



“Determinación de la Variación que se 2 Genera en la Resistencia a la Compresión cuando se Adiciona 20% de Limolita con un Curado bajo Agua al Cemento Portland Tipo I”

H. Gómez, M. Cornejo*

Área de Materiales y Procesos de Transformación
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción,
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL),
Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
mcornejo@espol.edu.ec *

Resumen

En el presente, el cemento Portland es un material de suma importancia en la rama de la construcción. Es conocido que el desarrollo de la resistencia de un cemento con adiciones hidráulicamente activas depende del efecto físico y de la reacción de la adición. Las partículas de escoria y puzolana son generalmente menos reactivas que las del cemento Portland. Pero cuando estas partículas, finamente molidas, se dispersan dentro de la matriz cementante, producen un gran número de sitios de nucleación para la precipitación de los productos de hidratación del cemento Portland, acelerando su resistencia inicial. Este efecto físico, tiende a disminuir la pérdida de resistencia a edad temprana del cemento compuesto, dado por la menor cantidad de material inicialmente reactivo. Por último, en investigaciones previas se ha analizado la influencia del empleo conjunto de escoria granulada de alto horno y de puzolana natural sobre la resistencia y el agua no evaporable de morteros.

Palabras Claves: limolita, cemento, resistencia a la compresión, esfuerzo de ruptura

Abstract

At the moment, the Portland's cement is an indispensable material in all construction. Therefore, the construction industry has the necessity to discover new materials that involves natural compounds and improvements in the mechanical resistance. This study is based in the knowledge of the effect of the different percentages of siltstone at different cured days in one of the most important mechanical properties as is the compression resistance to have the opportunity to discover new resistant materials and so to give ground to useful construction materials with the most compression resistance.

The development of this paper is based to make mechanical tests to compounds formed with Portland I Cement to different siltstone percentages and a different cured times to study the affectation of these values in the compression resistance. In addition this paper includes the study with a reference material (with 0% of additive) and with every cured conditions which allows the comparisons with the compounds that includes the additives.

Key words: siltstone, cement, compression resistance, fracture effort



1. Introducción

Hoy por hoy la competitividad para mejorar propiedades mecánicas del concreto ha promovido la investigación de materiales que abaraten costos de producción y disminuyan el impacto ambiental.

Por estas exigencias del mercado y de la producción de cemento, es cada vez más frecuente la elaboración de cementos con dos o más adiciones a partir de la molienda separada de sus constituyentes, dando origen a la formulación de los cementos a medida, los que permiten una gama de cementos con varios porcentajes de adiciones, sin cambiar el sistema de producción, lo que se obtendrá las mejoras en las propiedades resistentes y/o durables.

En este proyecto se analiza la influencia de la incorporación al cemento blanco de puzolana natural (hasta 25%) activada físicamente la resistencia a la compresión. Las previas investigaciones indican que los cementos ternarios presentan un mejor comportamiento resistente que los cementos binarios y que las máximas resistencias a compresión en las primeras edades (2 y 7 días) se alcanzan con hasta 13% de puzolana natural, mientras que a edades más avanzadas se trasladan a mayores contenidos de puzolana y escoria.

En la actualidad son conocidos los beneficios tecnológicos, económicos, y el menor impacto medioambiental que produce el empleo en forma aislada de puzolana natural y de escoria granulada de alto horno como reemplazo parcial de cemento Pórtland. Sin embargo, la influencia conjunta de estas adiciones sobre el mecanismo de hidratación y, en consecuencia, sobre las propiedades mecánicas de los cementos compuestos resultantes aún no está bien establecida.

Para aplicaciones en la construcción, las puzolanas naturales son consideradas en general como materiales de naturaleza silíceo ó silico-aluminoso, los que no tienen en si mismos propiedades aglomerantes pero que pueden finamente dividido y en presencia de humedad reaccionar con la cal a temperatura ambiente y formar por vía topó química productos estables y prácticamente insolubles de características semejantes a los formados durante la hidratación del cemento Pórtland.

