

# Simulación del Comportamiento del Cemento Portland Tipo I con la Adición de Zeolita 2 al 20% y curado en agua

Paúl E. Jaramillo Cruz  
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  
[pjaramil@espol.edu.ec](mailto:pjaramil@espol.edu.ec)

Juan Carlos Pindo. 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  
[jpindo@espol.edu.ec](mailto:jpindo@espol.edu.ec)

## Resumen

*El presente trabajo trata de estudiar la resistencia a la compresión uniaxial de la pasta de cemento cuando se añade a la mezcla total 20% de Zeolita 2 y se cura en Agua. Esta Tesis se desarrolla en dos etapas, la primera de ellas es la experimentación, que consiste en la realización de las probetas de pasta de cemento, ensayos destructivos, medición de resistencias y el análisis estadístico de los resultados obtenidos y la segunda etapa el desarrollo de un modelo teórico a partir de los parámetros obtenidos del experimento y su implementación en lenguaje de programación, que para este caso será Matlab. Al terminar las dos etapas se realiza una comparación del ajuste del modelo teórico con los datos experimentales. Otra parte del estudio consiste en la comparación de los resultados entre el material compuesto (pasta de cemento + Zeolita 2) y los cementos base Tipo I y Tipo IV.*

**Palabra claves:** *Cemento, Zeolita 2, resistencia uniaxial a la compresión, experimentación, análisis estadístico, modelo matemático.*

## Abstract

*This paper tries to study the uniaxial compressive strength of cement paste, adding 20% of Zeolite 2 in the mix and water curing. This essay is developed in two phases, the first one is experimentation, that consists on making the buret of cement grout, destructive tests, measurement of resistances and the statistical analysis of the experimental results and the second phase consists on the development of a theoretical model and its implementation in a programming language. At the end of the two stages was 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 2) with cement base Type I and Type IV cement.*

**Key words:** *Cement, Zeolite 2, uniaxial compressive strength, experimental, statistical analysis, mathematical model.*

## 1. Introducción

El cemento es un material de uso común, en nuestro medio, y a medida que incrementa la población nacional, demanda más uso del mismo. Es por eso, que se necesita utilizar otro tipo de material que hay en nuestro medio, que al combinarlo con el cemento aumente su resistencia mecánica y genere beneficios en todos los campos, permitiendo así un ahorro de cemento.

El siguiente trabajo tiene como estudio analizar y simular el comportamiento de la resistencia a la compresión de la pasta de cemento cuando se añada específicamente 20% Zeolita 2, además de que su inmersión es en agua. Y, para realizar este estudio se utiliza varias herramientas y recursos, tanto en la experimentación como la simulación del modelo matemático.

Finalmente se compara las Resistencias de Compresión, la del nuevo cemento que se obtuvo al adicionar la Zeolita 2 al 20% y curado en agua con la Resistencia del cemento Portland tipo I.

## 2. Objetivos

El objetivo general es analizar el efecto que se obtiene en la Resistencia de Compresión del cemento Portland tipo I al adicionar 20 % de zeolita 2 y tenerlo inmerso.

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

- Elaborar probetas según la norma ASTM C109 y realizar los ensayos respectivos.
- Recolectar los datos de la fuerza de compresión.
- Analizar e interpretar los datos recolectados mediante el software STATISTIC.
- Diseñar el modelo matemático en MATLAB que valide los datos obtenidos en la experimentación y luego comparar los resultados obtenidos.

## 3. Metodología

### 3.1. Proceso Experimental

El protocolo experimental se lo realizó siguiendo el siguiente proceso:

1. Molienda.
2. Preparación de las probetas de pasta de cemento.
3. Ensayos destructivos (compresión).

El protocolo experimental, se regirá según la Norma ASTM C 109/C 109M – 02, Método de prueba estándar para la Resistencia a la Compresión de morteros de cemento hidráulico (Utilizando especímenes cúbicos 50 mm). Según la norma se necesitan de dos a tres especímenes para cada período de prueba [1].

