

# **Estudio y Simulación del Comportamiento del Cemento Portland Tipo I con la adición del 5% de Zeolita Ecuatoriana mediante Curado al Aire**

Bodero C., Perugachi R. Ing.  
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador  
[cbodero@espol.edu.ec](mailto:cbodero@espol.edu.ec)

## **Resumen**

*El presente trabajo tiene como principal objetivo analizar los efectos que generan la adición de un 5% de zeolita ecuatoriana y el tiempo de curado en las propiedades mecánicas del cemento, específicamente la resistencia a la compresión uniaxial. En la etapa inicial se efectuaron ensayos de resistencia a la compresión uniaxial, de una mezcla cemento – zeolita (5%), a diferentes tiempos de curado al aire. Adicionalmente otros testistas efectuaron experimentos bajo las mismas condiciones pero con porcentajes de zeolita de 10%, 15% 20% y 25%. Los resultados de este estudio permitieron establecer que no existe una diferencia significativa entre los valores de resistencia a la compresión del cemento sin aditivos y la mezcla cemento – zeolita (5%) a los 28 días de curado. En cambio, para porcentajes de zeolita mayores al 5% el valor de resistencia a la compresión es significativamente mayor para el cemento sin aditivos en todos los días de curado.*

**Palabra claves:** *Cemento, zeolita, puzolana, resistencia uniaxial a la compresión, experimentación, análisis estadístico, modelo matemático.*

## **Abstract**

*The main goal of this work is to analyze the effects that generate the addition of 5% of zeolite from Ecuador and the curing time in the mechanical properties of cement specifically the uniaxial compression strength. Initially uniaxial compression strength tests were conducted to a mixture of cement - zeolite (5%), at different days of curing at air. Additionally other students carried out other experiments under the same conditions but with rates of 10% zeolite, 15%, 20% and 25%. The results of this study establishes that there is no significant difference between the values of compressive strength of cement with no additives and mixing cement - zeolite (5%) at 28 days of curing. However, for higher percentages of zeolite 5% the value of compressive strength is significantly higher for the cement without additives in all the days of curing.*

**Key words:** *Cement, zeolite, pozzolana, uniaxial compression strength, experimental, statistical analysis, mathematical model.*

## 1. Introducción

El presente trabajo evaluó la aplicación de zeolita ecuatoriana como aditivo al cemento, a fin de obtener una mezcla con menor porcentaje de cemento; pero que, posea una resistencia a la compresión similar o superior a una mezcla compuesta totalmente por cemento.

Actualmente, en Ecuador se explota zeolita cerca de Guayaquil para fines tan variados como filtros, captadores de nutrientes de suelos, agricultura, alimento para animales, etc. Sin embargo, la zeolita que se empleará como aditivo puzolánico en esta tesis, proviene de las cercanías de Manglaralto ubicada en la provincia de Santa Elena.

El afloramiento donde se puede hallar este tipo de zeolita, tiene varios centenares de kilómetros cuadrados y las condiciones en las que se encuentra dicha zeolita permitirían una explotación minera ambientalmente sustentable que beneficiaría a las comunas desde San Pablo hasta Puerto López.

Se efectuaron ensayos de resistencia a la compresión uniaxial, de una mezcla cemento – zeolita (5%), a diferentes tiempos de curado al aire; y adicionalmente otros tesisistas efectuaron experimentos bajo las mismas condiciones pero con porcentajes de zeolita de 10%, 15% 20% y 25%.

Los resultados de este estudio permitieron establecer que no existe una diferencia significativa entre los valores de resistencia a la compresión del cemento sin aditivos y la mezcla cemento – zeolita (5%) a los 28 días de curado. En cambio, para porcentajes de zeolita mayores al 5% el valor de resistencia a la compresión es significativamente mayor para el cemento sin aditivos en todos los días de curado.

## 2. Objetivos.

El objetivo principal es elaborar un modelo que permita simular el comportamiento de una pasta de cemento con zeolita ecuatoriana al 5% en diferentes tiempos de curado.

Estudiar el efecto en la resistencia a la compresión uniaxial de una pasta de cemento al adicionar zeolita ecuatoriana a diferentes porcentajes de adición.

Determinar el efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión uniaxial de una pasta de cemento.

Analizar los resultados con cada uno de los porcentajes de zeolita, con el cemento tipo I y cemento tipo IV

## 3. Procedimiento experimental

En esta etapa inicial se efectuaron ensayos de laboratorio con probetas cubicas de pasta de cemento compuesto que comprende: Cemento tipo I, 5% de zeolita ecuatoriana como aditivo y agua. El material de tipo puzolánico empleado como aditivo es zeolita de origen ecuatoriano y en cuanto a la condición de curado, fue al ambiente. Cada compuesto fue analizado para realizar ensayos mecánicos a 7, 14, 28 y 45 días, siendo la función de respuesta la resistencia a la compresión uniaxial.

### 3.1. Materiales

Los materiales empleados para la elaboración de la pasta de cemento compuesta con 5% de zeolita ecuatoriana como aditivo fueron:

**3.1.1. Zeolita.** Este tipo de puzolana fue obtenida de las cercanías de Manglaralto, en la provincia ecuatoriana de Santa Elena, esta zeolita fue empleada debido a la cercanía del yacimiento con la ciudad de Guayaquil.

**3.1.2. Agua Potable.** Se empleo agua potable debido a su frecuente uso en la construcción para elaborar concreto.

**3.1.3. Cemento Portland tipo I.** Este tipo de cemento carece de aditivos y fue empleado para la obtención de la pasta de cemento compuesta al agregarle la zeolita ecuatoriana, además fue utilizado para obtener las muestras que sirvieron como control, las cuales no tenían zeolita.