Es conocido que el desarrollo de la resistencia de un cemento con adiciones hidráulicamente activas depende del efecto físico y de

la reacción de la adición. Las partículas de escoria y puzolana son generalmente menos reactivas que las del cemento Pórtland. Pero cuando estas partículas, finamente molidas, se dispersan dentro de la matriz cementante, producen un gran número de sitios de nucleación para la precipitación de los productos de hidratación del cemento Pórtland, acelerando su resistencia inicial. Este efecto físico, denominado efecto filler, tiende a disminuir la pérdida de resistencia a edad temprana del cemento compuesto, dado por la menor cantidad de material inicialmente reactivo. Las partículas de escoria o puzolana reaccionan con los hidróxidos alcalinos generando un gradual decrecimiento del CH y un incremento del CSH y de aluminosilicatos de calcio similares a los obtenidos durante la reacción del cemento Pórtland.

Como consecuencia de esta reacción química, se produce el refinamiento de los granos y la segmentación de los poros, aumentando la densidad de la matriz, la resistencia y la inmunidad de la pasta frente al ingreso de los agentes agresivos.

Por otra parte, debido a la baja reactividad inicial de estas adiciones, los cementos con escoria y puzolana presentan una disminución de la resistencia inicial, que suele limitar su empleo. Pero, este inconveniente puede mitigarse a partir de la activación de una o ambas adiciones. Así, se pueden obtener adecuadas resistencias iniciales con la activación física, por el aumento en la finura de la adición, la activación térmica, por el incremento en la temperatura y tiempo de curado, y la activación química, por la incorporación de hidróxidos alcalinos a la mezcla.

Varios estudios se han realizado con la finalidad de modelar el comportamiento del cemento cuando se añaden ciertos agregados, a su composición básica, tales como escoria de alto horno, humo de sílice o cenizas volátiles. Todos estos estudios mostraron el análisis de las condiciones bajo las cuales es posible mejorar ciertas propiedades importantes en la selección de los materiales de construcción tales como el modulo de elasticidad o la resistencia a la compresión. Otro factor influyente en la variación de estas propiedades es el método de curado seleccionado para la fabricación de los diferentes cementos. Estudios han demostrado que agregando puzolanas se logra un incremento en la resistencia y en la durabilidad del concreto [1].

Debido a las exigencias del mercado y de la producción de cemento Portland, es cada vez más frecuente la elaboración de cementos con dos o más adiciones a partir de la molienda separada de sus constituyentes, dando origen a la formulación de los cementos a medida. Estudios han demostrado que cuando el contenido de adiciones es alto, la utilización

de puzolana y escoria en este tipo de cementos presenta la peculiaridad de disminuir la resistencia inicial del cemento resultante. Sin embargo, si algunas o ambas adiciones se activan, este problema puede minimizarse [2].

En esta investigación se busca determinar la variación que se genera en el valor correspondiente a la resistencia a la compresión, cuando se adiciona 10% de limolita con curado bajo agua en el Cemento Pórtland Tipo I lo cual se hizo efectivo mediante la utilización de herramientas estadísticas y de programación.

La metodología a aplicarse en este estudio se basa en la utilización del criterio de la primera y segunda derivada para determinar el punto de fluencia y consecuente a ello hallar el esfuerzo de ruptura que permitirá determinar el mejor tratamiento en comparación con los datos del experimento con la adición de 0% de aditivo.

2. Recopilación de Datos

Con la finalidad de comprobar la variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento añadiremos a su estado natural o de control que es el cemento tipo I, diferentes porcentajes de limolita con diferentes días de curado en agua.

Se mezcla con un porcentaje de 20% del mineral limolita para diferentes días de ensayo: 7, 14, 21 y 28 días, que una vez realizada se espera 24 horas para retirarlo del molde e inmediatamente sumergirlos en agua. De esta manera, se podrá efectuar una comparación con el control (cemento y 0% de limolita), y se desarrollará un modelo matemático, el mismo que deberá ser validado para identificar la existencia de la mejora en el valor de la resistencia a la compresión de la pasta de cemento, con proporciones de limolita del: 7.5, 12.5, 17.5, 22.5 y 27.5 %, para de esta manera, lograr el porcentaje de error entre ambos rangos de días para validar el modelo matemático que se generará.

Por último, se determinará el mejor tratamiento entre los valores promedios de esfuerzo de ruptura de los diferentes porcentajes de limolita incluyendo el 0% y los días de curado para poder definir en qué tiempo y a qué porcentaje ocurre un cambio significativo en la resistencia si así fuera el caso.

