0	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5
	Control					
4	70,2354	63,7000	57,8200	49,9800	57,8200	31,7520
4	71,1245	57,8200	52,9200	48,0200	59,7800	32,9280
4	80,0150	56,2520	56,8400	51,9400	51,9400	33,7120
11	86,2384	66,6400	59,5668	49,0000	59,7800	38,2200
11	86,2384	71,5400	54,2324	49,0000	75,4600	42,7280
11	88,0165	62,7200	58,6777	48,0200	60,7600	41,1600
18	87,1275	68,4573	45,0800	46,0600	83,5713	48,6080
18	101,3524	81,7932	44,4920	49,9800	86,2384	43,1200
18	86,2384	72,9026	44,6880	51,9400	86,2384	41,1600
25	94,2399	72,0135	40,1800	45,0800	79,1260	28,4200
25	84,4603	72,0135	45,6680	54,8800	70,2354	37,2400
25	110,2429	65,7901	41,7480	50,9600	74,6807	39,2000

TABLA 28.- ERRORES ESTÁNDAR E INTERVALOS DE CONFIANZA DEL ESFUERZO MÁXIMO PARA CADA PORCENTAJE DE ZEOLITA DE VALIDACIÓN Y DÍA DE CURADO

% de zeolita	días	Esfuerzo Máximo (Mpa)				Nº
		Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
				- 95.00%	+95.00%	
0	4	73,7917	2,8772	68,0066	79,577	3
0	11	86,8311	2,8772	81,0461	92,616	3
0	18	91,5728	2,8772	85,7877	97,358	3
0	25	96,3144	2,8772	90,5293	102,1	3
7,5	4	59,2573	2,8772	53,4723	65,042	3
7,5	11	66,9667	2,8772	61,1816	72,752	3
7,5	18	74,3844	2,8772	68,5993	80,169	3
7,5	25	69,9391	2,8772	64,154	75,724	3
12,5	4	55,86	2,8772	50,0749	61,645	3
12,5	11	57,4923	2,8772	51,7072	63,277	3
12,5	18	44,7533	2,8772	38,9683	50,538	3
12,5	25	42,532	2,8772	36,7469	48,317	3
17,5	4	49,98	2,8772	44,1949	55,765	3
17,5	11	48,6733	2,8772	42,8883	54,458	3
17,5	18	49,3267	2,8772	43,5416	55,112	3
17,5	25	50,3067	2,8772	44,5216	56,092	3
22,5	4	56,5133	2,8772	50,7283	62,298	3
22,5	11	65,3333	2,8772	59,5483	71,118	3
22,5	18	85,3494	2,8772	79,5643	91,135	3
22,5	25	74,6807	2,8772	68,8956	80,466	3
27,5	4	32,7973	2,8772	27,0123	38,582	3
27,5	11	40,7027	2,8772	34,9176	46,488	3
27,5	18	44,296	2,8772	38,5109	50,081	3
27,5	15	34,9533	2,8772	29,1683	40,738	3

La figura 4.16 muestra que los datos mostraron una distribución normal; asumiendo también que la varianza es homogénea y que los residuos indicaron una distribución normal.

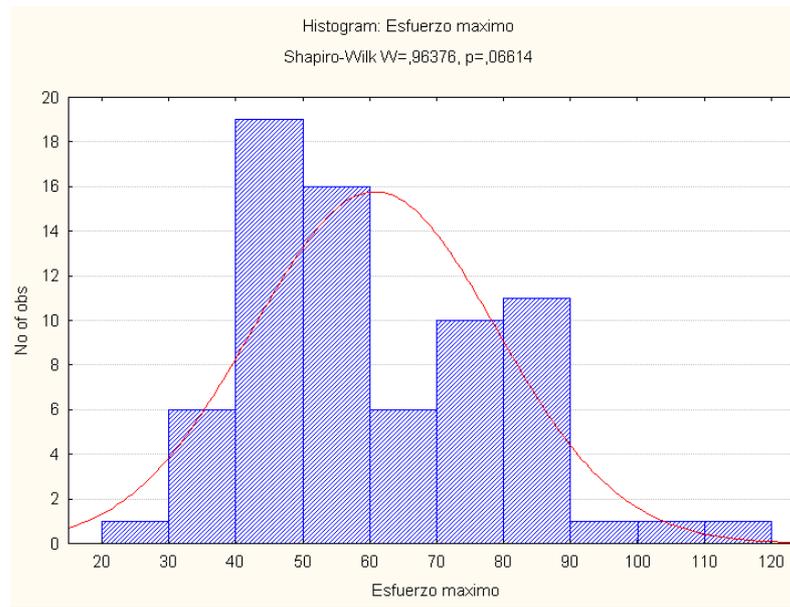


FIGURA 4.16. Distribución Normal de datos en análisis grupal (0-7.5-12.5-17.5-22.5-27.5% Zeolita)

En la figura 4.17., se ilustra una gráfica de probabilidad normal de los residuales, observando que los residuos caen aproximadamente sobre la recta, se pudo determinar que no hay desviación importante de la normalidad.

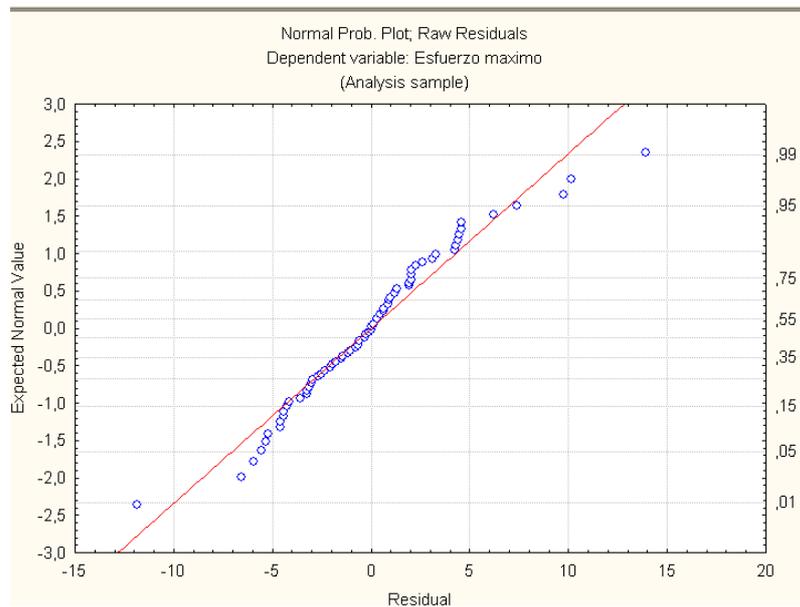


FIGURA 4.17. Probabilidad Normal de los residuos para pastas de cemento con diferentes porcentajes de Zeolita de validación incluyendo el patrón.

Análisis de Varianza

Comprobado la homogeneidad de los datos, nuevamente en el software STATISTICA se procedió a realizar un análisis de varianza simple (ANOVA – análisis factorial). Para el análisis se planteó las siguientes hipótesis:

- Ho: Las medias de los tratamientos son iguales
- H1: Al menos dos de las medias no son iguales

Las figura 4.18 y 4.19., muestran el análisis de covarianza y da a conocer el valor de probabilidad p siendo este menor al del estadístico $\alpha=0.05$ asumido, indicando que en los grupos definidos en la variable porcentaje tiene esfuerzos máximos medios diferentes y como también los esfuerzo máximos medios del grupo de la variable tiempo de curado. También da a presentar los efectos individuales en los efectos principales incluidos en el modelo.

El estadístico F correspondiente a este efecto llevó consecuentemente un nivel crítico de $p = 1.097 \times 10^{-9}$, lo cual da a conocer que la interacción Porcentaje – Tiempo de Curado generó un efecto significativo sobre el esfuerzo máximo de compresión. Esto quiere decir que si existieron diferencias significativas, por lo tanto se rechazó la hipótesis nula además se muestra el efecto que tiene la combinación de los dos factores porcentaje-días y se pudo decir que es significativo en ambos experimentos.

Efecto	Degr. Of freedom	SS	MS	F	p
Intercepto	1	270412.6	270412.6	16715.72	0.000000
Porcentaje (%)	6	9296.9	1549.5	95.78	0.000000
Tiempo de Curado (días)	3	914.9	305.0	18.85	1.414×10 ⁻⁸
Porcentaje (%)*Tiempo de Curado (días)	18	2290.5	127.2	7.87	1.097×10 ⁻⁹
Error	56	905.9	16.2		

FIGURA 4.18. Análisis de covarianza de dos factores para el experimento.