Los materiales necesarios para llevar a cabo la experimentación son:

- Cemento Portland Tipo I
- Zeolita 2
- Agua
- Aceite

Los equipos utilizados se enlistan a continuación:

- Balanza digital.
- Moldes.
- Paleta.
- Mezclador mecánico.
- Máquina de ensayo de compresión.

### Molienda

El proceso de molienda se realiza en varias etapas dado que la zeolita 2 debe terminar con granulometría de 45  $\mu\text{m}$ . La tabla 1 detalla las etapas y tiempos que se realiza en la molienda.

**Tabla 1. Etapas y Tiempos en procesos de Trituración y Molienda**

<b>Etapas</b>	<b>Tiempo (minutos)</b>
Trituración Manual	5
Trituradora de Mandíbulas	10
Trituradora de Rodillos	10
Primer tamizado	15
Molino de disco	10
Segundo tamizado	15
Molino de bolas	55
Tercer tamizado	15

Luego se almacena la Zeolita 2 para su respectivo uso en la etapa de preparación de las probetas.

### Preparación de las probetas de pasta de cemento.

Antes de realizar la mezcla se deberá ya tener calculado el peso en gramos de los porcentajes adecuados de los materiales que intervienen en la mezcla (Zeolita 2, Cemento tipo I y la relación de agua/mezcla que se requieren para realizar la pasta). Como se requiere que cada cubo tenga 250 g de mezcla, y por lo tanto son 12 probetas, entonces se requiere una mezcla total de 3000 gr en peso total de Zeolita 2 y cemento tipo I. También se realizan las probetas de la validación que consiste en el mismo procedimiento pero a un porcentaje distinto de aditivo (22.5% de Zeolita 2), por lo tanto serán 12 probetas más, dando un resultado de 24 probetas, la Tabla 2 muestra los pesos de cada componente de las mezclas.

La relación de agua/ mezcla, que vamos a utilizar es de 0.3. Por lo tanto se tiene un porcentaje de 900 g de agua que se añade a la mezcla total ya especificada anteriormente. Utilizaremos agua potable para hacer más realístico el experimento.

**Tabla 2. Peso de los componentes utilizados para realizar la pasta de Cemento**

% de Puzolana	Cemento Portland Tipo I (gr.)	Zeolita Tipo 2 (gr.)	Mezcla total (W) (gr.)	Relación W/C	Agua (gr.)
20	2400	600	3000	0,3	900
22,5	2325	675	3000	0,3	900

Para el moldeo de las probetas, se sigue los siguientes pasos [4, 7 y 8]:

1. Limpiar los moldes.
2. Secar los moldes.
3. Engrasar los moldes.
4. Verter pasta de cemento hasta la mitad de la capacidad del molde.
5. Compactar la pasta vertida en los moldes.
6. Manualmente retiramos las burbujas de aire en el interior del molde.
7. Verter pasta de cemento hasta el tope de la capacidad del molde.
8. Manualmente retiramos las burbujas de aire en el interior del molde.
9. Retirar el exceso de pasta de cemento en los moldes.
10. Compactar la pasta vertida en los moldes.
11. Cubrir los moldes con plásticos.

Pasadas 24 horas se procede a desmoldar las probetas y se las marca según el porcentaje de Zeolita 2 y el tiempo al que se hará el ensayo.

Luego se realiza la inmersión de las probetas en una tina llena de agua, y para finalizar se anota la temperatura y la humedad relativa del laboratorio al momento de colocar las probetas en agua. [14]

Cabe acotar que la humedad relativa del laboratorio no debe pasar del 50%, la humedad del cuarto se ajustan según los requisitos de las especificaciones C511.



**Figura 3.1. Preparación de probetas**

### Ensayos destructivos

Para realizar el ensayo de compresión se debe preparar la máquina y las probetas, secándolas y limando sus aristas vivas.

Luego se coloca la probeta en la máquina de ensayo y se carga hasta que llegue a cero, tanto el medidor de compresión como el reloj comparador (deformación).

