

“Simulación Del Comportamiento Del Cemento Tipo I Bajo La Adición De 15% De Zeolita Ecuatoriana En Las Mezclas De Cemento, Mediante Un Curado Al Agua”

Rodrigo Perugachi Ing.
Facultad de Ingeniería 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
“rperugaci@espol.edu.ec”

Aldo Frank León Maridueña
Facultad de Ingeniería 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
“a.f.leon@hotmail.com”

Resumen

La presente Tesis tiene como objetivo investigar, durante el período de curado del cemento Tipo I, el comportamiento de la resistencia mecánica, de manera específica el esfuerzo a la compresión, característica esencial del cemento, mediante la adición del 15% de zeolita ecuatoriana. Para el presente proyecto establecemos mediante la Norma ASTM C109 como tiempos de curado al agua 7, 14, 21 y 28 días respectivamente. Se realizará la mezcla cemento + % aditivo+agua, con lo cual se obtendrá la pasta de cemento, así de esta mezcla se tomarán muestras a las que realizaremos 3 ensayos por cada tiempo de curado. La recolección de datos a base de los ensayos de compresión nos permitirá modelar a partir del comportamiento del esfuerzo de compresión del cemento las respectivas curvas de esfuerzo-deformación tanto experimentales como teóricas en función del tiempo de curado y del porcentaje de aditivo adicionado. Logrando verificarse que a los 28 días de curado tenemos el mayor esfuerzo a la compresión y que el 15% de adición de zeolita es mucho mejor en comparación de otros porcentajes estudiados como 0, 5, 10,20 y 25% de adición de zeolita respectivamente.

Palabras Claves: zeolita, aditivo, norma ASTM C109

Abstract

The present Thesis has as objective to investigate, during the period of cured of the cement Type I, the behavior of the mechanical resistance, in a specific way the effort to the compression, essential characteristic of the cement, by means of the addition of 15% of Ecuadorian zeolite. For the present project we establish by means of Norma ASTM C109 like times of cured to the water 7, 14, 21 and 28 days respectively. It will be carried out the mixture cement +% additive + water, with that which the paste of cement will be obtained, that this mixture will take samples to those that we will carry out 3 tests for each time of cured. The gathering of data with the help of the compression tests will allow us to model starting from the behavior of the effort of compression of the cement the respective curves of effort-deformation so much experimental as theoretical in function of the time of cured and of the percentage of added preservative. Being able to be verified that to the 28 days of cured have the biggest effort to the compression and that 15% of zeolite addition is better in comparison of other percentages studied as 0, 5, 10,20 and 25% of zeolite addition respectively.

1. Introducción

La presente proyecto modelará el comportamiento del cemento tipo I bajo la adición del 15% de zeolita ecuatoriana en las mezclas de cemento, mediante un curado al agua. Se trata de verificar en que medida el adicionar un porcentaje determinado de zeolita del tipo mordenita a la mezcla cemento-agua afecta en el esfuerzo a la ruptura y si tiene relación con los días de curado que establece la NORMA ASTM C109.

Para lograr nuestro objetivo, empleando la máquina de ensayos universales a las probetas elaboradas con la mezcla cemento-agua-zeolita, les realizaremos un ensayo a la compresión con el cual tomaremos los esfuerzos a la compresión hasta llegar al esfuerzo a la ruptura. Con estos valores calcularemos los esfuerzos de fluencia, de ruptura y los módulos de elasticidad con los cuales podemos obtener dos constantes del material, m y a que al ser ingresados a las ecuaciones de inelasticidad por medio de un algoritmo computacional aproximaremos las curvas típicas de deformación del cemento tanto experimentales como teóricas. Finalmente por medio de un análisis estadístico aseguraremos que el resultado obtenido sea matemáticamente aceptable.

2. Objetivo

Verificar si al adicionar 15% de zeolita a la relación cemento-agua la resistencia a la compresión del cemento tipo I experimenta un aumento o disminución durante el proceso o tiempo de curado; y comparar el comportamiento de la curva esfuerzo deformación mediante la simulación matemática.