Univariate Tests of Significance for Esfuerzo maximo (Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition)					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	263758,7	1	263758,7	10620,23	0,000000
Porcentaje	19002,6	5	3800,5	153,03	0,000000
Dias	982,4	3	327,5	13,18	0,000002
Porcentaje*Dias	2384,5	15	159,0	6,40	0,000000
Error	1192,1	48	24,8		

FIGURA 4.19. Análisis de covarianza de dos factores para la validación.

La figura 4.20 y 4.21., da a conocer los intervalos de esfuerzos a la compresión de las pastas de cemento con un nivel de confianza del 95% con los factores descritos.

Porcentajes; Weighted Means (Sheet14 in Imported from F:\c
Current effect: F(5, 48)=82,169, p=0,0000
Effective hypothesis decomposition

Cell No.	Porcentajes	Esfuerzo Mean	Esfuerzo Std.Err.	Esfuerzo -95,00%	Esfuerzo +95,00%	N
1	0	77,55627	2,558812	71,92437	83,18818	12
2	5	65,12949	2,270529	60,13209	70,12689	12
3	10	56,41533	2,685557	50,50446	62,32620	12
4	15	53,08333	1,331488	50,15275	56,01392	12
5	20	53,81298	2,567865	48,16114	59,46481	12
6	25	45,79867	1,637960	42,19354	49,40379	12

FIGURA 4.20. Media de los tratamientos para los factores tiempo de curado y (0-5-10-15-20-25) % de zeolita.

Current effect: F(5, 48)=153,03, p=0,0000
Effective hypothesis decomposition

Porcentaje	Esfuerzo maximo Mean	Esfuerzo maximo Std.Err.	Esfuerzo maximo -95,00%	Esfuerzo maximo +95,00%	N
cero	87,12749	1,438619	84,23495	90,02003	12
siete cinco	67,63686	1,438619	64,74432	70,52939	12
doce cinco	50,15941	1,438619	47,26687	53,05194	12
diesisiete cinco	49,57167	1,438619	46,67913	52,46420	12
veintidos cinco	70,46919	1,438619	67,57665	73,36172	12
veintisiete cinco	38,18733	1,438619	35,29480	41,07987	12

FIGURA 4.21. Media de los tratamientos para los factores tiempo de curado y (0-7.5-12.5-17.5-22.5-27.5) % de zeolita.

Esto quiere decir que existieron diferencias entre las medias de los esfuerzos a la compresión, también se observó que mientras mayor porcentaje de zeolita tenía la pasta de cemento compuesto, menor era el esfuerzo a la compresión, en la figura 4.22., y 4.23, se puede constatar los rangos de las medias de los esfuerzos a la compresión para los dos factores ya mencionados.

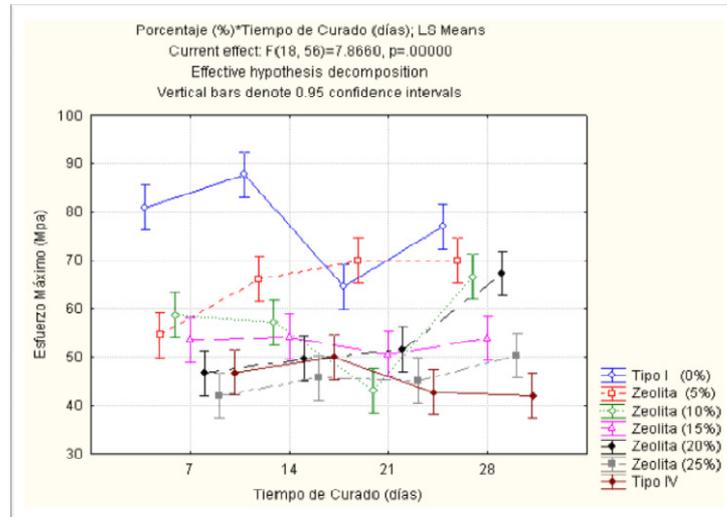


FIGURA 4.22. Esfuerzo a la compresión para los factores tiempo de curado y porcentajes de zeolita.

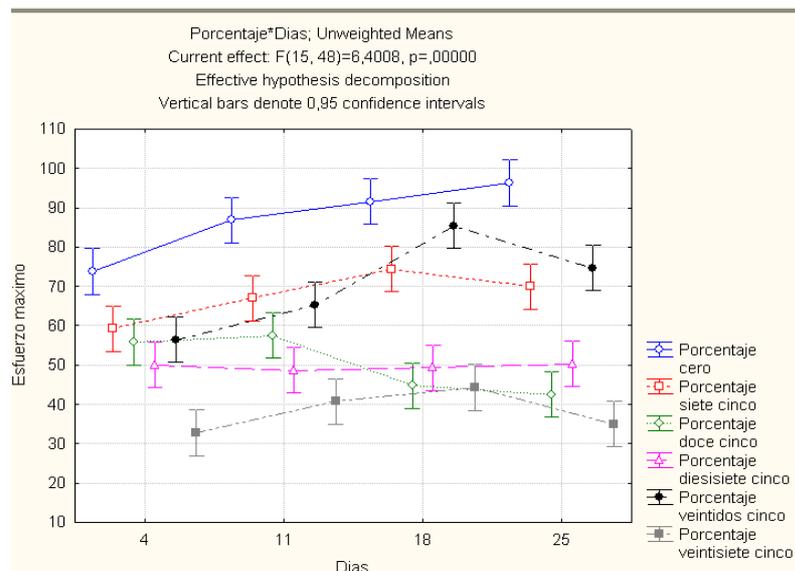


FIGURA 4.23. Esfuerzo a la compresión para los factores tiempo de curado y porcentajes de zeolita.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, del experimento patrón y de la validación se tiene que, la pasta de cemento (sin porcentaje de zeolita) sus esfuerzos de compresión están por encima

de los esfuerzos de las pasta de cemento con diferentes porcentajes de zeolita. Esto a priori indicó que no existieron una mejoría en las propiedades del cemento PÓRTLAND TIPO I, al agregarle distintos porcentajes de zeolita y teniendo como medio de curado el aire. A continuación la figura 4.24., y 4.25., muestran dos gráficos en las cuales se denota como variables independientes los factores tiempo de curado y porcentaje de zeolita y como variable dependiente el esfuerzo máximo a la compresión.

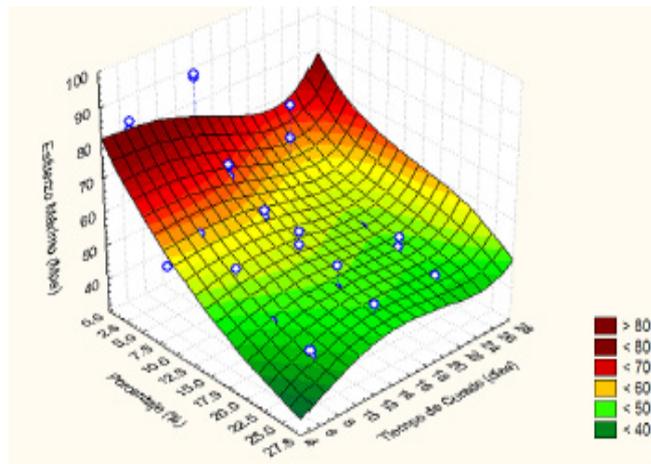


FIGURA 4.24. Esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempos de curado.

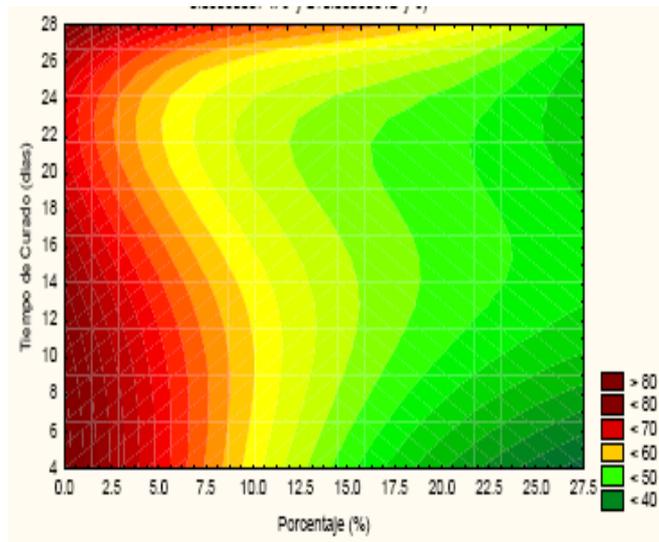


FIGURA 4.25. Curvas de nivel del esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempos de curado.