Finalmente se enciende la máquina, que comprime la probeta y se toman mediciones cada 0.005 pulgadas de compresión hasta que llegue al punto de ruptura.



**Figura 3.2. Ensayo de Compresión.**

## 4. Análisis de Datos

El análisis de los datos recolectados se la realizó con la siguiente metodología[10,11 y12]:

- Registrar los datos
- Tabular los datos
- Graficar los datos
- Modelar
- Inferir estadísticamente

Los datos que se obtienen se los tabulan según su tiempo de curado y el número de probeta analizada.

Los gráficos que se realizan con los datos experimentales son los que se mencionan a continuación:

- Gráfico esfuerzo de compresión vs deformación, incluyendo las tres probetas por cada tiempo de curado aplicado.
- Gráfico esfuerzo de compresión vs deformación, seleccionando la zona elástica para el cálculo del modulo de elasticidad.
- Gráfico esfuerzo de compresión máximo vs tiempo de curado, comparando la pasta de cemento con el cemento tipo I y el tipo IV.

Luego de este análisis gráfico de los resultados de la experimentación, se realiza el análisis estadístico, lo que comprende la normalidad de los datos y análisis de varianza con el método ANOVA ONE WAY para encontrar diferencias significativas en el efecto que tiene el tiempo de curado y el % de Zeolita 2 adicionado con respecto al cemento tipo I y el tipo IV.

Finalmente se realiza una comparación entre el gráfico teórico (simulación) y el experimental, para observar la similitud del modelo matemático con el comportamiento de la pasta de cemento.

#### 4.1. Modelamiento Matemático

Para realizar el modelo matemático en Matlab, se ocupan fórmulas para inelasticidad unidimensional.[2]

Se consideró la probeta como una barra elasto-plástica sometida a una fuerza uniaxial en los extremos y se asumió que la curva Esfuerzo vs. Deformación está dada por una relación bilineal, donde E es el módulo de Young y  $\sigma_{y0}$  es el esfuerzo de fluencia [2].

Una implementación numérica se utiliza para realizar el algoritmo que se rige principalmente por 4 pasos, descomposición aditiva del esfuerzo, la ley de hooke, la regla de flujo y las restricciones.

El paso 1 se calcula un  $\sigma_{n+1}^{tr}$  con la siguiente expresión que representa el esfuerzo elástico predictor en el punto siguiente al inicial.

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

En el paso 2 se calcula la diferencia entre el esfuerzo de fluencia ( $\sigma_{Y,n}$ ) con el esfuerzo calculado en el paso 1 y a esta diferencia se la asigno como

$$2.) \quad F_{n+1}^{tr} = \sigma_{n+1}^{tr} - \sigma_{Y,n} > 0$$

Por lo que si  $F_{n+1}^{tr}$  es mayor a cero se continua al paso 3 y si es menor a cero entonces

$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}$  y  $\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n}$  y sale del algoritmo.

En el paso 3 se utilizó un método iterativo llamado Newton-Raphson hasta encontrar un  $\Delta\lambda$  que satisfaga la siguiente expresión:

$$3.) \quad F_{n+1}(\Delta\lambda) = F_{n+1}^{tr} - \Delta\lambda(E + H'_{n+1}(\Delta\lambda)) = 0$$

En el paso 4 se calculan los esfuerzos  $\sigma_{n+1}$  y  $\sigma_{Y,n+1}$  con las siguientes expresiones:

$$4.) \quad \sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\lambda(\text{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr}))$$

$$\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n} + H'_{n+1}(\Delta\lambda)$$

Finalmente se obtuvo un valor de esfuerzo el cual se lo acumula y se forma un vector esfuerzo para realizar la grafica Esfuerzo vs Deformación.

#### 4.2. Validación de Datos

A continuación se analizan los datos grupales mediante el programa STATISTIC con ANOVA, para verificar si existe un tratamiento que puede tener una diferencia significativa entre las resistencias de compresión [11 y 12].

