

## **Estudio y Simulación de la Resistencia a la Compresión del Cemento Curado en Agua, con una Adición al 25% de Zeolita**

Luis A. Aguirre Tinitana ,Rodrigo Perugachi 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  
Luaguirr@espol.edu.ec  
cperugac@espol.edu.ec

### **Resumen**

*Se modelara, utilizando métodos numéricos, el comportamiento de materiales compuestos como el cemento. introducir en el modelo el efecto de materiales aditivos, como puzolanas, en su composición.*

*Se analiza el cemento tipo I al introducir 25% y 27.5% de aditivo zeolita en su mezcla, el efecto en la resistencia a la compresión para diferentes tiempos de curado en agua ( 7, 14, 21 y 28 días y 4,11,18,y 25 días respectivamente ), luego analizamos estadísticamente los resultados de la experimentación.*

*En MATLAB modelo el comportamiento de la pasta de cemento durante el proceso de ruptura, los resultados serán mayor resistencia a la compresión al agregar un 25% de zeolita en su mezcla, para el grupal hacemos contrastes de las diferentes adiciones de zeolita I como son 0, 5, 10, 15, 20 y 25% ,y 0% de cemento tipo IV para obtener la mejor aplicación de ellas y que ayudará a determinar cuál es recomendable.*

*Usando 25% de zeolita en la mezcla se obtuvo la mayor resistencia a la compresión al 28avo día de curado*

*Como resultado grupal la mejor resistencia a la compresión se da cuando la adición es del 15% de zeolita comparada con las muestras de control de 0% de cemento tipo I y IV.*

**Palabras Claves:** *Cemento compuesto, zeolita, aditivo puzolanico, espécimen: muestra hecha de pasta de cemento de 50x50x50mm*

### **Abstract**

*Are modeled using numerical methods, the behavior of composite materials such as cement. introducing into the model the effect of material additives, such as pozzolana, in its composition.*

*We analyze the cement type I to introduce 25% and 27.5% of zeolite additive in its mix, the effect on the compressive strength for different times of curing in water (7, 14, 21 and 28 days and 4,11,18 , and 25 days respectively), then statistically analyzed the results of experimentation.*

*In MATLAB model the behavior of the cement paste during the burst, the results will be higher compressive strength by adding 25% of zeolite in its mixture to make the group contrasts of different additions of zeolite I like are 0, 5, 10, 15, 20 and 25%, and 0% of cement type IV for the best implementation of it and which will help determine what is recommended.*

*Using 25% of zeolite in the mix was the greatest resistance to compression to 28avo day curing*

*As a result the group better compression resistance occurs when the addition is 15% of zeolite compared with control samples of 0% of cement type I and IV.*

## **1. Introducción**

La investigación en ciencia e ingeniería de materiales no solamente se realiza en los países desarrollados, muchos en vía de desarrollo están haciendo estudios y creando productos que mejoren su eficiencia y sus propiedades físicas que ayuden al desarrollo industrial y por ende al país.

La confluencia del interés científico y tecnológico con el interés social y de desarrollo convierte al estudio de los materiales de construcción en una rama interesante de estudio y profundización del conocimiento.

Los medios para realizar el estudio de los materiales es uno de los aspectos más importantes a considerarse. La aplicación de métodos numéricos a la resolución de problemas vinculados a las propiedades de respuesta de un material, al variar su composición por ejemplo, es un hito que debe ser resuelto por personal entrenado y calificado para desempeñar labores de diseño, análisis e interpretación de experimentos.

Las muestras de zeolita para la elaboración de las probetas fueron extraídas del sector de Casas Viejas en la vía a la Costa.

## 2. Objetivo

Obtener un modelo que permite simular el comportamiento del cemento tipo I al cual le adicionamos un 25% de zeolita ecuatoriana que tiene como variable de respuesta la resistencia a la compresión.

Hallar la composición más idónea que permite obtener como material puzolanico alternativo a la zeolita en la producción cementera del país.

