



# **ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

“Determinación de la variación que se genera en la resistencia a la compresión cuando se adiciona 10% de Limolita con un curado bajo agua al cemento Portland tipo I”

### **TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERA MECÁNICA**

Presentada por:

Gladys Janet Gómez Bernal

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## AG🗨️DECIMIENTO

A Dios, por ser mi luz y mi guía en el camino. A mis padres, por todo su esfuerzo, por ser mi fuerza, mi apoyo incondicional y mi fuente de inspiración. A mis hermanos, por su ayuda y sus consejos. Finalmente a mi Director de Tesis, por su dirección para culminar este trabajo.

## DEDICATORIA

ESTE TRABAJO ESTÁ  
DEDICADO A MI MADRE,  
GLADYS VICTORIA, QUE  
HA SIDO EL MOTOR DE  
MI VIDA, QUIEN SIEMPRE  
ME HA IMPULSADO A  
SEGUIR ADELANTE Y  
GRACIAS A LA CUAL HE  
OBTENIDO TODOS MIS  
TRIUNFOS.

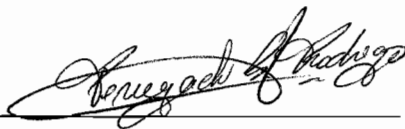
## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Dra. Cecilia Paredes V.  
DELEGADA POR EL  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTA



Ing. Mauricio Cornejo M.  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Rodrigo Perugachi B.  
VOCAL

## DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”



---

Gladys Janet Gómez Bernal

## RESUMEN

En la actualidad, el cemento Pórtland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del concreto.

Este trabajo se enfoca en determinar el cambio en la resistencia a la compresión con la introducción de 10% de Limolita en el cemento Pórtland tipo I y con un curado en agua. Para este efecto, se procede a recopilar datos mediante la elaboración de tres réplicas en moldes cúbicos en donde se deposita el material correspondiente a Limolita así como el material referente a Cemento Pórtland Tipo I con una relación agua/cemento correspondiente a 0.3. Luego a ello, se procede a curar la mezcla los días correspondientes a la fase de experimentación: 7, 14, 21 y 28 días así como también a la fase de validación: 4, 11, 18 y 25 días. Transcurridos dichos días se somete las muestras a ensayo de compresión para poder obtener los esfuerzos de ruptura y así mediante un adecuado diseño de experimentos, con una confiabilidad del 95%, determinar si existe una relación que vincule la variable dependiente (Esfuerzo de Ruptura) con las variables independientes (Porcentaje de Limolita y Días de Curado), además de determinar qué tratamiento genera una mejor variación en el valor correspondiente a la resistencia a la compresión. Adicional a ello, se compara los resultados obtenidos con aquellos referentes al 0% de aditivo que para este estudio representa el tratamiento control. Finalmente, mediante un código fuente adecuado se efectúa la debida modelación del experimento, tratando de obtener las curvas teóricas y experimentales con un error mínimo de graficación.

# INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
GENERALIDADES	
1.1. Planteamiento del Problema.....	4
1.1.1. Justificación del Estudio.....	5
1.1.2 Hipótesis.....	5
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo General.....	6
1.2.2.Objetivos Específicos.....	6
1.3. Metodología.....	7
1.4. Estructura de la Tesis.....	8

## CAPITULO 2

### 2. MARCO TEORICO

2.1. Generalidades.....	11
2.2. Tipos de Cemento.....	13
2.2.1. Cementos Portland.....	13
2.2.2. Cemento Portland Puzolánico.....	15
2.2.3. Otros cementos.....	17
2.3. Propiedades del Cemento.....	19
2.3.1. Resistencia.....	19
2.3.1.1. Factores que inciden en la resistencia.....	20
2.3.2. Hidratación.....	22
2.3.3. Peso Específico.....	24
2.3.4. Superficie específica o finura.....	25
2.4. Aditivos.....	26
2.4.1. Funciones de los aditivos.....	26
2.5. Curado del Cemento.....	27
2.5.1. Factores que determinan un buen curado.....	27
2.5.2. Métodos de curado.....	28
2.6. Estado del Arte de la modelación del comportamiento de la pasta de cemento Puzolánicos.....	29



## CAPITULO 3

### 3. METODOLOGÍA

3.1. Recolección de Datos.....	32
3.2. Diseño de Experimentos.....	34
3.3. Prueba con 0% de aditivo.....	35
3.4. Experimentación.....	35
3.5. Modelización del experimento.....	40

## CAPITULO 4

### 4. ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS

4.1. Tabulación de Datos y Resultados.....	41
4.2. Análisis de Resultados.....	57
4.3. Identificación de cambio de propiedades.....	77

## CAPITULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	85
5.2 Recomendaciones.....	88

## ANEXOS

- Código fuente
- Fotos

## BIBLIOGRAFIA

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Metodología de la Investigación.....	7
Figura 3.1 Distribución de masas al 10% de limolita.....	37
Figura 3.2 Distribución de masas al 12.5% de limolita.....	37
Figura 4.25 Esfuerzo – Deformación - Tabulación de Error.....	58
FIG. 4.26 Residuos para esfuerzo de ruptura.....	76
Figura 4.27 Grafico en el espacio – Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje de limolita vs. Días de curado.....	83
Figura 4.28 Grafico en el espacio – Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje de limolita vs. Días de curado (Validación).....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características de los materiales puzolánicos.....	15
Tabla 2	Cementos sustituidos a base de cemento portland.....	16
Tabla 3	Cementos generados con desechos Químicamente activados.....	18
Tabla 4	Principales acciones que afectan la durabilidad del concreto.....	21
Tabla 5.	Características de la máquina de experimentación (carga máxima: 30000 kgf).....	32
Tabla 6.	Características de la máquina de experimentación (carga máxima: 30000 lbf).....	33
Tabla 7.	Tamices.....	36
Tabla 8.	Datos experimentales (10% - 7 días).....	40
Tabla 9.	Datos experimentales (10% - 14 días).....	41
Tabla 10.	Datos experimentales (10% - 21 días).....	41
Tabla 11.	Datos experimentales (10% - 28 días).....	42
Tabla 12.	Datos experimentales (12,5% - 4 días).....	43
Tabla 13.	Datos experimentales (12,5% - 11 días).....	44
Tabla 14.	Datos experimentales (12,5% - 18 días).....	44

