

Estudio del efecto de adiciones de 20% de Limolita en mezclas de cemento, con un curado al aire, en su Resistencia a la Compresión

Christian R. Romero Rosero
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
cromero@espol.edu.ec

Mauricio Cornejo Z. 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
mcornejo@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo es un estudio acerca del comportamiento de la resistencia a la compresión en las pastas de cemento, cuando se agrega 20% de Limolita en la mezcla y se le aplica un curado al aire. La presente Tesis se desarrolla en dos etapas, la primera de ellas es la experimentación con su respectivo estudio estadístico de los resultados experimentales y la segunda etapa el desarrollo de un modelo teórico y su implementación en lenguaje de programación. Al terminar las dos etapas se realizó una comparación del ajuste del modelo teórico con los datos experimentales. Otra parte fundamental del presente estudio es la comparación entre el material compuesto (pasta de cemento + Limolita) con el cemento base Tipo I y el cemento comercial Tipo IV.

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

Abstract

This work is a study about the behavior of the compressive strength in cement grout, when you add 20% of Limolita in the mix and it is covered by an air-cured. This thesis is developed in two phases, the first of which is experimenting with its own statistical study of the experimental results and the second phase development of a theoretical model and its implementation in a programming language. At the conclusion 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 + Limolita) with cement base Type I and Type IV cement trade.

Key words: *Cement, Limolita, , resistance to uniaxial compression, experimental, statistical analysis, mathematical model.*

1. Introducción

El presente estudio analiza las propiedades mecánicas del cemento, después de agregar un porcentaje de puzolana (Limolita) y someterlo a un ambiente de curado al aire, para posteriormente someterlo a ensayos de compresión. Siendo el material compuesto, la mezcla del cemento mas Limolita, se pretende realizar un modelo matemático que arroje resultados semejantes a los de los ensayos realizados en el laboratorio, con el objetivo de verificar el ajuste que tiene el modelo matemático del material compuesto con la realidad.

Dada la disponibilidad de las puzolanas en nuestro país, la aplicación de materiales puzolánicos da lugar a la posibilidad de un considerable beneficio económico, teniendo en cuenta que existen algunas empresas cementeras en el país.

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

En la literatura se pueden encontrar modelos que describen procesos de hidratación, micro estructura y extracción electromecánicas de cloruros del cemento; sin embargo, hay muy escasa literatura acerca de métodos de estadística matemática para el modelado de la composición y propiedades de resistencia de compuestos del cemento con aditivos de subproductos minerales. La importancia de éste estudio radica en la inclusión de los modelos matemáticos, aplicados a los materiales compuestos, como las pastas de cemento con Limolita.

2. Objetivos.

El objetivo principal es analizar el efecto que tiene introducir materiales puzolánicos, como la Limolita, y el efecto del tiempo de curado en la resistencia a la compresión, en las pastas de cemento, a través de un modelo teórico y

mediante el estudio estadístico de los datos experimentales.

Implementar un experimento para determinar la resistencia a la compresión de las pastas cemento. Modelar, utilizando métodos numéricos, el comportamiento de materiales compuestos como el concreto. Introducir en los modelos el efecto de materiales aditivos, como puzolanas, en la composición de los materiales estructurales. Coordinar los trabajos de modelación con la experimentación de laboratorio, con el objetivo de lograr el mayor ajuste de los modelos con la realidad del comportamiento del material compuesto.

3. Metodología

3.1. Diseño factorial.

Para analizar el efecto que tiene introducir material puzolánico en pastas de cemento y el tiempo de curado en la resistencia a la compresión del material compuesto se escogió un diseño factorial, en donde los factores serán el porcentaje de Limolita y el tiempo de curado. Los niveles para el factor de porcentaje de Limolita serán 5, 10, 15, 20 y 25% y 7, 14 21 y 28 días para el tiempo de curado. Para el experimento se contará con tres muestras experimentales para cada tiempo de ensayo, es decir que se tendrá una población de 60 muestras. Los datos serán tratados estadísticamente con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ mediante el uso de un software para encontrar diferencias significativas entre los tratamientos con el método de ANOVA con una confiabilidad del 95%.

Antes de realizar el análisis estadístico, se debe verificar que los datos tengan una distribución Normal, además se asume que la varianza es homogénea y que los errores tienen distribución Normal [15-16].

