

Estudio del Comportamiento del Cemento Tipo I Mediante la adición de Limolita y curado al Aire

Edison Fernando Abata Yanchaguano.
Ing. Mauricio Cornejo.
Facultad de Ingeniería mecánica y Ciencias de la producción.
Escuela superior politécnica del Litoral
Francisco Segura entre la 15 y 16 , Guayaquil, Ecuador
eabata@espol.edu.ec
edison940002@hotmail.com

Resumen

El presente trabajo, enmarcado en el Tópico de Graduación “Simulación del Comportamiento de Materiales”, busca obtener un cemento tipo I con su resistencia mecánica modificada, a partir de la inserción de un 5% de limolita como material puzolánico. Si lográramos demostrar que con este tipo de puzolana mejoramos o igualamos a las propiedades mecánicas actuales del cemento como es el de la compresión uniaxial, entonces podríamos reducir el precio de este tipo de cemento haciéndolo más competitivo en el gran mercado de la construcción.

Actualmente el cemento es el material más usado en la industria de la construcción. Debido a su complejo proceso de producción y al uso de aditivos, es un proceso costoso, por lo cual el precio del cemento se eleva periódicamente. Con la inserción de la puzolana y confirmando mi hipótesis lograríamos mejorar ciertas propiedades del cemento, de las cuales analizaremos la resistencia a la compresión.

Se buscará identificar la aportación que realice la adición de la limolita en las propiedades del cemento en cuanto al mejoramiento de la resistencia a la compresión. Se realizará un diseño de experimentos que nos permita usar una relación agua/mezcla constante, y la granulometría del material también. El curado será al aire, y se cambiará el porcentaje de aditivo en la mezcla.

Luego, los ensayos respectivos se realizarán en el laboratorio a los 7, 14, 21 y 28 días de curado. Los resultados obtenidos serán analizados estadísticamente para determinar su confiabilidad. Así, se procederá también a utilizar estos datos para incluir en la codificación en lenguaje de programación que realizaremos del modelo matemático que describe la resistencia a la compresión del cemento.

Con esto, ajustaremos y verificaremos el comportamiento de nuestra simulación, reforzando el diseño del modelo matemático de la propiedad mecánica estudiada. Se espera, que con la adición de esta puzolana, nuestro cemento alcance o supere las propiedades mecánicas del cemento Pórtland tipo I, para que de esta forma podamos abaratar costos en su proceso de producción y en su respectiva distribución.

Palabras Claves: Puzolana, Limolita, igualar o superar, Resistencia a la compresión,

Abstract

"Determination of the Variation of the Resistance to the Compression of the Cement Type I with the Addition of 5% Limolita and Cured to the Air By means of Experimental and Mathematical Methods"

The present work, framed in the Topic of Graduation "Simulation of the Behavior of Materials", it looks for to obtain a cement type I with their modified mechanical resistance, starting from the insert of 5% limolita like material puzolánico. If we were able to demonstrate that with this puzolana type we improve or we equal to the current mechanical properties of the cement like it is that of the compression uniaxial, then we could reduce the price of this cement type making it more competitive in the great market of the construction.

Actually, the cement is the material more used in the industry of the construction. Due to their complex production process and to the use of preservatives, it is an expensive process, reason why the price of the cement rises periodically. With the insert of the puzolana and confirming the hypothesis would be able to improve certain properties of the cement, of which we will analyze the resistance to the compression.

It will be looked for to identify the contribution that it carries out the addition of the limolita in the properties of the cement as for the improvement from the resistance to the compression. We will be carried out a design of experiments

that allows us to also use a relationship constant water/mixture, and the grain of the material. The cured one will be to the air, and the preservative percentage will be changed in the mixture.

Then, the respective rehearsals will be carried out in the laboratory at the 7, 14, 21 and 28 days of cured. The obtained results will be analyzed statistically to determine their dependability. This way, we will also proceed to use these data to include in the code in language of programming that we will carry out of the mathematical pattern that describes the resistance to the compression of the cement.