Tabla 15. Datos experimentales (12,5% - 25 días).....	45
Tabla 16. Esfuerzos de ruptura individuales para cemento con diferentes porcentajes de limolita y a diferentes días de curado (experimentación).....	46
Tabla 17. Esfuerzos de ruptura individuales para cemento con diferentes porcentajes de limolita y a diferentes días de curado (validación).....	47
Tabla 18.1. Resumen: muestra 1 - 10% - 7 días.....	48
Tabla 19.1. Resumen: muestra 2 - 10% - 7 días.....	49
Tabla 20.1. Resumen: muestra 3 - 10% - 7 días.....	50
Tabla 21.1. Resumen: muestra 1 - 10% - 14 días.....	50
Tabla 22.1. Resumen: muestra 2 - 10% - 14 días.....	50
Tabla 23.1. Resumen: muestra 3 - 10% - 14 días.....	51
Tabla 24.1. Resumen: muestra 1 - 10% - 21 días.....	51
Tabla 25.1. Resumen: muestra 2 - 10% - 21 días.....	51
Tabla 26.1. Resumen: muestra 3 - 10% - 21 días.....	52
Tabla 27.1. Resumen: muestra 1 - 10% - 28 días.....	52
Tabla 28.1. Resumen: muestra 2 - 10% - 28 días.....	52
Tabla 29.1. Resumen: muestra 3 - 10% - 28 días.....	53
Tabla 30.1. Resumen: muestra 1 – 12.5% - 4 días.....	53

Tabla 31.1. Resumen: muestra 2 – 12.5% - 4 días.....	53
Tabla 32.1. Resumen: muestra 3 – 12.5% - 4 días.....	54
Tabla 33.1. Resumen: muestra 1 – 12.5% - 11 días.....	54
Tabla 34.1. Resumen: muestra 2 – 12.5% - 11 días.....	54
Tabla 35.1. Resumen: muestra 3 – 12.5% - 11 días.....	55
Tabla 36.1. Resumen: muestra 1 – 12.5% - 18 días.....	55
Tabla 37.1. Resumen: muestra 2 – 12.5% - 18 días.....	55
Tabla 38.1. Resumen: muestra 3 – 12.5% - 18 días.....	56
Tabla 39.1. Resumen: muestra 1 – 12.5% - 25 días.....	56
Tabla 40.1. Resumen: muestra 2 – 12.5% - 25 días.....	56
Tabla 41.1. Resumen: muestra 3 – 12.5% - 25 días.....	57
Tabla 42. Tabulación de error entre modelo experimental y modelo matemático – parte experimentación.....	59
Tabla 43. Tabulación de error entre modelo experimental y modelo matemático – parte validación.....	59
Tabla 44. Análisis de varianza (Fase Experimentación).....	61
Tabla 45. Comparación de modelos estadísticos polinomiales para datos experimentales.....	63
Tabla 46. Comparación de modelos estadísticos polinomiales para datos de validación.....	64

Tabla 47. Estadísticas de la regresión (Fase experimental).....	66
Tabla 48. Valores P para coeficientes de regresión (Ecuación logarítmica con intercepción) – Fase experimental.....	67
Tabla 49. Valores P para coeficientes de regresión (Ecuación logarítmica sin intercepción) – Fase Experimental.....	67
Tabla 50. Análisis de residuales – Fase Experimental.....	68
Tabla 51. Estadísticas de la regresión (Fase Validación).....	69
Tabla 52. Análisis de varianza (Fase Validación).....	69
Tabla 53. Valores P para coeficientes de regresión (Ecuación logarítmica con intercepción) – Fase Validación.....	70
Tabla 54. Valores P para coeficientes de regresión (Ecuación logarítmica sin intercepción) – Fase validación.....	70
Tabla 55. Análisis de residuales – Fase Validación.....	71
Tabla 56. Error entre modelo teórico y práctico – fase experimentación..	73
Tabla 57. Error entre modelo teórico y práctico – fase validación.....	75
Tabla 58. Análisis de Tukey: esfuerzo de ruptura vs. Porcentaje de limolita.....	78
Tabla 59. Análisis de Tukey: esfuerzo de ruptura vs. Días de curado....	79
Tabla 60. Análisis de Tukey: selección del mejor tratamiento.....	80

Tabla 61. Análisis de Tukey: selección del mejor tratamiento (cemento portland tipo (IV)).....	80
Tabla 62. Análisis de Tukey: esfuerzo de ruptura vs. Días de curado (validación).....	81
Tabla 63. Análisis de Tukey: selección del mejor tratamiento (validación).....	82
Tabla 64. Análisis de Tukey: selección del mejor tratamiento – validación (cemento portland tipo IV).....	82



# INTRODUCCIÓN

Debido a las exigencias del mercado y de la producción de cemento Pórtland, es cada vez más frecuente la elaboración de cementos con dos o más adiciones a partir de la molienda separada de sus constituyentes, dando origen a la formulación de los cementos a medida. Estudios han demostrado que cuando el contenido de adiciones es alto, la utilización de puzolana y escoria en este tipo de cementos presenta la peculiaridad de disminuir la resistencia inicial del cemento resultante. Sin embargo, si algunas o ambas adiciones se activan, este problema puede minimizarse.