Y para aquello se sigue un procedimiento como el descrito a continuación:

- Verificar si los datos son normales o no, y para esto El test de Shapiro-Wilk es un contraste de ajuste

- Aplicar ANOVA para diferencias significativas entre los tratamientos por medio del estadístico de Fisher “F”. [11]
- Hallar el valor de  $F_{\text{Calculado}}$  y compararlo con el  $F_{\text{teórico}}$

## 5. Identificación de Cambios en Resistencias y resultados

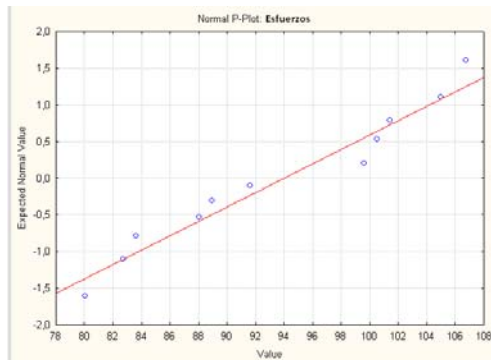
### 5.1. Análisis por STATISTIC

La Tabla 3 muestra los datos de las últimas resistencias de las muestras de pasta de cemento con 20% de Zeolita 2 para 7, 14, 21 y 28 días de curado en agua.

**Tabla 3 Resistencias Últimas de las muestras con 20% de Zeolita Tipo 2**

Días	7	14	21	28
$\sigma_1$ (MPa)	82,73	99,63	104,97	106,75
$\sigma_2$ (MPa)	83,62	91,63	101,41	99,63
$\sigma_3$ (MPa)	80,06	88,07	88,96	100,52

En la figura 5.1 se observa que los datos son normales con respecto a los tratamientos, dado que el probabilístico  $p_{\text{calculado}}=0,28348$  es mayor que el probabilístico  $p_{\text{teórico}}=0,05$ .



**Figura 5.1. Normalización de Esfuerzos al 20% de Zeolita**

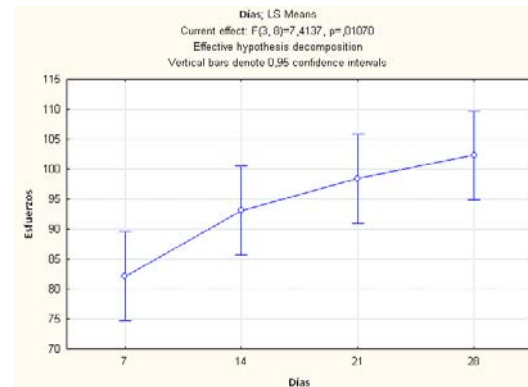
Una vez que se comprobó la normalidad de los datos, se procede a realizar un análisis de varianza simple (ANOVA-ONE WAY). La Tabla 4 muestra el valor del estadístico de Fisher que permite analizar si hay diferencia significativa.

Como  $F_{\text{Calculado}}=7.414 > F_{\text{teórico}}=4.07$ , se concluye que al menos un tratamiento aumenta el valor de la resistencia última.

**Tabla 4 Análisis de Varianzas y determinación de  $F_{\text{calculado}}$  para las muestras de 20% de Zeolita 2**

Effect	Degr. of Freedom	Esfuerzos SS	Esfuerzos MS	Esfuerzos F	Esfuerzos p
Intercept	1	106028,2	106028,2	3414,770	0,000000
Días	3	690,6	230,2	7,414	0,010697
Error	8	248,4	31,0		
Total	11	939,0			

Para poder afirmar que existen diferencias significativas entre los tratamientos se calculó el estadístico  $F_{\text{teórico}}$  mediante la Figura 2.4. que muestra la tabla para hallarlo. Con  $F_{0,05}(3,8)$ ;  $F_{\text{teórico}}$  es 4.07. Y para determinar el valor de  $F_{\text{Calculado}}$  se recurrió al programa en STATISTIC, dando la TABLA 4. La FIGURA 5.2., muestra que el valor de la resistencia última varía en función de los días.