With this, we will adjust and we will verify the behavior of our simulation, reinforcing the design of the mathematical pattern of the studied mechanical property. It is expected that with the addition of this puzolana, our cement reaches or overcome the mechanical properties of the cement Pórtland type I, so that this way we can reduce costs in its production process and in its respective distribution.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata de la “Determinación De La Variación De La Resistencia a La Compresión Del Cemento Tipo I Con La Adición De 5% Limolita y Curado Al Aire Mediante Métodos Experimentales y Matemáticos.”, este trabajo trata de determinar la variación de la resistencia uniaxial a la compresión mediante la adición del 5% de limolita al cemento tipo I, con un curado al aire, el cual tratará de determinar si este porcentaje supera o iguala a la propiedad mecánica de resistencia a la compresión del cemento tipo I.

Para la realización de este experimento trabajaremos siguiendo las normas ASTM C 595 - ASTM C 109/C 109M para lo cual se usará dos maquinas de ensayo la primera nos dará datos de prueba expresados en Kgf. Mientras que la segunda los datos serán dados en Lbf.

Una vez obtenido los datos se procederá a realizar el correspondiente análisis estadístico de forma individual y de forma grupal. Posteriormente se procede a realizar la simulación mediante un modelo matemático.

Si se llega a determinar que nuestra mezcla superó o iguala la resistencia a la compresión del cemento tipo I, esto implicará que obtendremos un tipo de cemento mas económico con la misma propiedad de resistencia a la compresión o mejor, que la del cemento tipo I. ya que se usó una puzolana natural extraídas de las cercanías de la ciudad de Guayaquil.

1.1 Planteamiento del problema.

El cemento Portland usado en la actualidad debe soportar grandes fuerzas de compresión uniaxial, es por tal motivo que para su elaboración se ha usado materiales que tengan muy buenas propiedades mecánicas

Esta investigación estará enfocada en el uso de un solo tipo de material puzolánico que es la limolita, que debido a su estructura molecular y las propiedades químicas que este presenta, influye directamente en la dureza del cemento.

Si llegáramos a demostrar que con el uso de esta puzolana mejoraríamos las propiedades mecánicas del cemento Portland tipo I lograríamos tener un cemento de mejor calidad a un bajo costo de producción.

Para reducir en lo mas mínimo las variaciones en los resultados habrán variables que se mantendrán constantes a lo largo del experimento como son la relación agua – cemento y la granulometría del material usado. El análisis a realizarse dará evidencia real y confiable en el cambio de las propiedades mecánicas del cemento y se demostrara como con el uso de la limolita afecta la resistencia a la compresión uniaxial en la estructura del cemento a lo largo del periodo de investigación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Generales

Identificar el efecto que tiene la introducción de un material puzolánico (5% de limolita) con un tiempo de curado (7, 14, 21, 28), al aire, en la propiedad mecánica de la resistencia a la compresión uniaxial del cemento, para lo cual nos valdremos de un modelo teórico mediante un análisis estadístico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar un modelo de experimento teniendo como base otros estudios realizados.
- Realizar los ensayos de una forma metodológica adecuada de tal manera que estas cumplan con las normas internacionales vigentes.
- Analizar los resultados obtenidos del experimento mediante el uso de herramientas adecuadas como lo es el uso del software Matlab y Statistica.
- Establecer la respectiva comparación entre el cemento Portland tipo I (sin aditivo) y nuestra mezcla con un 5% de limonita.

1.3 Metodología

La metodología planteada en el presente trabajo se detalla mediante el gráfico indicado en la figura 1.1. Siguiendo un esquema que detalla cada uno de los puntos a tratar en la elaboración de esta tesis.