Identificar el comportamiento de la mezcla cemento-agua-15% zeolita ecuatoriana durante el periodo de curado en agua establecido para 7, 14, 21, 28 días. Realizar la experimentación basados en la Norma ASTM C109 para obtener los datos que nos permitan establecer las variaciones en la resistencia a la compresión.

Analizar cualitativa y cuantitativamente los datos obtenidos por medio de un análisis estadístico e identificar en que medida la

variación en el tipo y porcentaje de aditivo incide sobre la resistencia mecánica comparada con un cemento de referencia (cemento sin adición de zeolita). Establecer un diseño experimental y un algoritmo, que nos permita modelar el resultado de adicionar zeolita al cemento, mediante la aproximación de las curvas esfuerzo-deformación experimental y teórico, empleando el software MATLAB.

3. Metodología

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

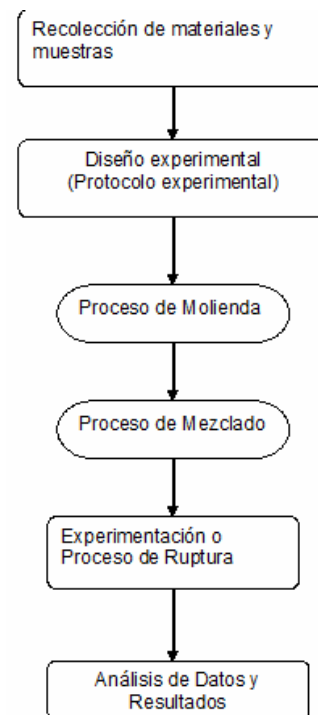


Figura 1. Metodología del proyecto

El protocolo experimental seguirá el siguiente procedimiento:

Se tomarán las muestras en un lugar determinado y se identificará el tipo de zeolita a usar.

Proceso de molienda: La zeolita en bruto será reducida a una finura de aproximadamente 45 micras.

Proceso de mezcla: estas muestras serán usadas en conjunto con el cemento puro (sin

aditivos). Así en un recipiente realizamos la mezcla cemento+agua, esta será la unidad experimental de donde tomamos la muestra de control para tener el módulo de elasticidad de referencia; luego a la unidad experimental le agregaremos 15% de zeolita Tipo I, de esta mezcla tomamos 4 muestras consideradas unidades observacionales que colocaremos en 3 probetas de 50 cm³ cada una.

Durante el proceso de curado se establecen los siguientes tiempos de pruebas: 7, 14, 21 y 28 días respectivamente; para cada día indicado realizaremos la toma de datos de pesos y el respectivo ensayo a la compresión a 3 muestras de las 4 unidades observacionales de manera aleatoria, replicas que nos generarán 3 valores de módulos de elasticidad, adicionalmente llevaremos un porcentaje de validación del 17.5% de adición de zeolita, al que se le aplicara el mismo procedimiento antes indicado.

Los instrumentos de medición a ser empleadas serán balanzas electrónicas, calibrador vernier, medidor de carátula, la máquina de pruebas universales para ensayos de tensión y compresión.

Para el análisis de los datos usamos modelos estadísticos donde consideramos como nivel de significancia un valor de $\alpha=0.05$ lo que nos asegura que los valores de los módulos de elasticidad están dentro de un 95% de nivel de confianza. Como herramienta para este análisis emplearemos el estadístico ANOVA factorial. Debemos tener en cuenta que realizamos las siguientes asunciones: que los datos se comportan como una distribución normal y que existe una homogeneidad entre las varianzas de las muestras.

Una vez entendidos y tabulados estos resultados nos servirán para realizar los debidos cálculos para obtener los esfuerzos a la compresión y poder hacer modelamiento del aumento o disminución de esta propiedad mediante regresión lineal.

