

# **Análisis del Comportamiento de la Resistencia a la Compresión del Cemento Tipo I con la adición de Limolita al 10%, con un Curado al Aire.**

Daniel P. Laverde Chica  
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  
[dlaverde@espol.edu.ec](mailto:dlaverde@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](mailto:mcornejo@espol.edu.ec)

## **Resumen**

*El presente proyecto, busca mejoras en las propiedades de un material compuesto debido a la exigencia en las características de los productos. En este caso, se examinará el efecto de la adición de un aditivo de Limolita al 10% en un cemento que será estudiado para tiempos de curado específicos. Como objetivo general será el analizar el efecto que tiene la introducción de un material puzolánico como la Limolita y el tiempo de curado en la resistencia a la compresión del material compuesto como el cemento mediante el modelo teórico y el análisis estadístico. Para cumplir nuestro objetivo se hará uso de la literatura técnica recopilada, para conocer antecedentes relacionados con el tema a tratar. Se realizará una simulación en lenguaje de programación MatLab que contemple el modelo matemático que describa la resistencia a la compresión del cemento. Con esto, se compararán los resultados calculados, con los obtenidos experimentalmente para ajustar el modelo y validarlo. La metodología a seguir se basará en un diseño experimental del cemento con el aditivo. Luego de la experimentación se analizarán estadísticamente todos los datos y resultados, finalmente poder conocer si existe cambio o mejoras en las propiedades del material experimentado. Las pruebas ser realizarán en los laboratorios de la FIMCP en la ESPOL, en supervisión y guía de los profesores asignados.*

**Palabra claves:** *Cemento, limolita, experimentación, ensayos de compresión, resistencia a la compresión, análisis estadístico, validación del modelo matemático.*

## **Abstract**

*This project seeks to improve the properties of a composite material, this is because to the demand in the characteristics of the products. In this case, the effect of the addition of an additive will be examined from Limolita to 10% introduced in the cement that will be studied for times of cured specific. As general objective it will be analyzing the effect that has the introduction of a material puzolánico like the Limolita and the time of having cured, in the compressive strength, of the composite material such as cement through the theoretical model and statistical analysis. To meet the objective, will use the technical literature to learn more about the related topic. There will be a simulation in MatLab programming language, that provides a mathematical model that describes the compressive strength of cement. With this, calculated results are compared with those obtained experimentally to adjust the model and validate it. The methodology to be observed is based on experimental design. After the experiment is statistically analyze all the data and results, finally able to know if there is change or improvements on the properties of the material tested. The tests being carried out in laboratories in the FIMCP ESPOL in supervision and guidance of teachers assigned.*

**Key words:** *Cement, Limolita, experiment, test compression, compressive strength, statistical analysis, mathematical model.*

## 1. Introducción

Hoy en día el cemento es uno de los productos más usados en el mercado y en si el concreto es de uso común, o convencional. Un cemento puede ser un compuesto químico único, pero la más de las veces es una mezcla. La clasificación de un cemento puede realizarse en función de, la naturaleza de sus componentes, su categoría resistente, o, en su caso, por sus características especiales, por lo que las investigaciones llevan a la adición de materiales alternos que mejoren las propiedades del cemento.

En la actualidad no existe un material alternativo al cemento que pueda ser utilizado como material de bajo costo en construcciones de gran volumen.

El día a día, y el avance tecnológico, requieren de construcciones y edificaciones de mayor volumen con gran resistencia, y con materiales más económicos, la investigación en ciencia e ingeniería de materiales ha traspasado las fronteras de los países industrializados alcanzando países en vías de desarrollo como el nuestro, y además proyectándose a ser un puntal para su desarrollo.

Encuadrados en esta realidad, el mejoramiento o la creación de productos es un reto tecnológico dentro del marco de la competitividad global al que deben enfrentarse cotidianamente los países en general, y las empresas en particular. Es por eso, este trabajo de investigación, se basa en la experimentación, y estudio de un material compuesto, este es el Cemento Tipo I. En la investigación se utilizó la limolita como adición en la fabricación del cemento puzolánico, con el fin de mejorar sus propiedades, y obtener un cemento igualmente resistente y más económico. El objetivo es desarrollar la aplicación de la limolita como un componente básico de las mezclas de hormigones y morteros, demostrado mediante ensayos y pruebas.

## 2. Objetivos.

Analizar el efecto que tiene la introducción de un material puzolánico como la Limolita, y el tiempo de curado en la resistencia a la compresión del material compuesto como el cemento, obtenido durante una experimentación, mediante el modelo teórico y el análisis estadístico.