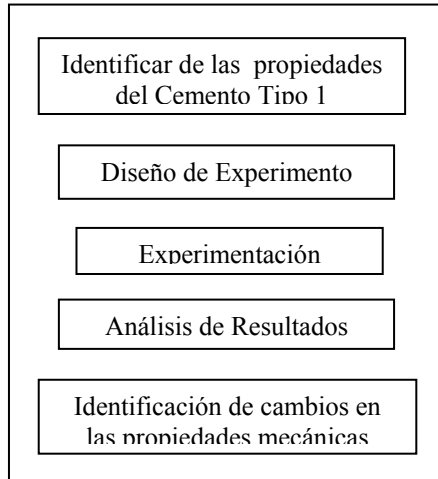


Figura 1 Metodología de la Tesis

Con la identificación de las propiedades mecánicas del cemento tipo I y en forma especial de la capacidad de soportar grandes fuerzas de compresión uniaxial nos darán valores que nos permita al final de la investigación cuantificar como afecta en dichas propiedades la inclusión del 5% de limolita con un curado al aire en la dureza del cemento.

El diseño de experimento se realizará de la siguiente manera: manteniendo constante la granulometría del material así como también la relación agua-mezcla a lo largo de la investigación. El aditivo ocupará el 5% de la mezcla en el cual se efectuará un curado al aire.

La experimentación se desarrollará de la siguiente forma: se utilizará 3 probetas de 50 mm³ a las cuales se realizará un curado al aire, realizado esto, se efectuará un ensayo de dureza a las probetas a los 7, 14, 21 y 28 días de la investigación, aquí también se procederá a hacer la respectiva validación del experimento a los 4, 11, 18, 25 (se tendrá tres probetas más por cada día de la validación), días de la experimentación, por lo que por cada ensayo realizado obtendremos 3 resultados para analizar.

Para analizar los datos obtenidos haremos uso del Software STATISTICA el cual nos permitirá establecer si los resultados encontrados guardan o no una relación confiable entre ellos.

Para la identificación de los cambios en las propiedades del cemento, se tomará como referencia los datos obtenidos del cemento Portland tipo I sin aditivos y lo compararemos con los resultados que obtengamos de nuestra investigación, de esta forma se podrá establecer como nuestro aditivo afecta la dureza del material.

1.4 Estructura de la Tesis

El primer capítulo se llama Generalidades, en esta parte expondremos la información preliminar para sustentar el desarrollo de esta tesis. Aquí se hace referencia al planteamiento del problema y a la justificación que son los puntos principales para explicar la importancia de esta investigación para la conveniencia de la sociedad.

El capítulo 2 se llama Marco Teórico, aquí se describen los diferentes temas concernientes a esta investigación. Cada sección de este capítulo nos ayudará a interpretar de mejor manera los resultados de esta investigación para que de esta forma poder tener un buen criterio al momento de analizarlos e interpretarlos.

El capítulo 3 se llama Análisis Metodológico, aquí se detallan los materiales, equipos y herramientas utilizados en nuestro experimento así como también se explica el diseño de experimento. El capítulo 4 se llama Resultados, en este capítulo se realizará la respectiva tabulación de los datos y resultados obtenidos en nuestro experimento para que de esta forma se pueda analizar estadísticamente con los datos de nuestra referencia que es el cemento tipo I sin aditivos, en este capítulo también se procede a realizar el respectivo ajuste y verificación del modelo.

El capítulo 5 se llama Conclusiones y recomendaciones, aquí se exponen las respectivas conclusiones a la que hemos llegado después de hacer el respectivo análisis, también se exponen las recomendaciones para futuras investigaciones.

3.1 Equipos y materiales

La norma ASTM C 595 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” nos da las especificaciones que deben cumplir los materiales y equipos que se usarán en esta investigación.

La norma ASTM C 109/C 109M “Standard Test for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), analiza el esfuerzo a la compresión en morteros de cementos hidráulicos, usando cubos de 2 pulgadas o 50mm.

3.1.1 Equipos

Vasos Graduados, deben de ser de una capacidad adecuada (Lo suficientemente largo para medir el agua a utilizar en la mezcla) para entregar el volumen indicado a 20 ° C. La variación

admisible será de ± 2 ml. Las graduaciones deben de ser subdivididas por lo menos 5mm.