**Figura 5.2. Gráfica de la Resistencias Últimas a la Compresión al 20% de Zeolita Tipo 2 en función de los días**

### 5.2. Simulación por MATLAB

La simulación elaborada en MATLAB cumple con lo establecido en el modelamiento matemático, y para comparar las gráficas, se toma en cuenta los valores obtenidos en el laboratorio y se realiza la curva experimental (Línea Celeste en las Figuras), de ahí mediante el algoritmo de Newton Raphson se realiza la curva que aproxime los valores obtenidos en el laboratorio (Línea Azul en las Figuras).

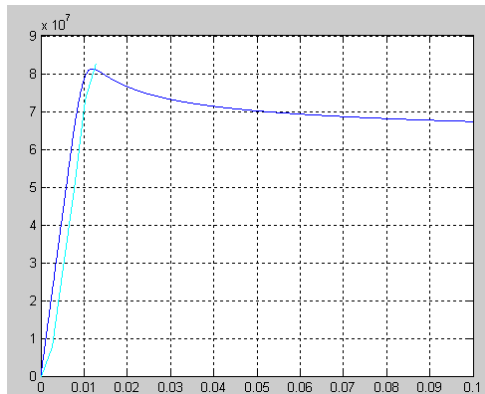
Los valores de entrada que se necesita son: Esfuerzo de Fluencia que se considera  $0.75\sigma_{\max}$ . El módulo de Elasticidad y las constantes  $a=0.333$  (valor que es el mismo para todas las comparaciones que se van a realizar) y el valor de  $m$  (propiedad del material que va a ir variando con respecto a la deformación pero en la zona plástica y se lo puede hallar de esta manera analizando solamente que pasa con las deformaciones en la región plástica). Para calcular el valor de  $m$  se parte de la ecuación  $\epsilon_{\max} = \epsilon^e + \epsilon^p$ , donde  $\epsilon^p = \lambda$  y  $\epsilon^e = \sigma_{yo}/E$ , por lo tanto el valor de la constante  $m$  depende de  $E$ , y está definido por:

$$m = \frac{\sigma_{\max}}{E} (1 - 0.75) \rightarrow m = 0.25 \frac{\sigma_{\max}}{E}$$

Como ejemplo se tomó, la **primera muestra** de la **probeta 20/7** (20% de Zeolita Tipo 2 y 7 días de curado), los valores de las Deformaciones Unitarias se almacenan en una matriz llamada **Def1**, de igual manera los esfuerzos correspondientes a esta deformación en una matriz **Esf1**, tomados de las respectivas tablas durante la experimentación, teniendo:

**Def1**= $1e-3 * [0 \ 2.54 \ 5.08 \ 7.62 \ 10.16 \ 12.7]$ ;

**Esf1**= $1e6 * [0 \ 7.828 \ 28.823 \ 49.462 \ 72.947 \ 82.733]$ ;



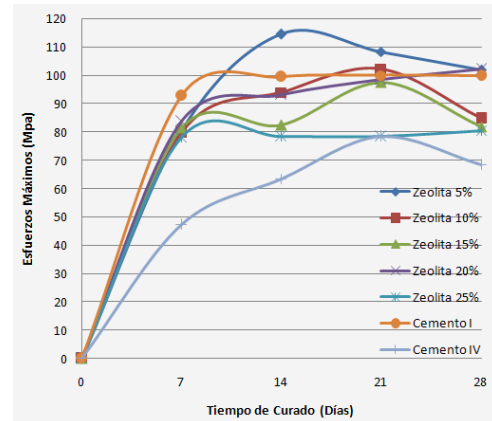
**FIGURA 5.3. Simulación de la Resistencia a la Compresión de la muestra 20/7 (Primera Probeta)**

El Esfuerzo Máximo que se obtuvo en La simulación con los Datos presentados es de **81.308 MPa**.