Comparar los datos obtenidos de resistencia a la compresión durante los diferentes ensayos realizados en Laboratorio con el modelo matemático obtenido por medio de la computadora y observar si ha mejorado la resistencia a la compresión uniaxial de un material compuesto como el cemento de manera

significativa con respecto al cemento Tipo I, para dicho efecto se utilizará una adición de 10% de Limolita.

## 3. Metodología

### 3.1. Diseño factorial.

Para poder dar cumplimiento a los requerimientos de validez y precisión de las pruebas es necesario utilizar una metodología estadística desde la planificación hasta la ejecución y, luego, el posterior análisis de los resultados. El criterio básico recomendado es seleccionar un método estadístico sencillo, que se ajuste a las condiciones experimentales y que permita obtener resultados válidos.

Para tal efecto en este experimento el diseño factorial consistirá en analizar el efecto que causa el tiempo de fraguado junto con el aporte a la mezcla de cemento de un aditivo, siendo para mi efecto de estudio la limolita, durante los días en los que se van a realizar los ensayos mecánicos, midiendo la resistencia a la compresión por cada tiempo en el cual se va a realizar el fraguado. Para cumplir tales requerimientos en el próximo ítem se indicaran respectivamente y siguiendo una norma los porcentajes requeridos en la mezcla, probetas a usar, temperaturas, etc. Para esto se recolectaran datos empíricos de acuerdo a la experimentación realizada posteriormente. Para la elaboración de una prueba se deben seguir los principios básicos planteados para el diseño de experimentos. Esto implica un número razonable de repeticiones (dependiendo de la prueba), aleatorización en las unidades experimentales y un control para lograr una estimación válida del error experimental.

Para este tipo de estudio, tiene como base la experimentación y luego la obtención de datos, que luego serán analizados estadísticamente usando el método ANOVA, para así poder validar nuestra hipótesis de investigación. El programa computacional a utilizar es STATISTICA. El nivel de confianza será de un  $\alpha = 0.05$ , con esto observamos si existen diferencias significativas entre las medias obtenidas dependiendo de los porcentajes. Este procedimiento se lo realizará analizando las medias de los tratamientos de los datos obtenidos en 7, 14, 21 y 28 días.

Es importante también identificar las fuentes de variabilidad, las cuales pueden presentarse dentro de los ensayos y entre los ensayos. La variación dentro

de los ensayos contribuye a la precisión de la estimación y puede ser causada por problemas como: errores en diluciones, imprecisiones en el pesado, errores al medir, errores en el conteo, variación del porcentaje entre las mezclas, etcétera.

### 3.2. Experimentación.

Para poder realizar un protocolo adecuado y referenciado, es necesario conocer la norma a usar previamente para la experimentación, la cual se tomará como una referencia clara, para conocer los porcentajes, condiciones de experimentación, máquina a usar, etc. Se tomará como referencia la norma siguiente.

ASTM C 109/C 109M – 02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), en traducción sería, Método de prueba estándar para la Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (Utilizando especímenes cúbicos de 2 pulg. O 50 mm).

Para seguir un protocolo de investigación primero se definirán los pasos de manera global o general a seguir. Estos son los siguientes. Según la norma se deben realizar de dos a tres especímenes para cada período de prueba.

- 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.
- Conclusiones.

Antes de conocer más a fondo del protocolo a seguir, se deben detallar los materiales y herramientas o equipos a utilizar para nuestro propósito.

Los materiales a usar son los siguientes, teniendo en cuenta que se van a preparar una pasta.

- Cemento Portland Tipo I
- Limolita
- Agua

Los equipos a usar se detallan a continuación.

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

**Molienda.** Este procedimiento se realiza previo a nuestro protocolo global, para obtener el aditivo (limolita) con una granulometría igual a la del cemento, la cual es de 45 micras, para tal efecto se describe el siguiente procedimiento experimental realizado en los laboratorios de la facultad de ciencias de la tierra.

Primero pesamos la cantidad necesaria de limonita en este caso es de 12 Kg. Para tal efecto se requiere que el tamaño de las rocas no sea tan grande para que pueda ingresar en la trituradora. Una vez concluido el pesaje, pasamos a la trituradora de mandíbulas y hacemos pasar el material por la misma, 2 veces. Una vez concluida la segunda pasada, obtenemos la granulometría.



**Figura 3.1. Pesaje y trituradora de Mandíbulas.**

Pasamos nuestro material a la trituradora de rodillos, esta máquina es regulable sus rodillos, dependiendo de la granulometría que se requiere obtener, cabe recalcar que no se obtienen granulometrías tan bajas en esta máquina. Una vez concluido y de haber pasado todo el material en la maquina, lo cuarteamos (en un separador).