3.2. Experimentación.

Para llevar a cabo el protocolo experimental primero se definirán los pasos a seguir de manera general. Estos son los siguientes.

- Molienda.
- Preparación de la pasta.
- Realizar el respectivo curado en el tiempo destinado.

- Determinación de la Resistencia a la compresión o ensayo.
- Recolección de datos.
- Análisis de los resultados.

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

Los materiales necesarios para llevar a cabo la experimentación son:

- Cemento Portland Tipo I
- Limolita
- Agua

Los equipos utilizados se enlistan a continuación:

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

Molienda. Los pasos para realizar la molienda se detallan a continuación:

1. Medir 12 Kg. de Limolita en la balanza.
2. Trituración por medio del molino de quijadas.
3. Moler en el triturador de rodillos
4. Pasar la limolita por el separador.
5. Homogenizar la mezcla y tomar una muestra.
6. Medir en la balanza 100 gramos.
7. Preparar los tamices de 14, 18, 40 y 50.
8. Realizar el proceso de tamizado en el tamizador eléctrico, durante 15 minutos
9. Una vez finalizado el tamizado, separar los tamices y medir en la balanza el material que se queda en cada tamiz, al sumar el material se deben obtener nuevamente los 100 gramos.
10. Moler en el molino de discos.
11. Repetir nuevamente los pasos 4 al 8.
12. Al terminar el tamizado, volver a medir en la balanza el material que queda en cada tamiz, esta vez el material que pasa por el tamiz número 50, debe ser mayor que la vez anterior.

13. Moler en el molino de rodillos.

14. Repetir los pasos 4 al 7.

15. Preparar los tamices número 50, 100, 200 y 325.

16. Realizar el tamizado durante 15 minutos

17. Al terminar el tamizado, volver a medir en la balanza el material que queda en cada tamiz, esta vez el material que pasa por el tamiz 325 debe estar entre el 70 y 80% de la muestra tomada.

18. Almacenar el material molido en una bolsa plástica o un recipiente cerrado para mantenerlo libre de humedad.

Una vez que el material pasó por el tamiz de 325, la Limolita alcanza una granulometría de 45 micras, que es la granulometría del cemento Tipo I, lo cual es importante para la fase experimental.

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

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

Temperatura y Humedad

La temperatura al contorno de la mezcla de la loza, molde y placas de la base se debe estar a una temperatura aproximada de 23 ± 3 ° C. La temperatura de la mezcla agua, habitación húmeda y el agua del tanque de almacenamiento deberá estar a una temperatura aproximada de 23 ± 2 °C.

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

Preparación de los moldes.

- ✓ Verificar que las superficies del molde se encuentran limpias y que los pernos de apriete se encuentren correctamente ajustados.

- ✓ Aplicar aceite en el interior del molde con un paño impregnado u otros medios apropiados.
- ✓ Eliminar algún exceso de aceite con un paño limpio.



Figura 3.1. Preparación de moldes

Moldeamiento de las probetas

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

- Con la paleta tomar una porción de la mezcla y colocarla dentro de cada uno de los cubos del molde, no se debe colocar más de la mitad de la capacidad de cada cubo.
- Compacte la mezcla con el apisonador dando ocho golpes en un sentido y ocho golpes más a 90° del sentido anterior.
- Una vez compactada la mezcla en el molde, con la paleta vuelva a revolver la mezcla del tazón y colóquela dentro de los cubos, esta vez llene los moldes.
- Vuelva a compactar la mezcla con el apisonador
- Remueva las burbujas de aire con un compactador de mezcla.
- Remueva los excesos de la superficie del molde
- Coloque un protector plástico sobre los moldes y almacénelos de preferencia en un lugar húmedo.



Figura 3.2. Almacenamiento de moldes con la mezcla

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

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

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

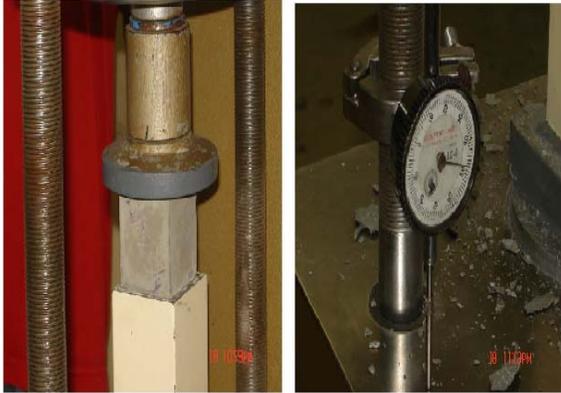


Figura 3.3. Ensayo de Compresión.

