

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

Jiménez J., Cornejo M. 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
jjimenez@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo es un estudio acerca del comportamiento de la resistencia a la compresión en las pastas de cemento, cuando se agrega 20% de Zeolita en la mezcla y se le aplica un curado al aire. La investigación se desarrolla en dos etapas, la primera de ellas: la experimentación con su respectivo estudio estadístico de los datos obtenidos y la segunda etapa el desarrollo de un modelo teórico y su implementación en un lenguaje de programación, para realizar una comparación de las curvas del modelo teórico con las curvas obtenidas en el proceso experimental. Otra parte fundamental del presente estudio es la comparación entre el material compuesto (pasta de cemento + Zeolita) con el cemento base Tipo I y el cemento comercial Tipo IV.

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

Abstract

This work is a study about the behavior of the compressive strength in cement pastes, adding 20% of Zeolite in the mixture and it was cured by air. This thesis is developed in two phases, the first comprised is experimenting with its own statistical study of the experimental results and the second are developed a theoretical model and its implementation in a programming language, for making comparison of curves the theoretical model with the curves obtained in the experimental process. At the conclusion of the two stages were made a comparison of the adjustment of the theoretical model with experimental data. Another key part of this study is the comparison between the composite material (cement paste + Zeolite) with cement base Type I and Type IV commercial trade cement.

Key words: *Cement, Zeolite, uniaxial compression strength, experimental statistical analysis, mathematical modeling.*

1. Introducción.

El concreto es un material durable y resistente que resulta de la mezcla de uno o más conglomerantes, áridos, agua y eventualmente aditivos; por lo que el presente estudio analiza las propiedades mecánicas del cemento, después de agregar un porcentaje de puzolana (zeolita) y someterlo a un ambiente de curado al aire, para posteriormente someterlo a ensayos de compresión. Siendo el material compuesto, la mezcla del cemento mas Zeolita.

En la actualidad los estudios se basan en tratar de mejorar la resistencia a la compresión del cemento Pórtland debido a que en todo el mundo se utiliza esta materia prima para la construcción de edificios, carreteras, represas, etc. Por lo tanto el objetivo es lograr resistencias altas o iguales con el uso de aditivos existentes en la naturaleza y de esta manera disminuir costos de producción sin causar daños ambientales. Dada la disponibilidad de las puzolanas en nuestro país, la aplicación de materiales puzolánicos da lugar a la posibilidad de un considerable beneficio económico, teniendo en cuenta que existen algunas empresas cementeras en el país.

La modelación matemática, juega un papel importante en el mundo actual y la ingeniería ya que los desafíos que enfrentan hoy la ciencia son tan complejos que sólo se pueden resolver con la relación interdisciplinaria y en la cual la matemática juega un papel muy destacado, puesto que permiten realizar experimentos virtuales cuyos análogos reales serían caros, peligrosos o imposibles.

La importancia de éste estudio radica en la inclusión de los modelos matemáticos, aplicados a los materiales compuestos, como las pastas de cemento con Zeolita.

2. Objetivos.

La finalidad de la presente investigación científico-tecnológica, es la de analizar y predecir mediante modelación matemática el comportamiento del cemento variando su tiempo de fraguado teniendo una concentración del 20% de zeolita en la mezcla.

3. Procedimiento Experimental.

Para analizar el efecto que tiene introducir material puzolánico en pastas de cemento y el tiempo de curado en la resistencia a la compresión del material compuesto se escogió un diseño factorial, en donde los factores serán el porcentaje de Zeolita y el tiempo de curado. Los niveles para el factor de porcentaje de Zeolita serán 5, 10, 15, 20 y 25% y 7, 14 21 y 28 días para el tiempo de curado. Para el experimento se contará con tres muestras experimentales para cada tiempo de ensayo, es decir que se tendrá una población de 60 muestras. Los datos serán tratados estadísticamente con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ mediante el uso del software STATISTICA para encontrar diferencias significativas entre los tratamientos con el método de ANOVA con una confiabilidad del 95%. La segunda Parte que consiste en la elaboración de un algoritmo que nos permitirá obtener un modelo matemático mediante el cual se obtendrá una curva simulada que será bien aproximada a los datos experimentales. Antes de realizar el análisis estadístico, se debe verificar que los datos tengan una distribución Normal.

3.1. Materiales

Los materiales utilizados para la obtención de las pastas de cemento compuesta con 20% de zeolita fueron:

3.1.1. Agua Potable. Se utilizó este tipo de agua por que se buscó que los experimentos realizados sean lo mas reales posibles, ya que este tipo de agua es la que se utiliza generalmente en la mayoría de edificaciones.