**Figura 3.2. Trituradora de Rodillos y Separador.**

Homogenizamos una de las muestras, para que esta sea representativa, y tomamos 100 g, con el cuál hacemos el tamizado en las mallas #14, 18, 40, 50 y un fondo en el orden descrito las colocamos. Realizamos el tamizado en el tamizador eléctrico, alrededor de 15 minutos. Sacamos las muestras y pesamos los porcentajes obtenidos, en cada una de las mallas, el total me tiene que dar 100 g.



**Figura 3.3. Tamices y Tamizador eléctrico**

Una vez realizado el tamizado y obteniendo un porcentaje granulométrico bueno de la muestra, hacemos pasar todo el material ahora por el molino de discos. Una vez pasado y molido todo el material nuevamente se lo pasa a cuartear, para ver nuevamente su granulometría, obteniendo una muestra de 100 g. Hacemos el tamizado nuevamente en las mallas #14, 18, 40, 50 y un fondo, y obtenemos los porcentajes obtenidos en cada una de las mallas.



**Figura 3.4. Molino de Discos**

Concluido el procedimiento anterior, colocamos el material total en el molino de bolas, el tiempo es indistinto dependiendo de las condiciones en que este la muestra, humedad, granulometría a obtener, etc. El

tiempo de permanencia es de alrededor una hora y media. Una vez concluida la molienda en el molino de bolas, nuevamente se cuartea, homogeniza y sacamos una muestra de 100 g. para realizar el tamizado. Este ahora se lo realiza en las mallas #50, 100, 200, 325 y un fondo, la malla de 325, es la que equivale a la granulometría del cemento (45 micras)



**Figura 3.5. Tamices y Tamizador eléctrico**

**Temperatura y Humedad.** La temperatura del aire en las proximidades de la mezcla, los materiales secos, moldes, placas base, etc., se mantendrá entre  $73.5 \pm 5.5$  °F o  $(23.0 \pm 3.0$  °C). La temperatura de la mezcla de agua, o cuarto húmedo, y el agua en el tanque de almacenamiento será de  $73.5 \pm 3.5$  °F o  $(23.0 \pm 2$  °C). La humedad relativa del laboratorio no podrá ser inferior al 50%.

**Preparación de la Pasta.** Antes de realizar la mezcla se deberá ya tener calculado los porcentajes adecuados para realizar la mezcla. Esto consiste en especificar los porcentajes en peso de la Limolita y el cemento tipo I y la relación de agua/mezcla que se requieren para realizar la pasta. Como se requiere q cada cubo tenga 250 g de mezcla, y por lo tanto son 12 probetas, entonces se requiere una mezcla total de 3000g en peso total de Limolita y cemento tipo I. También se realizara la validación que consiste en el mismo procedimiento pero a un porcentaje distinto de aditivo, por lo tanto serán 12 probetas más, dando un resultado de 24 probetas.

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

Para preparar los moldes, primero se debe aplicar una capa delgada de aceite al interior de las caras del molde y placas base. Limpiar las caras lateras del

molde y la placa base con un paño para eliminar cualquier exceso del aceite y para conseguir una finura [16].

Luego de la limpieza de los moldes se debe realizar la mezcla adecuada y preparar la pasta de cemento en los moldes respectivos. Una vez ya pesados todos los elementos que formarán la pasta a obtener, se coloca en un recipiente tanto la Limolita y el cemento tipo I, se pone en los moldes la mezcla, se debe llenar en dos capas para el moldeo y provocar el asentamiento, mediante una varita disponible en el laboratorio, finalmente colocar la segunda capa y nuevamente taquear, para finalizar se debe golpear suavemente para hacer que las burbujas salgan.

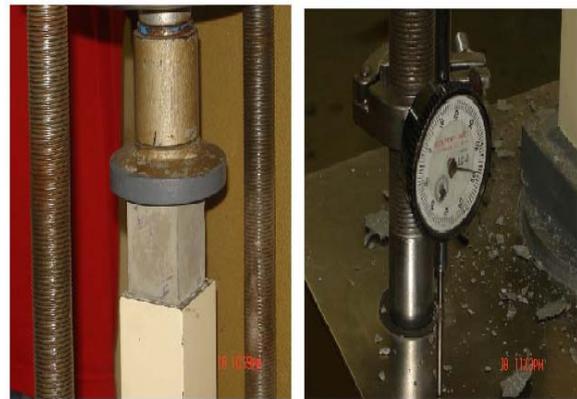


**Figura 3.6. Preparación de la Pasta.**

**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 [16]. 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, colocar 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 3.7. 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

Antes de predecir un modelo que describa el comportamiento del material a obtener, se deben tener claros los conceptos de inelasticidad y conocer condiciones. Para tal efecto se deben determinar las condiciones de la no linealidad mecánica, las cuales están determinadas por la geometría y el material (comportamiento del material), que será nuestro objetivo. Nuestro modelo se limitara a un modelo bidimensional. Puesto que el material a analizar es un material que se comporta como un material con una respuesta no lineal, entonces presentara en la gráfica del esfuerzo vs. Deformación un comportamiento al inicio lineal, lo cual determinará la elasticidad del material hasta el punto de fluencia (esfuerzo de fluencia), y posteriormente variara en una función no

lineal, hasta llegar a la ruptura, esta zona se determinará por la plasticidad del material.