### 5.3. Resultados

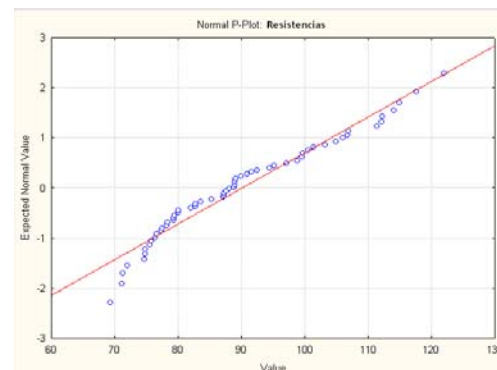
El análisis grupal, se lo realizó gráficamente y estadísticamente.

El análisis gráfico se basó en una comparación gráfica entre los datos obtenidos en la experimentación con los patrones que son el cemento Tipo I y Tipo IV, teniendo así la Figura 5.4.



**Figura 5.4. Gráfico Esfuerzo vs. Tiempo de curado según el % de Zeolita 2 en las probetas**

En el análisis estadístico se realizó una comprobación de la distribución normal de los datos experimentales ( la mayoría de los datos están en el intervalo  $[-2,2]$ , donde se aloja el 95.45% de los datos) y un análisis de varianza.



**Figura 5.5. Normalización de Esfuerzos Al 5, 10, 15, 20 y 25% de Zeolita 2**

Se utilizó el método ANOVA Factorial, para determinar si existen o no diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, que en este estudio es el tiempo de curado y % de Zeolita 2 adicionado, con lo que se

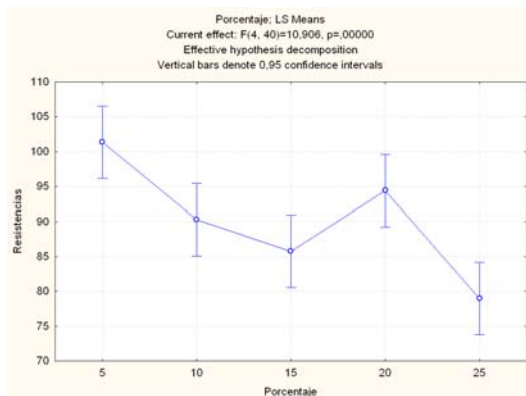
nota el efecto que tienen en el esfuerzo último de compresión.

La Tabla 5 muestra que sí existen diferencias significativas entre los tratamientos y el % de Zeolita 2 adicionado. Además muestra que el efecto de la combinación de los dos factores porcentaje y tiempo de curado no es significativo.

**Tabla 5 Análisis de Varianza Factorial**

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	487691,2	1	487691,2	6145,210	0,000000
Porcentaje	3462,0	4	865,5	10,906	0,000004
Días	2113,6	3	704,5	8,878	0,000124
Porcentaje*Días	1882,2	12	156,8	1,976	0,053393
Error	3174,4	40	79,4		

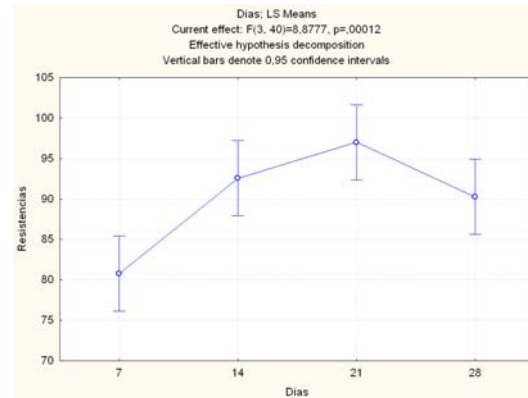
Se comprueba que hay diferencia significativa entre las medias de la Resistencia cuando interviene solo el porcentaje, pues el valor de  $F_{\text{calculado}} = 10,906$  es mayor al valor de Fisher  $F_{\text{teórico}}(4,40) = 2,61$ .