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

3.3. Modelo Matemático

Considere una barra elasto - plástica sujeta a tensión uniaxial tal como se muestra en la Figura 2.6

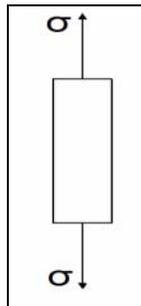


Figura 3.4. Carga uniaxial de una barra

Asuma que la curva esfuerzo – deformación está dada por una relación bilineal, donde E es el módulo de Young y esfuerzo de fluencia σ_{y0} , como se muestra en la figura 2.7

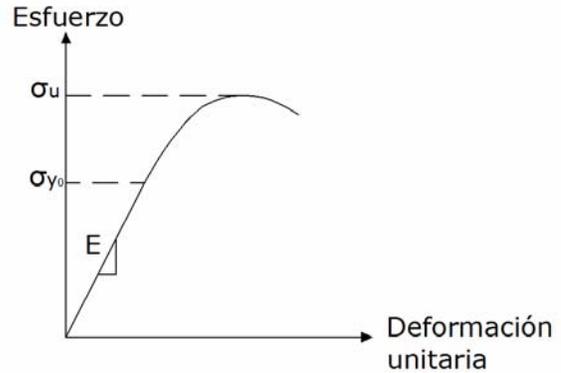


Figura 3.5. Curva esfuerzo-deformación

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

$$E_0 = \{\sigma \in R \mid -\sigma_{T0} < \sigma < \sigma_{T0}\}$$

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

$$\epsilon = \epsilon^E + \epsilon^P$$

donde ϵ : deformación axial total

ϵ^E : deformación en la región elástica

ϵ^P : deformación en la región plástica

La ecuación constitutiva para la barra está dada por:

$$\sigma = E\epsilon^E = E(\epsilon - \epsilon^P)$$

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

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

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

$$f(\sigma, \sigma_{T0}) = |\sigma| - \sigma_{T0} = 0$$

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

$$E_0 = \{\sigma \in R | f(\sigma, \sigma_{T0}) < 0\}$$

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

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

Alternativamente se puede escribir

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

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

compresión.

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

Asumiendo que el esfuerzo de fluencia en compresión se mantiene igual al esfuerzo de fluencia en tensión, entonces la función fluencia actual se puede escribir como:

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

y la región elástica actual

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

Una simple ley que describe la evolución de σ_Y

con la continuada deformación plástica está dada por la ecuación

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

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

Carga / descarga y condiciones de consistencia. El esfuerzo axial σ y el parámetro $\dot{\lambda}$, están restringidas por ciertas restricciones

unilaterales

$$\dot{\lambda} \geq 0, \quad f(\sigma, \sigma_Y) \leq 0$$

Existen dos posibilidades: si la barra está deformada elásticamente, entonces $\dot{\lambda} = 0$ y

$$f(\sigma, \sigma_Y) \leq 0, \text{ en el otro lado si está deformada}$$

plásticamente, entonces $\dot{\lambda} \geq 0$ y $f(\sigma, \sigma_Y) = 0$.

se puede escribir en una forma más compacta

$$\dot{\lambda} f(\sigma, \sigma_Y) = 0 \quad \text{Ec. (2.32)}$$

La última ecuación recibe el nombre de condición de Kuhn-Tucker y representa una condición que debe cumplirse para deformación elástica como para plástica [17].

ALGORITMO. Considere un intervalo típico en el tiempo $t \in [t_n, t_{n+1}]$ y asuma que σ_n

y $\sigma_{Y,n}$ son conocidos. Se debe encontrar

σ_{n+1} y $\sigma_{Y,n+1}$ los cuales deben satisfacer

la condición de Kuhn-Tucker para un incremento de deformación $\Delta \epsilon$.

Se debe definir también σ_{n+1}^{tr} como el

predicor del esfuerzo elástico y $E \Delta \epsilon^p$ es el corrector del esfuerzo plástico.

Paso 1: Calcular $\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n + E \Delta \epsilon$

Paso 2:

$$F_{n+1}^{tr} = |\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{Y,n} < 0?$$

No, $\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n, \sigma_{n+1} = \sigma_{Y,n+1}$

y salir

Paso 3: Si, empiece Newton-Raphson e itere hasta

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

Paso 4:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\lambda \operatorname{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr})$$

y

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

y salir [17].