Moldes para muestras, para cubos de 2-in. (50 mm) tendrán que ser de un ajuste apropiado. Los moldes no tendrán más de tres compartimentos para los cubos y podrán separarse en no más de dos partes. Los moldes deben de ser de un metal muy duro para que no sean atacados por los morteros de cemento. Para moldes nuevos el número de dureza Rockwell del metal no debe ser inferior a 55 HRB. El interior de las caras de los moldes serán superficies planas y se ajustarán a las tolerancias mostradas en la siguiente tabla.

TABLA 1

Tolerancias Permitidas en los Moldes de las Muestras

Parámetros	Moldes de los cubos.	
	Nuevos	Usados
Superficies de los lados	<0,025mm	<0,05mm
Dist. entre lados opuestos	50 $\pm 0,13$ mm	50 $\pm 0,50$ mm
Altura de los compartimientos	50 $\pm 0,25$ mm -0,13mm	50 $\pm 0,25$ mm -0,38mm
Angulo entre caras adyacentes	90 $\pm 0,5^\circ$	90 $\pm 0,5^\circ$

Mezclador, Tazón y Paleta, Se usará un mezclador de tipo mecánico el cual funcionará con corriente eléctrica equipado con paleta y un tazón para el mezclado de los materiales de la muestra.

Paleta, debe de ser de una hoja de acero de aproximadamente 100 a 150 mm de longitud el cual debe tener sus filos rectos.

Tabla de flujo y caudal del Molde, de conformidad con los requerimientos especificados en la norma ASTM de C 230.

Apisonador, Este debe de ser de un material no frágil (un compuesto de goma con una dureza de 80 ± 10 el cual es medido con un durómetro Shore A), no absorbente y abrasivo. Este apisonador tendrá una sección transversal de aproximadamente 1/2 por 1 pulgadas (13 por 25 mm) y una longitud de unos 5 a 6 pulgadas (120 a 150mm).

Máquina de ensayo, esta máquina ya sea esta hidráulico o de tornillo, es una máquina de ensayos de compresión universal, la cual debe contar con la suficiente apertura entre las caras de las superficie superior e inferior de la máquina para permitir el uso de verificación de los aparatos.

3.1.2 Materiales.

El material que utilizare para la preparación de la pasta de cemento compuesto se detalla continuación:

- Cemento Portland Tipo I sin aditivos.
- Limolita a un 5%.
- Agua.

3.2 Protocolo de ensayos.

Cada día de los ensayos se tomará tres datos de la resistencia a la compresión a los cuales se los procederá a realizar el respectivo análisis estadístico y su respectiva modelación para cada día del experimento. En la siguiente tabla se indica la forma en la que procederemos a recolectar los datos de la resistencia a la compresión uniaxial así como también el tiempo de curado para nuestra mezcla (Cemento Portland tipo I sin aditivos + limolita 5%).

TABLA 2

Modelo Toma de Datos del Experimento

5%	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	7 Días	14 Días	21 Días	28 Días
Muestra 1	r1	r4	r7	r10
Muestra 2	r2	r5	r8	r11
Muestra 3	r3	r6	r9	r12

A continuación también se procederá a realizar la correspondiente validación de la forma como se indica en la siguiente tabla.

TABLA 3

Modelo de Datos de Validación

8%	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	4 Días	11 Días	18 Días	25 Días
Muestra 1	r1	r4	r7	r10
Muestra 2	r2	r5	r8	r11
Muestra 3	r3	r6	r9	r12

Durante la toma de los datos de la resistencia a la compresión también debemos de tomar datos adicionales como: La temperatura al momento que se realice la toma de los datos, la humedad relativa. Estos datos pueden afectar a los resultados por lo tanto se deben de considerar.

Para el análisis de estos datos debemos de tener una tabla similar del cemento Portland tipo I sin aditivos para poder comparar como la adición de limolita al 5% efecto a la compresión uniaxial de este cemento.

