

Estudio y Simulación del Comportamiento del Cemento Pórtland Tipo I con la Adición de 10% de Zeolita Ecuatoriana Mediante el Curado al Aire.

Richard M. Vélez Mosquera, Perugachi Rodrigo 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
rvelez@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo se basa en el estudio y simulación para describir el comportamiento de una pasta de cemento compuesta por cemento Pórtland tipo I y zeolita ecuatoriana a través de métodos numéricos. La pasta de cemento compuesta estuvo expuesta a un proceso de curado al aire. Las variables analizadas fueron: El porcentaje de zeolita y el tiempo de curado, siendo la función de respuesta la resistencia mecánica a la compresión. De este estudio, se obtuvo que la adición de la zeolita analizada disminuye la resistencia mecánica a la compresión del cemento Pórtland tipo I. Además que el tiempo que las muestras de pasta de cemento compuesta permanezcan expuestas a un proceso de curado al aire no influye en la resistencia mecánica a la compresión. El modelo computacional implementado, se ajusta de muy buena manera a la curva esfuerzo-deformación real de cada una de las muestras analizadas, excepto por que al inicio de esta curva el comportamiento de la pasta de cemento compuesta analizada no se comporta como los otros materiales.

Palabra claves: *Cemento Pórtland tipo I, zeolita, simulación.*

Abstract

The present work is based on the study and simulation to describe to the behavior of a cement paste composed by Pórtland cement type I and Ecuadorian zeolite through numerical methods. The compound cement paste was exposed to a cured process of to the air. The analyzed variables were: The percentage of zeolite and the cured time, being the function of answer the mechanical resistance to the compression. From this study, it was obtained that the addition of the analyzed zeolite diminishes the mechanical resistance to the compression of the Pórtland cement type I. In addition that the time that compound the cement paste samples remain exposed to a cured process of to the air does not influence in the mechanical resistance to the compression. The implemented computacional model, adjusts of very good way to the curved real effort-deformation of each one of the analyzed samples, except so that at the beginning of this curve the behavior of the compound analyzed cement paste does not behave like the other materials.

Key words: *Pórtland cement type I, zeolite, simulation.*

1. Introducción

El cemento ha sido utilizado desde la época de los alquimistas para múltiples aplicaciones, ya sea para las construcciones de modestas casas hasta la actualidad con grandes construcciones de estructuras y pavimentaciones de calles. Estudios han demostrado que la zeolita puede suplir de muy buena manera a las cenizas volcánicas en su función como aditivo del cemento, ya que la zeolita le brinda al cemento mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros. Además, la zeolita incrementa la resistencia a la compresión y a la abrasión, y también aumenta la durabilidad del cemento.

En el presente estudio, se implementó un programa en Matlab, el cual permitió simular por el comportamiento de la pasta de cemento compuesta por zeolita ecuatoriana, por medio del modelo matemático obtenido a partir de los resultados del laboratorio.

2. Objetivos

El presente estudio tuvo por objetivo obtener un modelo por medio de métodos numéricos para simular el comportamiento de la resistencia máxima a la compresión de una pasta de cemento compuesta cuando se varía el porcentaje de zeolita y días de curado. Siendo el medio de curado el aire.

3. Procedimiento experimental

En esta etapa, se describirá todo lo que se realizó para la obtención de los resultados experimentales. Estos resultados obtenidos en el laboratorio fueron utilizados para implementar el modelo computacional en Matlab, con esto se pudo observar si la curva esfuerzo-deformación obtenida experimentalmente se ajusta a los datos reales de la experimentación.

3.1. Materiales

Los materiales utilizados para la obtención de las pastas de cemento compuesta con 15% de zeolita fueron:

3.1.1. Agua Potable. Se utilizó este tipo de agua debido a que las mayorías de las aplicaciones, se utiliza este tipo, por obtendríamos finalmente la simulación del comportamiento mucho más real..

3.1.2. Zeolita. Esta fue extraída desde la provincia ecuatoriana de Santa Elena del sector de Manglaralto.

3.1.3. Cemento Pórtland tipo I. Este cemento fue determinado para el estudio como “control”, siendo este el que no contiene ningún porcentaje de zeolita dentro de su composición, donde sirvió para realizar las comparaciones respectivas con las muestras de estudio.