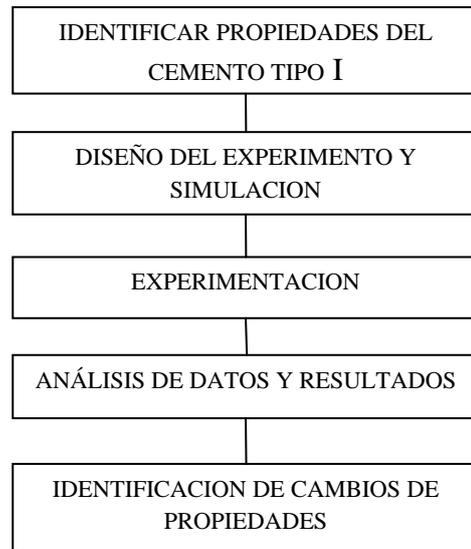
Determinar el efecto que tiene el tiempo de curado en la resistencia del espécimen.

Determinar cómo influye la adición de % de zeolita en la resistencia del espécimen.

## 3. Metodología

En la figura 1 se muestra la metodología planteada para la consecución del objetivo del presente estudio.

Para el modelamiento matemático se recopiló varios factores que han aportado para el desarrollo e implementar el algoritmo que permita el modelar el



**Figura 1.** METODOLOGIA

Para este estudio iniciamos identificando las propiedades del material a usar en este caso el cemento tipo I, específicamente las propiedades mecánicas en las cuales nos enfocaremos, especialmente en la resistencia a la compresión una vez sometida al curado en agua para los diferentes días estipulados.

Para esta fase del diseño construimos tablas para los datos de los tres especímenes en los diferentes días de curado en agua (7,14,21,28) para el 25% de zeolita de igual manera (4,11,18,25) días de curado para el 27,5% de zeolita, es decir nos servirá para la recolección de datos en el momento de la experimentación, estas tablas son de fácil llenado y manejo, donde se incluyen todos los esfuerzo para cada una de las cargas aplicada al espécimen (o muestra) estas se las hizo equidistantes ( 5centipulgadas) , al igual que los días cada 7 días.

Luego de hallar los esfuerzos promedios encontramos el modulo de Young promedio, para el cual se hizo un análisis estadístico con 95% de confianza, para poder determinar el esfuerzo de fluencia, luego de esto comparamos estadísticamente los valores experimentales con los teóricos.

Para el análisis grupal tenemos que tomar en cuenta que nuestros datos son aleatorios y normales, por lo que usamos el método estadístico de DUNCAN.

comportamiento de la pasta de cemento al ser aplicada cierta fuerza que al aumentar progresivamente hará que el espécimen (o muestra) llegue a su punto

máximo de compresión y se produzca la ruptura del material.

Cabe mencionar que uso del algoritmo tiene sus recursos en conocimientos de inelasticidad a través del Test  $f_m = \frac{P}{A}$ , la cual será analizada

mediante la materia mecánica del continuo. Para lograr esto se considero un vector residual el cual lo integramos a una subrutina material que viene dentro de un código de elementos finitos [3].

Finalmente presentaremos la comparación de los resultados de los ensayos de esfuerzos de compresión de los que contienen adición de zeolita con los especímenes de control para nuestro caso el cemento tipo I y IV es decir que mediante un análisis comparativo de la medición obtenida y haciendo uso del software STATISTICA 7, podremos indicar cuál es la mejor experimentación.

Para obtener una buena experimentación dividimos en tres procesos elementales:

- Proceso de Molienda.
- Proceso de mezclado y elaboración de Especímenes.
- Proceso de Ruptura.

Basándose en la Norma C-109 del código ASTM [1], para ensayos en probetas de pasta de cemento.

Durante proceso de molienda se trata de dejar la materia prima (rocas zeolitas) dentro de los parámetros de experimentación para lo cual se procedió a pasar por varios molinos estas rocas para luego tamizarlas y así lograr que este dentro de los parámetros.

Para la realización de los ensayos se elaboraron 24 especímenes de (51x51x51mm) tres por cada día de ruptura, con una relación agua cemento de 0.3, los porcentajes de puzolana Zeolita y Cemento tipo I para cada una de las proporciones constan en la tabla 3.