Se debe agregar las siguientes fórmulas para completar el algoritmo

$$\sigma_u = \sigma_{Y0}(1 + a)$$

$$\sigma_Y = \sigma_{Y0} \left(1 + \frac{2a}{k+\lambda} \sqrt{k\lambda}\right)$$

donde las constantes k y a son positivas.

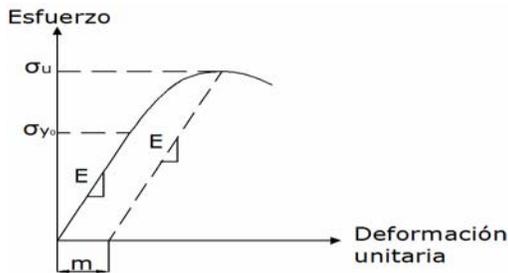


Figura 3.6. Curva esfuerzo-deformación[17].

4. Resultados.

La Tabla 7 resume la composición de la mezcla empleada para llevar a cabo el experimento con una concentración de Limolita al 20% y la Tabla 8 la mezcla empleada para Limolita al 22.5%.

Tabla 1. Composición de la mezcla, con una concentración de Limolita al 20%

Puzolana en la mezcla(g)	600
Cemento en la mezcla(g)	2400
Agua (g)	900
Mezcla (puzolana +cemento) (g)	3000
Relación agua / mezcla	0,3

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

Tabla 2. Datos experimentales

Deformación unitaria	Esfuerzo 7 Dias N/mm2	Esfuerzo 14 Dias N/mm2	Esfuerzo 21 Dias N/mm2	Esfuerzo 28 Dias N/mm2
0	0	0	0	0
0,00254	0,797	4,939	6,698	2,608
0,00508	2,221	9,957	19,500	9,602
0,00762	4,835	15,379	37,459	24,182
0,01016	8,598	21,168	51,565	40,422
0,0127	13,446	27,571	65,197	53,639
0,01524	18,725	33,647	67,271	59,270
0,01778	24,827	38,873		62,678
0,02032	31,425	41,617		60,455
0,02286	38,220	48,020		
0,0254	44,688			
0,02794	48,151			
0,03048	51,842			

4.1. Análisis de Resultados.

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

Para realizar este análisis tenemos las siguientes hipótesis:

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

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

$$F=13.13 > F_{cr}=4.06$$

Tabla 3. Análisis de varianza

Current effect: F(3, 8)=13,136, p=.00186						
Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Dias	Esfuerzo Mean	Std.Err.	Esfuerzo -95,00%	Esfuerzo +95,00%	N
1	7	42,92400	3,077981	35,82616	50,02184	3
2	14	50,24133	3,077981	43,14350	57,33917	3
3	21	67,26667	3,077981	60,16883	74,36450	3
4	28	62,52333	3,077981	55,42550	69,62117	3

Además de la Figura 4.1 podemos ver que a los 21 días de ensayo se obtiene el mayor esfuerzo y esto nos da un indicio de cuál es el mejor tratamiento.

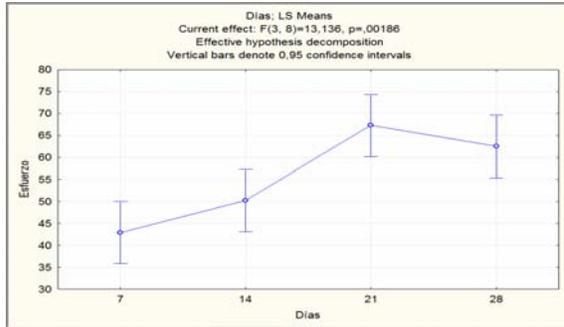


Figura 4.1. Gráfica Esfuerzo último vs. Días de curado (20% Limolita).

ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL. Este análisis busca adoptar un modelo que mejor se ajuste a los datos obtenidos en la experimentación. Al realizar el ajuste se encontró un modelo polinomial de tercer orden y una correlación de 95.74%, de lo cual podemos concluir que el modelo adoptado es el adecuado para nuestro experimento. Los coeficientes de esta regresión se muestran en la Figura 4.2.