**3.1.4. Cemento Portland tipo IV.** Este tipo de cemento es un cemento puzolánico comercial en el Ecuador, se lo utilizo para obtener muestras que permitieron comparar la resistencia a la compresión con las pastas de cemento compuesto.

Los cementos Portland tipo I y tipo IV, fueron obtenidos de una planta de procesamiento de cemento en la ciudad de Guayaquil, Ecuador.

### 3.2. Diseño experimental

El diseño experimental que se empleó fue un diseño factorial con el cual se analizó el efecto de dos factores (variables independientes) a varios niveles (valores que toma cada factor) en la respuesta (variable dependiente).

Las variables independientes que se emplearon en este trabajo son:

- Tiempo de curado (7, 14, 28 y 45 días).
- Porcentaje de zeolita (5%, 10%, 15%, 20% y 25%).

Para este estudio se tomó como variable dependiente la resistencia a la compresión uniaxial, debido a que es un indicador que permitirá conocer el efecto de las variables independientes (porcentaje de zeolita y tiempo de curado) en las propiedades mecánicas de la pasta de cemento.

La relación agua-cemento se mantendrá constante. Y las condiciones de curado al aire se mantendrán controladas para todos los días en que se ensayaran las muestras.

A partir de la información recolectada de los ensayos de compresión, se procedió a aplicar un modelo informático con el cual se simuló el comportamiento de las pasta de cemento en base a sus propiedades.

#### Variables de Entrada

Las propiedades o variables de entrada requeridas para la simulación son las siguientes:

- *Módulo de Elasticidad, E*: es la propiedad que define el modulo de elasticidad de la parte elástica para la muestra simulada.
- *Esfuerzo de Fluencia,  $\sigma_{y0}$* : es el esfuerzo que define donde termina la parte elástica para la muestra simulada.
- *Parámetro a*: parámetro adimensional que relaciona el esfuerzo de fluencia con el esfuerzo máximo de ruptura. Esta relación se define de la siguiente forma:

$$a = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} - 1$$

- *Parámetro m*: parámetro adimensional que relaciona la deformación unitaria donde ocurre el esfuerzo máximo, con el esfuerzo máximo de ruptura (el cual es la deformación unitaria máxima para la pasta de cemento) y el módulo de elasticidad.

Esta relación se define de la siguiente manera:

$$m = \varepsilon_{max} - \frac{\sigma_u}{E}$$

Estas variables fueron obtenidas a partir de una curva esfuerzo-deformación experimental, tal como se muestra en la figura 3.12 a continuación:

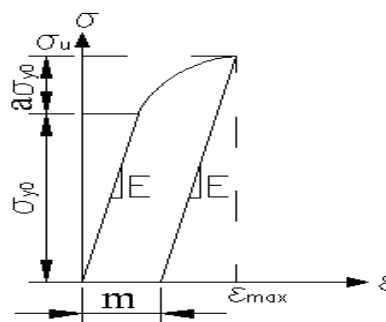


Figura 1. Representación gráfica de las variables de entrada para la simulación

#### Variables adicionales de entrada

Son las variables que proveen información de cómo se desarrolla la simulación:

- *Límite máximo de deformación, ef*: es el máximo valor de deformación para el cual se va a simular la gráfica esfuerzo-deformación, no necesariamente debe ser la deformación máxima de la muestra simulada.
- *Intervalos de deformación, de*: es la magnitud de cada partición de deformación a la cual se aplicará la simulación; conforme menor es dicho intervalo se obtiene mayor precisión, pero mayor tiempo de procesamiento.
- *Número de intervalos de deformación, n*: define el número de particiones de longitud definidas por *de*.
- *Tolerancia, tol*: define la tolerancia para aplicar el método iterativo de Newton-Raphson.

#### Asunciones del Modelo de Simulación

El modelo de simulación asume básicamente dos formas de comportamiento para el material: comportamiento elástico y plástico.

Para el régimen elástico se asumió un comportamiento lineal definido, cuya pendiente está determinada por el módulo de elasticidad. El régimen elástico ocurre mientras el esfuerzo sea menor al esfuerzo de fluencia del material.

Para el régimen elástico se definió un comportamiento no lineal con pendiente variable definida por el módulo de plasticidad  $H'$  la cual se define a partir de un esfuerzo de fluencia variable definido de la siguiente forma:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left( 1 + \frac{2a}{m + \lambda} \sqrt{m \lambda} \right)$$

Donde,  $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$

Finalmente, se tiene que el módulo de plasticidad definido como:

$$H'(\Delta\lambda) = \frac{\delta\sigma_y}{\delta\lambda}(\Delta\lambda)$$

### Lógica del Modelo de Simulación

A continuación, se describe la secuencia de las operaciones a programar en el modelo de simulación para cada intervalo de deformación unitaria:

1. Se calculó un esfuerzo de prueba, considerando dicho esfuerzo parte de la zona elástica:

$$\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n + E\Delta\varepsilon$$

2. Se determina si el esfuerzo de prueba está en la zona elástica:

$$F_{n+1}^{tr} = |\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{y,n} > 0$$

3. En caso de ser negativo, se establecieron los valores:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}$$

$$\sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n}$$

4. En caso de ser positivo, se aplica el método de Newton-Rapshon y se itera hasta conseguir:

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

5. Se establecieron los valores:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\lambda \operatorname{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr})$$

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

### 3.3. Preparación y ensayo de las probetas

Para la preparación y ensayo de probetas se tuvo en cuenta la norma ASTM C 109/C 109M "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", pero efectuando ciertas modificaciones. Se emplearon probetas de pasta de cemento con zeolita (cemento + zeolita) con una relación agua mezcla de 0.3, en lugar de utilizar morteros (cemento + arena) como indica

la norma. Otra modificación del procedimiento fue el método de curado, el cual fue distinto al mencionado en la norma la cual indica 1 día de curado dentro del molde y luego inmersos en agua de cal hasta su ensayo; para las probetas a ensayar fueron curadas al aire en lugar de agua de cal.