A continuación, se muestran las figuras 4.26 hasta 4.34., el comportamiento que denotaron las demás propiedades en una curva esfuerzo deformación como son: esfuerzo de fluencia, módulo de elasticidad, incluyendo los datos sugeridos en la norma ASTM C-109. Cuyos resultados se muestran en los apéndices C, D, F y G dando también los resultados de sus respectivas ecuaciones encontradas.

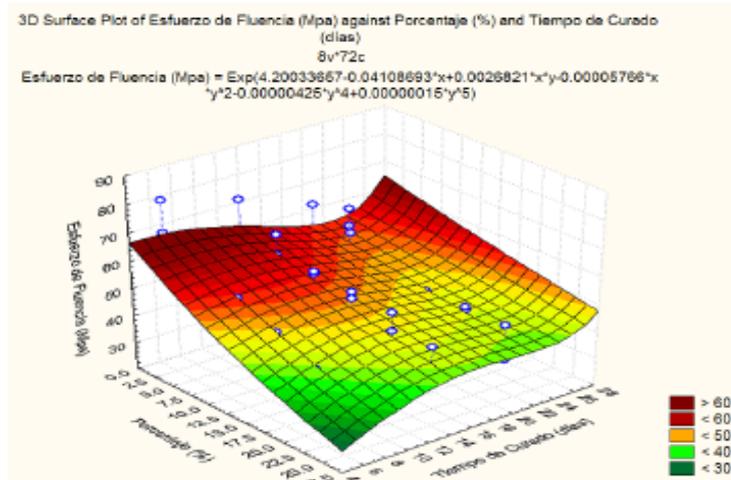


FIGURA 4.26. Superficie de respuesta del esfuerzo de fluencia en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

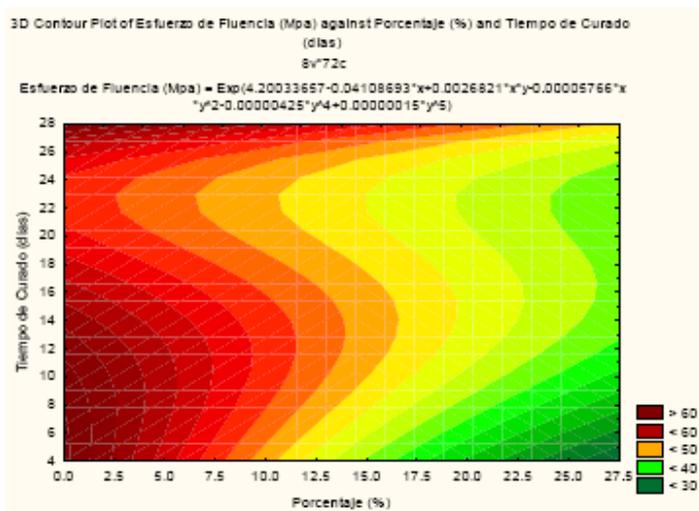


FIGURA 4.27. Curvas de nivel para el esfuerzo de fluencia en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

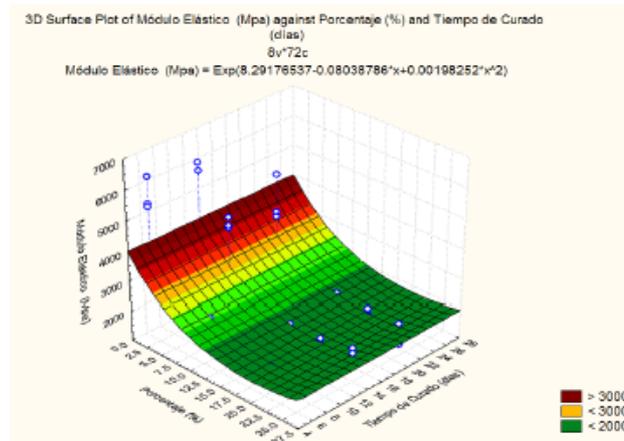


FIGURA 4.28. Superficie de respuesta del módulo de elasticidad en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

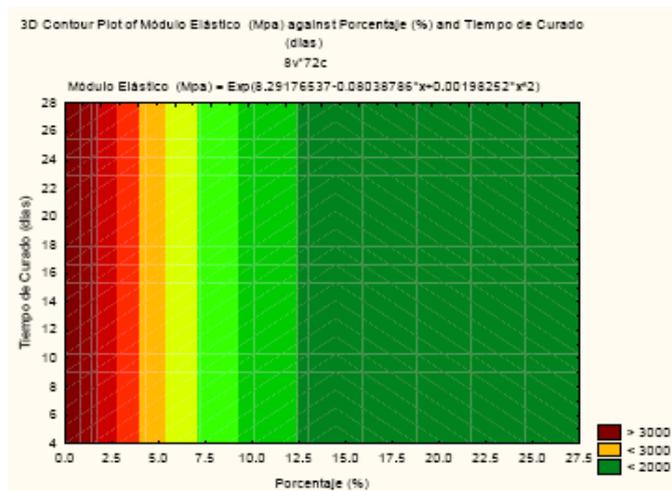


FIGURA 4.29. Curvas de nivel para el módulo de elasticidad en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

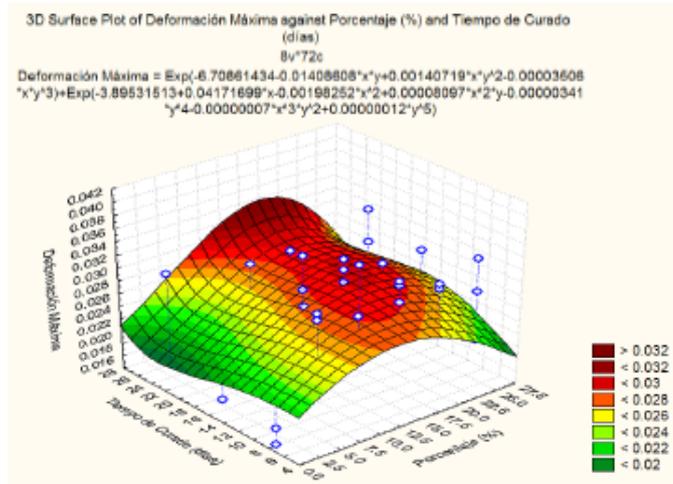


FIGURA 4.30. Superficie de respuesta de la deformación máxima en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

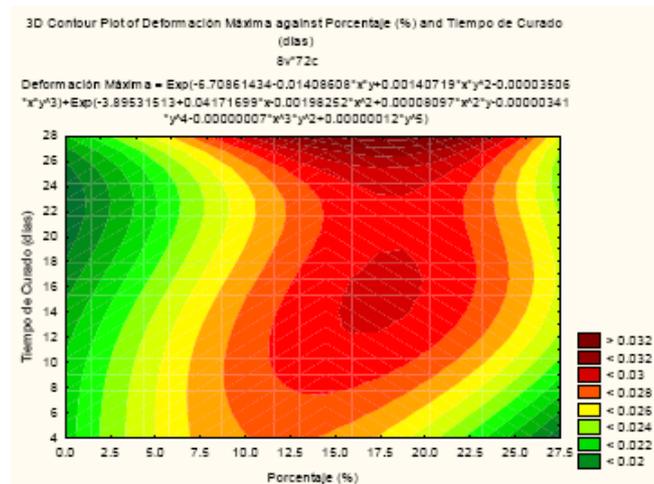


FIGURA 4.31. Curvas de nivel para la deformación máxima en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