3.3 Temperatura y humedad

La **temperatura** del lugar en donde se va a proceder a realizar la mezcla del material, moldes, embases y del tazón deberán mantenerse entre los $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ la temperatura del agua a mezclarse será de $23.0^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. La **humedad relativa** del laboratorio en la cual se va a realizar el experimento deberá de ser no menos del 50%

3.4 Diseño experimental.

Con la finalidad de reducir en lo más mínimo los errores experimentales se deben de hacer una buena planificación de los experimentos, para de esta forma poder abaratar costos y reducir a lo máximo los tiempos durante la experimentación. Con una muy buena planificación podremos desarrollar un buen plan de trabajo para nuestra experimentación.

Para la realización de un excelente plan de trabajo se debe de seguir los siguientes pasos:

- Análisis del problema.
- Planificación del experimento.
- Ejecución de los experimentos.
- Análisis estadístico de los datos.
- Análisis de los resultados estadísticos.
- Revisión del análisis del problema.

Análisis del problema:

En esta etapa vamos a establecer nuestra función de respuesta y los factores así como también los vínculos existentes entre la función de respuesta y dichos factores.

Para el presente trabajo la función de respuesta a obtener es La resistencia de nuestra mezcla a la

compresión uniaxial con respecto al tiempo de ensayo.

Se mantendrá constante la relación agua/mezcla así como también su granulometría. La variable independiente será el porcentaje de aditivo que se utilizará que para este caso es de 5% de limolita, al cual se le hará un curado al aire.

Nuestra mezcla (cemento+ 5% de limolita) lo analizaremos mediante un ensayo mecánico (ensayo a la compresión) a los 7, 14, 21 y 28 días (de aquí se obtiene el tiempo de curado y estos días en los que se realizarán los ensayos son los niveles de este factor). A este experimento se procederá hacer una validación con el uso de una nueva mezcla (cemento + 8% de limolita) al cual se procederá a realizar el mismo ensayo mecánico a los días 4, 11, 18 y 25 días, para de esta forma tener datos suficientes para realizar un buen análisis estadístico y de modelación. De esta forma se podrá estudiar como la adición de 5% de limolita afecta a las propiedades mecánicas del cemento Portland tipo I (material de referencia) sin aditivos y en especial al de la resistencia de la compresión uniaxial por cada tiempo de ensayo.

Planificación del experimento.

Este experimento lo realizaremos en la máquina de ensayos de compresión que se encuentra en la Facultad de ciencias de la tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), siguiendo la norma que se especifica en la ASTM C109/C 109M.

La forma como se planificara el experimento esta explicada en el protocolo de ensayos descrito en la sección 3.2

Ejecución de los experimentos.

Los ensayos de la resistencia a la compresión se realizaran en el área de materiales de la Facultad de Ingeniería en ciencias de la tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) siguiendo las normas establecidas por la norma ASTM C109/C 109M. Las probetas para la pasta de cemento se fabricaran en el mismo laboratorio siguiendo las normas antes mencionas.

Análisis estadístico de los datos

ANOVA: Para realizar el análisis estadístico de las muestras se usará el método de la varianza (ANOVA) para lo cual suponemos que:

Las K poblaciones son independientes y normalmente distribuidas con medias $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, y varianza común σ^2 . [10].

Para este análisis se hace la siguiente hipótesis:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$

H_1 : Al menos una de las medias no son iguales

Mediante este método se analizará si hay o no diferencias significativa entre las medias de las muestras.

Análisis de los resultados.

Cuando ya se haya conseguido determinar la curva de regresión y la función estimada de regresión podremos determinar la función que relaciona las medias de la resistencia de compresión uniaxial en función del tiempo de curado

Antes de comenzar hacer el respectivo análisis (previo a la toma de datos) nos planteamos la siguiente hipótesis. “En nuestra mezcla, la forma como se comporta la resistencia a la compresión uniaxial en función del tiempo de curado, será siguiendo un modelo de regresión lineal simple”. Con la hipótesis ya planteada se comienza hacer el respectivo análisis de los datos. Si se comprueba que verdaderamente nuestro modelo es lineal se aceptará la hipótesis casi contrario se rechaza la hipótesis inicial a favor de la hipótesis experimental encontrada.