**Figura 5.6. Gráfica Esfuerzo Último vs. % Zeolita 2**

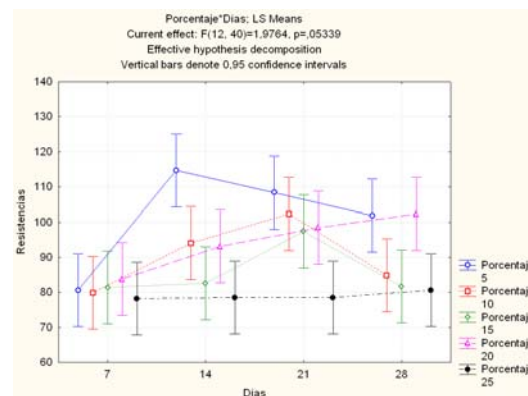
El valor de Fisher hallado mediante Tabla es  $F_{\text{teórico}}(3,40) = 2,84$  y el Fisher calculado en el programa es  $F_{\text{calculado}} = 8,8777$  por lo que se demuestra que hay diferencia significativa entre las medias de la resistencia cuando interviene *sólo los días*.

La FIGURA 5.7. indica el tratamiento donde se obtiene la mayor Resistencia Media a la Compresión, que es a los 21 días de curado.



**Figura 5.7. Esfuerzo Último vs. Días De Curado**

Calculando y analizando los valores de Fisher, para la combinación entre los porcentaje y los días, se tiene que:  $F_{\text{teórico}}(12,40) = 2$  es mayor que  $F_{\text{calculado}} = 1,9764$  por lo que se demuestra que no hay diferencia significativa entre las medias de la Resistencia.



**Figura 5.8. Gráfico de Esfuerzos a Compresión vs. Días de Curado y % de Zeolita 2**

Los gráficos obtenidos, mediante los métodos utilizados para el análisis dieron una interpretación válida a la hora de determinar dónde está la mayor media de la Resistencia de Compresión, como muestran individualmente la FIGURA 5.6 (al añadir 5 % de Zeolita 2), y la FIGURA 5.7 (a los 21 días de curado en agua).

La combinación entre estos dos factores, determinó mediante la FIGURA 5.6 que la mejor combinación donde la media de la Resistencia a la Compresión es mayor; constan en los intervalo del [5% al 20% de Zeolita 2] y del [11 a los 22 días de curado] respectivamente.



## 6. Conclusiones

Del análisis individual de las curvas de los esfuerzos de ruptura, se observa que el esfuerzo de compresión, en función del tiempo, aumenta hasta llegar a un valor máximo promedio de 102.30 MPa a los 28 días de curado, que en comparación con el cemento tipo IV tuvo en un 47% de aumento y en comparación con el cemento tipo I un aumento del 27 %.

Al comparar las resistencias que obtuvimos al 20% con las de 22.5% de Zeolita 2 se puede apreciar que no hay incremento de las resistencias a medida que el porcentaje sube, y esto puede ser a que el compuesto puede estar saturado con la adición de Zeolita 2.

Del análisis grupal de las curvas de los esfuerzos de ruptura, se observa que para los porcentajes de estudio (5, 10, 15, 20 y 25%) y el tiempo de curado (7, 14, 21 y 28 días), el efecto del porcentaje de Zeolita 2 adicionado, tanto como el tiempo de curado en agua, por separado, son variables que afectan directamente a la resistencia a la compresión de las probetas de pasta de cemento.

Del análisis de las curvas Esfuerzo de Ruptura vs. tiempo de Curado, para los diferentes porcentajes del estudio, se encontró que el esfuerzo máximo se presenta a los 14 días con adición de 5% de Zeolita 2, cuyo valor en comparación con el Cemento Portland tipo IV presenta un aumento aproximado del 32 % y en comparación con el Cemento Portland tipo I un aumento aproximado del 13%. Sin embargo, estos valores decrecen conforme aumenta el tiempo de curado, hasta los 28 días, con un valor máximo de 120,3 MPa para el 20% de Zeolita 2, lo cual representa un 2.5% por encima del valor de referencia del Cemento Portland tipo I y 33.3% sobre el Cemento Portland tipo IV.