La temperatura del aire en las vecindades de las losas de mezclado, materiales secos, moldes, soportes y tazón de mezcla se mantuvo entre 20° C y 26° C. La temperatura del agua para la mezcla, cuarto húmedo, y el agua del tanque de almacenamiento estuvo comprendida entre 21° C y 25° C.

La humedad relativa del laboratorio donde se realizaron los ensayos siempre fue superior a 50%.

El proceso de experimentación comenzó con la molienda de la zeolita, Una vez recolectada la piedra fue llevada al laboratorio, y se procedió a su molienda. Al finalizar el proceso de molienda se obtuvo zeolita a una granulometría igual al del cemento que es de 45 micras.

Para elaborar las probetas, se obtuvo una mezcla de cemento-zeolita de 3000 g para obtener 12 probetas de ensayo. Se utilizó para este experimento, una relación agua-cemento de 0.3. En la tabla 1, se muestran las cantidades de masa en gramos que se emplearon para obtener la mezcla tanto de las 12 probetas con 5% de zeolita, como de las 12 probetas de validación con 7.5% de zeolita.

**TABLA 1**  
**Cantidad en Gramos de Material a ser Usado en el Experimento al 5 Y 7.5% de Zeolita**

Fracción de zeolita (%)	Zeolita (g)	Cemento tipo I (g)	Agua (g)
5	150	2850	900
7.5	2250	2775	900

Antes de proceder mezclar, se tomaron los datos de temperatura y humedad relativa del cuarto.

**TABLA 2**  
**Condiciones de Temperatura y Humedad en la Preparación de las Probetas**

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
25.6	62

Una vez mezclado el material, se lo colocó en los moldes, los cuales se cubrieron con un plástico para evitar la pérdida excesiva de humedad de las probetas. Se dejó reposar de esta forma por 24 horas.

Luego de 24 horas se retiró el plástico que cubre los moldes; y se removió el exceso de mezcla de la cara superior. Se identificó cada probeta en su cara superior, de acuerdo al código establecido. Se agruparon todas las probetas y se las almacenaron de tal forma que estuvieron expuestas al ambiente del laboratorio.

Se ensayaron 3 probetas con 5% de zeolita se ensayaron a los 7, 14, 21 y 28 días de curado; de igual manera se ensayaron 3 probetas de validación con 7.5% de zeolita, pero a los 4, 11, 18 y 24 días de curado. Todos los especímenes de prueba para un tiempo de curado dado, fueron ensayados dentro del rango permisible descrito en la Tabla 3.

**TABLA 3**  
**Variaciones permisibles en los tiempos de curado (1)**

Tiempo de Curado	Tolerancia Permitida
24 h	± ½ h
7 días	± 1 h
14 días	± 3 h
28 días	± 12 h

### 3.4. Resultados obtenidos

A partir de la experimentación, se obtuvieron los datos de esfuerzo de compresión y deformación unitaria para cada una de las 3 muestras ensayadas cada día de curado.

A partir de estos datos, se determinó el esfuerzo máximo de compresión de cada muestra, así como los parámetros necesarios para elaborar el modelo que permita simular el comportamiento de la muestra de 5% de zeolita a diferentes días de curado.

**TABLA 4**  
**Resultados obtenidos para cada muestra de 5% de zeolita a los diferentes días de curado**

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
5	7	46.0600	43.1200	2122.047	0.02184	0.0682	0.00100
5	7	59.7800	51.5480	1844.954	0.03302	0.1597	0.00100
5	7	57.8200	55.4680	1819.816	0.03200	0.0424	0.00100
5	14	64.0120	52.4543	4130.260	0.01778	0.2203	0.00228
5	14	66.6792	64.0120	4200.265	0.01778	0.0417	0.00191
5	14	67.5683	56.8996	4480.282	0.01778	0.1875	0.00270
5	21	66.6792	59.5668	3908.580	0.02032	0.1194	0.00326
5	21	66.6792	56.8996	3733.569	0.02032	0.1719	0.00246
5	21	76.4588	65.7901	5180.326	0.01778	0.1622	0.00302
5	28	67.5683	64.0120	2800.176	0.0279	0.0556	0.00381
5	28	68.4573	48.8981	3850.243	0.0203	0.4000	0.00254
5	28	73.7916	59.5668	3908.580	0.0229	0.2388	0.00398

De igual forma, a partir de los datos de los ensayos de compresión para las muestras de validación, se determinó el esfuerzo máximo de compresión de cada muestra de validación, así como los parámetros necesarios para validar el modelo que simulará el comportamiento de la muestra de 7.5% de zeolita a diferentes días de curado:

**TABLA 5**  
**Resultados obtenidos para cada muestra de 7.5% de zeolita a los diferentes días de curado**

Variables Independientes		Resultados o Variables Dependientes					
% de Zeolita	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Módulo Elástico (Mpa)	Def. Máxima	a	m
7.5	4	63.7000	61.7400	2025.591	0.03302	0.0317	0.00157
7.5	4	57.8200	55.8600	1999.284	0.03048	0.0351	0.00156
7.5	4	56.2520	49.9800	2459.646	0.02337	0.1255	0.00100
7.5	11	66.6400	61.7400	2025.591	0.03302	0.0794	0.00100
7.5	11	71.5400	68.4040	1923.622	0.03810	0.0458	0.00100
7.5	11	62.7200	59.7800	1810.418	0.03556	0.0492	0.00100
7.5	18	68.4573	64.0120	4200.265	0.01778	0.0694	0.00148
7.5	18	81.7932	77.3479	5110.322	0.01778	0.0575	0.00177
7.5	18	72.9026	68.4573	4491.950	0.01778	0.0649	0.00155
7.5	25	72.0135	59.5668	4690.295	0.0183	0.2090	0.00293
7.5	25	72.0135	65.7901	4316.939	0.0203	0.0946	0.00364
7.5	25	65.7901	64.0120	4200.265	0.0178	0.0278	0.00212

En la tabla 6 se muestran los valores de los esfuerzos a la compresión obtenidos para los

diferentes niveles de porcentajes de zeolita y tiempo de curado. Adicionalmente a las mezclas cemento tipo I con 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de zeolita, se incluyo también los valores que se emplearon como control 0% de zeolita y el del cemento Pórtland tipo IV.

**TABLA 6**

**Datos de esfuerzo máximo de compresión para el control y diferentes porcentajes de zeolita a diferentes días de curado**

Tiempo de Curado (días)	Porcentaje de Zeolita (%)						
	0 Control	5	10	15	20	25	Tipo IV
7	80.015	46.060	62.132	49.980	49.000	33.320	49.9570
7	80.015	59.780	57.820	57.820	47.040	45.668	45.2441
7	82.682	57.820	56.252	52.920	44.100	47.236	45.2441
14	87.128	64.012	53.900	59.780	44.100	41.160	50.8996
14	88.017	66.679	57.820	55.860	49.000	45.080	49.9570
14	88.017	67.568	59.780	47.040	55.860	50.960	49.0144
21	63.700	66.679	40.180	48.020	51.940	42.140	45.2441
21	63.308	66.679	44.100	51.940	48.020	43.120	40.5311
21	66.640	76.459	45.080	51.940	54.880	49.980	42.4163
28	77.348	67.568	62.720	59.780	67.568	54.880	40.5311
28	76.459	68.457	65.660	47.040	68.457	45.080	42.4163
28	77.348	73.792	71.540	54.880	65.790	50.960	42.9819

De igual manera en la tabla 7 se muestran los valores de los esfuerzos a la compresión obtenidos para los diferentes niveles de porcentajes de zeolita y tiempo de curado de las muestras de validación.

**TABLA 7**

**Datos de esfuerzo máximo de compresión para el control y diferentes porcentajes de zeolita a diferentes días de curado**

Tiempo de Curado (días)	Porcentaje de Zeolita (%)						
	0 Control	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	Tipo IV
4	42.141	61.740	53.900	40.180	55.468	29.008	45.2441
4	66.679	55.860	49.000	46.844	54.880	29.792	39.5886
4	62.234	49.980	51.548	49.000	46.060	31.360	38.6460
11	75.570	61.740	49.787	45.080	56.840	35.280	42.4163
11	72.903	68.404	30.939	44.100	70.560	39.004	46.1866
11	73.792	59.780	45.431	42.728	52.920	34.888	42.2278

18	82.682	64.012	44.100	39.200	65.790	44.100	40.5311
18	88.906	77.348	42.140	49.000	68.457	38.612	44.3015
18	83.571	68.457	41.356	42.728	80.015	36.652	36.7608
24	86.238	59.567	35.868	40.180	61.345	24.696	46.7522
24	70.235	65.790	42.140	52.920	59.567	35.280	37.3263
24	92.462	64.012	37.828	48.020	59.567	35.280	44.3015

## 4. Análisis de resultados

### 4.1. Análisis estadísticos

Se analizó estadísticamente, por medio de un análisis de varianza ANOVA, el efecto que tiene el tiempo de curado en el esfuerzo de compresión de una pasta de cemento con 5% de zeolita.

Se tomó como variable independiente el tiempo de curado; y como variable dependiente el esfuerzo máximo de compresión. A continuación se muestra la tabla de datos empleada para este análisis.

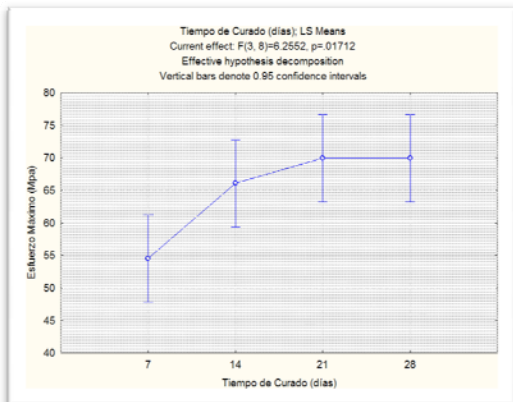
Para efectos del análisis se supone que cada condición de tratamiento (día de curado) tiene una población de referencia con una media  $\mu$  y se supone que la varianza  $s^2$  es la misma para cada población y no la afecta el tratamiento. Es decir, se supone que la varianza de las poblaciones de tratamiento es homogénea.