**Tabla 3.** Porcentaje de Zeolita y Cemento por todos los especímenes

Nº	cant de especimenes	% de zeolita	gr. Zeolita	% de cemento	gr Cemento	relación agua cemento	Cant . de agua
		(%)	(gr)	(%)	(gr)		(gr)
1	12	25%	900	75%	2700	0.30	1080
2	12	27.5%	950	72.5%	2610	0.30	1080

Una vez hecha la mezcla de la pasta de cemento, se moldearon los especímenes dentro de un tiempo total no mayor a 3 min luego de haber completado la mezcla original del lote. Y se apisono la mezcla en cada compartimento cúbico aproximadamente 32 veces durante 10 s en 4 rondas, cada ronda fue en ángulos rectos con respecto a la otra y consistió de ocho golpes contiguos sobre la superficie del espécimen o muestra. [1].

Los especímenes de prueba después de pasados los (4, 11, 18,25) y (7, 14, 21,28) días de curado en agua para el caso de la mezcla al 27.5% de Zeolita y del 25% de Zeolita respectivamente; fueron aplicados al proceso de ruptura de acuerdo a la tolerancia permisible prescrita en la norma ASTM C-109

#### 4. Resultados

Usando los valores promedios de ruptura que se obtuvieron de acuerdo a los datos experimentales y con las variaciones de los valores de las correlaciones de “m y a” que son variables propias del material se pudo comprobar que el esfuerzo a la compresión aumenta a medida que aumentan los días de curado de los especímenes, de acuerdo con la graficas antes observadas.

Haciendo uso de la metodología planteada, la tabla 1 y 2 nos muestran un cuadro de valores que serán llenados una vez concluida la experimentación basada en la norma ASTM C 109.

**Tabla 1.** Cuadro de Datos Experimentales para 25% de Zeolita con 7 días de Curado

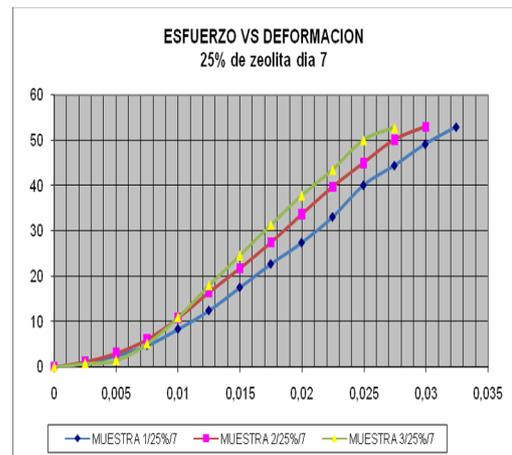
25% de Zeolita al 7 día de curado	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
-----------------------------------	-----------	-----------	-----------

Marca	Delta longitud (mm)	Deform.	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,002	0,94	1,13	0,75
10	0,254	0,004	2,45	3,02	1,43
15	0,381	0,007	4,72	6,05	5,10
20	0,508	0,009	8,32	10,78	10,89
25	0,635	0,012	12,40	16,45	17,96
30	0,762	0,014	17,51	21,74	24,58
35	0,889	0,017	22,69	27,42	31,31
40	1,016	0,019	27,42	33,66	37,82
45	1,143	0,022	33,09	39,71	43,49
50	1,27	0,024	40,09	45,01	50,04
55	1,397	0,027	44,44	50,11	52,76
60	1,524	0,029	49,17	52,95	
65	1,651	0,032	52,95		

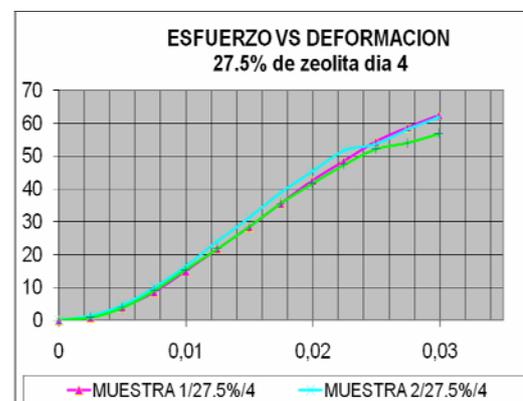
**Tabla 2.** Cuadro de Datos Experimentales para 27.5% de Zeolita con 4 días de Curado