3.1.4. Cemento Pórtland tipo IV. Este cemento es el que se comercializa dentro del mercado ecuatoriano, donde sirvió para realizar las comparaciones respectivas con las muestras de estudio.

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

3.2. Diseño experimental

El estudio de la resistencia mecánica del cemento compuesto se realizó a través de la resistencia a la compresión, por tener relación directa, la misma que fue la variable de repuesta.

Las variables de estudio fueron el porcentaje de zeolita y el tiempo de curado, que variaron de 5, 10, 15, 20, 25% y de 7, 14, 21, 28 días respectivamente de forma equidistante para poder observar los efectos que las combinaciones de estas causan en la resistencia a la compresión.

Los demás efectos influyentes en la resistencia mecánica del material fueron constantes, tales como: la relación agua/mezcla temperatura granulometría, etc.

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos se aplicó diferentes análisis, tales como: Shapiro y Wilk para comprobar la normalidad de los resultados obtenidos por medio de una variable aleatoria “W” con un nivel de significancia α para N datos. Una vez comprobada la normalidad de los datos, se procedió a realizar el análisis de varianza para comprobar si existe o no diferencia significativa entre los medios de los tratamientos.

Para realizar el análisis de varianza se utilizó las pruebas univariada, Post Hoc de Tuckey y Dunnet. Por medio de la prueba univariada se comprobó si existe diferencia significativa entre los resultados obtenidos para los diferentes tiempos de curado en todo el conjunto. En tanto que, con la prueba de “Tuckey” se comparó la diferencia que existe para cada tratamiento. Mientras que en el análisis por medio de

“Dunnet” se comparó la diferencia significativa con respecto al patrón (cemento con 0% de zeolita) y con respecto al cemento Pórtland tipo IV.

Se intento controlar y disminuir los errores realizando pruebas o comparaciones simultáneas, las cuales sirvieron para validar los resultados obtenidos. Estas pruebas de validación se las realizó con porcentajes y a tiempos de curado intermedios, es decir: 7.5, 12.5, 17.5, 22.5 y 27.5% de zeolita y los ensayos de compresión se los realizó desde el cuarto día de curado en intervalos de siete días hasta llegar al día 25.

Para la simulación computacional, es necesaria la obtención de varios parámetros los cuales se obtienen de los resultados experimentales. En la Figura 1 se muestra la interpretación gráfica en la curva esfuerzo-deformación de cada parámetro requerido por el programa en Matlab para realizar la simulación computacional.

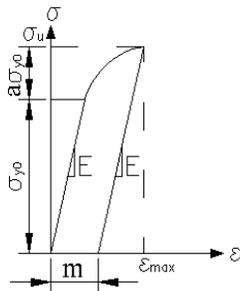


Figura 1. Representación de los parámetros.

Donde cada parámetro representa:
 σ_u : Esfuerzo máximo de compresión.
 σ_{yo} : Esfuerzo de fluencia.
 ϵ_{max} : Deformación máxima.
 m : Deformación inelástica total.

$$a = \frac{\sigma_u - \sigma_{yo}}{\sigma_{yo}}$$

Las hipótesis asumidas para los análisis que se realizaran luego de terminar la etapa de experimentación serán:

- H_0 : Con ninguno de los porcentajes de zeolita analizados se obtendrá una resistencia a la compresión final mayor que el patrón de 0% de zeolita.
- H_1 : Con alguno de los porcentajes de zeolita analizados se obtendrá una resistencia a la

compresión final mayor que el patrón de 0% de zeolita.

Cuando se menciona la palabra “final” en las hipótesis planteadas, esto se refiere a una vez que ha concluido el tiempo máximo de curado.

Una vez concluido la experimentación, se analiza si verdaderamente con ninguno de los porcentajes se supero la resistencia a la compresión del patrón, se acepta la hipótesis inicial planteada. Caso contrario se rechaza la hipótesis inicial en favor de la hipótesis alternativa o experimental.

3.3. Preparación y ensayo de las probetas

En esta etapa de la investigación se realizó la preparación de las muestras y los experimentos que permitieran obtener los resultados que sirvieran para el análisis en las etapas posteriores.

La preparación y ensayo de las probetas inicio con la obtención de la zeolita, la cual se obtuvo por medio de un muestreo en la comuna de Manglaralto.

Una vez que se tiene la zeolita en bruto se procedió a la molienda de esta en el laboratorio de Piro Metalurgia de la FICT (Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra) hasta llegar a una finura de 0.45μm.