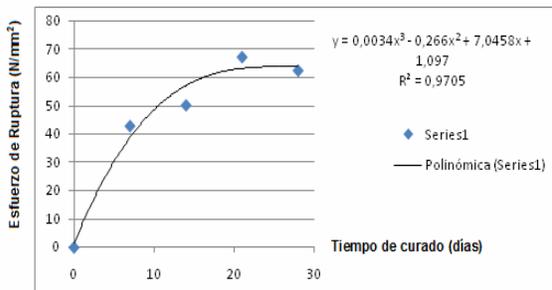


Figura 4.2. Esfuerzo vs. Tiempo de curado (20% Limolita)

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

Tabla 3. Análisis de varianza de dos factores

Univariate Tests of Significance for Esfuerzo (Sheet3)					
Sigma-restricted parameterization					
Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	206000.1	1	206000.1	5671.299	0.000000
Porcentaje	1797.5	4	449.4	12.372	0.000001
Días	4622.3	3	1540.8	42.418	0.000000
Porcentaje*Días	3471.6	12	289.3	7.965	0.000000
Error	1452.9	40	36.3		

De Figuras 4.3 se puede concluir que el mejor porcentaje para el esfuerzo último para el experimento es de 10% de Limolita

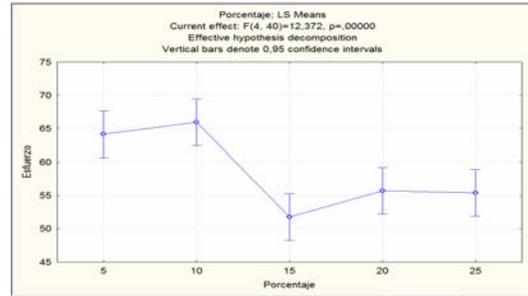


Figura 4.3. Esfuerzo vs. Porcentaje

Mis datos van a ser analizados por un método estadístico y un ajuste de curva, a los promedios de mis resistencias últimas en los diferentes días de curado y también con mis datos dispersos.

4.2. Datos grupales.

PRUEBA DE DUNCAN. Una vez que se ha hecho el análisis de varianza, se procede a verificar cuál es el mejor tratamiento. De los resultados que se obtuvieron del análisis de varianza, se observa que para el 10% de Limolita se obtiene el mayor esfuerzo último y al realizar la prueba de Duncan resultó que 10% a los 21 días es el mejor tratamiento.

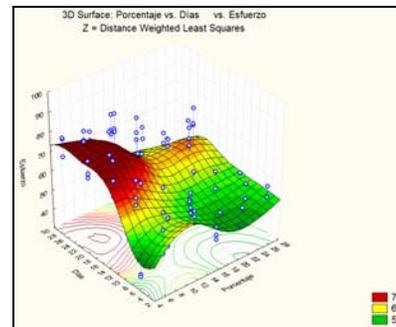


Figura 4.5. Superficie de respuesta

PRUEBA DE DUNNETT En esta prueba queremos determinar si el material compuesto tiene mayor resistencia a la compresión que el cemento Tipo I. Los resultados observados fueron que sólo el tratamiento de 10% de Limolita a los 21 días de curado es mayor que el control, para todos los restantes tratamientos la resistencia a la compresión del material compuesto es menor a la del cemento Tipo I.

La comparación con el cemento tipo IV dio como resultado que los siguientes tratamientos son mejores que el control:

- 5% de limolita – 14 días de curado
- 5% de limolita – 21 días de curado
- 10% de limolita – 21 días de curado
- 20% de limolita – 21 días de curado
- 25% de limolita – 21 días de curado
- 5% de limolita – 28 días de curado
- 10% de limolita – 28 días de curado
- 20% de limolita – 28 días de curado

para todos los restantes tratamientos la resistencia a la compresión del material compuesto es menor a la del cemento Tipo IV.

4.3. Verificación del Modelo

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

Los datos de entrada para el modelo bilineal serán:

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

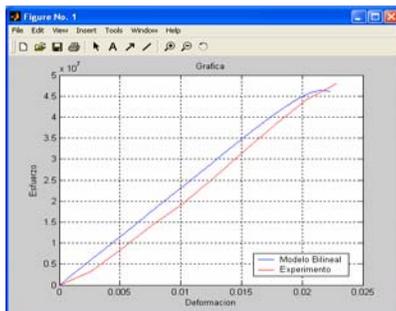


Figura 4.6. Modelo Bilineal. Curva esfuerzo-deformación.