La producción de cementos con dos o más adiciones a partir de la molienda separada de sus constituyentes (cementos a medida) permite la elaboración de cementos con una amplia variedad y porcentaje de adiciones, sin aumentar la complejidad del sistema de producción, en función de los cuales se pueden obtener las propiedades resistentes y durables preestablecidas. Las puzolanas son un material natural o artificial compuesto principalmente por sílice amorfa, que por si solas poseen poco o ningún valor cementante o propiedades hidráulicas, pero que finamente dividido y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio o cal y forman un compuesto que posee propiedades aglomerantes.

Actualmente son muy conocidos los beneficios tecnológicos, económicos, y el menor impacto medioambiental que produce el empleo en forma

aislada de puzolana natural y de escoria granulada de alto horno como reemplazo parcial de cemento Pórtland. Sin embargo, la influencia conjunta de estas adiciones sobre el mecanismo de hidratación y, en consecuencia, sobre las propiedades mecánicas de los cementos compuestos resultantes aún no está bien establecida.

Es conocido que el desarrollo de la resistencia de un cemento con adiciones hidráulicamente activas depende del efecto físico y de la reacción de la adición. Las partículas de escoria y puzolana son generalmente menos reactivas que las del cemento Pórtland. Pero cuando estas partículas, finamente molidas, se dispersan dentro de la matriz cementante, producen un gran número de sitios de nucleación para la precipitación de los productos de hidratación del cemento Pórtland, acelerando su resistencia inicial. Este efecto físico, tiende a disminuir la pérdida de resistencia a edad temprana del cemento compuesto, dado por la menor cantidad de material inicialmente reactivo. Las partículas de escoria o puzolana reaccionan con los hidróxidos alcalinos generando un gradual decrecimiento del CH y un incremento del CSH y de aluminosilicatos de calcio similares a los obtenidos durante la reacción del cemento Pórtland. Como consecuencia de esta reacción química, se produce el refinamiento de los granos y la segmentación de los poros, aumentando la densidad de la matriz, la resistencia y la inmunidad de la pasta frente al ingreso de los agentes agresivos. Por otra parte, debido a la baja reactividad inicial de estas adiciones, los cementos con escoria y puzolana presentan una disminución de la resistencia inicial, que suele limitar su empleo. Pero, este inconveniente puede mitigarse a partir de la

activación de una o ambas adiciones. Así, se pueden obtener adecuadas resistencias iniciales con la activación física, por el aumento en la finura de la adición, la activación térmica, por el incremento en la temperatura de curado, y la activación química, por la incorporación de hidróxidos alcalinos a la mezcla. Por último, en investigaciones previas se ha analizado la influencia del empleo conjunto de escoria granulada de alto horno y de puzolana natural sobre la resistencia y el agua no evaporable de morteros.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES.

### 1.1 Planteamiento del Problema.

En la actualidad, el cemento Portland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto.

Este trabajo se enfoca en determinar la variación existente en lo referente al valor correspondiente a la resistencia a la compresión de un material compuesto como el cemento ya que en la actualidad se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en las nuevas construcciones. Por esta razón, surge la necesidad de determinar si existe variación o no en el valor correspondiente a la resistencia a la compresión cuando se le añade cierto porcentaje de puzolana para poder con estudios posteriores, descubrir nuevos materiales para la construcción.

El **desarrollo** de esta investigación se basará en realizar ensayos mecánicos a compuestos formados por cemento PORTLAND tipo I con cierto tipo de puzolana a diferentes porcentajes y a tiempos de reacción diferentes para así, estudiar la afectación que la adición de puzolana tiene sobre la resistencia a la compresión por cada tiempo de ensayo. Además, se incluirá el estudio de material referencial (0% puzolana) para cada una

para cada una de las condiciones de curado establecidas con la cual se permitirá la comparación con los compuestos que incluyen los aditivos.

### **1.1.1 Justificación del Estudio.-**

Debido a la competitividad en el sector industrial así como la exigencia del mercado por la necesidad de productos más naturales y con mayor índice de vida útil, nace la oportunidad de realizar un análisis del cemento Portland comercial para que, mediante el uso de ciertos porcentajes de aditivos y a diferentes tiempos de ensayos, poder descubrir si existen mejoras significativas en lo referente a su resistencia a la compresión en la calidad del Cemento Portland Tipo I.

Estudios han demostrado que agregar material puzolánico incrementa la resistencia y la durabilidad del concreto. Esta premisa nos permite continuar con el proceso investigativo para poder confirmar esta hipótesis y así aportar con el desarrollo de los materiales de construcción.

### **1.1.2 Hipótesis**

La hipótesis del presente estudio se refiere que al añadir 10% de limolita al Cemento Portland Tipo I se obtiene la variación en la Resistencia a la Compresión

## 1.2 Objetivos.

### 1.2.1 Objetivo general.

Determinar la variación que se genera en el valor correspondiente a la resistencia a la compresión, cuando se adiciona 10% de limolita con curado bajo agua en el cemento Portland tipo I.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Por medio de herramientas referentes al programa Matlab y conocimientos de Inelasticidad, generar un código fuente adecuado que nos permita conocer el comportamiento ideal del cemento en un grafico esfuerzo vs. Deformación.
- Mediante teoría de Regresión Lineal Múltiple, obtener un modelo matemático que genere la relación existente entre una variable dependiente (Resistencia a la compresión) y dos variables independientes (Porcentaje de limolita y Días de curado).
- Comparar, estadísticamente, los resultados obtenidos individualmente con aquellos referentes al 0% de aditivo para que podamos determinar si existieron o no mejoras significativas en el valor referente a la resistencia a la compresión.

### 1.3 Metodología.

La metodología de la siguiente tesis está graficada en la figura 1.1 y se detalla a continuación:

Para la ejecución del experimento, el material a analizarse será una pasta de cemento compuesto que comprende Cemento Pórtland tipo I, 10% de Limolita, Agua.