Además se observó que en las graficas esfuerzo de compresión vs tiempo de curado, el esfuerzo de compresión aumento hasta el día 14 o máximo hasta el día 21, luego del cual disminuyo.

Los valores de Esfuerzos de ruptura para las probetas formadas con el 25% de Zeolita 2, en función del tiempo, presentan las curvas menos favorables, lo que indica que el incremento de la

proporción de este aditivo al Cemento Portland Tipo I, influye negativamente en la variable de estudio que es la resistencia a la compresión.

## 7. Recomendaciones

Luego que se realizó el estudio se debe recomendar lo que se detalla a continuación:

- Algunos de los factores que pueden influir en las lecturas de Resistencia son los Factores Humanos, la Instrumentación y Calibración de Equipos (Metrología), por eso se recomienda que para tener una lectura más precisa se tome en cuenta utilizar máquinas de Compresión digitales; así, se optimizará los intervalos de medición y por ende se tendría curvas más continuas para mejorar la precisión en las mediciones de los ensayos, pues este factor afecta los valores que se analizan y distorsionan las Conclusiones.
- Mantener una condición ambiental constante en los días de ensayo para evitar un cambio brusco en la temperatura y la humedad relativa, pues puede afectar el valor de la Resistencia a Compresión. Además, se debe ampliar el tiempo de análisis, ya que en las gráficas se observa una tendencia a decrecer en los valores de los esfuerzos de ruptura con relación al tiempo, por lo que los valores obtenidos a los 28 días no se pueden considerar como los esfuerzos finales o de estado estable.
- Se debe continuar con el estudio para poder optimizar el recurso del cemento Portland tipo I y así explotar las reservas de zeolita en nuestro país.

## 8. Referencias

- [1]. Norma ASTM C 595 – 03. Standard for Blended Hydraulic Cements.
- [2]. Notas de la materia Teoría de Inelasticidad. Ph. D. José Andrade. Profesor de la universidad de Northwestern. R.I. Borja.
- [3]. H.W.Taylor, “La química de los cementos”, Mayo 02, 2008.



- [4]. Norma ASTM C 150. Standard Specification for Portland cement
- [5]. AVALLONE – BAUMEISTER III. MARKS, *Manual del Ingeniero Mecánico*, Mc Graw–Hill, Tercera Edición en Español, Pág. 6-198.
- [6]. FREDERICK A. MUMPTON, *Mineralogía and Geology of Natural Zeolite* (1993), Pág.45
- [7]. Robalino E. Paola, “El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánico”, TESIS – Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL, 2004. Pág. 18-22.
- [8]. **Link:**[http://www.minas.upm.es/catedra-anefta/Consultas/ROBALINO\\_IVIBERMAC.pdf](http://www.minas.upm.es/catedra-anefta/Consultas/ROBALINO_IVIBERMAC.pdf), Mayo 27, 2008. Pág. 4-8.
- [9]. BASF The Chemical Company, Construction Chemicals Latin America “Methods for curing Concrete”, **Link:** [www.basf-cc-la.com](http://www.basf-cc-la.com). Mayo 29, 2008.
- [10]. Irwin Miller, John E. Freud, Richard A. Johnson. Probabilidad y estadística para ingenieros. Prentice – Hall. Hispanoamericana S.A. México.
- [11]. Walpole, Myers, Myers. Probabilidad y estadística para ingenieros. Pearson. México
- [12]. JORGE CALDERÓN V., Ph.D, ”*Diseño de Experimentos*”, Marzo, 2008.
- [13]. A. BENTUR, A.K. KOVLER, *Advances in Cement Research* 25, 752 (1995).

.....  
Ing. Juan Carlos Pindo  
**Director de tesis**

**Fecha:** 04/02/2009