Revisión del análisis del problema

Una vez que se haya analizado los resultados obtenidos de la experimentación se comenzará a verificar si las suposiciones hechas inicialmente son las únicas que afectan al experimento o si hay algunos otros factores que pueden influir en la resistencia a la compresión de las muestras que deberían tomarse en cuenta durante el análisis del problema.

4. Conclusiones

La mezcla a la cual realizamos el correspondiente análisis fue la del cemento portland tipo I con un determinado porcentaje de puzolana que fue limolita con lo cual se obtuvo diferentes resultados a los cuales se procedió a realizar el correspondiente análisis estadístico y de modelación que para el caso se analizaron de forma grupal e individual dando las siguientes conclusiones:

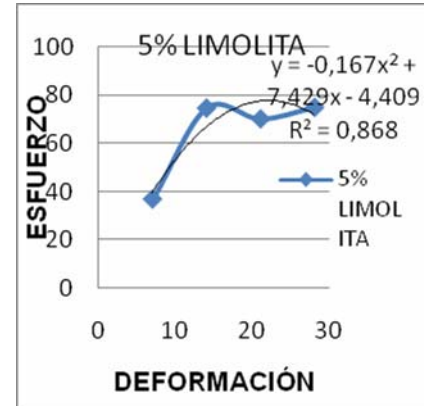


Figura 2. Resultados con el 5% de Limolita

En la gráfica se puede apreciar que en los primeros días el esfuerzo a la compresión uniaxial aumenta pero conforme pasa los días este tiende a bajar esto se debe a varias causas que se detallan a continuación:

La humedad relativa del ambiente en la cual se realizó la prueba variaba de experimento a experimento, pero al sacar los promedios vemos que tenemos 68.2 y 72.8 para el experimento y validación respectivamente, para los cuales vemos que estos datos si cumplen con la norma que dice que el experimento se debe de realizar a una HR > al 50%

La temperatura en la cual se desarrolla la fase experimental variaban de prueba a prueba, que al sacar los promedios tenemos 26°C y 25.45°C para el experimento y la validación respectivamente, que son la temperatura ambiente del lugar de desarrollo de este trabajo que corresponde a la ciudad de Guayaquil. Esta temperatura está dentro de el rango de la norma que dice, el ensayo debe ser trabajado en un ambiente que este por los 23+3°C

No se conto con una máquina de compactación de las muestras.

La toma de datos se desarrollo de manera visual con la cual se obtuvieron algunos errores al tratar los datos de las muestras.

Los resultados dados en este trabajo nos lleva a concluir que entre los diferentes porcentajes de Puzolana (Limolita) el rango de porcentaje que tiene las mejores características mecánicas de resistencia a la compresión estarán entre un

rango del 10% al 12.5% de agregado de limolita al cemento portland Tipo I.

Para verlos mas detallado se usaremos el siguiente grafico:

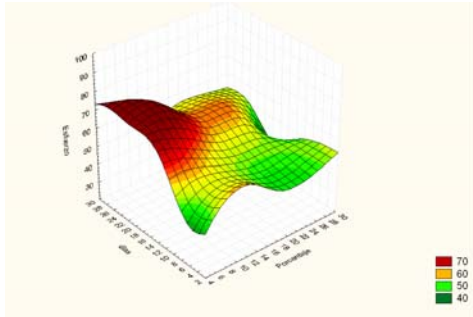


Figura 3. Análisis en tercera dimensión de todas las muestras y porcentajes de limolita

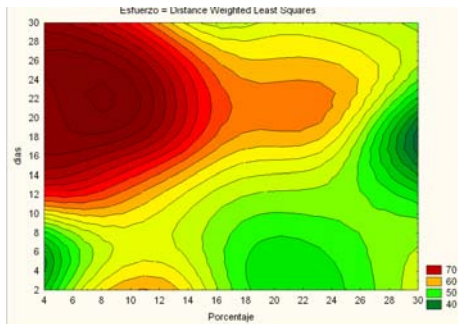


Figura 4. Análisis de todas las muestras y porcentajes de Limolita

Este gráfico nos dice que mientras menor sea el porcentaje de limolita mayor será el esfuerzo conforme pasan los días, pero nuestro mejor tratamiento se lo obtuvo con el rango del 10 al 12.5% de limolita en la mezcla.