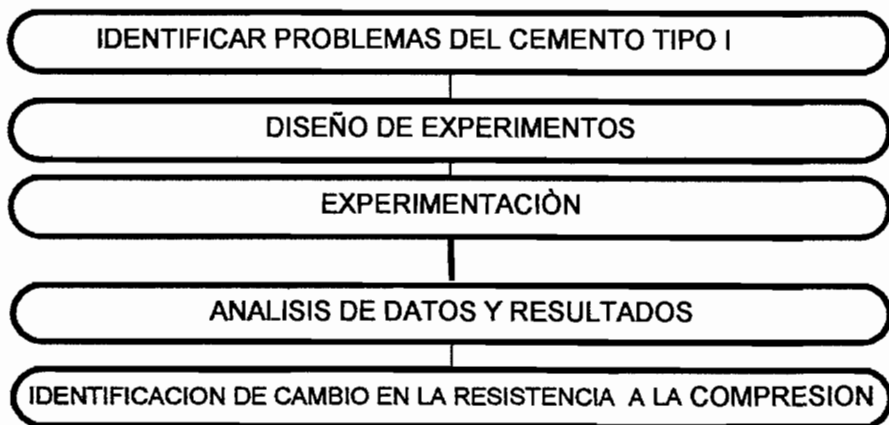


FIGURA 1.1 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta mezcla se formará en cubos de  $50*50*50 \text{ mm}^3$  (3 replicas) para las pruebas requeridas, siendo la función de respuesta la resistencia a la compresión uniaxial.

Las variables independientes que se incluirán en el trabajo serán el porcentaje de aditivo (10%) y tiempo de curado (Curado en agua). Las variables cuyos valores se mantendrán constantes serán la relación agua/mezcla y la granulometría del material utilizado.

Cada compuesto será analizado para realizar ensayos mecánicos a 7, 14, 21 y 28 días para de esta manera estudiar la afectación que la puzolana tiene hacia la resistencia a la compresión por cada tiempo

de ensayo. Además, se incluirá material referencial (0% puzolana) para cada una de las condiciones de curado establecidas con lo cual se permitirá la comparación con los compuestos que incluyen los aditivos.

Mediante el uso del diseño de experimentos, se realizará la planificación y el análisis de la experimentación y se utilizarán herramientas estadísticas, que permitan validar el modelo matemático generado al experimentar a varios días de endurecimiento, el porcentaje de puzolana agregada a la mezcla.

Todos estos análisis, junto con la toma de decisión final, se los realizará con un nivel de confiabilidad del 95%.

Además, se utilizaran conocimientos de elementos finitos para realizar la debida modelación del comportamiento de un material compuesto como lo es el Cemento.

#### **1.4 Estructura de la Tesis.**

La **estructura** de la siguiente tesis es la siguiente:

El **Capitulo 1** se llama **Generalidades** y en él se detalla información referente al planteamiento del problema y su respectiva justificación así como también la descripción del objetivo general así como los objetivos específicos, la metodología y la estructura de la tesis.



El Capítulo 2 denominado **Marco Teórico**, incluye una descripción de conceptos, características y procedimientos referentes al tema de este proyecto así como también herramientas estadísticas y de simulación a utilizarse en este estudio. Además, se hará referencia a cierto caso de estudio que describe un procedimiento similar como el aplicado en esta tesis.

El Capítulo 3 será denominado **Metodología**; en él se recolectará los datos referentes al experimento a llevarse a cabo para esta tesis así como también se realizará una adecuada descripción referente al diseño de experimentos, prueba con 0% de aditivo y la experimentación propiamente dicha.

El Capítulo 4, cuyo tema principal será el **Análisis de datos y resultados**, se realizará una tabulación de datos y resultados con su respectiva ponderación así como también se identificará el cambio de propiedades respectivo que sufrirá el material al ser expuesto a varios porcentajes de limolita y a diferentes tiempos de reacción con un curado bajo agua.

Finalmente, el Capítulo 5, denominado **Conclusiones y Recomendaciones**, estará compuesto de las respuestas a los objetivos planteados inicialmente, así como también constará, todas

las precauciones a tomar para futuros experimentos respecto a lo ocurrido en la evolución de este.

Se adjuntará una sección denominada Anexos, en donde se dará a conocer el código fuente utilizado en el experimento así como también fotos, gráficos y figuras correspondientes al desarrollo del proceso.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Generalidades

El **concreto** es el material constituido por la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregados y opcionalmente aditivos, que inicialmente denota una estructura plástica y moldeable y que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes, lo que hace un material ideal para la construcción.

La **pasta** es el resultado de la combinación química del cemento y el agua y se la considera la fase continua del concreto, ya que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto.

Se denomina **cemento** a un aglutinante o conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica capaz de fraguar y endurecer al reaccionar con el agua y adquiriendo por ello consistencia pétreo, el hormigón o concreto. Su uso está muy generalizado, siendo su principal función la de aglutinante [1].

El **agregado** es la fase discontinua del concreto, dado que sus diversas partículas no están unidas o en contacto unas con otras, si no se encuentran separadas por espesores diferentes de pasta reducida.

Las propiedades del concreto están determinadas fundamentalmente por las características físicas y químicas de sus componentes. La propiedad básica que se procura obtener en el concreto es una determinada resistencia mecánica además de otras características que lo hagan resistente y durable al verse sometido a acciones dañinas específicamente previstas.

Más del 75% del volumen del concreto está ocupado por los agregados, por lo que las propiedades de los mismos tienen influencia definitiva sobre el comportamiento del hormigón [2].