3. Diseño de Experimentos

Identificando las variables de entrada y salida, que permitan revisar la correlación entre ellas (o por medio de la predicción de un modelo que facilite el planteamiento de relaciones matemáticas entre los ingresos y las salidas). Esta relación está relacionada con la prueba de validez de las hipótesis previamente formuladas [4].

Las variables de entradas se refieren a las diferentes proporciones de limolita y días de curado en los cuales se efectuará las pruebas. Los factores externos, se refieren a las condiciones ambientales que se realizará el experimento. La de salida corresponde a la resistencia a la compresión.

La limolita se recibe en forma de roca, para realizar la mezcla se requiere una granulometría de 45μ , para lo que se procede a la molienda de la siguiente manera:

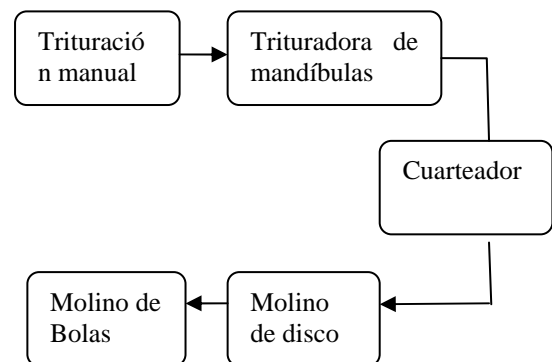


Figura 1. Proceso de molienda

Luego el producto pasa por un juego de tamices de # 50, 100, 200 y 325 quedando depositado 5, 8, 12, y 75 gramos, respectivamente, para lo que utilizaremos el último valor que fue depositado en el fondo del tamiz.

Se prepara probetas con una cantidad de 20% de limolita; para 7, 14, 21 y 28 días de curado en agua con tres réplicas para la *fase experimentación* y con una cantidad de 22.5% de limolita para 4, 11, 18 y 25 días de curado en agua con tres réplicas para la *fase validación*, la cuales fueron codificadas y sumergidas en agua en una bandeja plástica.

El mismo procedimiento se realiza con 0% de limolita que servirá para comparar el cambio en la propiedad.



En dos prensas de compresión ubicadas en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a una temperatura y humedad relativa específica y cumplido el tiempo de curado, se somete a esfuerzos axiales, de donde se obtiene valores de resistencia mecánica a la compresión y se realiza un cuadro comparativo con el de control (0% de aditivo).

La mezcla para este estudio se efectuará de la siguiente manera:

- Con 20% de limolita:-

Masa total= 3000 [gr]

Masa agua= 900 [gr]

Masa Limolita= $0.20 \cdot (3000) = 600$ [gr]

Masa Cemento= $0.80 \cdot (3000) = 2400$ [gr]

- Con 22.5% de limolita (Validación):

Masa total= 3000 [gr]

Masa agua= 900 [gr]

Masa Limolita= $0.225 \cdot (3000) = 675$ [gr]

Masa Cemento= $0.775 \cdot (3000) = 2325$ [gr]

4. Tabulación de Datos y Resultados

Con los datos obtenidos, se procede a hallar los valores de esfuerzo, mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ec. 1})$$

De donde σ se refiere al esfuerzo aplicado en cada punto, F representa la fuerza aplicada sobre cada muestra y A corresponde al área de la superficie de contacto.

De la misma manera, se obtienen los datos referentes a la deformación en cada punto, este resultado se lo obtiene aplicando la siguiente relación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde, ε representa la deformación del material; ΔL corresponde a la variación en la longitud y L equivale a la longitud del lado del cubo (muestra).

Debido a que no se conoce con exactitud el comportamiento de esta pasta de cemento, se procede a graficar cada uno de los datos para cada día de curado y porcentaje de limolita para de esta manera, observar la dispersión de dichos puntos y así poder determinar una tendencia que se ajuste de la mejor manera a los datos obtenidos.

5. Modelación del experimento.

Con los resultados de diseño de experimentos se establece una tendencia de la cual se escoge el esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura para con teoría de inelasticidad establecer un modelo matemático que mejor se ajusta a la curva esfuerzo-deformación.