Para realizar el modelo matemático a usar en este análisis de la pasta de cemento, se ocupara formulas para inelasticidad unidimensional. En la que se detalla el algoritmo a ocupar en base a fórmulas establecidas en la plasticidad del cemento, basada en métodos iterativos para aproximarse al comportamiento del material, cuando se aplica una carga de compresión, la grafica a obtener mostrará el comportamiento en base al esfuerzo y la deformación. Formalmente podemos decir que la ecuación constitutiva para materiales elastoplásticos no se puede expresar mediante una función ordinaria, sino por medio de un funcional cuyo argumento es la historia del proceso de deformación. Ahora se detalla el algoritmo a usar, el cuál es para un endurecimiento no lineal, con el cual programaremos paso a paso hasta hallar la solución gráfica. El algoritmo es el siguiente.

Return Mapping: Nonlinear-Hardening.

STEP 1. Compute  $\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n + E \Delta \epsilon$

STEP 2.  $F_{n+1}^{tr} = |\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{Y,n} > 0$  ???

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

Quiere decir que, cuando no cumple la condición, determinado en el paso 2, los valores del esfuerzo  $\sigma_n$  y  $\sigma_{Y,n+1}$  toman los valores ya señalados, en el algoritmo, eso hay que programar inicialmente, ahora si la condición es cierta viene el paso 3.

STEP 3. Yes begin Newton – Raphson & itérate until.

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

Me dice que se debe utilizar el método iterativo de Newton – Raphson, hasta que cumpla la condición ya especificada. Con el proceso iterativo de N-R, se tiene que hallar un residuo  $r$ , una función  $H'$ , que dependerá de  $\Delta \gamma$ . Para realizar las respectivas iteraciones primero configuramos la función a utilizar. Que consiste en el modelo iterativo de Newton-Raphson. Hasta que cumpla la condición específica, encontrando finalmente valores de  $\Delta \gamma$  y  $H'$ , necesarios para el siguiente paso. Para los valores ya encontrados con N-R, ingresamos las ecuaciones para el paso 4.

STEP 4. Set

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

$$\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n} + H'_{n+1} \Delta \gamma \text{ and exit.}$$

Para el modelado de este experimento se utilizara medios computacionales con el empleo de programas, para este caso MATLAB, el cuál llevará un lenguaje programado. El cuál conllevará, lo señalado en el algoritmo nombrado en el modelo matemático.

#### 4. Resultados.

En cada tabla se muestra los valores de las resistencias calculadas para las distintas probetas, en los respectivos días de curado y porcentaje de aditivo.

Los cálculos realizados, en base de los datos obtenidos, fueron las deformaciones, fuerzas, y esfuerzos de compresión.

Para cada ensayo se tomaron las condiciones de temperatura y humedad relativa. Para las probetas con el 10% de limolita, se muestra la siguiente tabla con promedios de las temperaturas y humedad relativa, las cuales cumplen con las condiciones, especificadas expuestas en la norma.

10%	DIAS				Promedio
	7	14	21	28	
Temperatura (° C)	25,3	25,3	25,2	26,7	25,625
Humedad Relativa	77,3	74,5	75,7	66,9	73,6

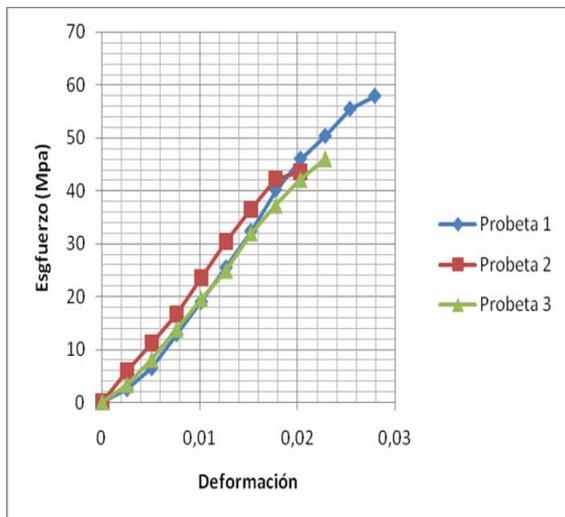
**Tabla 4.1. Temperatura y Humedad Relativa - 10% Limolita.**

Se tabularon, todos los resultados obtenidos para cada probeta, dependiendo del día en que se realiza la ruptura. También se muestran las gráficas obtenidas de Esfuerzo vs. Deformación.