Para la obtención de las muestras, no se realizaron morteros (cemento + arena), como se especifica en la norma ATM C 109/C 109M – 02, sino que se obtuvo pasta de cemento compuesta (Cemento + H₂O + 15% de zeolita, y Cemento + H₂O + 17,5% de zeolita). La relación agua/mezcla fue de 0.3 en lugar de 0.485. Las muestras obtenidas fueron, cubos de pasta de cemento compuesta de 50mm de arista, la mezcla y obtención de los cubos se los realizó en el laboratorio de Suelos, Rocas y Materiales de la FICT. Se obtuvieron 24 muestras para la obtención de la resistencia a la compresión, 12 que contenían 15% de zeolita y 12 con 17.5% de zeolita. Estas muestras se procedió a exponerlas al proceso de curado al aire durante 7, 14, 21 y 28 días para las muestras que contenían 15% de zeolita y 4, 11, 18 y 25 días para las muestras con 17.5% de zeolita.

En los días mencionados en el párrafo anterior se procedió a realizar el ensayo de compresión a tres cubos por cada día de curado respectivamente, estas pruebas se las realizo en el mismo laboratorio de Suelos, Rocas y Materiales en una maquina de ensayos universales tal como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Ensayo de compresión.

3.4. Resultados obtenidos

Una vez que se realizaron los ensayos de compresión a todas las probetas, en la Tabla 1 se muestra los valores de los esfuerzos a la compresión obtenidos para los diferentes niveles de porcentajes de zeolita y tiempo de curado. Además de los valores experimentales de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de zeolita, se incluyó también los valores que sirvió como muestra de control (contiene 0% de zeolita) y el del cemento Pórtland tipo IV (comercial).

Tabla 1. Datos de la resistencia a la compresión obtenidos experimentalmente

		TIEMPO DE CURADO			
		7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS
% DE ZEOLITA	0,00%	80,015	87,128	63,700	77,348
	0,00%	80,015	88,017	63,308	76,459
	0,00%	82,682	88,017	66,640	77,348
	5,00%	46,060	64,012	66,679	67,568
	5,00%	59,780	66,679	66,679	68,457
	5,00%	57,820	67,568	76,459	73,792
	10,00%	62,132	53,900	40,180	62,720
	10,00%	57,820	57,820	44,100	65,660
	10,00%	56,252	59,780	45,080	71,540
	15,00%	49,980	59,780	48,020	59,780
	15,00%	57,820	55,860	51,940	47,040
	15,00%	52,920	47,040	51,940	54,880
	20,00%	49,000	44,100	51,940	67,568
	20,00%	47,040	49,000	48,020	68,457
	20,00%	44,100	55,860	54,880	65,790
	25,00%	33,320	41,160	42,140	54,880
	25,00%	45,668	45,080	43,120	45,080
	25,00%	47,236	50,960	49,980	50,960
	TIPO IV	49,9570	50,8996	45,2441	40,5311
	TIPO IV	45,2441	49,9570	40,5311	42,4163
TIPO IV	45,2441	49,0144	42,4163	42,9819	

En la Tabla 2, se muestran los resultados experimentales de la resistencia a la compresión para las pruebas de validación, donde se adjuntaron también los resultados de la validación para el cemento Pórtland Tipo I y Tipo IV.

Para la obtención de las curvas que simularán el comportamiento de la pasta de cemento, mediante el programa, es necesario obtener los parámetros tales como se mostraron en la Figura 1. La Tabla 3, muestra los resultados de los diferentes parámetros requeridos por el programa

para realizar la simulación computacional para las pastas de cemento con 10% de zeolita.

Tabla 2. Datos de la resistencia a la compresión para los resultados de validación