Debido a las exigencias del mercado y de la producción de cemento Portland, es cada vez más frecuente la elaboración de cementos con dos o más adiciones a partir de la molienda separada de sus *constituyentes*, dando origen a la *formulación de los cementos a medida*. Estudios han demostrado que cuando el contenido de adiciones es alto, la utilización de puzolana y escoria en este tipo de cementos presenta la peculiaridad de disminuir la resistencia inicial del cemento resultante. Sin embargo, si algunas o ambas adiciones se activan, este problema puede minimizarse [3].

La producción de cementos con dos o más adiciones a partir de la molienda separada de sus *constituyentes* (cementos a medida) permite

la elaboración de cementos con una amplia variedad y porcentaje de adiciones, sin aumentar la complejidad del sistema de producción, en función de los cuales se pueden obtener las propiedades resistentes y durables preestablecidas.

*PUZOLANAS.-* Las puzolanas son un material natural o artificial compuesto principalmente por sílice amorfa, que por si solas poseen poco o ningún valor cementante o propiedades hidráulicas, pero que finamente dividido y en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio o cal y forman un compuesto que posee propiedades aglomerantes.

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

## 2.2 Tipos de Cemento

### 2.2.1 Cementos Pórtland

El cemento Pórtland es el ingrediente ligante o adhesivo del concreto. Está compuesto principalmente por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro hasta en un 95%. Las fases presentes

comprenden principalmente silicatos de calcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  y  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y en menor proporción aluminato de calcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y ferro-aluminato de calcio ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Las propiedades de endurecimiento del cemento se logran mediante la mezcla de éste con el agua. Esto resulta en la formación de productos de hidratación que poseen cualidades ligantes y baja solubilidad en agua (las estructuras de cemento pueden subsistir aun bajo el agua). La reacción química principal se da con el silicato tri-cálcico y el agua [4].

El cemento Pórtland tiene características peculiares con respecto a otros materiales de construcción. Se requieren conocimientos en dos líneas principales para su explotación adecuada. En primer lugar sobre los procesos de fabricación, que involucran materias primas (selección y formulación), procesamiento térmico (calentamiento y enfriamiento) y molienda; sólo un cemento bien procesado tiene buen potencial de desempeño. En segundo lugar vienen los problemas involucrados en la utilización del cemento, donde se requiere tener conocimientos sobre la química de hidratación, interacción con agregados y con fibras, reacciones nocivas, resistencia al ataque químico, etc. La preparación de un buen concreto puede ser cuestión de buena suerte, pero en general la obtención de buenas propiedades y buena durabilidad (por muchos años), lejos de ser trivial está ligada al dominio del proceso.

### 2.2.2 Cemento Portland Puzolánico

Las puzolanas son aquellos materiales de composición rica en  $\text{SiO}_2$ , similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos. Ejemplos de éstos son la ceniza volcánica (empleada en nuestro país), la sílice condensada, algunos caolines, ceniza de cascarilla de arroz y desechos geotermales. La tabla 1 presenta un resumen de algunas de sus características. Todos estos materiales pueden ser empleados como reemplazo parcial del cemento Pórtland y algunos como reemplazo total. Los materiales puzolánicos son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación del cemento.

**TABLA 1**

#### **CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PUZOLÁNICOS**

<b>Ligante básico</b>	<b>Materiales de reemplazo</b>	<b>Resistencia mecánica</b>
	Ceniza volante	√
	Ceniza volcánica	√
<b>Cemento</b>	Escoria de alto horno	√
<b>Portland</b>	Sílice condensada	√√
	Caolines	√
	Sílice geotérmica	√√

**TABLA 2**  
**CEMENTOS SUSTITUIDOS A BASE DE CEMENTO**  
**PORTLAND**

	Procesamiento adicional requerido	Características	Origen
Sílice condensada	Aglomeración para su manejo	Partículas esféricas de tamaño < 1µm. Alta área superficial	Vapores condensados de la producción de carburo de silicio
Ceniza volcánica	Molienda	Reactividad variable, partículas de forma irregular	Emisiones volcánicas
Ceniza de cascarilla de arroz	Calcinación, se aprovecha el calor generado como combustible	Morfología irregular, tamaño muy fino, alta área superficial	Producción de grano de arroz
Sílice geotérmica	Lavado	Morfología irregular, tamaño submicrónico, alta área superficial	Incrustaciones en líneas de vapor geotermal (generación de electricidad).
Caolines	Tratamiento térmico hasta 800°C	Tamaño de partícula fina, alta área superficial	Mineral
Ceniza volante		Partículas esféricas de tamaño variable similar o menor a las del cemento Portland	Generadas por la combustión de carbón para la generación de electricidad

Los materiales hidráulicos son de los más comúnmente empleados en la escoria de alto horno granulada; sin embargo, es posible emplear escorias de otros procesos como el de aceración, producción de fósforo, cobre, zinc y plomo. Pueden considerarse como materiales sintéticos dado que son subproductos. En términos generales requieren de molienda antes de ser empleados como reemplazo del cemento Portland.

Para el caso de escoria de alto horno (producción de hierro), los niveles de sustitución por cementos son de 10 a 90% y varían según las normas locales. Al igual que las puzolanas,



interacciona con los productos de hidratación del cemento pero la reacción es diferente ya que los materiales hidráulicos, como la escoria de alto horno, contienen calcio en su composición química.