27,5% de Zeolita al 4 día de curado			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Marca	Delta longitud (mm)	Deform.	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0	0	0
5	0,127	0,002	0,75	1,32	0,86
10	0,254	0,004	3,97	4,61	3,78
15	0,381	0,007	8,51	9,94	8,96
20	0,508	0,009	14,94	16,45	15,31
25	0,635	0,012	21,74	24,01	21,74
30	0,762	0,014	28,36	31,20	28,36
35	0,889	0,017	35,55	38,77	35,55
40	1,016	0,019	42,55	45,39	41,60
45	1,143	0,022	48,41	51,63	47,28
50	1,27	0,024	54,28	53,52	52,01
55	1,397	0,027	58,63	58,06	53,90
60	1,524	0,029	62,41	61,84	56,73
65	1,651	0,032			59,19

En las figuras 2 y 3 mostramos el comportamiento de las curvas de esfuerzo vs deformación para el día 4 y 7 de curado en agua para los porcentajes 27.5 % y 25% respectivamente.



**Figura 2.** Grafica Esfuerzo vs Deformación 25% de Zeolita al 7 día de Curado en Agua



**Figura 3.** Grafica Esfuerzo vs Deformación 27.5% de Zeolita al 4 día de Curado en Agua

A continuación indicamos las siguientes tablas 4 y 5 que indican los valores de modulo de Young, esfuerzos de compresión, esfuerzo de fluencia, y los correctores “m” y “a”.

**Tabla 4.** Valores promedios del Modulo de Young Para 27.5% de Zeolita Curado en Agua

DIAS DE CURADO	E	$\sigma_U$	$\sigma_Y$	m	a
4	2368.47	61.15	36.43	0.00495	0.7
11	2331.80	67.96	43.56	0.00485	1.2
18	6737.86	81.86	65.61	0.00284	0.2
25	7813.62	95.42	68.19	0.00441	0.6

**Tabla 5.** Valores promedios del Modulo de Young Para 25% de Zeolita Curado en Agua

DIAS DE CURADO	E	$\sigma_U$	$\sigma_Y$	m	a
----------------	---	------------	------------	---	---

7	2081.99	52.89	30.6 1	0.00425 7	0.738 6
14	8653.94	91.12	74.7 9	0.00278 4	0.249 7
21	4315.48	52.87	49.8 6	0.00185 3	0.155 9
28	7761.94	99.15	59.0 3	0.00219 6	0.345 0

Usando el algoritmo para modelar el comportamiento del esfuerzo vs deformación se pudo obtener la siguiente figura 4 la cual muestra el comportamiento de la pasta de cemento con 25 % de Zeolita 1 para los días de curado en agua 7-14-21-28.

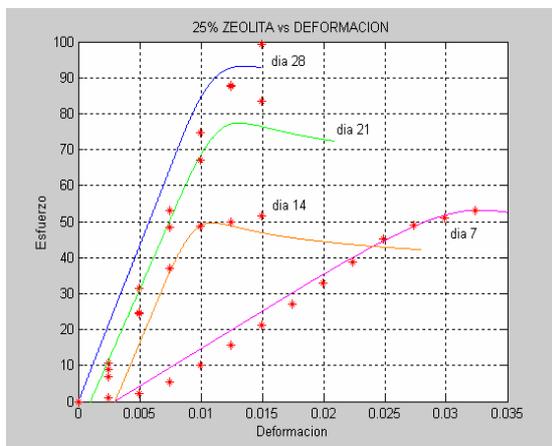


Figura 4. Grafica Esfuerzo Deformación 25% de Zeolita Curado en Agua

De igual manera se muestran las figuras 5 y 6 que muestran las graficas del valor de modulo de Young vs días de curado para los % de zeolitas analizados 25% y 27.5% respectivamente.