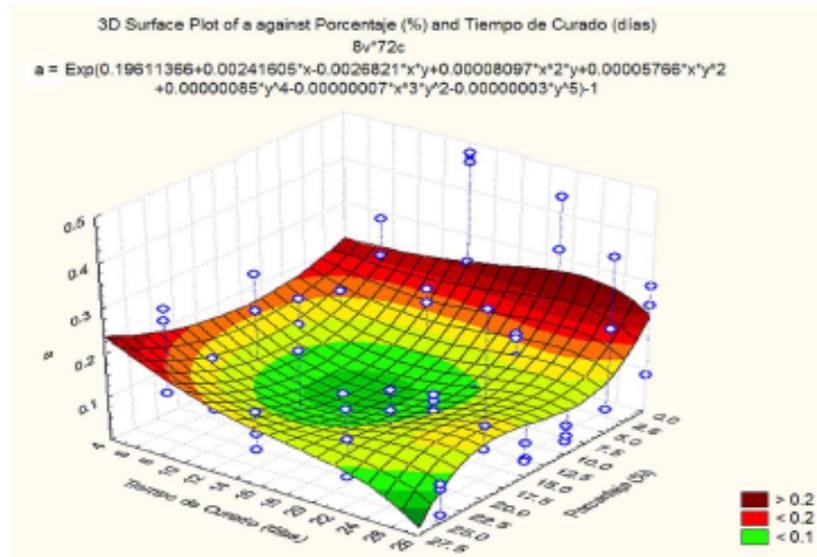


FIGURA 4.32. Superficie de respuesta del parámetro “a” en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

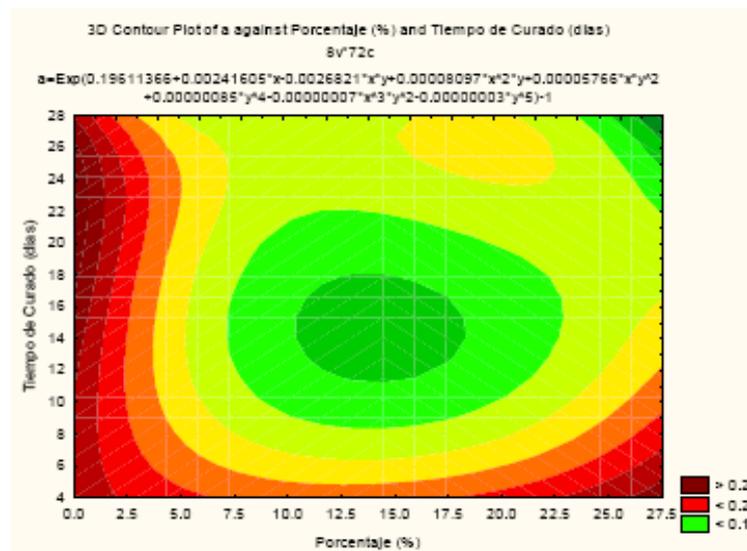


FIGURA 4.33. Curvas de nivel para el parámetro “a” en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

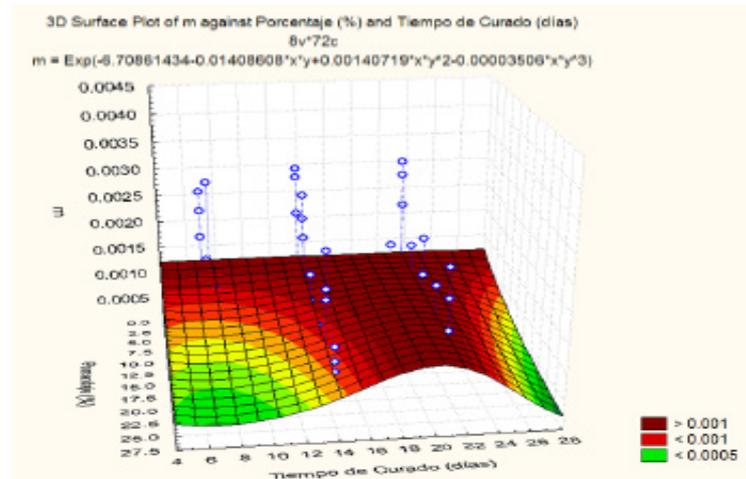


FIGURA 4.34. Superficie de respuesta de la deformación inelástica total (parámetro “m”) en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

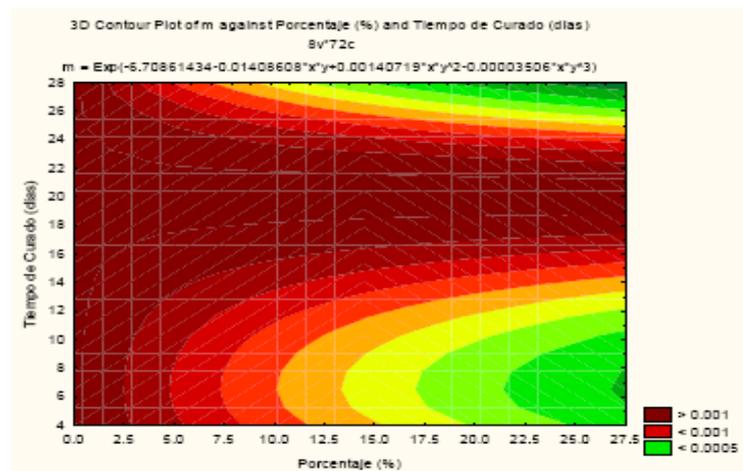


FIGURA 4.35. Curvas de nivel para la deformación inelástica total (parámetro “m”) en función del tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

4.3. Resultados del Modelo.

Una vez finalizado el análisis estadístico de los datos experimentales, se procedió a tomar los parámetros del modelo inelástico como también las propiedades para el modelo bilineal teórico que, por medio de la herramienta matemática MatLab fueron graficadas las curvas experimentales de esfuerzo versus deformación de cada uno de los cubos de cemento compuesto con 20% de zeolita y diferentes días de curados, realizando una comparación a los resultados obtenidos.

La tabla 17 muestra tanto las propiedades y parámetros que fueron ingresados para la simulación del modelo inelástico. La figura 4.36., presenta la curva simulada para estos parámetros, la cual se aprecia en azul, y las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los cubos de pasta de cemento compuesto con 20% de zeolita expuestos a un proceso de curado al aire por siete días.

TABLA 29.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 20% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 7 DÍAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1766,96 Mpa	Parámetro a	0,13455
Esfuerzo de Fluencia	40,04 Mpa	Parámetro m	0,00053
Esfuerzo Máximo	45,42 Mpa		
Deformación Máxima	0,0262		

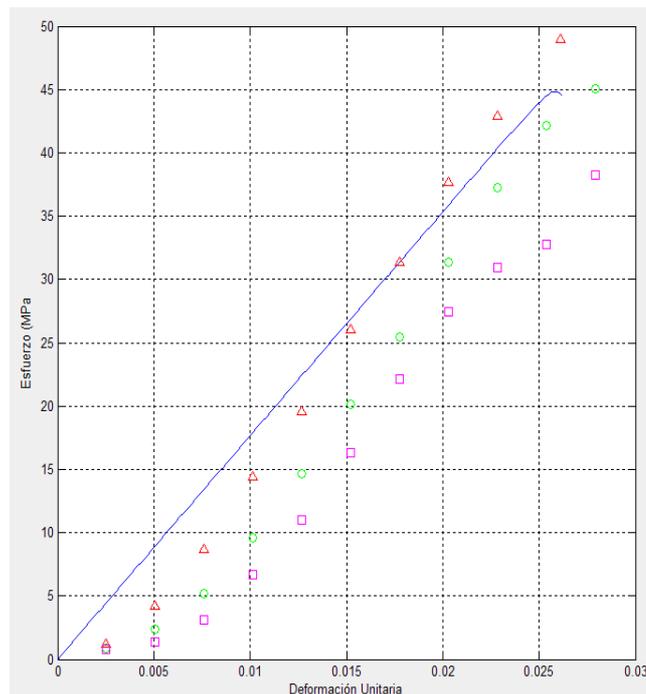


FIGURA 4.36. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 7 días de curado

La tabla 30 muestra tanto las propiedades y parámetros que fueron ingresados para la simulación del modelo inelástico. La figura 4.37., presenta la curva simulada para estos parámetros, la cual se aprecia en azul, y las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los cubos de pasta de cemento compuesto con 20% de zeolita expuestos a un proceso de curado al aire por catorce días.