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

5. Conclusiones.

El análisis estadístico de los datos experimentales nos dio como resultado que las pastas de cemento con una concentración de Limolita al 20% y sometida a un curado al aire, alcanzan una mayor resistencia a la compresión a los 21 días de tiempo de curado. Además se observó que para edades tardías (25 y 28 días de curado) se presenta una disminución de la resistencia a la compresión, dicha disminución se debe a que el cemento no alcanzó suficiente hidratación para poder incrementar su resistencia. El análisis de regresión dio como resultado un polinomio de tercer orden el cual sirve para interpolar la resistencia última del material en un intervalo de 0 hasta 28 días; es importante mencionar que el polinomio no tiene un buen ajuste para los primeros días de curado.

Al analizar la resistencia a la compresión para varios días de curado y distintos porcentajes de Limolita (5 – 7.5 – 10 -12.5 -15 -17.5 – 20 – 22.5 – 25 y 27.5%) nos dio como resultado que existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos; es decir que existen combinaciones de días de curado y porcentaje de Limolita para los cuales el esfuerzo último alcanza valores óptimos. La mejor combinación de tratamientos se determinó que estaba entre 7.5 y 12.5% de Limolita y 18 y 21 días de curado.

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

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

cuales el material compuesto es superior al cemento Tipo IV.

6. Recomendaciones

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

Uno de los factores más importantes para mejorar las propiedades del material compuesto es la hidratación que debe alcanzar el cemento, por lo tanto se recomienda mejorar las características del medio de curado (humedad y temperatura) en el cual se desarrolle el experimento.

El análisis estadístico empleado en la presente tesis, requería de un número mayor de muestras experimentales para poder analizar de manera más adecuada la normalidad de los datos, ya que al solo contar con tres muestras experimentales para cada día de ensayo, se asumió que los datos tienen distribución Normal.

7. Bibliografía

1. H.F.W Taylor. La química de los cementos, Volumen I. Departamento de Química Universidad de Aberdeen, Escocia. Ediciones URMO, Esportero – Bilbao. 1967.Página 14.
2. H.F.W Taylor. La química de los cementos, Volumen I. Departamento de Química Universidad de Aberdeen, Escocia. Ediciones URMO, Esportero – Bilbao. 1967.Página 16.
3. A Neville, Properties of concrete. Pitman Publishing. www.ucn.d/FacultaddeInstitutos/laboratorio
4. Bogue, R. H.. Chemistry of Portland cement. Segunda edición Reinhold. Nueva York. 1955.
5. Norma ASTM C 595 – 03. Standard for Blended Hydraulic Cements.
6. H.F.W Taylor. La química de los cementos, Volumen I. Departamento de Química

Universidad de Aberdeen, Escocia. Ediciones URMO, Esportero – Bilbao. 1967.Página 18.

7. H.F.W Taylor. La química de los cementos, Volumen I. Departamento de Química Universidad de Aberdeen, Escocia. Ediciones URMO, Esportero – Bilbao. 1967.Página 19.
8. H.F.W Taylor. La química de los cementos, Volumen I. Departamento de Química Universidad de Aberdeen, Escocia. Ediciones URMO, Esportero – Bilbao. 1967.Página 80.
9. J. A. Gallegos. Una clasificación de los materiales sedimentarios. 1996
10. Reconocimiento de Rocas. Práctica 5. Universidad Rey Juan Carlos Geología.
11. Curing of concrete. Portland Cement Association.
12. S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Design and control of concrete mixtures. Panarese.2002
13. Irwin Miller, John E. Freud, Richard A. Johnson. Probabilidad y estadística para ingenieros. Prentice – Hall. Hispanoamericana S.A. México.
14. www.google.com. www.gestiopolis.com. Consulta Octubre 2008.
15. Ing. Byron Humberto González Ramírez. Profesor de Estadística Aplicada. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. La prueba de Shapiro & Wilk para verificar la normalidad de un conjunto de datos proveniente de muestras pequeñas Universidad Rafael Landívar. Publicación: octubre 2006.
16. Walpole, Myers, Myers. Probabilidad y estadística para ingenieros. Pearson. México.
17. Notas de la materia Teoría de Inelasticidad. Ph. D. José Andrade. Profesor de la universidad de Northwestern. R.I. Borja.
18. Buscador google: Algoritmo de Newton Raphson. Consultado Octubre 2008.www.cidse.itcr.ac.cr/cursos-linea/NUMERICO