3.1.2. Zeolita. Esta fue obtenida de la comuna de Manglaralto en la provincia ecuatoriana de Santa Elena, se utilizó esta zeolita por la cercanía con la ciudad de Guayaquil, ciudad en la que se encuentra la más grande y moderna planta cementera del Ecuador.

3.1.3. Cemento Pórtland tipo I. Este cemento sin ningún tipo de aditivos fue utilizado para la obtención de la pasta de cemento compuesta al agregarle la zeolita, además fue utilizado para obtener las muestras que sirvieron como control

3.1.4. Cemento Pórtland tipo IV. Este cemento es el comercial en el Ecuador, se lo utilizo para obtener muestras que servirán para compararlas

con las del experimento que servirán para la implementación del modelo computacional.

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

Para el modelo matemático asuma que la curva esfuerzo – deformación está dada por una relación bilineal, donde E es el módulo de Young y esfuerzo de fluencia σ_{y0} , como se muestra en la figura 3.1

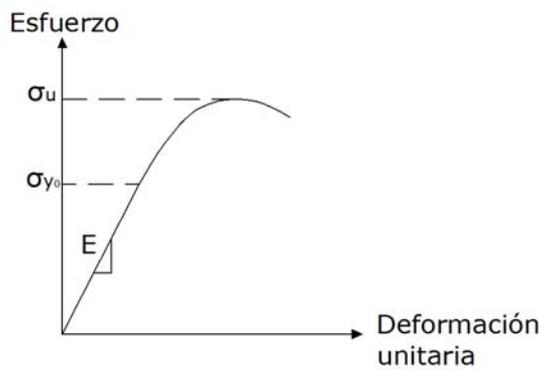


Figura 3.1. Curva esfuerzo-deformación

Para la barra sometida a tensión, el rango elástico en tensión está definido por $\sigma_{YT} > 0$, en cambio el rango elástico en compresión para la barra sometida a compresión está dado por $-\sigma_{YC} < 0$, puesto que la barra se soporta lateralmente para prevenir el pandeo. Por simplicidad asumimos $\sigma_{YT} = \sigma_{YC} = \sigma_Y$. Ahora definimos la región elástica como:

$$E_0 = \{\sigma \in R | -\sigma_{Y0} < \sigma < \sigma_{Y0}\}$$

En cualquier punto más allá del esfuerzo de fluencia, la deformación axial total de la barra puede descomponerse aditivamente en una parte elástica y una plástica

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p$$

Donde ϵ : deformación axial total

ϵ^e : Deformación en la región elástica

ϵ^p : Deformación en la región plástica

La ecuación constitutiva para la barra está dada por:

$$\sigma = E\epsilon^e = E(\epsilon - \epsilon^p)$$

y para cualquier aplicación de carga adicional que produce deformación plástica adicional, la derivada con respecto al tiempo del esfuerzo axial está dado por:

$$\dot{\sigma} = E(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^p)$$

Función fluencia, regla de flujo y endurecimiento/ablandamiento. La región elástica puede ser definida en términos de la función fluencia, se define la función fluencia inicial

$$f(\sigma, \sigma_{Y0}) = |\sigma| - \sigma_{Y0} = 0$$

por lo tanto, la región elástica inicial puede ser escrita como:

$$E_0 = \{\sigma \in R | f(\sigma, \sigma_{Y0}) < 0\}$$

Asuma que la barra está sujeta a carga diferencial, la cual produce deformación axial plástica diferencial. Esto es posible si la barra está fluyendo en tensión y es alargada aún más, o si está fluyendo en compresión y se comprime aún más. Denotando la magnitud de la tasa de deformación plástica por $\dot{\lambda} \geq 0$, tenemos

$$\dot{\epsilon}^p \begin{cases} +\dot{\lambda}, & \text{if } \sigma > 0 \\ -\dot{\lambda}, & \text{if } \sigma < 0 \end{cases}$$

Alternativamente se puede escribir

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\delta f}{\delta \lambda}, \quad \frac{\delta f}{\delta \lambda} = \text{sign}(\sigma)$$

La ecuación 2.27 se llama regla de flujo para la tasa de deformación plástica. La regla de flujo contiene la magnitud de la tasa de deformación, $\dot{\lambda}$, como el sentido, $\frac{\delta f}{\delta \lambda}$ describiendo tensión o

compresión.

Asuma que la barra continúa a fluencia en tensión y que el esfuerzo de fluencia cambia del valor inicial σ_{Y0} al valor actual σ_Y .