TABLA 30.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 20% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 14 DÍAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1766,96Mpa	Parámetro a	0,082508
Esfuerzo de Fluencia	45,64 Mpa	Parámetro m	0,000858
Esfuerzo Máximo	49,41 Mpa		
Deformación Máxima	0,0288		

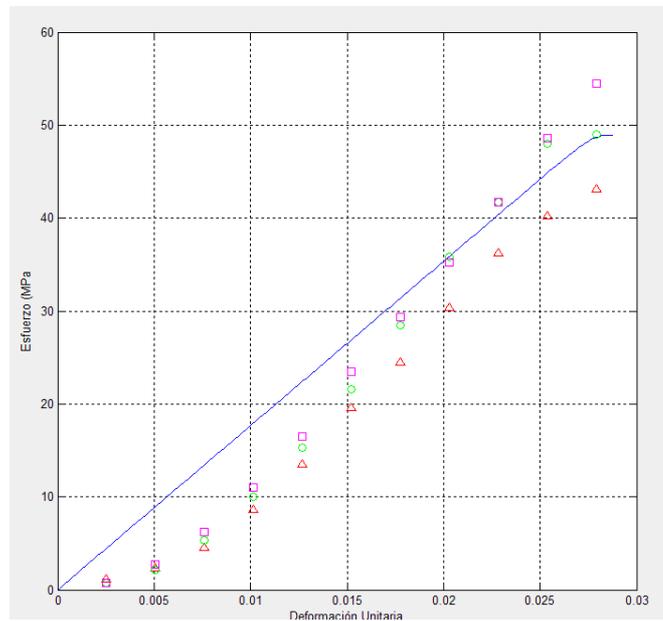


FIGURA 4.37. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 14 días de curado.

La tabla 31 muestra tanto las propiedades y parámetros que fueron ingresados para la simulación del modelo inelástico. La figura 4.38., presenta la curva simulada para estos parámetros, la cual se aprecia en azul, y las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los cubos de pasta de cemento compuesto con 20% de zeolita expuestos a un proceso de curado al aire por veinte y un días.

TABLA 31.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 20% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 21 DÍAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1766,96Mpa	Parámetro a	0,10517
Esfuerzo de Fluencia	43,92 Mpa	Parámetro m	0,0012221
Esfuerzo Máximo	48,57 Mpa		
Deformación Máxima	0,0287		

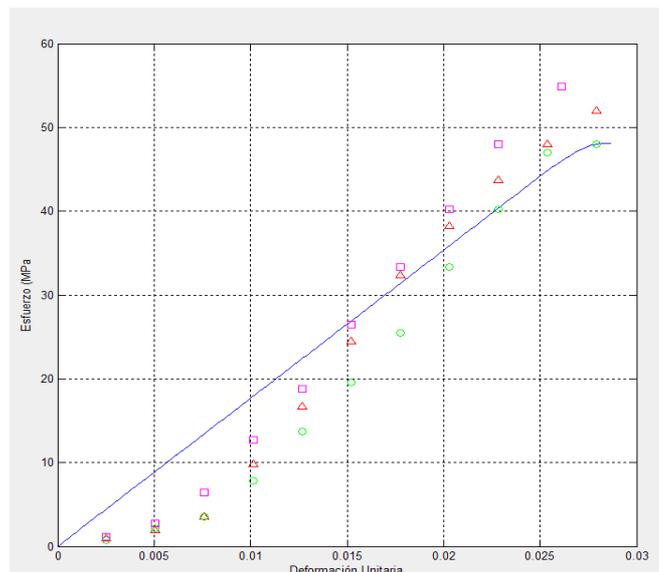


FIGURA 4.38. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 21 días de curado

La tabla 32 muestra tanto las propiedades y parámetros que fueron ingresados para la simulación del modelo inelástico. La figura 4.39., presenta la curva simulada para estos parámetros, la cual se aprecia en azul, y las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los

cubos de pasta de cemento compuesto con 20% de zeolita expuestos a un proceso de curado al aire por veinte y ocho días.

TABLA 32.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 20% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 28 DÍAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1766,96Mpa	Parámetro a	0,12119
Esfuerzo de Fluencia	51,71 Mpa	Parámetro m	0,000361
Esfuerzo Máximo	57,98 Mpa		
Deformación Máxima	0,0332		

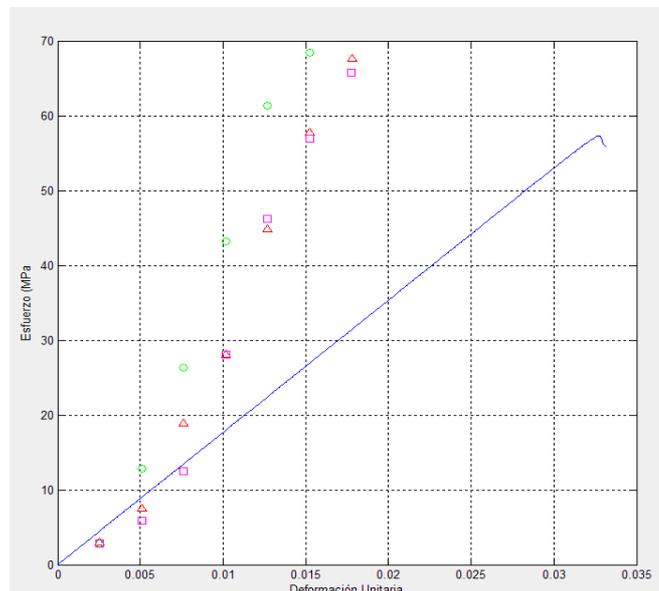


FIGURA 4.39. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 20% de zeolita y 28 días de curado

Las tablas 21 a la 24 se muestran tanto las propiedades y parámetros que fueron ingresados para la simulación del modelo inelástico en la validación. Las figuras 4.40., 4.41., 4.42., y 4.43, se presentan las curvas simuladas para estos parámetros, las cuales se aprecian en azul, y las curvas de esfuerzo-deformación de cada uno de los cubos de pasta de cemento compuesto con 22.5% de zeolita expuestos a un proceso de curado al aire por cuatro, once, dieciocho y veinticinco días respectivamente.

TABLA 33.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 22.5% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 4 DÍAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1784,13 Mpa	Parámetro a	0,1987
Esfuerzo de Fluencia	32,96 Mpa	Parámetro m	0,000541
Esfuerzo Máximo	39,52 Mpa		
Deformación Máxima	0,022693		

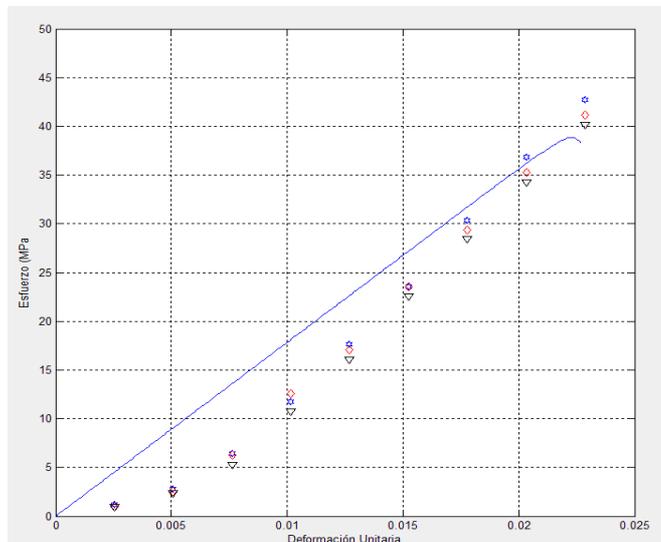


FIGURA 4.40. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 4 días de curado

TABLA 34.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 22.5% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 11 DÍAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1784,13 Mpa	Parámetro a	0,11129
Esfuerzo de Fluencia	42,29 Mpa	Parámetro m	0,000602
Esfuerzo Máximo	47,00 Mpa		
Deformación Máxima	0,026947		

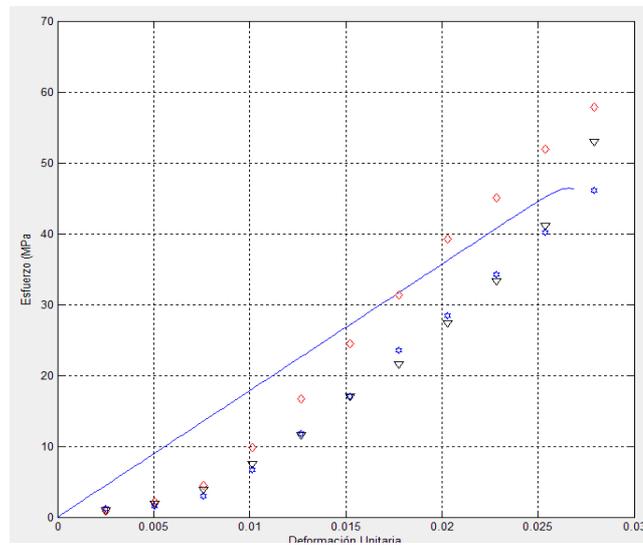


FIGURA 4.41. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 11 días de curado