Por medio del programa STATISTICA con los datos se obtuvieron los siguientes resultados con una confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ):

**TABLA 8**

**Errores estándar e intervalos de confianza del Esfuerzo Máximo para cada día de curado y un porcentaje de zeolita de 5%**

Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)				N
	Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
			-95.00%	+95.00%	
7	54.55333	2.911153	47.84020	61.26646	3
14	66.08650	2.911153	59.37336	72.79963	3
21	69.93907	2.911153	63.22594	76.65220	3
28	69.93907	2.911153	63.22594	76.65220	3



**Figura 2. Gráfico de las medias e intervalos de confianza del Esfuerzo Máximo para cada día de curado y un porcentaje de zeolita de 5%**

**TABLA 9**

**Tabla de análisis de varianza para el Esfuerzo Máximo de la pasta de cemento con 5% de zeolita**

Efecto	Suma de cuadrados	G L	Cuadrados medios	F	p
Interce pto	50902.21	1	50902.21	2002.098	0.000
Tiempo de Curado (días)	477.11	3	159.04	6.255	0.017
Error	203.40	8	25.42		

Como  $p = 0.017124$  es menor al valor de significancia escogido  $p < 0.05$ , se concluyó que los tratamientos difieren respecto al esfuerzo máximo de la pasta de cemento con 5% de zeolita bajo diferentes días de curado.

Se determinó estadísticamente, por medio de un análisis de varianza ANOVA factorial, si las respuestas medias (esfuerzo máximo de compresión) de los tratamientos (porcentaje y días de curado) son iguales, incluyendo el cemento tipo I (porcentaje de zeolita 0%) y del cemento tipo IV. De esta forma se estableció si el porcentaje de zeolita, el tiempo de curado y la acción combinada de porcentaje de zeolita y tiempo de curado influyen significativamente en el esfuerzo máximo de compresión.

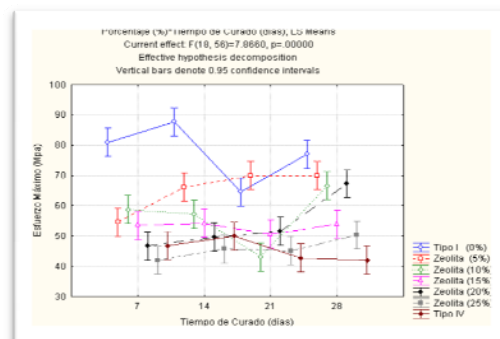
Ahora se tomaron como variables independientes el porcentaje de zeolita y el tiempo de curado; y como variable dependiente

Por medio del programa STATISTICA con los datos se obtuvieron los siguientes resultados con una confianza de 95% ( $\alpha=0.05$ ):

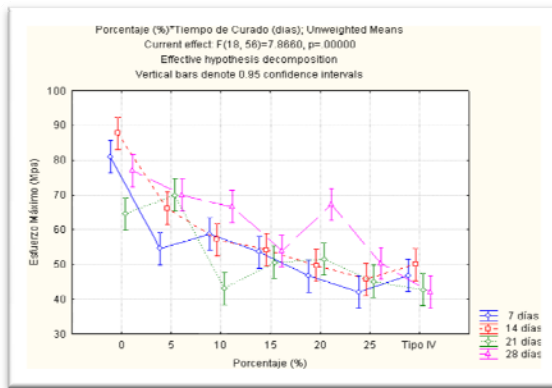
**TABLA 10**

**Errores estándar e intervalos de confianza del Esfuerzo Máximo para cada Porcentaje de Zeolita y día de curado**

% de Zeolita (%)	Tiempo de Curado (días)	Esfuerzo Máximo (Mpa)				N
		Media	Error Estándar	Intervalo de Confianza		
				-95.00%	+95.00%	
0	7	80.90410	2.464735	75.94841	85.85978	3
0	14	87.72019	2.464735	82.76451	92.67587	3
0	21	64.54933	2.464735	59.59365	69.50502	3
0	28	77.05152	2.464735	72.09584	82.00720	3
5	7	54.55333	2.464735	49.59765	59.50902	3
5	14	66.08650	2.464735	61.13081	71.04218	3
5	21	69.93907	2.464735	64.98339	74.89475	3
5	28	69.93907	2.464735	64.98339	74.89475	3
10	7	58.73467	2.464735	53.77898	63.69035	3
10	14	57.16667	2.464735	52.21098	62.12235	3
10	21	43.12000	2.464735	38.16432	48.07568	3
10	28	66.64000	2.464735	61.68432	71.59568	3
15	7	53.57333	2.464735	48.61765	58.52902	3
15	14	54.22667	2.464735	49.27098	59.18235	3
15	21	50.63333	2.464735	45.67765	55.58902	3
15	28	53.90000	2.464735	48.94432	58.85568	3
20	7	46.71333	2.464735	41.75765	51.66902	3
20	14	49.65333	2.464735	44.69765	54.60902	3
20	21	51.61333	2.464735	46.65765	56.56902	3
20	28	67.27190	2.464735	62.31622	72.22759	3
25	7	42.07467	2.464735	37.11898	47.03035	3
25	14	45.73333	2.464735	40.77765	50.68902	3
25	21	45.08000	2.464735	40.12432	50.03568	3
25	28	50.30667	2.464735	45.35098	55.26235	3
Tipo IV	7	46.81504	2.72102	1.570980	40.05566	3
Tipo IV	14	49.95698	0.94258	0.544201	47.61547	3
Tipo IV	21	42.73050	2.37212	1.369544	36.83783	3
Tipo IV	28	41.97643	1.28321	0.740861	38.78877	3



**Figura 3. Gráfico de las medias e intervalos de confianza del esfuerzo máximo por porcentaje de zeolita para cada día de curado**



**Figura 4. Gráfico de las medias e intervalos de confianza del esfuerzo máximo por día de curado para cada porcentaje de zeolita**