		TIEMPO DE CURADO				
		NIVELES	4 DIAS	11 DIAS	18 DIAS	25 DIAS
% DE ZEOLITA	0,00%	70,235	86,238	87,127	94,240	
	0,00%	71,124	86,238	101,352	84,460	
	0,00%	80,015	88,017	86,238	110,243	
	7,50%	63,700	66,640	68,457	72,014	
	7,50%	57,820	71,540	81,793	72,014	
	7,50%	56,252	62,720	72,903	65,790	
	12,50%	57,820	59,567	45,080	40,180	
	12,50%	52,920	54,232	44,492	45,668	
	12,50%	56,840	58,678	44,688	41,748	
	17,50%	49,980	49,000	46,060	45,080	
	17,50%	48,020	49,000	49,980	54,880	
	17,50%	51,940	48,020	51,940	50,960	
	22,50%	57,820	59,780	83,571	79,126	
	22,50%	59,780	75,460	86,238	70,235	
	22,50%	51,940	60,760	86,238	74,681	
	27,50%	31,752	38,220	48,608	28,420	
	27,50%	32,928	42,728	43,120	37,240	
	27,50%	33,712	41,160	41,160	39,200	
	TIPO IV	45,2441	42,4163	40,5311	46,7522	
	TIPO IV	39,5886	46,1866	44,3015	37,3263	
TIPO IV	38,6460	42,2278	36,7608	44,3015		

En tanto que, en la Tabla 4 se muestran los parámetros para la simulación de la pasta de cemento compuesta que contiene 12.5% de zeolita y que además sirvieron para validar los resultados obtenidos.

Tabla 3. Parámetros para la simulación computacional 10% de zeolita

VARIABLES DEPENDIENTES		RESULTADOS VARIABLES INDEPENDIENTES					
DIAS	PORCENTAJE	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Deformación Máxima	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
7	10	52,332	62,132	0,03810	1716,9291	0,19	0,00191
7	10	55,860	57,820	0,03048	1999,2842	0,04	0,00156
7	10	49,980	56,252	0,02337	2459,6457	0,13	0,00100
14	10	50,960	53,900	0,02794	2006,2991	0,06	0,00107
14	10	55,860	57,820	0,03048	1999,2842	0,04	0,00156
14	10	56,840	59,780	0,03556	1721,3810	0,05	0,00100
21	10	38,220	40,180	0,03048	1367,9313	0,05	0,00111
21	10	43,120	44,100	0,02540	1886,2642	0,02	0,00202
21	10	41,356	45,080	0,02540	1809,0989	0,09	0,00100
28	10	58,800	62,720	0,03810	1653,5433	0,07	0,00100
28	10	63,700	65,660	0,04064	1671,9160	0,03	0,00137
28	10	68,600	71,540	0,04064	1800,5249	0,04	0,00100

Tabla 4. Parámetros para la simulación computacional 17.5% de zeolita

VARIABLES DEPENDIENTES		RESULTADOS VARIABLES INDEPENDIENTES					
DIAS	PORCENTAJE	Esfuerzo de Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Deformación Máxima	Módulo Elástico (Mpa)	a	m
4	12,5	53,900	57,820	0,0330	1768,3727	0,07	0,00100
4	12,5	49,000	52,920	0,0305	1753,7581	0,08	0,00100
4	12,5	51,548	56,840	0,0330	1844,9535	0,10	0,00221
11	12,5	49,787	59,567	0,0128	4900,3087	0,20	0,00100
11	12,5	30,939	54,232	0,0152	4060,2550	0,75	0,00188
11	12,5	45,431	58,677	0,0102	5962,0400	0,29	0,00100
18	12,5	44,100	45,080	0,0279	1736,2205	0,02	0,00198
18	12,5	42,140	44,492	0,0279	1659,0551	0,06	0,00112
18	12,5	41,356	44,688	0,0305	1480,1710	0,08	0,00100
25	12,5	35,868	40,180	0,0203	2017,3228	0,12	0,00100
25	12,5	42,140	45,668	0,0254	1843,3946	0,08	0,00100
25	12,5	37,828	41,748	0,0254	1654,7600	0,01	0,00100

4. Análisis estadísticos, y resultados del modelo computacional

4.1 Resultados y análisis estadísticos

El análisis computacional de los resultados obtenidos en la experimentación, se lo realizo con ayuda del software computacional STATISTICA. Tal como se describio en el “Diseño de Experimentos”, lo primero que se realizó fue comprobar que los datos obtenidos tengan un comportamiento normal. Para este análisis se asumió las siguientes hipótesis:

- Ho: Los datos obtenidos tienen una distribución normal.
- H1: Los datos obtenidos no tienen una distribución normal.

La Figura 3 muestra el Histograma de frecuencia de los esfuerzos a la compresión para una concentración de 10% de zeolita.