Asumiendo que el esfuerzo de fluencia en compresión se mantiene igual al esfuerzo de

fluencia en tensión, entonces la función fluencia actual se puede escribir como:

$$f(\sigma, \sigma_Y) = |\sigma| - \sigma_Y = 0$$

y la región elástica actual

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid f(\sigma, \sigma_Y) < 0\}$$

Una simple ley que describe la evolución de σ_Y

con la continuada deformación plástica está dada por la ecuación

$$\dot{\sigma}_Y = H' |\dot{\epsilon}^p| = H' \dot{\lambda}$$

Por definición, la barra exhibe una respuesta de endurecimiento si $H' > 0$, una respuesta de plasticidad perfecta si $H' = 0$, y una respuesta de ablandamiento si $H' < 0$.

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 $0.45 \mu\text{m}$.

Para llevar a cabo el proceso experimental debemos tener definidos los pasos a seguir de manera general. Detallándolos a continuación.

- Obtención y degreación de la zeolita
- Molienda.
- Diseño del experimento
- Experimentación
- Recolección de datos.
- Análisis de los resultados.

El protocolo experimental, se regirá según la Norma ASTM C 109/C 109M – 02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ó Método de prueba estándar para la Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (Utilizando

especímenes cúbicos de 2 pulg. o 50 mm). La norma detalla que se necesitan de dos a tres especímenes para cada período de prueba.

Los equipos utilizados se enlistan a continuación:

- Instrumento de medición de peso.
- Moldes.
- Paleta.
- Mezclador mecánico.
- Máquina de ensayo de compresión.

Molienda. Los pasos para realizar la molienda son:

1. Medir 12 Kg. de Zeolita en la balanza, después de haber obtenido la zeolita una granulometría requerida para el proceso.
2. Trituración por medio del molino de quijadas.
3. Moler en el triturador de rodillos
4. Pasar la zeolita por el separador.
5. Homogenizar la mezcla y tomar una muestra.
6. Medir en la balanza 100 gramos.
7. Preparar los tamices de 14, 18, 40 y 50.
8. Realizar el proceso de tamizado en el tamizador eléctrico, durante 15 minutos
9. Una vez finalizado el tamizado, separar los tamices y medir en la balanza el material que se queda en cada tamiz, al sumar el material se deben obtener nuevamente los 100 gramos.
10. Moler en el molino de discos.
11. Repetir nuevamente los pasos 4 al 8.
12. Al terminar el tamizado, volver a medir en la balanza el material que queda en cada tamiz, esta vez el material que pasa por el tamiz número 50, debe ser mayor que la vez anterior.
13. Moler en el molino de rodillos.
14. Repetir los pasos 4 al 7.
15. Preparar los tamices número 50, 100, 200 y 325.
16. Realizar el tamizado durante 15 minutos
17. Al terminar el tamizado, volver a medir en la balanza el material que queda en cada tamiz, esta vez el material que pasa por el tamiz 325 debe estar entre el 70 y 80% de la muestra tomada.
18. Almacenar el material molido en una bolsa plástica o un recipiente cerrado para mantenerlo libre de humedad.

Una vez que el material pasó por el tamiz de 325, la Zeolita alcanza una granulometría de 45

micras, que es la granulometría del cemento Tipo I, lo cual es importante para la fase experimental.

Preparación de la Pasta. Para la composición de las probetas, se debe hacer una mezcla homogénea de cemento Tipo I más el porcentaje correspondiente de Zeolita (20%). Se preparó una mezcla de 3000 gramos para las 12 probetas, de esta mezcla el 20 % de Zeolita corresponde a 600 gramos y los restantes 2400 gramos al cemento. Se empleó una relación agua/cemento de 0.3, por lo tanto a la mezcla se le añadió 900 gramos de agua. Mostrando en la tabla.

Tabla 1
Relaciones para la mezcla del 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

La preparación de la pasta de cemento debe realizarse con mezcla mecánica con el procedimiento según la norma ASTM C 305.

Preparación de los moldes.

- ✓ Verificar que las superficies del molde se encuentran limpias y que los pernos de apriete se encuentren correctamente ajustados.
- ✓ Aplicar aceite en el interior del molde con un paño impregnado u otros medios apropiados.
- ✓ Eliminar algún exceso de aceite con un paño limpio.



Figura 3.2. Preparación de moldes

Moldeamiento de las probetas. Una vez que la mezcla se homogenizó en el mezclador y se le agregó agua se debe realizar los siguientes pasos:

- Con la paleta tomar una porción de la mezcla y colocarla dentro de cada uno de los cubos

del molde, no se debe colocar más de la mitad de la capacidad de cada cubo.