Con los esfuerzos de ruptura de todas las muestras y aplicando métodos de regresión se determina la mejor relación entre las variables de entrada (días de curado y porcentaje de limolita), para la fase de experimentación, que para convalidar y encontrar el error experimental se compara la evaluación en la ecuación mencionada con el dato del experimento en los días de curado y porcentaje de la validación.

Todo este procedimiento se lo efectúa con la finalidad de poder determinar la pendiente de la zona elástica de la pasta de cemento que correspondería al módulo de elasticidad del material. Para este efecto, se procede a graficar la dispersión de puntos para cada día y cada porcentaje y se puede notar mediante los valores de confiabilidad que la mejor tendencia que se ajusta a los datos es la tendencia cúbica de la cual se obtiene la ecuación de tercer grado para que, mediante la segunda derivada, se pueda adquirir el punto en donde se produce un cambio de concavidad. Este punto de concavidad servirá de guía para poder determinar el punto de fluencia que, justamente se refiere al punto de intersección de la curva esfuerzo deformación y una paralela a la línea de la zona elástica que pasa por el punto de deformación. Luego se procede a calcular las pendientes punto a punto con la finalidad de comprobar que el valor obtenido del punto de fluencia, mediante la aplicación de la segunda derivada, sea el correcto ya que puede darse el caso que en la gráfica esfuerzo deformación se presenten dos cambios de concavidad debido a posibles datos aberrantes, y que el valor 'x' proporcionado por la segunda derivada no corresponda verdaderamente al punto de fluencia que es el que nos interesa. Entonces, determinando la pendiente punto a punto se puede comprobar en qué rango de valores la pendiente deja de sufrir incrementos y ese justamente será el punto correspondiente a la fluencia.

6. Identificación de Cambio de Propiedades

Selección del mejor tratamiento: Experimentación

Para poder determinar el mejor tratamiento en lo referente a porcentajes y en lo referente a días de curado, se procede a aplicar, mediante el software

estadístico, el método de Tukey, el mismo que se lo realiza en dos partes:

Lo que se obtiene mediante este método es que se realice un análisis individual para seleccionar el mejor tratamiento y de esta manera poder comparar con los datos referentes al 0% de aditivo, para poder determinar si existe o no un cambio significativo en los datos referentes a la resistencia a la compresión[5]. Dicho análisis consiste en separar los factores implicados por niveles, y de cada nivel se obtiene la media la misma que se resta entre todos los niveles y de esta manera se encuentra el mejor tratamiento de un nivel y luego se realiza el mismo procedimiento con cada uno de los niveles restantes.

Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje

Se procede a analizar cuál es el mejor tratamiento respecto al porcentaje de limolita. El método consiste en separar las variables en factores, en este caso tenemos porcentaje de limolita. Por cada nivel de porcentaje se obtiene la media. Como se lo puede observar en la siguiente tabla:

TABLA 1. Resultados del Mejor Tratamiento

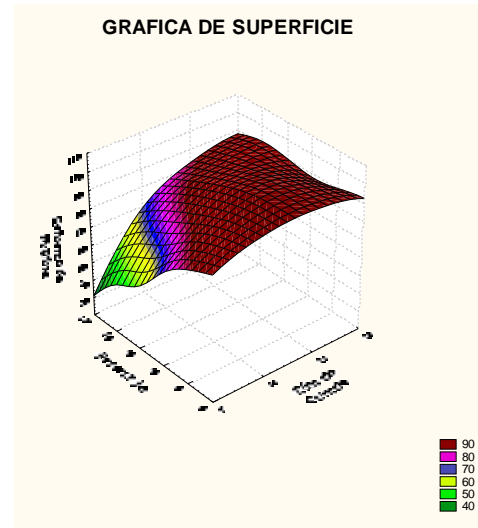
	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Media
0%	89.2 2	95.4 9	96.06	95.77	94.14
5%	71.1 5	66.6 4	77.73	113.0 3	82.14
10%	86.9 2	87.5 2	103.5 4	80.4	89.60
15%	28.8 7	90.7 8	89.3	91.08	75.01
20%	64.6 2	82.2 7	80.84	99.54	81.82
25%	24.4 2	72.3 4	81.01	85.9	65.92

De la tabla 1 se obtiene que el mayor valor de esfuerzo de ruptura ocurre con un 0% de aditivo, pero para efectos de comparación con el control se toma el segundo mejor valor que ocurre con un 10% de limolita en curado bajo agua.