### 2.2.3 Otros cementos

Otro esquema es el de los desechos químicamente activados, por ejemplo las escorias de alto horno activadas. En este caso no se usa cemento Portland y las reacciones de hidratación de la escoria se activan con agentes alcalinos como hidróxido de sodio, silicato de sodio y carbonato de sodio. Las propiedades mecánicas resultantes dependen del tipo de agente activante: generalmente las mejores propiedades se obtienen con silicato de sodio y las más pobres con hidróxido de sodio. Algunos estudios sobre la adición de desecho de sílice geotérmica al sistema de escoria con NaOH indican incrementos significativos de las propiedades mecánicas. Los productos de reacción generados son similares al CS-H del cemento Portland. La posibilidad de combinar algunos desechos con la escoria activada con agentes de bajo costo ha dado resultados promisorios. Las cenizas volantes activadas están también bajo estudio con buenas propiedades mecánicas. La tabla 3 presenta algunos esquemas con pequeñas fracciones o nada de cemento Portland. Otro esquema alternativo con gran potencial y que puede presentar ligereza, buen acabado y rápido fraguado es el

que involucra yeso+cemento+puzolana. El costo de estos materiales puede implicar ahorros de hasta 70%; sin embargo, la durabilidad de estos sistemas no está bien definida. Las posibilidades de igualar estos esquemas con materiales sólo de desecho o subproductos son interesantes.

**TABLA 3**

**CEMENTOS GENERADOS CON DESECHOS QUÍMICAMENTE  
ACTIVADOS**

Ligante básico	Características	Observaciones
Escoria de alto horno activada por álcalis	Excelentes propiedades mecánicas, 0% cemento Pórtland	Posiblemente pueda incorporar otros desechos, ahorros de hasta 40% en costos
Ceniza volante activada por álcalis	Propiedades mecánicas aceptables, 0% cemento Pórtland <sup>18</sup>	
Escoria de producción de fósforo y cobre <sup>19</sup>	Buenas propiedades mecánicas, 0% cemento Pórtland	
Cementos de sulfoaluminatos de calcio <sup>20</sup>	Relativamente reciente, en desarrollo con excelentes propiedades	Menor demanda energética que el cemento Pórtland
Cementos supersulfatados	5% cemento Pórtland, 80-85% escoria, 10-15% yeso	No soportan curado a alta temperatura

## 2.3 Propiedades del Cemento

La capacidad del concreto, como material de construcción, para prestar un buen servicio permanente, depende sustancialmente de que posea las características y propiedades adecuadas para resistir satisfactoriamente y por largo tiempo, los efectos de las sollicitaciones mecánicas y las acciones detrimentales inherentes a las condiciones en que opera la estructura. La propiedad básica que se procura obtener en el concreto es una determinada resistencia mecánica así como también una serie de características y propiedades que lo hagan resistente y durable al verse sometido a las acciones dañinas específicamente previstas [5] .

### 2.3.1 Resistencia

La resistencia mecánica del concreto ha sido tradicionalmente la propiedad más identificada con su comportamiento como material de construcción, lo cual se ha considerado atribuible a tres principales razones:

- En la mayoría de los casos, la resistencia mecánica, ya sea de compresión o tensión, tiene influencia directa en la capacidad de carga de las estructuras.
- Es la propiedad más fácilmente determinable en el concreto
- Los resultados de su determinación pueden ser utilizados como datos índices de otras propiedades del concreto.

El uso de la resistencia mecánica del concreto como índice general de su aptitud para prestar un buen servicio permanentemente, no siempre es acertado porque hay ocasiones en que pueden ser más importantes otras características y propiedades del concreto, de acuerdo con las condiciones específicas en que opera la estructura. Inclusive, la costumbre de especificar y aceptar la calidad del concreto con base solamente en la resistencia mecánica, es una de las causas que suelen originar problemas de durabilidad en las estructuras, debido a que una resistencia suficiente no siempre es garantía de una duración adecuada del concreto en servicio.

#### 2.3.1.1 Factores que inciden en la resistencia

En la tabla 4, se incluye un resumen general de las principales acciones que pueden afectar al buen servicio permanente del concreto, y a la forma usual como se manifiestan sus efectos.

TABLA 4

PRINCIPALES ACCIONES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

Naturaleza de las acciones	Identificación de los medios y agentes activos	Manifestación común de los efectos en el concreto
<p>Físicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mecánicas</li> <li>- Fenomenológicas</li> </ul>	<p>Cargas ordinarias; cargas sostenidas (sismo y otras); impacto; fricción; flujo de agua y empuje de viento.</p> <p>Variaciones de humedad y temperatura; sobre elevación autógena de temperatura;</p>	<p>Agrietamientos; deformaciones; abrasión mecánica; erosión hidráulica; cavitación;</p> <p>Agrietamientos; descostramientos; fallas de adherencia (matriz-agregado); aumento de porosidad;</p>
<p>Químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Internas</li> <li>- Externas</li> </ul>	<p>Reacciones deletéreas cemento-agregado; falta de sanidad en el cemento.</p> <p>Aguas y suelos con sustancias agresivas; aguas muy puras; índoles.</p>	<p>Agrietamientos; desintegración progresiva hasta la falla estructural; corrosión del refuerzo; descostramientos.</p> <p>Agrietamientos; descostramientos; progresiva hasta la falla estructural; lixiviación y aumento de porosidad;</p>
<p>Biológicas</p>	<p>Vegetación; micro-organismos y agentes derivados de la descomposición orgánica.</p>	<p>Agrietamientos; rozaduras; manchas y cambios de color.</p>

La resistencia mecánica que potencialmente puede desarrollar el concreto depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales. En la práctica habría que añadir a estos factores el grado de densificación logrado en la mezcla de concreto en la estructura ya que, como ocurre con otros materiales, la proporción de vacíos en el concreto tiene un efecto decisivo en su resistencia mecánica

### 2.3.2 Hidratación

La hidratación del cemento se refiere a la reacción química existente entre las partículas de cemento y el agua, la misma que es una reacción exotérmica. Los cementos fraguan y endurecen al ser mezclados con agua, debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de los componentes básicos del cemento con el agua. Luego del proceso de sinterización que le da origen, los constituyentes básicos del cemento son: silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A) y ferro-aluminato tetracálcico (C4FA). Estos minerales, en contacto con el agua reaccionan entre sí dando los siguientes productos hidratados: los silicatos cálcicos se transforman básicamente en silicatos cálcicos hidratados (CSH) e hidróxido de calcio (CH), el aluminato tricálcico y el

ferro-aluminato tetracálcico forman Aft (etringita) y Afn (monosulfato) [6].