TABLA 35.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 22.5% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 18 DIAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1784,13 Mpa	Parámetro a	0,10027
Esfuerzo de Fluencia	43,77 Mpa	Parámetro m	0,001164
Esfuerzo Máximo	48,16 Mpa		
Deformación Máxima	0,028161		

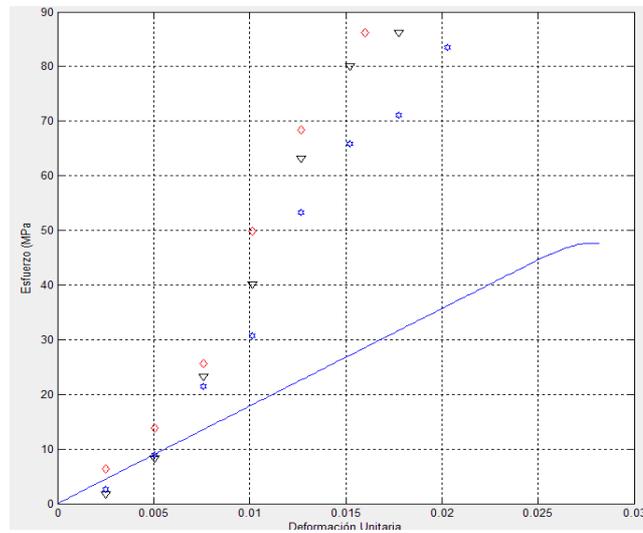


FIGURA 4.42. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 18 días de curado

TABLA 36.- DATOS INTRODUCIDOS EN LA SIMULACIÓN DE UNA PASTA DE CEMENTO CON 22.5% DE ZEOLITA Y CURADO A LOS 25 DÍAS.

Propiedades del Modelo		Parámetros del Modelo Inelástico	
Modulo de Elasticidad	1784,13 Mpa	Parámetro a	0,12101
Esfuerzo de Fluencia	43,74 Mpa	Parámetro m	0,000769
Esfuerzo Máximo	49,04 Mpa		
Deformación Máxima	0,028257		

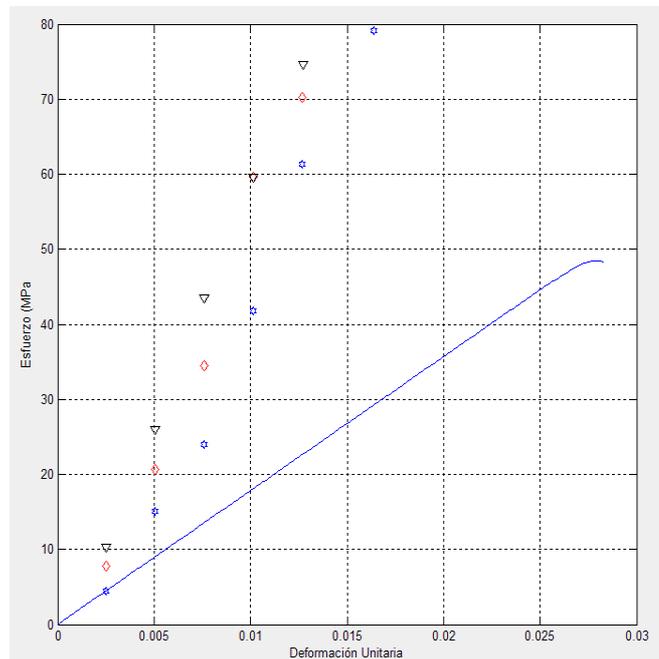


FIGURA 4.43. Curvas esfuerzo-deformación simulada para una pasta de cemento con 22.5% de zeolita y 25 días de curado

CAPÍTULO 5

5.- DISCUSIONES DE RESULTADOS

5.1 Recomendaciones.

Debe mencionarse que con la ayuda de la tecnología, implementando a la máquina de ensayos una computadora se puede minimizar en un factor importante los errores de las pruebas, para así obtener una mejor comprensión dentro de un estudio mediante software.

Uno de los factores más importantes para mejorar las propiedades del material compuesto es la hidratación que debe alcanzar el cemento, por lo tanto se recomienda mejorar las características del medio de curado (humedad y temperatura) en el cual se desarrolló el experimento.

5.2 Conclusiones.

La presente tesis tuvo como objetivo principal analizar el comportamiento de la resistencia a la compresión de las pastas de cemento, agregando 20% de Zeolita en la mezcla y aplicando un curado al aire, de este análisis se puede concluir que la resistencia a la compresión aumenta conforme se incrementa el tiempo de curado, sin embargo, este incremento de la resistencia a la compresión sólo se observó hasta los 28 días. Pero para el trabajo de la validación varió el día donde la compresión alcanza su mayor esfuerzo, tal como se puede apreciar en la figura 4.12.; este cambio no coincidente con el de la experimentación se debe a cambios externos realizados en el trabajo. El efecto de disminución de la resistencia a la compresión a edades tardías se debe a que el material no alcanzó la suficiente hidratación para poder incrementar su resistencia.

Del análisis estadístico se pudo extraer información acerca del mejor tratamiento manteniendo fija la concentración de Zeolita al 20% y se pudo concluir que para el tiempo de curado de 28 días la resistencia a la compresión fue mayor que para los otros tratamientos.

Del análisis grupal, el cual incluye los porcentajes de 5 -10 -15 - 20 y 25% de Zeolita, se concluye que el mejor tratamiento es el de 5% de Zeolita, teniendo un comportamiento casi cercano al patrón ya que los valores de resistencia a la compresión son mayores en este tratamiento.

Al incluir en el análisis los datos de la validación, se obtuvo una superficie de respuesta para los distintos porcentajes y el tiempo de curado, Figura 4.25, de la cual se puede concluir que los porcentajes de Zeolita y los días de curado para obtener una mayor resistencia a la compresión son de 7.5 a 12.5% y 18 a 28 días respectivamente.

Al analizar la resistencia a la compresión en las pastas de cemento, con un modelo teórico, seleccionando un modelo bilineal, el cual se comporta de manera lineal en la región elástica del material compuesto y tiene un comportamiento no lineal en la región plástica del material. Para analizar las dos regiones plástica y elástica se obtuvo ayuda de un algoritmo que permitió simular las dos regiones.

Para este algoritmo los datos de entrada fueron el módulo de Young, el esfuerzo de fluencia y las constantes a y m que son los valores

iniciales los cuales fueron encontrados y se muestran sus respectivas ecuaciones en el apéndice B.

Las curvas del modelo bilineal, tal como se muestra en las Figuras 4.36 hasta 4.39. También se observó que existió un margen de error entre las curvas, lo cual se atribuye a errores experimentales y además, el modelo con el que se compara es ideal.

Al comparar la resistencia a la compresión del material compuesto con el cemento tipo I se puede concluir que ningún tratamiento de con porcentajes de Zeolita y sus días de curado es mejor que el control.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Neville Adam. *Tecnología del Concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y Del Concreto, Tomo 1, paginas 2, 12, México, 1977

- [2] William F. Smith. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, McGraw – Hill, Concepción Fernández Madrid, Tercera edición, páginas 662, 663, 664, 665, Madrid, España.