El gráfico también muestra que a menor porcentaje de limolita mayor esfuerzo, esto se debe a que tenemos mayor porcentaje de cemento además nuestro análisis se lo realizo con un curado al aire por lo que a los primero días tendremos mayor porcentaje de agua y esto hace que el esfuerzo se incremente en estos días

Al realizar las respectivas comparaciones con el cemento tipo I se dedujo que este cemento tipo I (la cual se experimento con un curado al aire), tiene mejor propiedad de resistencia a la compresión que la mezcla del rango del 10 al 12.5% de limolita.

Este cemento tipo I es mejor a la de la mezcla en un 12.7575%, y para la validación en un 11.87481%.

Al analizar la mezcla con el 10% de limolita con el cemento tipoIV (la cual se realizo la experimentación con un curado al aire), vemos que nuestra mezcla tiene mayor resistencia a la compresión. Nuestra mezcla es mejor en un 30% y para la validación en un 41.656%.

Estos datos analizados solo son validos hasta un rango de experimentación de 25 días y de validación de 28 días.

4.1 Recomendaciones:

Para que los datos obtenidos se acerquen mejor a los reales experimentales se debe de tener cuidado en el proceso de moldeo para evitar que estén presentes burbujas de aire en nuestras muestras.

Se debe de usar algún dispositivo de compactación para eliminar tales burbujas.

Es recomendable controlar la temperatura mediante el proceso de experimentación.

Se obtienen errores experimentales si no se tiene cuidado con las diferentes etapas de análisis.

Se recomienda usar equipo de seguridad durante las pruebas de compresión.

Agradecimiento

Este trabajo va dedicado a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para el desarrollo de la misma y en especial a mi director el Ing. Mauricio Cornejo

Bibliografía

[1](A.M. Neville ,*Tecnología del concreto*, Instituto Mexicano del cemento y del concreto, Tomo I, pag. 1 - 70).

[2] (William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Mc Graw Hill, Tercera Edición Pag.662-665).

[3](<http://www.afcp.org.ar/anuario/proceso-cementohtm> .htm.Julio,2008).

[4](<http://es.wikipedia.org/wiki/Puzolana> .Juli o.2008)

[5](<http://katodos.com/doctos/81f459021729e3a6bf02db0430923c9b.doc> .Julio.2008) .

[6](<http://edafologia.ugr.es/rocas/limolita.htm> .Agosto,2008)

[7](<http://www.pdvsa.com/lexico/museo/rocas/rv-0005.htm>". Agosto ,2008)

[8](<http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/mod/resource/view.php?inpopup=true&id=24504>", Octubre,2008)

[9](Irwin Miller, *Probabilidades y estadística para ingenieros*, cuarta edición, pag.353-356)

[10](Walpole Myers Mayers, *Probabilidades y Estadística para Ingenieros*, Pearson Prentice Hall. Sexta Edición pag.461-468)

[11] (J.P.B. Leitea,* , V. Slowikb, H. Mihashia, *Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures*, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1025–1033.)

[12] (Hani H. Nassif * , Husam Najm, Nakin Suksawang, *Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC*, Cement & Concrete Composites 27 (2005) 661–670))

[13](F.P. Ganneau a,1, F.-J. Ulm a,* , J. Gondzio b, E.J. Garboczi c, *An algorithm for computing the compressive strength of heterogeneous cohesive-frictional materials – Application to cement paste*, Computers and Geotechnics 34 (2007) 254–266)