Los cuatro componentes principales del cemento se diferencian no solamente por el calor liberado en el proceso de hidratación, sino también por la velocidad a la cual se produce la reacción de hidratación, siendo diferente en cada uno de ellos pero no del todo desacoplado.

Se han realizado intentos para modelar el proceso de hidratación teniendo en cuenta las interacciones que ocurren entre los diferentes compuestos, pero aún no se han logrado resultados cualitativamente razonables.

Durante el proceso de hidratación, el agua puede encontrarse en diferentes estados:

- Agua químicamente ligada la cual se refiere al agua que se combina con el cemento para producir una nueva fase diferente del agua y del cemento.
- Agua físicamente ligada la misma que es aquella que se encuentra adsorbida a la superficie de la partícula de gel y ocupa los poros del gel.
- Agua libre, se refiere al resto de agua que se encuentra en la pasta saturada y ocupa los poros capilares.

### 2.3.3 Peso Específico

La necesidad de disponer de un hormigón ligero o pesado requerirá la utilización de agregados ligeros o pesados respectivamente. Los hormigones ligeros podrían ser utilizados en losas de edificios altos o en muros aislantes de temperatura, mientras que los hormigones pesados podrían emplearse en anclajes de puentes colgantes o para almacenar materiales explosivos.

El peso específico expresa básicamente la relación existente entre la muestra del cemento y el volumen absoluto. El valor referente al peso específico no indica la calidad de un tipo de cemento, al contrario, su valor es utilizado para el diseño de la mezcla ya que con él se pueden encontrar otras características del concreto. Un valor bajo de densidad absoluta nos indica poca presencia de clínker y una alta presencia de yeso. Existen diversos métodos para determinar el peso específico del cemento entre los cuales tenemos: método de Chetalier, método de Schuman, método de Candlot y método Picnómetro, los mismos que poseen la finalidad de determinar el volumen del líquido que desplaza una cantidad de cemento.

### 2.3.4 Superficie específica o finura

La finura se refiere a la superficie específica en centímetros cuadrados por gramo la misma que es una de las propiedades más importantes, ya que está íntimamente ligada al valor



hidráulico. Puesto que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie hacia el interior, el área superficial total de las partículas constituye el material de hidratación. La finura del cemento influye especialmente sobre la velocidad de hidratación, desarrollo del calor, retracción y aumento de resistencia con la edad [7].

En el aspecto técnico interesa principalmente definir el grado de finura que debe darse al cemento para que cumpla especificaciones de acuerdo con su tipo, pero sin dejar de considerar también los efectos secundarios que la finura del cemento puede inducir en el comportamiento del concreto, tanto en estado fresco como ya endurecido. El grado de finura del cemento tiene efectos ambivalentes en el concreto. Al aumentar la finura el cemento se hidrata y adquiere resistencia con más rapidez, y también se manifiesta mayor disposición en sus partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada, lo cual es ventajoso para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de concreto. Como contrapartida, una finura más alta representa mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, cuyas consecuencias son indeseables porque se traducen en mayores cambios volumétricos de los concretos y posibles agrietamientos en las estructuras.

La finura es una propiedad vital del cemento, que tiene que someterse a un control cuidadoso. La finura se expresa por el área superficial de las partículas contenidas en un gramo del material, lo cual se denomina *superficie específica* y se mide en  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

## 2.4 Aditivos

Son compuestos químicos que, añadidos en pequeñas cantidades, modifican las propiedades del hormigón. Los aditivos siempre deben ser probados previamente a su utilización, debido a la gran variabilidad de la calidad del cemento.

### 2.4.1 Funciones de los aditivos

Los aditivos para el concreto se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco y/o inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto endurecido. Su función específica consiste en complementar o mejorar el resultado, cuando estas no son suficientes para lograr el comportamiento requerido del concreto fresco, de acuerdo a las condiciones ambientales y de trabajo en obra o bien son incapaces de obtener el concreto endurecido con las propiedades necesarias para resistir los efectos físicos, mecánicos o químicos.

## 2.5 Curado del Cemento

El curado es el mantenimiento de un adecuado contenido de humedad y temperatura en el concreto a edades tempranas, de manera que este pueda desarrollar las propiedades para las cuales fue diseñada la mezcla. El curado comienza inmediatamente después del vaciado y el acabado, de manera que el concreto puede desarrollar la resistencia y la durabilidad deseada [8].

### 2.5.1 Factores que determinan un buen curado

Sin un adecuado suministro de humedad, los materiales cementantes en el concreto, no pueden reaccionar para formar un producto de calidad. El secado puede eliminar el agua necesaria para esta reacción química denominada hidratación y por lo cual el concreto no alcanzará sus propiedades potenciales.

La temperatura es un factor importante en un curado apropiado, basándose en la velocidad de hidratación y por lo tanto, el desarrollo de resistencias es mayor a más altas temperaturas. Generalmente, la temperatura del concreto debe ser mantenida por encima de los 50°F (10°C) para un ritmo adecuado de desarrollo de resistencias. Además debe mantenerse una temperatura uniforme a través de la sección del concreto, mientras está ganando resistencia, para evitar las grietas por choque térmico.

Para el concreto expuesto, la humedad relativa y las condiciones del viento son también importantes; ellas contribuyen al ritmo de pérdida de humedad en el concreto y pueden dar como resultado agrietamiento, una pobre calidad y durabilidad superficial. Las medidas de protección para el control de la evaporación de humedad de las superficies del concreto antes de que fragüe, son esenciales para evitar la fisuración por retracción plástica.