Así se obtuvieron todas las tablas y gráficas para los porcentajes de 10 y 12.5% de limolita, respectivamente de acuerdo a los días específicos de curado y ensayos de compresión.

G3/10/7			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
MARCA (in)	MARCA (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	2,47	5,88	3,33
0,01	0,254	0,00508	6,47	11,17	8,04
0,015	0,381	0,00762	12,86	16,66	13,72
0,02	0,508	0,01016	19,01	23,52	19,52
0,025	0,635	0,0127	25,48	30,38	24,89
0,03	0,762	0,01524	32,34	36,46	31,95
0,035	0,889	0,01778	40,18	42,14	37,24
0,04	1,016	0,02032	46,06	43,51	42,14
0,045	1,143	0,02286	50,37		46,06
0,05	1,27	0,0254	55,47		
0,055	1,397	0,02794	57,94		

**Tabla 4.2. Resistencias a los 7 días-10% Limolita**



**Figura 4.1. Gráfica Esfuerzo vs. Deformación**

Para la obtención del módulo de elasticidad E, se linealizó una recta que abarque la mayoría de los puntos en mi curva de esfuerzo vs. Deformación, pero solo para la zona elástica. También se muestra una gráfica con la dispersión de los datos, para el ensayo.

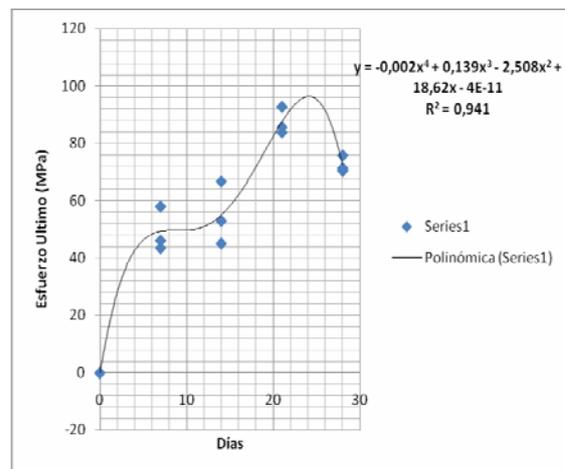
#### 4.1. Análisis de Resultados.

Para el análisis de los datos, este se basó en el análisis experimental, el cual es el arreglo de unidades experimentales, el cual se le asigna los tratamientos. Para tal, se considera el efecto, que tiene el curado en la resistencia última a la compresión. Las probetas, se usan como unidades experimentales, en el que se cuenta para cada día de la experimentación con tres probetas, los números de

días en que se experimenta son cuatro, los cuatro tratamientos se asignan al azar a las 12 probetas, es decir se escogen tres probetas de la población y se designan para cada día específico, en los que se realizaron los ensayos. Se escoge una Hipótesis de investigación, el cual es el efecto que causa el curado, en la mezcla de un compuesto. Tal objetivo se verifica sometiendo a las muestras al ensayo de compresión. Se necesita de un método para estimar los parámetros de los modelos y determinar que hipótesis o modelos estadísticos se ajustan mejor a los datos del experimento. El método de mínimos cuadrados es el que se usa con más frecuencia para estimar los parámetros. Las estimaciones con mínimos cuadrados son sin sesgo y con varianza mínima.

Se analizaron ambos porcentajes, buscando diferencias significativas entre los tratamientos, utilizando el análisis de la varianza (ANOVA). Para tal efecto se, tomaron ciertas asunciones y se verifico que los datos cumplan una distribución normal. Con el cual se concluyo que las medias entre los tratamientos no son iguales. Una vez identificado que hay diferencias significativas, se analizaron los datos por factores cuantitativos, para tal se requiere un estudio en función de la tendencia. Es decir un modelo polinomial, el cual tiene como objetivo, el determinar la ecuación polinomial de menor orden posible, que describa la relación en forma adecuada. Para los datos se obtuvo un polinomio de cuarto orden realizado con la ayuda de Excel.

Obteniendo la siguiente figura, en la cual se muestra la tendencia y la ecuación del polinomio. Este me sirve para predecir valores a cualquier día dentro de los rangos establecidos en la prueba.