**TABLA 11**

**Tabla de Análisis de varianza factorial del Esfuerzo de Compresión de una pasta de cemento con diferentes porcentajes de zeolita y para distintos días de curado**

Efecto	Suma de cuadrados	G L	Cuadrados medios	F	p
Intercepto	270412.6	1	270412.6	16715.72	0.000000
Porcentaje (%)	9296.9	6	1549.5	95.78	0.000000
Tiempo de Curado (días)	914.9	3	305.0	18.85	1.414×10 <sup>-8</sup>
Porcentaje (%) * Tiempo de Curado (días)	2290.5	18	127.2	7.87	1.097×10 <sup>-9</sup>
Error	905.9	56	16.2		

En esta tabla las filas Porcentaje y Tiempo de Curado recogen los efectos principales, es decir, los efectos individuales de los dichos factores incluidos en el modelo. Los niveles críticos (p) indican que, los grupos definidos por la variable Porcentaje poseen esfuerzos máximos medios significativamente diferentes ( $p = 0.0000 < 0.05$ ), de igual manera los esfuerzos máximos medios de los grupos definidos por la variable Tiempo de Curado también difieren significativamente ( $p = 1.414 \times 10^{-8} < 0.05$ ).

La siguiente fila Porcentaje\*Tiempo de Curado contiene información sobre el efecto de la interacción entre las variables Porcentaje y Tiempo de Curado. El estadístico F correspondiente a este efecto lleva asociado un nivel crítico de  $p = 1.097 \times 10^{-9}$ , lo cual indica que la interacción Porcentaje – Tiempo de Curado genera un efecto significativo sobre el esfuerzo máximo de compresión.

Debido a que los estadísticos F correspondientes a los efectos principales son significativos, se efectuaron comparaciones post hoc. Los estadísticos F del ANOVA factorial efectuado anteriormente únicamente nos permitieron contrastar la hipótesis general de que los promedios comparados son iguales. Al rechazar esa hipótesis, se concluyó que existen diferencias, pero no se sabe dónde se encuentran.

Entonces por medio de la prueba post hoc de Dunnett se determinó si las respuestas medias de los distintos porcentajes de zeolita son menores que el control para cada día de curado. Es decir que se consideró que el tratamiento de control (0% de zeolita) es mejor en cada día de curado, en caso de ser falsa dicha afirmación se determinaría el porcentaje con el cual se obtiene un mayor esfuerzo máximo.

**TABLA 12**

**Tabla de Probabilidades para la prueba Post Hoc de Dunnett (M<Control) del Esfuerzo de Compresión de una pasta de cemento para cada día de curado con diferentes porcentajes de zeolita**

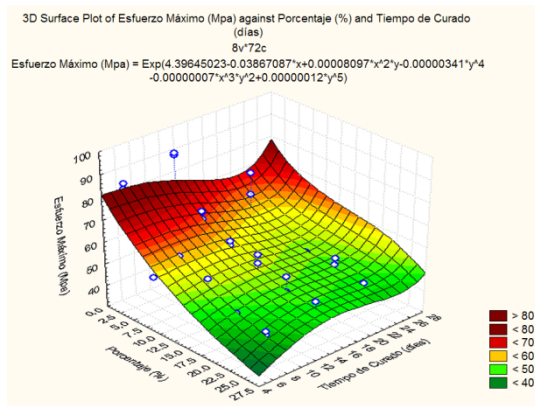
	% de Zeolita (%)	7 días	14 días	21 días	28 días
		{1}	{1}	{1}	{1}
		<b>80.904</b>	<b>87.720</b>	<b>64.549</b>	<b>77.052</b>
<b>1</b>	0				
<b>2</b>	5	0.000041	0.000056	0.999041	0.075651
<b>3</b>	10	0.000142	0.000022	0.000028	0.010820
<b>4</b>	15	0.000035	0.000022	0.000551	0.000030
<b>5</b>	20	0.000023	0.000022	0.001031	0.015910
<b>6</b>	25	0.000022	0.000022	0.000040	0.000023
<b>7</b>	Tipo IV	0.000023	0.000022	0.000027	0.000022

Las probabilidades de la prueba post hoc de Dunnett (M<Control) indican que, para los 7 y 14 días de curado todos los grupos definidos por la variable Porcentaje (5, 10, 15, 20 y 25) poseen esfuerzos máximos medios significativamente menores ( $p < 0.05$ ) que los del grupo de control (80.904 y 87.720 MPa respectivamente). Para los 21 y 28 días de curado sólo los grupos 10, 15, 20 y 25 definidos por la variable Porcentaje poseen esfuerzos máximos medios significativamente menores ( $p < 0.05$ ) que los esfuerzos máximos medios del grupo de control (64.549 y 77.052 MPa respectivamente) del grupo control son significativamente mayores sólo para los grupos 10, 15, 20 y 25.

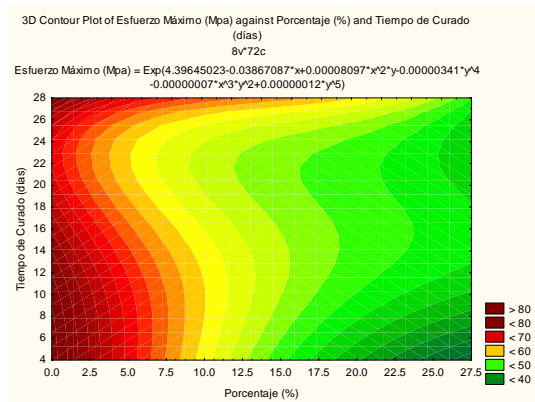


**Regresión Lineal Múltiple de los diferentes parámetros requeridos para el modelo de simulación**

Para poder implementar el modelo de simulación se necesitó definir los parámetros que requiere el modelo para poder simular la curva esfuerzo deformación. Estos parámetros fueron mencionados anteriormente. A continuación se muestra los gráficos obtenidos de las superficies de respuesta y sus curvas de nivel que definen el comportamiento del esfuerzo máximo.