- [3] Zelic , J. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 2319–2328.
A mathematical model for prediction of compressive strength in cement–silica fume blends, April, 2004

- [4] Princigallo, A. *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1013–1020.
A Early development of properties in a cement paste: A numerical and experimental study, December, 2002

- [5] Turanli, L. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 2277–2282. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural, April, 2004

- [6] Pekmezci, B. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 2175–2179
Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete, February, 2004

- [7] Nassif, H. *Cement and Concrete Research* 27 (2005) 661–670 Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC, December, 2004

- [8] Leitea, J. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 1025–1033
Computer simulation of fracture processes of concrete using
mesolevel models of lattice structures, November, 2003
- [9] Walpole, R. *Probabilidad y Estadística para Ingeniero*, sexta edición.
Prentice – Hall Hispanoamérica, S.A, páginas 358, 145, 232, 233, 481,
341, México, 1999]
- [10] Norma ASTM C 109 Standard Test Method for Compressive Strength of
Hydraulic Cement Mortars (Designation: C 109/C 109M – 02)
- [11] Notas de la materia Teoría de Inelasticidad. Ph. D. José Andrade.
Profesor de la universidad de Northwestern. R.I. Borja

APÉNDICE B

RESULTADOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA PREDECIR LOS VALORES DE LOS LOGARITMOS NATURALES DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS EN EL MODELO DE SIMULACIÓN

Variable Dependiente	R	R ²	R ²	Modelo			Residual			F	p
	Múltiple	Múltiple	Ajustado	SC	GL	CM	SC	GL	CM		
Ln (Esfuerzo Máximo)	0.841215	0.707643	0.685494	2.299637	5	0.459927	0.950078	66	0.014395	31.95023	0.000000
Ln (Esfuerzo de Fluencia)	0.795573	0.632936	0.605128	1.713736	5	0.342747	0.993862	66	0.015059	22.76101	0.000000
Ln (Módulo Elástico)	0.671475	0.450878	0.434962	6.088924	2	3.044462	7.415655	69	0.107473	28.32762	0.000000
Ln (m)	0.373461	0.139473	0.101509	13.58470	3	4.528232	83.81529	68	1.232578	3.673790	0.016270

APÉNDICE C

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL ESFUERZO MÁXIMO

Ln (Esfuerzo Máximo)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		4.39645023	0.04517187	97.32716	0.000000	4.30626168	4.48663879				
x		-0.03867087	0.00589225	-6.56300	0.000000	-0.05043513	-0.02690661	-1.55432	0.236831	-2.02717	-1.08147
x ² y		0.00008097	0.00002806	2.88590	0.005269	0.00002495	0.00013699	1.76288	0.610861	0.54326	2.98251
y ⁴		-0.00000341	0.00000094	-3.62171	0.000569	-0.00000528	-0.00000153	-3.89865	1.076468	-6.04789	-1.74941
x ³ y ²		-0.00000007	0.00000003	-2.17905	0.032903	-0.00000014	-0.00000001	-0.96490	0.442808	-1.84899	-0.08081
y ⁵		0.00000012	0.00000003	3.73675	0.000392	0.00000006	0.00000018	3.93859	1.054013	1.83418	6.04299

$$\sigma_u = e^{4.39645023 - 0.03867087x + 0.00008097x^2y - 0.00000341y^4 - 0.00000007x^3y^2 + 0.00000012y^5}$$

$$xy \quad xx^2yy^4 \quad x^3y^2y^5$$

APÉNDICE D

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL ESFUERZO DE FLUENCIA

Ln (Esfuerzo de Fluencia)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		4.20033657	0.04196080	100.1014	0.000000	4.116559	4.284114				
x		-0.04108693	0.00760803	-5.4005	0.000001	-0.056277	-0.025897	-1.80922	0.335012	-2.47809	-1.14035
xy		0.00268210	0.00098245	2.7300	0.008112	0.000721	0.004644	2.63757	0.966140	0.70861	4.56653
xy ²		-0.00005766	0.00002819	-2.0452	0.044827	-0.000114	-0.000001	-1.56179	0.763643	-3.08646	-0.03713
y ⁴		-0.00000425	0.00000111	-3.8156	0.000302	-0.000006	-0.000002	-5.33412	1.397985	-8.12529	-2.54295
y ⁵		0.00000015	0.00000004	3.8723	0.000250	0.000000	0.000000	5.37536	1.388154	2.60382	8.14690

$$\sigma_y = e^{4.20033657 - 0.04108693x + 0.00268210xy - 0.00005766xy^2 - 0.00000425y^4 + 0.00000015y^5}$$

$$xyxyxy^2 y^4 y^5)$$

APÉNDICE E

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Ln (Módulo de elasticidad)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		8.291765	0.085772	96.67240	0.000000	8.120655	8.462875				
x		-0.080388	0.016136	-4.98193	0.000004	-0.112578	-0.048198	-1.58500	0.318150	-2.21969	-0.950309
y	Removido										
x ²		0.001983	0.000620	3.19997	0.002078	0.000747	0.003218	1.01807	0.318150	0.38338	1.652762

$$E = e^{8.291765 - 0.080388x + 0.001983x^2}$$

$$xyxx^2)$$

APÉNDICE F

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DEL LOGARITMO NATURAL DEL PARÁMETRO M

Ln (m)											
Efecto	Comentario (B/Z/P)	Coeficiente	Error Estándar	t	p	Intervalo de Confianza		Beta (β)	Error Estándar β	Intervalo de Confianza β	
						-95.00%	+95.00%			-95.00%	+95.00%
Intercepto		-6.7086143	0.231060	-29.0341	0.000000	-7.16969	-6.24754				
xy		-0.0140861	0.005709	-2.4675	0.016128	-0.02548	-0.00269	-2.30957	0.935990	-4.17731	-0.44184
xy ²		0.0014072	0.000544	2.5866	0.011839	0.00032	0.00249	6.35531	2.457052	1.45233	11.25828
xy ³		-0.0000351	0.000013	-2.7041	0.008646	-0.00006	-0.00001	-4.41731	1.633572	-7.67705	-1.15757

$$m = e^{-6.7086143 - 0.0140861xy + 0.0014072xy^2 - 0.0000351xy^3}$$

$$xyxy^2xy^3$$

APÉNDICE G

VALIDACIÓN GRUPAL: DIFERENCIA SIGNIFICATIVA DE TUKEY

%	Día	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}	{13}	{14}	{15}	{16}	{17}	{18}	{19}
		73,792	86,831	91,573	96,314	59,257	66,967	74,384	69,939	55,860	57,492	44,753	42,532	49,980	48,673	49,327	50,307	56,513	65,333	85,349
0	4		0,22813	0,01190	0,00044	0,10172	0,9884	1,00000	0,99998	0,01067	0,03342	0,00018	0,00018	0,00026	0,00021	0,00023	0,00029	0,01702	0,90355	0,43446
0	11	0,22813		0,99993	0,77971	0,00019	0,00257	0,30127	0,02231	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00081	1,00000
0	18	0,01190	0,99993		0,99993	0,00018	0,00022	0,01813	0,00074	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00019	0,99628
0	25	0,00044	0,77971	0,99993		0,00018	0,00018	0,00062	0,00019	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,53438
7.5	4	0,10172	0,00019	0,00018	0,00018		0,95777	0,07117	0,58338	1,00000	1,00000	0,10354	0,02504	0,80887	0,60029	0,71053	0,85096	1,00000	0,99728	0,00019
7.5	11	0,98843	0,00257	0,00022	0,00018	0,95777		0,97125	1,00000	0,51008	0,78100	0,00052	0,00023	0,02089	0,00821	0,01316	0,02618	0,62283	1,00000	0,00769
7.5	18	1,00000	0,30127	0,01813	0,00062	0,07117	0,97125		0,99997	0,00693	0,02231	0,00018	0,00018	0,00023	0,00020	0,00021	0,00025	0,01115	0,83861	0,53438
7.5	25	0,99999	0,02231	0,00074	0,00019	0,58338	1,00000	0,99997		0,13199	0,30127	0,00021	0,00019	0,00240	0,00096	0,00150	0,00305	0,18767	0,99995	0,05963
12.5	4	0,01067	0,00018	0,00018	0,00018	1,00000	0,51008	0,00693	0,13199		1,00000	0,51008	0,19744	0,99826	0,97940	0,99312	0,99923	1,00000	0,78115	0,00018
12.5	11	0,03342	0,00018	0,00018	0,00018	1,00000	0,78100	0,02231	0,30127	1,00000		0,26353	0,07882	0,96730	0,86634	0,92835	0,97943	1,00000	0,95038	0,00019
12.5	18	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,10354	0,00052	0,00018	0,00021	0,51008	0,26353		1,00000	0,99968	0,99999	0,99996	0,99923	0,40206	0,00153	0,00018
12.5	25	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,02504	0,00023	0,00018	0,00019	0,19744	0,07882	1,00000		0,97003	0,99687	0,98901	0,95421	0,13936	0,00039	0,00018
17.5	4	0,00026	0,00018	0,00018	0,00018	0,80887	0,02089	0,00023	0,00240	0,99826	0,96730	0,99968	0,97003		1,00000	1,00000	1,00000	0,99312	0,06181	0,00018
17.5	11	0,00021	0,00018	0,00018	0,00018	0,60029	0,00821	0,00020	0,00096	0,97940	0,86634	0,99999	0,99687	1,00000		1,00000	1,00000	0,95044	0,02618	0,00018
17.5	18	0,00023	0,00018	0,00018	0,00018	0,71053	0,01316	0,00021	0,00150	0,99312	0,92835	0,99996	0,98901	1,00000	1,00000		1,00000	0,97940	0,04061	0,00018
17.5	25	0,00029	0,00018	0,00018	0,00018	0,85096	0,02618	0,00025	0,00305	0,99923	0,97943	0,99923	0,95421	1,00000	1,00000	1,00000		0,99640	0,07569	0,00018
22.5	4	0,01702	0,00018	0,00018	0,00018	1,00000	0,62283	0,01115	0,18767	1,00000	1,00000	0,40206	0,13936	0,99312	0,95044	0,97940	0,99640		0,86623	0,00018
22.5	11	0,90355	0,00081	0,00019	0,00018	0,99728	1,00000	0,83861	0,99995	0,78115	0,95038	0,00153	0,00039	0,06181	0,02618	0,04061	0,07569	0,86623		0,00230
22.5	18	0,43446	1,00000	0,99628	0,53438	0,00019	0,00769	0,53438	0,05963	0,00018	0,00019	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00230
22.5	25	1,00000	0,34290	0,02231	0,00074	0,05914	0,95752	1,00000	0,99993	0,00556	0,01813	0,00018	0,00018	0,00022	0,00019	0,00020	0,00023	0,00900	0,79917	0,58564
27.5	4	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00019	0,00018	0,00018	0,00018	0,00035	0,00022	0,37176	0,74170	0,01821	0,04423	0,02862	0,01445	0,00027	0,00018	0,00018
27.5	11	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00677	0,00019	0,00018	0,00018	0,06985	0,02395	0,99999	1,00000	0,80887	0,94225	0,88737	0,76176	0,04615	0,00022	0,00018