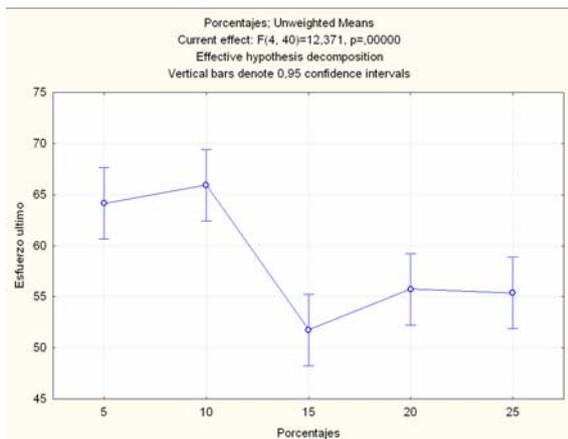


**Figura 4.2. Datos ajustados a un modelo polinomial.**

## 4.2. Datos grupales.

Se recopiló la información de los ensayos realizados a distintos porcentajes de limolita (5, 10, 15, 20 y 25%), para los mismos días de curado, para ser analizados estadísticamente y buscar el porcentaje que se obtiene la más alta resistencia a la compresión. Igualmente se realizó el análisis con los porcentajes de validación (7.5, 12.5, 17.5, 22.5, y 27.5%).

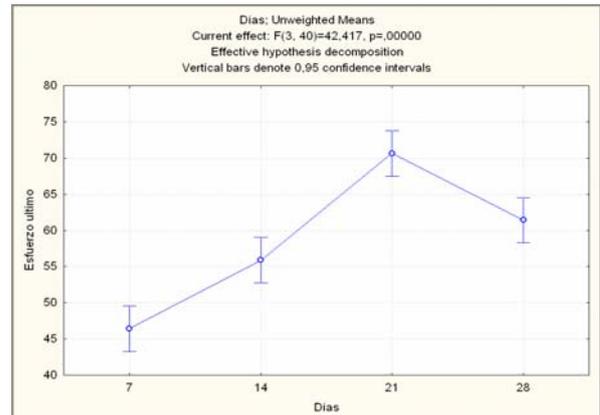
En ambos grupos de porcentajes solo se analizaron los esfuerzos de ruptura. El método utilizado fue el de ANOVA, buscando diferencias significativas entre los tratamientos, en este caso los porcentajes. Al identificar que existen diferencias entre los porcentajes se buscó el porcentaje en donde se obtenía la mayor resistencia, utilizando el método de Tukey. Al final se logró determinar el porcentaje con la más alta resistencia.



**Figura 4.3. Esfuerzo de ruptura vs. Porcentaje**

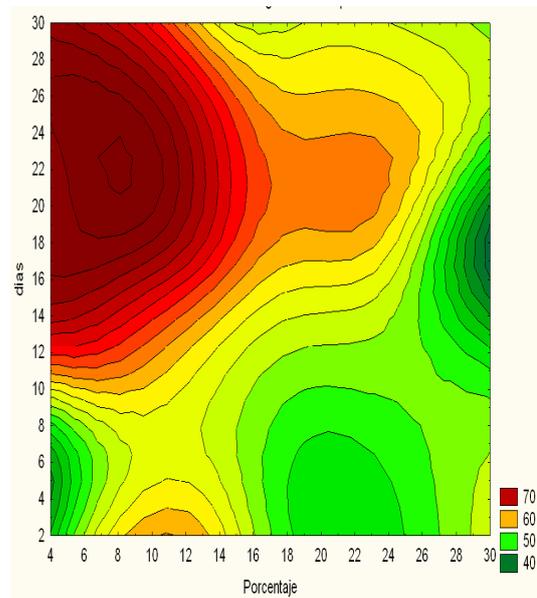
Al interpretar el gráfico obtenido, se observan que las medias entre el porcentaje de 20 y 25% son parecidas, mientras en los otros tratamientos son distintas, además se observa el mejor tratamiento, obteniendo la mejor resistencia en el 10% y la de menor resistencia en el 15%.