**Figura 5. Gráfico de la superficie de respuesta del esfuerzo máximo a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado**

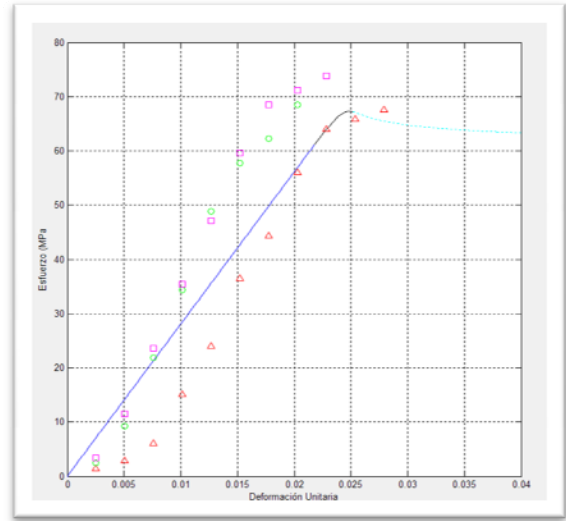


**Figura 6. Gráfico de las curvas de nivel de la superficie de respuesta del esfuerzo máximo a diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado**

**4.2. Resultados del modelo computacional**

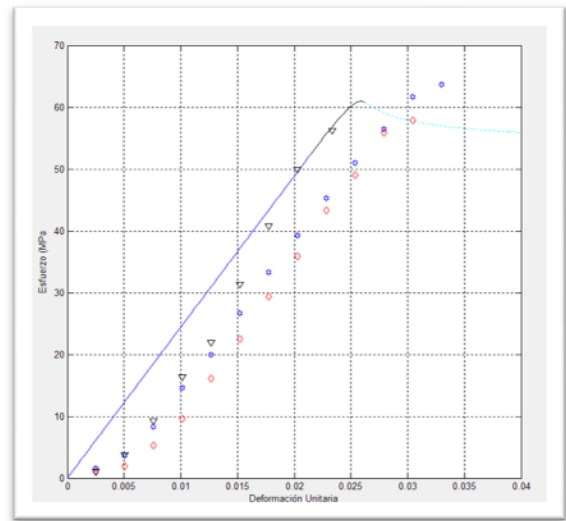
Con estos parámetros se aplicó el modelo de simulación implementado en MATLAB y se obtuvieron las graficas esfuerzo deformación de cada día establecido. A continuación se muestra

una de las gráficas simuladas comparadas con los datos experimentales obtenidos:



**Figura 7. Gráfico de la curva esfuerzo deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 5% de zeolita y 28 días de curado**

Para validar nuestro modelo de simulación se contrastó la curva esfuerzo–deformación simulada con los datos experimentales de validación



**Figura 8. Gráfico de la curva esfuerzo deformación simulada y de los datos de esfuerzo y deformación obtenidos experimentalmente para una pasta de cemento con 7.5% de zeolita y 4 días de curado**

## 5. Conclusiones.

A partir del análisis estadístico de los datos obtenidos experimentalmente se pudo observar que conforme aumentaba el tiempo de curado mayor era la resistencia a la compresión, a excepción de los 21 y 28 días de curado donde se obtuvieron resistencias medias iguales para dichos tratamientos. Además se debe considerar que sólo se observaron diferencias significativas con un 95% de confianza de la resistencia a la compresión entre los días 7 y 21, 7 y 28.

Al analizar los datos experimentales obtenidos por otros tesisistas que efectuaron los ensayos de compresión con pastas de cemento que contenían porcentajes de zeolita de 10, 15, 20 y 25; y la pasta de cemento de control enteramente de cemento tipo I (0% de zeolita); se pudo determinar con un 95% de confianza que el efecto del porcentaje de zeolita, el tiempo de curado y el efecto combinado de ambos son significativos en la resistencia máxima a la compresión. Con el mismo nivel de confianza se pudo concluir que para los días 7 y 14 la resistencia a la compresión del control es significativamente mayor que las mezclas de pasta de cemento con algún porcentaje de zeolita; algo similar ocurrió para los días 21 y 28 donde la resistencia a la compresión resultó significativamente mayor solo para los porcentajes de zeolita 10, 15, 20 y 25. En conclusión con un 95% se puede señalar que no existen diferencias significativas entre las resistencias a la compresión de una pasta de cemento sin zeolita y una con 5% de zeolita.

Para poder implementar la simulación se requirió obtener funciones que permitan simular los valores de los parámetros necesarios para la simulación para diferentes porcentajes de zeolita y tiempo de curado. Por medio del método de regresión lineal múltiple, considerando reducción de los términos del modelo de regresión completo que consistía del desarrollo binomial de grado 5.

Se obtuvieron funciones que expliquen la variabilidad de los logaritmos naturales de los parámetros para simulación, por lo que las superficies de respuesta obtenidas fueron de tipo exponencial. Entonces se obtuvo una superficie de respuesta para el Ln(Esfuerzo Máximo) que explica su variabilidad observada (coeficiente de regresión ajustado) en un 68.55%. Para el Ln (Esfuerzo de Fluencia) su superficie de respuesta explica el 60.51% de su variabilidad. Mientras

que las superficies de respuesta del Ln (Módulo Elástico) y Ln (m) sus superficies de respuesta mostraron un coeficiente de regresión ajustado de 43.50% y 10.15% respectivamente; estos bajos coeficientes se deben al notorio cambio de las propiedades del módulo elástico y deformación máxima al emplear diferentes máquinas en los ensayos de compresión.