- Se debe apisonar el mortero en cada compartimiento cúbico 32 veces en unos 10 segundos en 4 rondas, cada ronda debe ser perpendicular a las otras y cada ronda consta de 8 golpes como se muestra en la figura 3.2
- Una vez compactada la mezcla en el molde, con la paleta vuelva a revolver la mezcla del tazón y colóquela dentro de los cubos, esta vez llene los moldes.
- Vuelva a compactar la mezcla con el apisonador
- Remueva las burbujas de aire con un compactador de mezcla.
- Remueva los excesos de la superficie del molde, figura 3.3
- Coloque un protector plástico sobre los moldes y almacénelos de preferencia en un lugar húmedo.

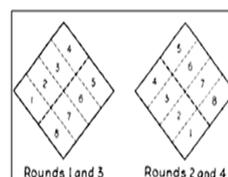


Figura 3.3. Almacenamiento de moldes con la mezcla

Pasadas 24 horas se procede a desmoldar las probetas y se las marca según el porcentaje de Zeolita y el tiempo al que se hará el ensayo.

Curado y almacenamiento. Inmediatamente después de terminar de moldear, colocar los moldes con un material plástico el cuál actuará como una cámara. Según la norma se debe mantener los moldes en una cámara de curado de 20 a 72 h, con sus superficies superiores expuestas a aire húmedo, pero protegidas del agua que gotea. Si las muestras se retiran de los moldes antes de las 24 h, mantenerlos en los estantes del armario húmedo o sala hasta que sean las 24 h de edad [5]. Al siguiente día se lo desmoldara y se procederá al lavado de los moldes. Las probetas se dejaran en una tina a temperatura ambiente para que adquieran el endurecimiento adecuado que requerimos, a esto lo llamamos curado al aire.



Figura 3.4 Almacenamiento de los moldes

Determinación de la Resistencia a la compresión. Limpiar cada muestra, eliminando las aristas vivas o incrustaciones de las caras que se pondrá en contacto con el rodamiento de bloques de la máquina de ensayo. Con cuidado, se coloca la muestra en la máquina de ensayo por debajo del centro del bloque del soporte superior. Cargamos hasta llegar a cero en el medidor de compresión y encerramos el reloj comparador que nos da los datos de lo que se irá comprimiendo cada probeta hasta que llegue a su máximo punto de ruptura. Luego encendemos la máquina con lo que empieza a comprimirse la probeta y al mismo tiempo se va marcando la fuerza que se requiere para cada 0.005 pulgadas de compresión hasta que llegue a la máxima fuerza de compresión que es la fuerza de ruptura.



Figura 3.5. Ensayo de Compresión.

Recolección de Datos. Ya al culminar cada ensayo se recolectarán los datos obtenidos durante el procedimiento de ruptura. Esto se hará para cada muestra sometida al ensayo, es decir se tendrán para cada tiempo de curado 3 tablas de valores recolectados, ya que son tres muestras para cada tiempo.

4. Análisis estadísticos, y resultados del modelo computacional

La Tabla 2 muestra los datos promedio de resistencia a la compresión para 7, 14, 21 y 28 días de ensayo y 20% de Zeolita.

Tabla 2. Datos experimentales

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	0,001838
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	54,86	0,02613	2100,61	0,1429	0,000001
20	28	57,7686	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

4.1. Resultados y análisis estadísticos.

ANALISIS DE VARIANZA. Este análisis nos sirve para determinar si hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, para nuestro análisis los tratamientos son 7, 14, 21 y 28 días y analizamos los datos de esfuerzo último.

Para realizar este análisis tenemos las siguientes hipótesis:

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

Se observa que $F > F_{cr}$, por lo tanto se rechaza mi hipótesis inicial a favor de mi hipótesis alterna, es decir que con al menos uno de los tratamientos se obtiene un incremento en el esfuerzo de ruptura del material.

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

Tabla 3. Análisis de varianza

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

Además de la Figura 4.1 podemos ver que a los 28 días de ensayo se obtiene el mayor esfuerzo y esto nos da un indicio de cuál es el mejor tratamiento.