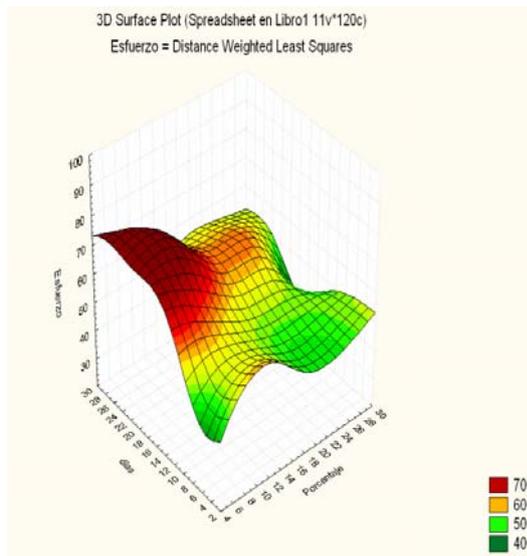
También se puede interpretar de manera global, con respecto a los datos ingresados, el valor máximo de resistencia a la compresión, dependiendo de los días de curado. Obteniendo la más alta resistencia a los 21 días en total entre todos los porcentajes.



**Figura 4.4. Esfuerzo de ruptura vs. Días.**

Finalmente se obtuvo, un gráfico en tres dimensiones uniendo los datos de porcentajes normales y los de la validación, en los que se observa claramente el rango en el que se obtiene los valores más altos de resistencia a la compresión dependiendo del porcentaje y los días de curado.





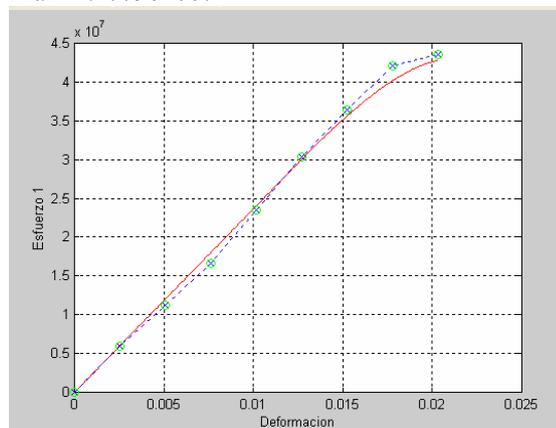
**Figura 4.5. Gráfica Global de esfuerzos últimos, días y porcentajes. Esfuerzo de ruptura vs. Días.**

### 4.3. Verificación del Modelo

En la verificación del modelo que se obtiene al ingresar los valores del Módulo de elasticidad, las constantes del material  $a$  y  $m$ , el rango de deformación y el esfuerzo de fluencia. Se obtuvo la siguiente aproximación con una de las probetas.

Para esta probeta se ingresaron los siguientes valores, y se muestra el valor del esfuerzo máximo obtenido en el programa.

$E=2365e6$ ;  
 $m=0.0036$ ;  
 $a=0.43$ ;  
 $de=0.00005$ ;  
 $def=0.02032$ ;  
 $Gy(1)=30.45e6$ ;  
 $Max=4.2779e+007$



**Figura 4.6. Validación del modelo a los siete días.**

Se observa una buena aproximación del modelo obtenido al ingresar los datos, con la gráfica del experimento. Finalmente se registro todas las constantes y datos de ingreso al programa en la tabla siguiente, en las que también se encuentra el valor máximo obtenido en el modelo y en el experimento.

10 % limolita					
días	probeta	a	m	$\sigma_{\text{máx}}$ programa	$\sigma_{\text{máx}}$ experim
7	primera probeta	0.43	0.0048	57.42	57.93
7	segunda probeta	0.43	0.0036	42.77	43.51
7	tercera probeta	0.43	0.0044	44.49	46.06
14	primera probeta	0.43	0.0062	42.58	45.08
14	segunda probeta	0.43	0.0073	61.92	66.64
14	tercera probeta	0.43	0.0066	47.87	52.92
21	primera probeta	0.43	0.0035	84.77	85.53
21	segunda probeta	0.43	0.0027	82.85	83.75
21	tercera probeta	0.43	0.0029	89.52	92.65
28	primera probeta	0.43	0.0031	69.62	70.38
28	segunda probeta	0.43	0.0034	73.09	75.73
28	tercera probeta	0.43	0.0043	65.3	71.27

**Tabla 4.3. Datos de  $a$  y  $m$  para ajuste del modelo – 10% Limolita**

### 5. Conclusiones.

1. En los ensayos de compresión, los esfuerzos últimos obtenidos, variaron o estuvieron muy dispersos, para ciertos días y probetas en los que se realizaron los ensayos, al analizar las probetas al momento de la ruptura, se veían porosidades, por lo que se concluía que la inclusión de burbujas en la probeta hace que disminuya su resistencia a la ruptura.
2. En el análisis de los resultados, en los ensayos en los primeros días se obtuvo una resistencia inicial, a medida que aumentaban los días de curado, se llegó un punto en donde obtuvieron su máxima resistencia, y luego comenzó a bajar, esto se debe a la hidratación de las probetas, como el curado fue al aire, las probetas no estuvieron suficientemente hidratadas, obteniendo su mayor resistencia a los 21 días, luego disminuyó la resistencia. Lo mismo se observó en el porcentaje utilizado para la validación, obteniendo la más alta resistencia a los 18 días y al pasar los días disminuye. Con esto se concluye que esto es por falta de hidratación de las muestras.
3. Por medio del análisis estadístico, se obtuvo, los porcentajes en los que se obtenía de manera global el mayor esfuerzo a la compresión, en la ruptura. Uniendo los datos de la validación y los porcentajes normales, se tiene un rango en el

porcentaje de limolita, que está entre 7.5 y 12.5%, en este rango es donde se obtuvieron los mejores resultados.