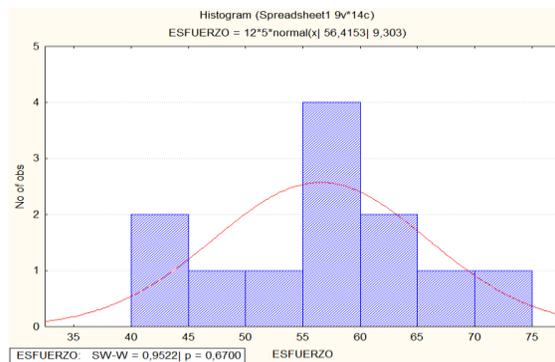


Figura 3. Distribución normal para 10% de zeolita y curado al aire.

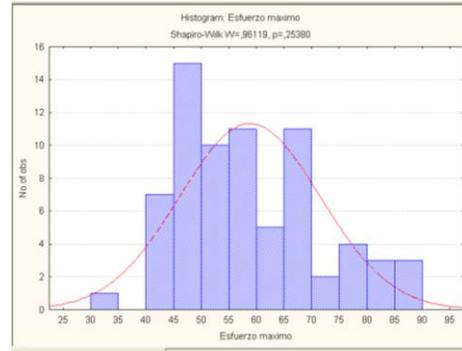


Figura 4. Distribución normal del esfuerzo a la compresión para el tiempo de curado y el % de zeolita.

Mediante la gráfica se pudo obtener que el valor de “p” calculado para el 10% de zeolita es igual a 0.67; debido a que el valor de la probabilidad calculada es mayor a nuestro valor de significancia (0.05), obtenido a partir de nuestro intervalo de confianza igual a 95%. Entonces se pudo aceptar la hipótesis de normalidad de los datos.

Una vez que se comprobó la normalidad de los datos obtenidos se procedió a realizar el análisis de varianza para los resultados del 10% de zeolita. Donde se plantearon las siguientes hipótesis:

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

El primer análisis que se realizó, fue el de covarianza. En la Figura 5 se muestra este análisis para el 10% de zeolita.

Efecto	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	F	p
Intercepto	38192,28	1	38192,28	3385,390	0,000000
Tiempo de Curado (días)	861,76	3	287,25	25,462	0,000191
Error	90,25	8	11,28		

Figura 5. Análisis de covarianza para el 10% de zeolita y curado al aire.

Como se puede observar en la tabla anterior, En el análisis del 10% de zeolita el valor de la probabilidad “p” es mayor que el valor del α asumido (0.05) con lo que se acepta la hipótesis inicial planteada de que no existe diferencia

significativa entre las medias de los tratamientos, con lo cual en un proceso de curado al aire la resistencia a la compresión no varía en función del tiempo.

En la Figura 6, se muestra el análisis por medio del método de Post Hoc de Tuckey para los resultados de esfuerzo máximo a la compresión para la pasta de cemento con 10% de zeolita. Este análisis compara la probabilidad de que la media de un tratamiento se encuentre en el intervalo de confianza de las medias de los esfuerzos a la compresión de los otros tratamientos analizados.

	Tiempo de Curado (días)	{1}	{2}	{3}	{4}
		58.733	57.168	43.129	66.640
1	7		0,937841	0,002195	0,078602
2	14	0,937841		0,004124	0,035244
3	21	0,002195	0,004124		0,000321
4	28	0,078602	0,035244	0,000321	

Figura 6. Análisis de Post Hoc de Tuckey

Mediante la figura 7, se pudo ilustrar que la pasta de cemento compuesto por 10%, disminuye su resistencia a la compresión a los 21 días de curado al aire.

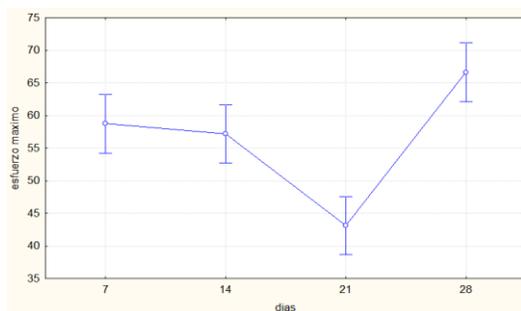


Figura 7. Gráfica de esfuerzo máximo Vs días de curado.

A continuación en la Tabla 5, se presenta mediante el análisis de Dunnett la tabla que se obtuvo del análisis en STATISTICA para buscar el tratamiento más óptimo y que muestre una diferencia significativa con el patrón.