3.1 Recolección de muestras

El procedimiento a seguir tanto para la recolección de muestras y su respectivo tratamiento, hasta llegar al proceso de ensayo a la compresión están basados en las especificaciones según la Norma ASTM C 109

La muestras tomadas (rocas de zeolita ecuatoriana) fueron obtenidas del sector conocido como Casas Viejas, el cual se encuentra vía a la costa en la ciudad de Guayaquil, el material recolectado fue aproximadamente 25 Kg de rocas enteras. Para la experimentación se tomó cerca de 10 Kg para un grupo de 5 integrantes y para este caso particular 1170 gr para las dos mezclas al 15 y 17.5%, 540 y 630 gr respectivamente.

3.2 Protocolo Experimental

La resistencia del cemento es generalmente, el índice principal para determinar la calidad del mismo. Es nuestro objetivo hacer las pruebas de resistencia del cemento a la mezcla ya preparada de acuerdo al diseño de mezcla según asignado a los diferentes grupos; con estas pruebas podemos corroborar los resultados del diseño de la mezcla y además establecer la relación con la resistencia a compresión. También tendremos la oportunidad de comparar resultados a 7 a 28 días de madurez, notando el desarrollo de resistencia con respecto al tiempo y poder luego predecir resistencias a 28 días con resultados a tiempos menores.

Durante la prueba de compresión también determinaremos el módulo de elasticidad del cemento tomando lecturas de carga y deformación del cilindro y generaremos una gráfica de esfuerzo vs. Deformación.

3.3 Mezclado

Es un proceso donde realizamos según el porcentaje establecido de zeolita las respectivas relaciones de cemento-zeolita y agua.

-Esta tabla aplica para una mezcla total de 300 g (Cemento + puzolana). A partir de la próxima semana será 250 g la mezcla total.

-Este valor es por cada cubito, pero como tenemos 3 cubitos por 4 días (7, 14, 21, 28), será: un total de 300g * 12 cubitos= 3600g (mezcla).

-Agua/mezcla=0.3 por lo que tenemos agua= 0.3*3600g= 1080g de agua.

TABLA 1
Gramos de Puzolana y Cemento

Fracción de puzolana (%)	PUZOLANA(g)	CEMENTO(g)
5	15	285
7.5	22.5	277.5
10	30	270
12.5	37.5	262.5
<u>15</u>	<u>45</u>	<u>255</u>
<u>17.5</u>	<u>52.5</u>	<u>247.5</u>
20	60	240
22.5	67.5	232.5
25	75	225
27.5	82.5	217.5

4. Resultados y Análisis de Resultados

El ensayo a la compresión nos permite obtener para cada intervalo de deformación \square los datos necesarios determinar el esfuerzo a la compresión máxima o de ruptura $f'c$.

Haciendo uso de la relación $f'c = \frac{P}{A}$

donde:

P= fuerza o carga aplicada sobre la probeta.
A= área donde es aplicada la carga P.

Para cada intervalo de deformación y su respectivo esfuerzo a la compresión podemos determinar el respectivo valor del módulo de elasticidad E (MPa), este es un parámetro que caracteriza al material dentro de su comportamiento elástico, la relación

$$E = \frac{f'c}{\varepsilon} = \frac{f'c_f - f'c_o}{\varepsilon_f - \varepsilon_o}$$

Permite encontrar este valor, es de notar que la relación mostrada es producto de considerar que en una gráfica o curva de esfuerzo -deformación el módulo de elasticidad es la pendiente de la misma.

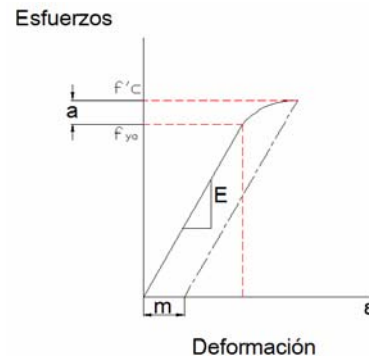


Figura 2. Esfuerzo-Deformación

Como se puede apreciar en la curva esfuerzo-deformación tenemos dos variables “a” y “m” para el esfuerzo y la deformación respectivamente que son característicos de cada material y que tienen una relación muy estrecha en la ecuación de inelasticidad. Para poder calcular las variables “a” y “m” tomamos para los respectivos días de curado los valores de esfuerzos promedios y a partir de los mismos determinamos el valor del módulo de elasticidad E y por medio de la relación:

$$m = \frac{(E_{prom} * \varepsilon_{total}) - f'c}{E_{prom}}$$

$$a = \left(\frac{f'c}{\sigma_y} \right) - 1$$

Donde:

E_{prom} = Módulo_Elastico

ε_{total} = deformación_total

$f'c$ = Esfuerzo_de_Ruptura

$f_{yo} = \sigma_{yo}$ = Esfuerzo_de_Fluencia

Valores que son obtenidos producto de la experimentación en el caso de de la deformación, los esfuerzos de fluencia, de ruptura (esfuerzos de compresión) y por la relación entre estas variables (ecuaciones) en el caso del Módulo de Elasticidad. Primero trabajaremos el análisis para el 15% de zeolita (modernita) ecuatoriana para los tiempos de curado de 7, 14,21 y 28 días; y luego realizaremos el análisis para el porcentaje de validación de 17.5% para 4, 11,18, y 25 días.

El análisis consiste primero en determinar si las muestras obtenidas para los respectivos días de curado son aceptables. Para el fácil entendimiento del proceso mostraremos como ejemplo los valores para el día 28 de curado para el 15% de adición de zeolita.

TABLA 2
Valores que ingresados al algoritmo
Adición: 15% Días de curado: 28

m=0.0064
a=0.5
E=8578.926
deltaeps=0.002
def_total=0.0199
sigmay=ones(n,1)*91.496

Se tiene que tener en cuenta que se debe ingresar los datos de la matriz deformación (defor) y de la matriz esfuerzo (esf) que nos generan los intervalos de esfuerzo y deformación para la representación gráfica de los puntos. También es importante observar que el valor de deltaeps ($\Delta\epsilon$) debe ser proporcional de la deformación total, ya que este valor permite una mejor definición de la curva mostrada.

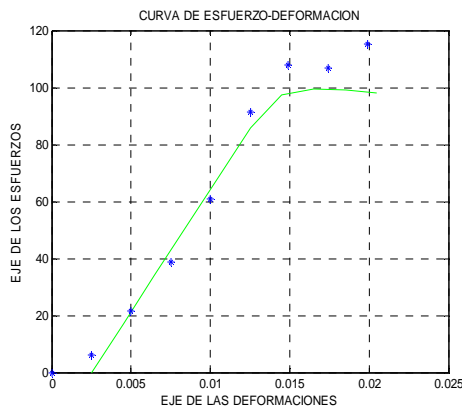


Figura 4. Aproximación de las Curvas Teórica +Experimental

Como se puede apreciar es fácil distinguir entre la zona elástica y la zona plástica de las curvas experimentales y teóricas, si se desea

ajustar el comportamiento de la curva teórica en la zona plástica hasta llegar al punto de ruptura del material, se puede variar los valores de los correctores plásticos **m** y **a** alternadamente ó de ambos al mismo tiempo. Para nuestro caso el único dato a modificar fue **a**, cuyo valor pasa de 0.26 a 0.6 .

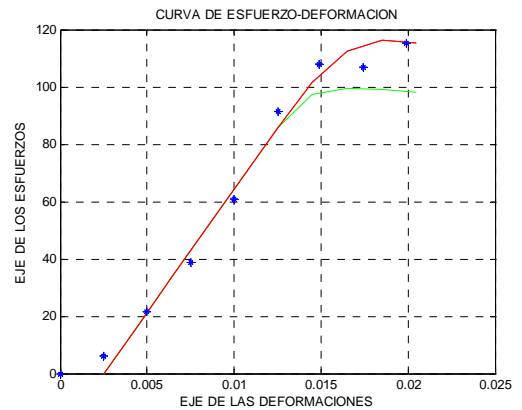


Figura 3. Aproximación de las Curvas Teórica +Experimental
Ajuste del valor de a=0.6

5. Análisis Estadístico

Para comparar el comportamiento del cemento sin aditivo en relación a la adición de zeolita para 5, 10, 15, 20,25% para los días de curado indicados previamente 7, 14, 21,28 días respectivamente, para lo cual realizaremos un análisis estadístico factorial.