APÉNDICE H

VALIDACIÓN GRUPAL: DIFERENCIA SIGNIFICATIVA DE TUKEY

%	Dias	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}	{13}	{14}	{15}	{16}	{17}	{18}	{19}	
		80,904	87,720	64,549	77,052	54,553	66,086	69,939	69,939	58,735	57,167	43,120	66,640	53,573	54,227	50,633	53,900	46,713	49,653	51,613	
0	7		0,94316	0,00455	0,99997	0,00018	0,01679	0,25604	0,25604	0,00020	0,00019	0,00018	0,02634	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018
0	14	0,94316		0,00019	0,30027	0,00018	0,00021	0,00135	0,00135	0,00018	0,00018	0,00018	0,00022	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018	0,00018
0	21	0,00455	0,00019		0,09819	0,41651	1,00000	0,99571	0,99571	0,98914	0,88796	0,00021	1,00000	0,25448	0,35761	0,03468	0,30332	0,00129	0,01574	0,07232	
0	28	0,99997	0,30027	0,09819		0,00019	0,25604	0,91733	0,91733	0,00088	0,00033	0,00018	0,34238	0,00019	0,00019	0,00018	0,00019	0,00018	0,00018	0,00018	
5	7	0,00018	0,00018	0,41651	0,00019		0,18404	0,01045	0,01045	0,99989	1,00000	0,19555	0,12976	1,00000	1,00000	0,99996	1,00000	0,82564	0,99882	1,00000	
5	14	0,01679	0,00021	1,00000	0,25604	0,18404		0,99997	0,99997	0,89159	0,62981	0,00019	1,00000	0,09745	0,15022	0,00987	0,12150	0,00042	0,00425	0,02225	
5	21	0,25604	0,00135	0,99571	0,91733	0,01045	0,99997		1,00000	0,22367	0,08126	0,00018	0,99999	0,00451	0,00792	0,00044	0,00598	0,00019	0,00027	0,00087	
5	28	0,25604	0,00135	0,99571	0,91733	0,01045	0,99997	1,00000		0,22367	0,08126	0,00018	0,99999	0,00451	0,00792	0,00044	0,00598	0,00019	0,00027	0,00087	
10	7	0,00020	0,00018	0,98914	0,00088	0,99989	0,89159	0,22367	0,22367		1,00000	0,00861	0,81551	0,99758	0,99965	0,78350	0,99903	0,13541	0,59731	0,91645	
10	14	0,00019	0,00018	0,88796	0,00033	1,00000	0,62981	0,08128	0,08126	1,00000		0,03129	0,51827	0,99999	1,00000	0,96198	0,99999	0,33534	0,87173	0,99375	
10	21	0,00018	0,00018	0,00021	0,00018	0,19555	0,00019	0,00018	0,00018	0,00861	0,03129		0,00019	0,33534	0,23652	0,87173	0,28312	0,99999	0,96198	0,71310	
10	28	0,02634	0,00022	1,00000	0,34238	0,12976	1,00000	0,99999	0,99999	0,81551	0,51827	0,00019		0,06579	0,10434	0,00614	0,08314	0,00032	0,00263	0,01412	
15	7	0,00018	0,00018	0,25448	0,00019	1,00000	0,09745	0,00451	0,00451	0,99758	0,99999	0,33534	0,06579		1,00000	1,00000	1,00000	0,93974	0,99996	1,00000	
15	14	0,00018	0,00018	0,35761	0,00019	1,00000	0,15022	0,00792	0,00792	0,99965	1,00000	0,23652	0,10434	1,00000		0,99999	1,00000	0,87173	0,99957	1,00000	
15	21	0,00018	0,00018	0,03468	0,00018	0,99996	0,00987	0,00044	0,00044	0,78350	0,96198	0,87173	0,00614	1,00000	0,99999		0,99999	0,99996	1,00000	1,00000	
15	28	0,00018	0,00018	0,30332	0,00019	1,00000	0,12150	0,00598	0,00598	0,99903	0,99999	0,28312	0,08314	1,00000	1,00000	0,99999		0,90982	0,99986	1,00000	
20	7	0,00018	0,00018	0,00129	0,00018	0,82564	0,00042	0,00019	0,00019	0,13541	0,33534	0,99999	0,00032	0,93974	0,87173	0,99996	0,90982		1,00000	0,99882	
20	14	0,00018	0,00018	0,01574	0,00018	0,99882	0,00425	0,00029	0,00029	0,59731	0,87173	0,96198	0,00263	0,99996	0,99957	1,00000	0,99986	1,00000		1,00000	
20	21	0,00018	0,00018	0,07232	0,00018	1,00000	0,02225	0,00087	0,00087	0,91648	0,99375	0,71317	0,01412	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99882	1,00000		
20	28	0,04316	0,00026	1,00000	0,45770	0,08441	1,00000	1,00000	1,00000	0,70478	0,39634	0,00019	1,00000	0,04102	0,06683	0,00356	0,05253	0,00025	0,00154	0,00830	
25	7	0,00018	0,00018	0,00019	0,00018	0,09979	0,00019	0,00018	0,00018	0,00349	0,01337	1,00000	0,00018	0,18792	0,12430	0,70069	0,15354	0,99946	0,86314	0,50523	
25	14	0,00018	0,00018	0,00060	0,00018	0,64971	0,00027	0,000190	0,00019	0,06899	0,19557	1,00000	0,00023	0,82564	0,71310	0,99882	0,77232	1,00000	0,99996	0,98765	

APÉNDICES

APÉNDICE I

W TABULADA PARA LA PRUEBA DE SHAPIRO & WILK

N	0.01	0.05	0.1
3	0.753	0.767	0.789
4	0.687	0.748	0.792
5	0.686	0.762	0.806
6	0.713	0.788	0.826
7	0.73	0.803	0.838
8	0.749	0.818	0.851
9	0.764	0.829	0.859
10	0.781	0.842	0.869
11	0.792	0.85	0.876
12	0.805	0.859	0.883
13	0.814	0.866	0.889
14	0.825	0.874	0.895
15	0.835	0.881	0.901
16	0.844	0.887	0.906
17	0.851	0.892	0.91
18	0.858	0.897	0.914
19	0.863	0.901	0.917
20	0.868	0.905	0.92
21	0.873	0.908	0.923
22	0.878	0.911	0.926
23	0.881	0.914	0.928
24	0.884	0.916	0.93
25	0.888	0.918	0.931
26	0.891	0.92	0.933
27	0.894	0.923	0.935
28	0.896	0.924	0.936
29	0.898	0.926	0.937
30	0.9	0.927	0.939
31	0.902	0.929	0.94
32	0.904	0.93	0.941
33	0.906	0.931	0.942