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

Como se puede apreciar en la tabla anterior existe diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, excepto con la pasta de cemento compuesta con 5% de zeolita, donde se puede apreciar que a los 21 días de curado la resistencia mecánica a la compresión se comporta igual que el patrón y mejor que el cemento tipo IV, ya que en este tiempo se obtiene una mayor resistencia a la compresión que con los otros porcentajes. Esto se puede ver de forma gráfica en la Figura 8, la cual muestra los rangos de las medias de los esfuerzos a la compresión para los dos factores ya mencionados.

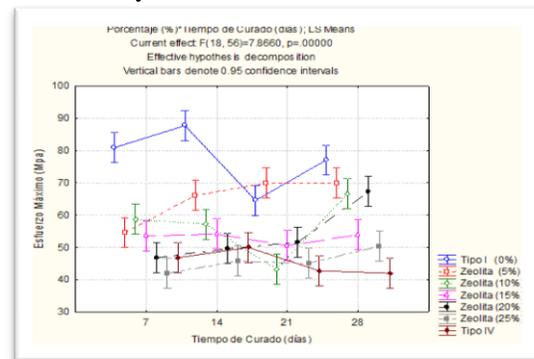


Figura 8. Rangos del esfuerzo a la compresión para los factores tiempo de curado y porcentaje de zeolita.

En la figura anterior se puede apreciar como el esfuerzo a la compresión de la pasta de cemento que no tiene zeolita se encuentra por arriba de los esfuerzos a la compresión que las pastas de cemento compuestas que contienen zeolita. Con esto se puede afirmar que agregarle este tipo de zeolita no mejora las propiedades de la pasta de cemento Portland, esta zeolita hizo que disminuya la resistencia a la compresión. Esto se puede apreciar en el gráfico en 3d de la Figura 9 y en las curvas de nivel de la Figura 10, las cuales tienen como variables independientes los factores tiempo de curado y porcentaje de zeolita y como variable dependiente el esfuerzo máximo a la compresión.

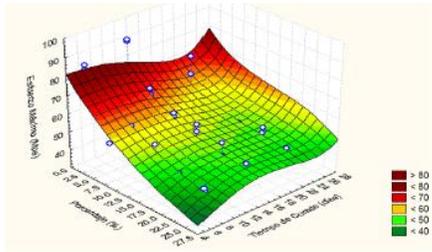


Figura 9. Esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempos de curado.

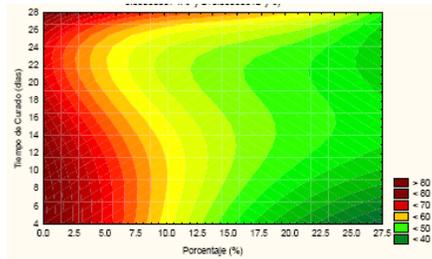


Figura 10. Curvas de nivel del esfuerzo máximo a la compresión para diferentes porcentajes de zeolita y tiempos de curado.

Las 2 graficas anteriores, se las obtuvo con la ayuda de una regresión múltiple, Estas graficas se las puede obtener para cada uno de los parámetros que necesita el modelo en Matlab que permitirá la simulación computacional de la pasta de cemento.

4.1 Resultados del modelo computacional

En esta sección se presentaron los resultados de la simulación computacional con el programa en Matlab implementado. La Figura 11 muestra la curva de esfuerzo-deformación de cada uno de los cubos de pasta de cemento compuesta con 10% de zeolita que fueron expuestos a un proceso de curado al aire por 7, días. Además, se presenta la curva simulada para estos parámetros, la cual se aprecia en azul.

La Figura 12 muestra la curva de esfuerzo-deformación de los cubos de pasta de cemento compuesta con 12.55% de zeolita que fueron expuestos a un proceso de curado al aire por 4, días.

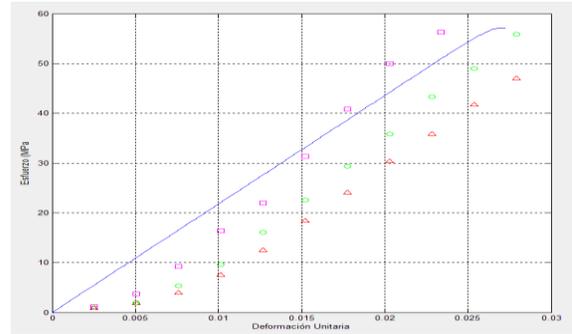


Figura 11. Curvas esfuerzo-deformación simulada y reales.