Para lo cual primero ingresamos los valores de los esfuerzos de ruptura que se obtienen de los ensayos a la compresión, como por ejemplo para el 15% de zeolita:

TABLA 3
Días de curado-Esfuerzos de Ruptura

Días de Curado	Esfuerzo f'c Promedio
7	72.202
14	106.8873
21	113.7281
28	115.4383

Tabla 4
Medias Esfuerzo de Ruptura-Días de Curado-%de zeolita

Días de Curado*% de zeolita: Unweighted Means (Grupal)						
Current effect: F(15, 36)=6.0069, p=.00001						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Días de Curado	% de zeolita	Esfuerzo de Ruptura Mean	Esfuerzo de Ruptura Std Err	Esfuerzo de Ruptura -95.00%	Esfuerzo de Ruptura +95.00%
1	7	0	89.215	4.58540	79.915	98.514
2	7	5	87.772	5.01594	76.382	99.161
3	7	10	93.090	5.01594	72.300	95.079
4	7	15	87.394	5.01594	56.005	78.794
5	7	20	57.026	5.01594	45.638	68.416
6	7	25	52.893	4.58540	43.593	62.193
7	14	0	95.480	4.58540	86.188	104.785
8	14	5	86.059	5.01594	74.670	97.449
9	14	10	87.401	4.58540	78.101	96.700
10	14	15	89.785	4.58540	80.485	99.085
11	14	20	73.638	5.01594	62.148	84.928
12	14	25	91.126	4.58540	81.926	100.426
13	21	0	96.056	4.58540	86.756	105.356
14	21	5	104.470	5.01594	93.080	115.860
15	21	10	95.424	5.01594	84.039	106.814
16	21	15	112.302	4.58540	103.003	121.602
17	21	20	89.785	5.01594	78.395	101.175
18	21	25	57.598	4.58540	48.299	66.898
19	28	0	95.771	4.58540	86.471	105.070
20	28	5	108.181	4.58540	98.881	117.480
21	28	10	119.495	5.01594	108.106	130.885
22	28	15	116.720	5.01594	105.331	128.110
23	28	20	109.880	5.01594	98.490	121.269
24	28	25	99.150	4.58540	89.850	108.450

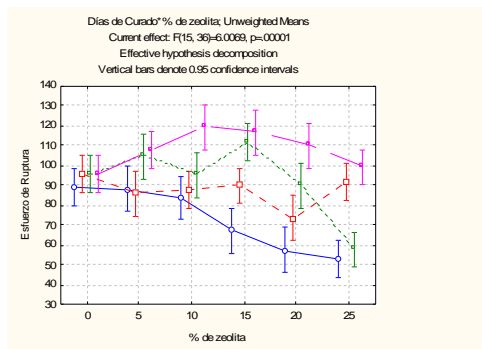


Figura 5. Curvas de las medias aritméticas Esfuerzo a la Ruptura-% de zeolita-Días de Curado

Si estadísticamente consideramos un Error de Tipo I, el cual consiste en rechazar la hipótesis nula para aceptar la alterna.

Formulamos nuestra hipótesis nula la que seleccionamos como:

Existe por lo menos una media que es menor o igual a la media del control

$$H_0: \mu_i \leq \mu_c$$

Caso contrario aceptamos la hipótesis alterna:

$$H_a: \mu_i > \mu_c,$$

Se rechaza la hipótesis nula si no existiese una relación de significancia entre las muestras.

Mediante el método estadístico de Duncan's, se comprueba que entre las muestras comparadas, la existencia de diferencias significativas para el porcentaje de 15% de adición de zeolita, por lo tanto la media aritmética del esfuerzo de compresión es el mayor comparado con el resto de porcentajes, su valor es de 116.29 MPa.