4. El mantener suficientemente hidratadas las probetas, hace que el valor de esfuerzo aumente, conforme pasan los días de curado, esto no sucede con el curado al aire, esto hace que los valores de respuesta de esfuerzo de ruptura conforme pasan los días de curado, varíen de manera polinomial, para el 10% y 12.5% que es la validación se ajusto mejor una curva polinómica de tercer grado, obteniendo una correlación alta.
5. Los valores de  $a$  y  $m$ , obtenidos y el suponer que el esfuerzo de fluencia es igual a 0.7 el esfuerzo último, se obtiene una aproximación muy buena para los datos obtenidos en el experimento, por lo cual el modelo si aplica para mi experimento. Además que el esfuerzo máximo último obtenido en el experimento, se aproxima al obtenido experimentalmente en cada probeta.

## 6. Recomendaciones

1. En la experimentación, es de gran importancia, obtener una granulometría de la limolita, igual a la del cemento, para obtener mejor resistencia a la compresión en la mezcla.
2. Se obtuvo que los datos obtenidos experimentalmente se ajustan mejor al modelo, en los obtenidos en la máquina con una compresión constante, lo que sugiere que para futuros ensayos se realice en máquinas con las mismas condiciones de operación o más avanzadas, lo que haga reducir el error experimental.
3. Antes del ensayo, es de gran importancia limpiar cada muestra, eliminando las incrustaciones o filos, los cuales se pondrán en contacto con las caras del bloque de la máquina. Resultados mucho más bajo que la verdadera fuerza se obtendrá debido a que las caras del cubo muestran que no son realmente de superficies planas.
4. Para el análisis estadístico es de gran importancia, tener un modelo definido, para ser evaluado, considerar que todos los supuestos en el análisis se cumplan, esto hará que los resultados obtenidos, tengan una confiabilidad elevada.

## 7. Referencias

- [1] TAYLOR H, La Química de los cementos, vol. 1, Ediciones URMO, Impreso en España.
- [2] REYES SARA, “Manufactura del cemento Portland”, Universidad Veracruzana, México, www.monografias.com, Marzo, 2008.
- [3] ICCYC, Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto, www.iccyc.com, Marzo, 2008
- [4] CARRASCO M., “Materiales Cementicios”, Universidad Tecnológica Nacional, www.monografias.com, Marzo, 2008.
- [5] \_\_\_\_\_, “Cemento Portland”, www.comaceimport.com, Febrero, 2008.
- [6] \_\_\_\_\_, “Cemento”, www.cement.org, Marzo, 2008.
- [7] FOLK R.L., “Petrology of sedimentary rocks”, 1965, 2008
- [8] SUAREZ J., “Ensayo de compresión para concreto”, www.tullave.com, Marzo, 2008
- [9] MATHER B., COMITÉ, “Terminología del cemento y el hormigón”, www.ciccp.com, Febrero, 2008
- [10] Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., MacLead N. and McGrath R, Design and Control of Concrete Mixtures, Seventh Canadian Edition 2002, Chapter 9.
- [11] \_\_\_\_\_, “Curado del Concreto”, www.google.com, Marzo, 2008.
- [12] INCI 4035, “Cemento Portland - Materiales de Ingeniería Civil”, publicación primavera del 2008, pp. 4 – 17
- [13] GOTTHARD F., Tratado del Hormigón Armado, Editorial Gustavo GILI S.A., Barcelona 1970, impreso en España.
- [14] PETKOVA V., “The Use of mathematical modelling in the composition of a composite material, Cement and Concrete Research 6 June 2002, pp 927 – 930
- [15] ROBALINO E., “El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánico”, TESIS – Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL, 2004, pp. 18 - 22.
- [16] ASTM C109/C109M, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)
- [17] WALPOLE R.E., Probabilidad y Estadística para Ingenieros, Editorial Prentice Hall, 1998, 6ª edición, Impreso en México
- [18] PEREZ C., Estadística Aplicada a través de Excel, Editorial Prentice Hall, 2005, Madrid – España.