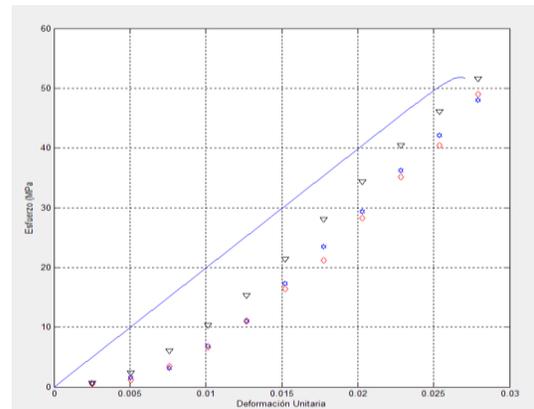


Figura 12. Curvas esfuerzo-deformación simulada y reales, datos de validación.

Las mismas graficas anteriores se pueden obtener para cada uno de los diferentes días de curado mostrados en las tablas 8 y 9 (11, 14, 18, 21, 25 y 28), ingresando sus respectivos parámetros en el programa en Matlab.

5. Conclusiones.

La adición de zeolita ecuatoriana extraída de la provincia de Santa Elena de la comuna Manglaralto en el cemento Portland tipo I, produjo una disminución sobre la resistencia máxima a la compresión de una pasta de cemento, respecto a la muestra patrón (contiene 0% de zeolita dentro de su composición); cuando se le agregó cualquier porcentajes de zeolita tales como: (5, 10, 15, 20, 25) respectivamente.

Por lo tanto se pudo concluir que mientras más, se aumente el porcentaje de zeolita, la resistencia máxima a la compresión disminuirá, respecto al cemento Tipo I (sin porcentaje de zeolita)

Mientras que la adición del 5% de zeolita ecuatoriana en la pasta de cemento, mediante curado al aire. Produjo un aumento de 10 MPa en la resistencia máxima a la compresión, respecto al cemento Tipo IV (comercial).

Teniendo un efecto contrario sobre la resistencia a la compresión de la pasta de cemento, cuando se le agregó un porcentaje de zeolita ecuatoriana igual a (10, 15, 20, 25), bajo en el mismo tipo de curado.

6. Bibliografía

- [1] Abram's, D.A "Design and control of concrete mixtures", Institute Structural materials Research laboratory, pág 20, 1918.
- [2] Cesar Echevarría, *Modulo del Hormigón* (Universidad Nacional de Colombia, sede en Medellín, 2002).
- [3] Hugo Barrera, Sergio Enríquez y Diego Salgado, "Influencia del cemento y sus adiciones en la corrosión del acero en hormigón armado" (Departamento de ingeniería, Universidad de Santiago Chile, 2004).
- [4] Antiohosa, V.G. Papadakis y S. Tsimas, "Improving the performance of ternary blended cements by mixing different types of fly ashes", Universidad Técnica Nacional de Atenas, Escuela de Ingeniería Química, 2003.
- [5] Canpolat, K. Yılmaz, y M.A. Yurdusev, "Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production", Department of Civil Engineering, Celal Bayar University, Manisa, Turkey, Febrero de 2003.
- [6] Olgún María "Zeolitas características y propiedades", Instituto nacional de investigaciones nucleares, depto. de química, [México], Febrero de 2001.
- [7] ACI 318, "Building code requirement for structural concrete".
- [8] ACI 363, "State for the art report on high strength concrete".
- [9] Camilo Juan, "Efecto de la adición de Metacaolín en el cemento Pórtland, Universidad Nacional de Colombia (Medellín), 2006.
- [10] Robalino Paola, "El uso de la zeolita como una adición mineral para producir cemento Puzolanico", (Tesis, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2004.
- [11] Nakin Suksawan¹, Hani. Nassif, "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of hpc, Department of Civil and Environmental Engineering, The State University of New Jersey, 2004.
- [12] Hani H. Nassif *, Husam Najm, Nakin Suksawang "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC", Department of Civil and Environmental Engineering, Rutgers, The State University of New Jersey, 98 Brett Road, SOE Building, 131 A-Wing, Piscataway, NJ 08854, USA. December 2004.
- [13] ASTM C 109/C109M – 02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 – in or [50 - mm] Cube Specimens).