6.- Conclusiones

Se ha podido verificar que el proceso de adicionar a la pasta de cemento un 15% de zeolita ecuatoriana produce un aumento progresivo de los esfuerzos a la compresión, hasta llegar a un valor máximo a los 28 días de curado, cuyo valor fue de 116.29 MPa.

La comparación de los esfuerzos máximos de compresión entre los porcentajes de 5, 10, 15, 20, 25% de adición de zeolita con respecto al cemento Tipo I y el cemento Tipo IV, nos da como resultado primero que el esfuerzo a la ruptura del cemento Tipo I es mayor que el esfuerzo a la ruptura del cemento Tipo IV y segundo que los esfuerzos máximos a la compresión de los cementos con 5, 10, 15, 20, 25% de zeolita adicionada son mucho mayores en comparación con el cemento Tipo IV y el cemento Tipo I.

Se demostró por medio de un histograma de frecuencias y la campana de gauss la relación existente entre los datos de las muestras para un mismo tratamiento, obteniendo los valores de los correctores plásticos "m" y "a". Para el día 28 de curado que es el que produce un mayor esfuerzo a la ruptura los valores fueron : $m=0.0064$ y $a=0.6$

El algoritmo implementado para poder ajustar la curva teórica y experimental de esfuerzo-deformación nos dio un error de la media cuadrática aproximada del 36% para el 15% de adición de zeolita y del 27% para el porcentaje de validación del 17.5%, es decir la aproximación del algoritmo nos dio una efectividad del 64% para la adición de zeolita al 15% y del 79% para la adición del 17.5% de zeolita respectivamente.

Mediante el método de Dunnet se comprobó que para la adición del 15% y del 17.5% de zeolita ecuatoriana el mayor día de

curado resulta a los 28 días y a los 25 días respectivamente.

El método de Duncan's comprueba que al 15% de adición de zeolita produce el mayor esfuerzo a la compresión comparado con el resto de porcentajes.

Se verificó que la zeolita es una buena alternativa como reemplazo de los materiales puzolánicos empleados en la industria cementera.

Al disminuir la producción de cemento, se contribuye en la disminución del CO₂ y por lo tanto la contaminación ambiental.

7.- Recomendaciones

Al realizar los ensayos de compresión se debe tener en cuenta de no cambiar de máquina de ensayos universales y que al aplicar la carga sobre las probetas se lo debe hacer con una velocidad constante para evitar que al tomar los datos del ensayo no acumulemos errores del equipo, como errores de apreciación.

Controlar el nivel de agua para asegurar que las muestras interactúen con el medio húmedo una vez iniciado los ensayos de compresión.

No olvidarse de cubrir la muestra con una franela o trapo para evitar el riesgo de que el operador sea golpeado con los pedazos que se producen en la ruptura.

Se recomienda extender el experimento por 45 ó 90 días de curado al agua, según el caso para poder comprobar que sucede con el comportamiento de los esfuerzos a la compresión.

[2] Reyes,G."MANUFACTURA DEL CEMENTO PORTLAND". www.monografias.com. Marzo, 2008.

[3] Anton, A."EL EXPERIMENTO FACTORIAL", www.uned.es.Marzo, 2008

[4] Servin , J. "METALURGIA DE MINERALES NO METÁLICOS", www.monografias.com. Marzo, 2008.

[5] Gutiérrez, M. "ZEOLITAS CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES", Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares , Marzo, 2008.

[6] _____,"QUE ES UNA ZEOLITA", www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx, Febrero, 2008.

[7] ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials, Mayo 2008.

[8] Galbiati, J. "REGRESION LINEAL SIMPLE", http://www.jorgegalbiati.cl/enero_07/Regresion.pdf, Mayo,2008

BIBLIOGRAFIA

[1] Jimenez, H."TECNOLOGIA DEL CONCRETO".UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA DEL PERU". www.fic.uni.edu.pe. Febrero, 2008.