7. Análisis en el Espacio

Todo el comportamiento descrito y demostrado previamente es fácilmente visible en el espacio tridimensional en donde se puede observar que el

mayor esfuerzo de ruptura se lo obtiene a los 21 días de curado con un 10% de limolita.



8. Conclusiones

- Mediante un código fuente adecuado desarrollado por la herramienta Matlab se pudo verificar que la pasta de cemento es un material elasto-plástico.
- En base a los datos experimentales se obtuvo información referente a las propiedades mecánicas de la pasta del cemento (Módulo de elasticidad, Esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura) a diferentes porcentajes de limolita los mismos que permitieron ajustar la curva ideal esfuerzo deformación correspondientes a la pasta de cemento y así poder compararla con la curva experimental para obtener un porcentaje de error de dicho ajuste.
- Para el modelamiento matemático referente a nuestros datos experimentales se requirieron de constantes positivas (a y m) que son propias de cada material con las cuales se pudo realizar un ajuste adecuado tanto de la curva teórica y curva experimental.
- Mediante herramientas estadísticas se obtuvieron varias posibles ecuaciones que relacionan la variable dependiente (esfuerzo de ruptura) con las variables independientes (porcentaje de limolita y días de curado) pero la única que se ajustó con un alto grado de confiabilidad fue la ecuación obtenida mediante regresión múltiple logarítmica la misma que se presenta a continuación y que es válida para 0, 5 10, 15, 20 y 25% de limolita así como para 7, 14, 21, y 28 días de curado en agua.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



Esf. Ruptura = - 0.744 Porcentaje + 32.79 ln (Días de curado)

- Mediante la evaluación en la ecuación anterior de los porcentajes de limolita y días de curado referentes a la validación, se comprueba que los valores obtenidos de esfuerzos de ruptura se ajustan al modelo estadístico con una margen de error correspondiente al 25%.
- Mediante análisis estadístico se determinó que el esfuerzo de ruptura más alto se produjo con la adición del 10% de limolita y a los 21 días de curado en agua con lo cual se pudo determinar que si existe una mejora en la resistencia a la compresión con respecto al 0% de aditivo de Cemento Portland tipo I así como también se produjo una variación mucho más significativa con respecto al Cemento Portland Tipo IV.
- Existe una mejora del 8% de la resistencia a la compresión con respecto al 0% de limolita en el Cemento Portland tipo I.

[1] Wikipedia. "Cemento". Abril, 2008.

[2] [7] Romo, M. "Temas de Hormigón armado", Escuela Politécnica del Ejercito, Mayo, 2008.

[3] V.L. Bonavetti. "Cementos compuestos elaborados con puzolana natural y escoria granulada de alto horno", Materiales de construcción, Volumen 56, 283, Argentina, Julio-Septiembre, 2006.

[4] Escalante, J. "Materiales alternativos al cemento Portland". Unidad Saltillo del Cinvestav. www.cinvestav.mx, Abril, 2008.

[5] _____, Manual de Tecnología del Concreto, Limusa, Grupo Noriega Editores, Volumen 3, 381, México, México. 1994.

9. Recomendaciones

- Para efectuar este tipo de experimento y poder obtener valores de respuesta más óptimos, se debería adecuar el lugar de la experimentación con condiciones de temperatura y humedad relativa específicas tal como lo indica la norma ASTM C – 109.
- Los moldes a utilizarse en la experimentación deben encontrarse libres de todo tipo de residuo para que no exista una afectación directa en nuestras probetas.
- Los moldes deben ser debidamente lubricados para facilitar que al momento de desmoldar, sus superficies no se vean afectadas,
- Debe existir homogeneidad en el proceso de mezclado.
- Se debe realizar un adecuado apisonamiento de las probetas, de acuerdo a la norma ASTM C - 109 para poder eliminar en su mayoría las burbujas de aire que se pudieron haber formado en ellas.
- Las prensas de compresión a utilizarse en la ejecución de este experimento deben encontrarse en perfectas condiciones de calibración.
- La aplicación de la carga a las probetas de ensayo debe ser suministrada a velocidad constante.
- La superficie de contacto se debe encontrar con el menor relieve posible para que la carga esté uniformemente distribuida.

9. Bibliografía