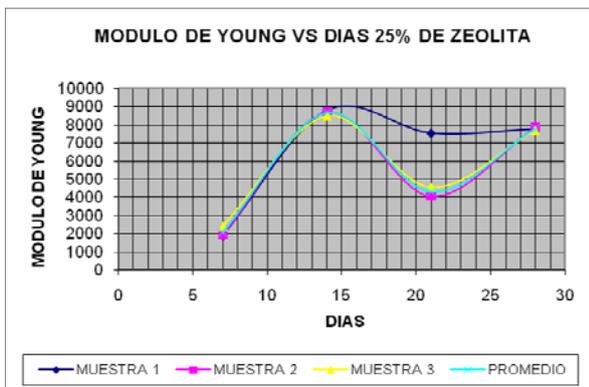


Figura 5. Grafica Esfuerzo Deformación 25% de Zeolita Curado en Agua

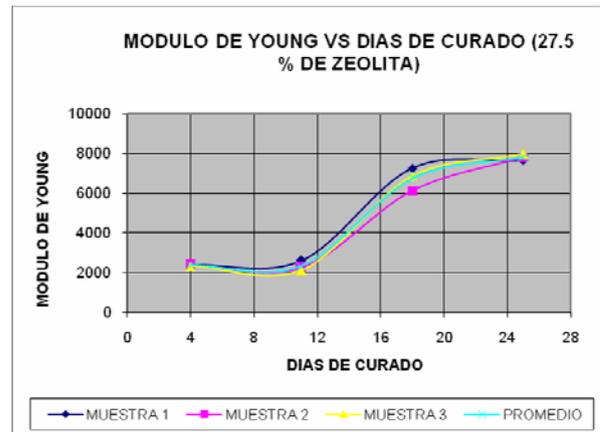


Figura 6. Grafica Esfuerzo Deformación 27.5% de Zeolita Curado en Agua

## 5. Conclusiones

- Se obtuvo un modelo elastoplástico de la pasta de cemento para 25% y 27.5% de adición de Zeolita
- La adición de 25% de zeolita a la pasta de cemento tipo I hace que el esfuerzo a la ruptura de las muestras va incrementándose a medida que aumentan los días de curado es así que al día 28 nuestras muestras alcanzan un mayor valor de resistencia a la compresión.
- Con esta experiencia de adicionar la puzolana zeolita a la pasta de cemento, logramos que se lo considere como un material para la producción del cemento comercial, obviamente que se debe realizar más estudios, para garantizar su verdadera efectividad ya que esta investigación solo estuvo enfocada a la resistencia a la compresión como variaba su valor (Esfuerzo de ruptura) de acuerdo al tiempo de curado de las muestras.
- El valor de esfuerzo de ruptura mayor experimental adicionando 25% de zeolita se dio el día 28 y fue de 102.30 Mpa.
- A mayor tiempo de curado el comportamiento de la resistencia a la compresión es similar a la del cemento.
- Del análisis grupal podemos indicar que la mejor composición es cuando se adiciona 15% de zeolita comparada con las muestras controles cemento tipo I y IV, aquí se obtuvo la máxima resistencia.
- Con la adición del 15% al 25% de zeolita disminuye la resistencia a la compresión pero vale recalcar que a pesar de esto, dichos valores son mayores a las muestras de control de cemento tipo I y IV.

- Esta investigación permite ver desde el punto de vista ambiental que se puede reducir el índice de contaminantes en la producción del cemento para su comercialización, considerando la reducción del clinker.

[4] H. J. Hamilton, A type of variation on Newton's method, *The American Mathematical Monthly*, 57(1950), 517-522.

[5] Llinares Inares, R. Martinez "Elasticidad Lineal". Ed. Servicio de Publicaciones de la U.P.V.

## 6. Recomendaciones

- Extender el tiempo de curado de las muestras para obtener mayor información del esfuerzo a la compresión como variaría respecto a que si sigue aumentando muy considerablemente , su aumento es mínimo o se mantiene .

## 7. Referencias

[1] ASTM Standarts (2002).C-109, Standart Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standart, Vol. 04.

[2] ASTM Standarts (2003).C-595, Standart Specification for Blended Hydraulic Cements, Annual Book of ASTM Standart, Vol. 04.

[2] Y.C. Fung, A First Course in Continuum Mechanics, Second Edition, Prentice Hall,

[3] H. Bathe, K. J., Finite element procedures., Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996.