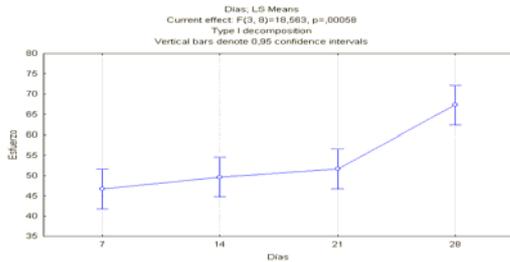


Figura 4.1. Gráfica Esfuerzo último vs. Días de curado (20% Zeolita).

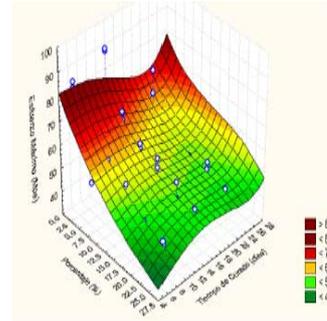


Figura 4.4. Superficie de respuesta

ANÁLISIS DE VARIANZA DE DOS FACTORES. La Tabla 3 muestra que si existen diferencias significativas, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula además muestra el efecto que tiene la combinación de los dos factores porcentaje-días y se puede decir que es significativo.

Effect	Univariate Tests of Significance for Esfuerzo maximo (Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition)				
	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 4.2. Análisis de varianza de dos factores

De Figuras 4.3 se puede concluir que el mejor porcentaje para el esfuerzo último para el experimento es de 5% de Zeolita

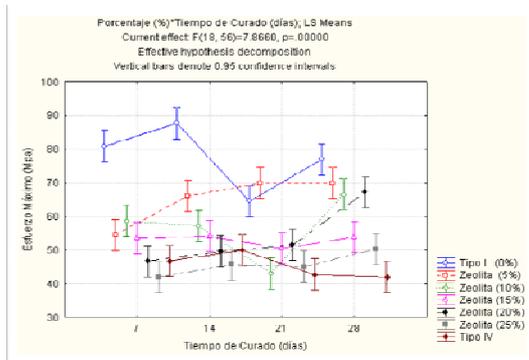


Figura 4.3. Esfuerzo vs. Porcentaje

PRUEBA DE TUKEY. Una vez que se ha hecho el análisis de varianza, se procede a verificar cuál es el mejor tratamiento. De los resultados que se obtuvieron del análisis de varianza, se observa que para el 5% de Zeolita se obtiene el mayor esfuerzo último y al realizar la prueba de Tukey resultó que 5% a los 28 días es el mejor tratamiento.

4.1 Resultados del modelo computacional

Una vez finalizado el análisis estadístico de los datos experimentales, procedemos a verificar y ajustar el modelo bilineal teórico y comparamos los resultados obtenidos tanto mediante la experimentación como los resultados que proporciona el software Matlab. Los datos de entrada para el modelo bilineal serán:

- Módulo de Young
- Esfuerzo de Fluencia
- Las constantes a y m

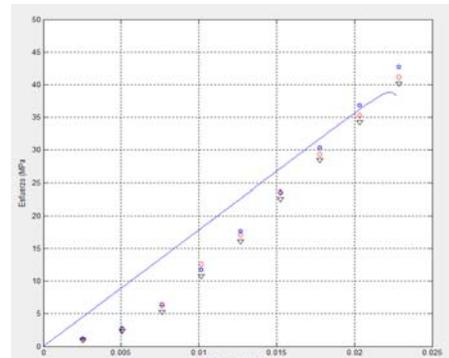


Figura 4.5. Modelo Bilineal. Curva esfuerzo-deformación.

Una vez ejecutado el algoritmo se trata de ajustar la curva obtenida con el modelo bilineal con la curva esfuerzo-deformación obtenida mediante la experimentación, dicho ajuste se hace mediante parámetros a y m.

5. 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.

Al desarrollar el modelo teórico se obtuvo una curva esfuerzo vs deformación unitaria la cual se comparó con los resultados experimentales y se pudo concluir que el modelo teórico tiene un buen ajuste, sin embargo existe un margen de error entre las dos curvas, lo cual se atribuye a los errores experimentales y a que el modelo con el que se compara es ideal.

Al comparar el cemento Tipo I, con el material compuesto se determinó que el cemento Tipo I es ampliamente superior al material compuesto, por otra parte al compararlo con el cemento comercial Tipo IV, existen tratamientos en los cuales el material compuesto es superior al cemento Tipo IV.

6. Recomendaciones

Para futuras investigaciones acerca de este tema, se recomienda realizar las pruebas de resistencia a la compresión en una sola máquina de ensayo ya que el presente estudio se realizó en máquinas diferentes, las cuales tenían mecanismos de acción diferentes, lo cual pudo incidir en los errores experimentales.

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

7. 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