El modelo de simulación depende de las propiedades esfuerzo a la fluencia, módulo de elasticidad y los parámetros  $a$  y  $m$ , que están relacionados con las propiedades de esfuerzo máximo y deformación máxima. Entonces la fiabilidad de la simulación está directamente ligada a la capacidad de los modelos de regresión múltiple para simular las propiedades para las que se determinaron (esfuerzo máximo, esfuerzo de fluencia, modulo de elasticidad y el parámetro  $m$ ). De esta forma a partir de las figuras donde se contrastan los datos experimentales de una pasta de cemento con 5% de zeolita, con la curva esfuerzo–deformación sólo para el día de curado 28 se obtuvo una gráfica que simula fielmente lo que ocurre en la experimentación. Para el porcentaje de validación, 7.5% de zeolita, se encuentra que la gráfica simulada que más se acerca a representar los datos experimentales es la obtenida a los 4 días.

Debido a factores externos no considerados en el modelo de regresión tales como tipo de máquina empleada para las pruebas, temperatura y humedad; el modelo de simulación no es lo suficientemente confiable para simular el diagrama esfuerzo–deformación para una pasta de cemento con 5% de zeolita.

## 6. Recomendaciones

Para obtener resultados de mayor precisión es recomendable efectuar las pruebas de resistencia a la compresión en una misma máquina de ensayo debido a que en las pruebas experimentales efectuadas para propósitos de esta tesis se emplearon dos máquinas diferentes, con mecanismos de acción diferentes (electromecánico e hidráulico). Este factor genero una notable variación tanto en el módulo de elasticidad y la deformación máxima, y no se puede descartar su posible incidencia en los demás propiedades como esfuerzo máximo de compresión y esfuerzo de fluencia.

Para lograr una mayor certeza sería propicio emplear un mayor número de muestras

experimentales ensayadas para cada porcentaje de zeolita, en cada día de curado de esta manera al poseer más datos se podrían obtener resultados que reflejen con mayor fidelidad lo que ocurre experimentalmente.

## 7. Bibliografía

- [1] ASTM C 109/C 109M – 02 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)”
- [2] ASTM C 311 – 77. “Sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland cement concrete”
- [3] BOSCH PEDRO / SCHIFTER ISAAC, “La Zeolita una Piedra que Hierve” ([http://www.jovenclub.cu/libros/Libros\\_1/ciencia2/55/htm/SEC\\_3.HTM](http://www.jovenclub.cu/libros/Libros_1/ciencia2/55/htm/SEC_3.HTM))
- [4] CANALS LLUÍS, “Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes, de la planta térmica de Mudunuru (India), en materiales de construcción” (<http://hdl.handle.net/2099.1/3325>)
- [5] COSTAFREDA JORGE y CALVO BENJAMÍN, “Influencia de la zeolita de Cabo de Gata, Almería, en la evolución del fraguado de morteros de cemento.” ([http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Consultas/influencia\\_zeolita\\_mortero.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Consultas/influencia_zeolita_mortero.pdf))
- [6] CORTÉS, VALERIO, “La Puzolana”, Boletín Informativo Nº 10, Asociación de Antiguos Alumnos de la Universidad Politécnica de Almadén [España], Diciembre de 2007. ([www.uclm.es/CR/EUP-ALMADEN/aaaeupa/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf](http://www.uclm.es/CR/EUP-ALMADEN/aaaeupa/pdf/boletines/10/12.%20LA%20PUZOLANA.pdf))
- [7] ENCARTA, "Cemento," Enciclopedia Microsoft® Encarta® Online 2008
- [8] ESCALANTE JOSÉ, “Materiales alternativos al cemento Portland”, Revista Avance y Perspectiva vol. 21, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional [México], Marzo-Abril de 2002.
- [9] GARCIA ADOLFO, “Consideraciones Generales Sobre Concreto Reforzado” (Tesis, Facultad de Arquitectura, Universidad De San Carlos De Guatemala, Julio de 2005).
- [10] GONZÁLES DE LA COTERA MANUEL, “Nuevos Conceptos en Cementos y Aditivos” ([http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/cementoMGC60\\_aditivos.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/cementoMGC60_aditivos.pdf)).
- [11] JIMENEZ HECTOR, “Obtención de Concreto de Alta Resistencia mediante adición en el diseño de un Superplastificante y Ceniza de Cascarilla de Arroz” (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2001).
- [12] MARTÍNEZ LESDAY, QUINTANA RAFAEL y MARTIRENA JOSÉ, “Aglomerante puzolánico formado por cal y ceniza de paja de caña de azúcar: la influencia granulométrica de sus componentes en la actividad aglomerante”, Revista Ingeniería de Construcción Vol. 22 No2, Agosto de 2007.
- [13] MORANTE FEMANDO, “Las zeolitas de la costa de Ecuador (Guayaquil) : geología, caracterización y aplicaciones”, (Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 2004).
- [14] POWERS, T.C., “A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete”, Research Department Bulletin 25, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1947.
- [15] SOLÍS RÓMEL y MORENO ERIC “Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo” Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Asociación de Antiguos Volumen 9 Nº 3, Universidad Autónoma de Yucatán [México], Septiembre - Diciembre 2005.