### 2.5.2 Métodos de curado

Todo hormigón acabado de vaciar, debe ser curado rápidamente y durante un periodo no menor que siete días manteniendo una humedad debida. El curado es parte integrante de las operaciones del uso y aplicación del hormigón; cualquier estructura impropriamente curada, debería ser considerada defectuosa, y el ingeniero puede suspender todas las operaciones de vaciado de un contratista mientras se ejecuta un proceso adecuado.

## 2.6 *Estado del Arte de la modelación del comportamiento de la pasta de cemento puzolánicos*

Varios estudios se han realizado con la finalidad de modelar el comportamiento del cemento cuando se añaden ciertos agregados, a su composición básica, tales como escoria de alto horno, humo de sílice o cenizas volátiles. Todos estos estudios mostraron el análisis de las condiciones bajo las cuales es posible mejorar ciertas propiedades importantes en la selección de los materiales de construcción tales como

el módulo de elasticidad o la resistencia a la compresión. Otro factor influyente en la variación de estas propiedades es el método de curado seleccionado para la fabricación de los diferentes cementos.

Estudios han demostrado que agregando puzolanas se logra un incremento en la resistencia y en la durabilidad del concreto [9].

Nassif en su estudio respecto al tema, logró demostrar que a temprana edad, el porcentaje de ganancia del módulo de elasticidad es más alto que la ganancia de resistencia a la compresión, cuando las puzolanas son agregadas al concreto. Además, demostró que, la adición de humo de sílice al concreto de alta resistencia, reduce la tasa de incremento del módulo de elasticidad con el tiempo, debido a la alta tasa de hidratación del concreto conteniendo humo de sílice. A temprana edad, el concreto de humo de sílice tiene una ganancia de resistencia mayor pero decrece gradualmente para el concreto ordinario. El módulo elástico es más alto a temprana edad con una disminución gradual del tiempo. Respecto a los tiempos de curado, Nassif logró concluir que, las muestras que usaron curado húmedo mostraron un incremento en el valor del módulo de elasticidad con la edad mientras que los curados de tipo seco y curados compuestos mostraron menos incremento y a veces una disminución en el valor del módulo de elasticidad, además la resistencia a la compresión del concreto continua incrementándose con la edad independientemente del tipo de curado utilizado, aunque esto no se cumple para lo que se refiere al módulo elástico.

Entre otros estudios, autores como Tsvilis y Parissakis demostraron que la finura del cemento es un factor influyente en la resistencia temprana del material mientras que las propiedades químicas y mineralógicas del cemento contribuyen en el desarrollo de la resistencia a edades futuras [10]. Además, Knudsen, desarrolló un modelo analítico de hidratación probado mediante curvas experimentales obtenidas principalmente de la reducción y del grado de hidratación como funciones del tiempo y la temperatura. Por otro lado, el modelo tridimensional desarrollado por Bentz mediante el uso del computador, mostro de manera cuantitativa, predicciones de los efectos de la composición del cemento, proporción agua-cemento y los ambientes de curado en el resultado de las propiedades físicas y de hidratación.

De esta manera, se siguen desarrollando estudios para obtener la modelación del cemento mediante la adición de puzolanas naturales, para de esta manera, obtener nuevos materiales a partir de otros ya existentes, y así explotar recursos con mayores y mejores propiedades a menor costo.

# CAPÍTULO 3

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Recolección de Datos

El presente estudio se efectúa con la finalidad de descubrir la influencia que se genera en el cemento en el valor correspondiente a la resistencia a la compresión al ser añadido, a su estado natural o de control, diferentes porcentajes de limolita en una proporción adecuada de días y un tipo específico de curado.

Para este caso, se analizará el cemento Pórtland tipo I con un porcentaje de 10% del mineral limolita para diferentes días de ensayo: 7, 14, 21 y 28 días con un curado bajo agua. De esta manera, se podrá efectuar una comparación con el control (0% aditivo) y además se logrará desarrollar un modelo matemático, que permita ajustar los datos experimentales a dicho modelo. Adicional a esto, mediante análisis estadístico se logrará obtener una ecuación que permita relacionar las variables independientes con la variable dependiente y así, con los datos de validación, comprobar que dicha ecuación se cumpla en ambos casos con un porcentaje de error determinado.

Por último, se determinará el mejor tratamiento entre los valores promedios de esfuerzo de ruptura de los diferentes porcentajes de limolita incluyendo el 0% y los días de curado para poder definir en qué

tiempo y a qué porcentaje ocurre un cambio significativo en la resistencia si así fuera el caso.

Los datos referentes al experimento se toman de una prensa de compresión existente en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ver Anexo la misma que posee las siguientes características:

**TABLA 5**  
**CARACTERISTICAS DE LA MÁQUINA DE EXPERIMENTACIÓN**  
**(CARGA MÁXIMA: 30000 kgf)**

<i>Nombre:</i>	Prensa de Compresión
<i>Marca:</i>	Soiltest
<i>Modelo:</i>	Versa Tester
<i>Función:</i>	Comprimir muestras de cubos de mortero; con los dispositivos adecuados puede ejecutar ensayos de flexión en viguetas.

Dichos datos serán recolectados a una temperatura y humedad relativa específica y sus unidades estarán dadas en [kgf] las cuales deberán ser transformadas a Newton [N] para su análisis de forma adecuada.

Es preciso especificar que esta máquina se utilizó para la experimentación a los 4 días, ya que para los días posteriores en donde los esfuerzos de ruptura aumentaban se hizo uso de una máquina que soportaba valores de esfuerzos más altos cuyas características se describen a continuación:



**TABLA 6**  
**CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA DE EXPERIMENTACIÓN**  
**(CARGA MÁXIMA: 30000 lbf)**

<i>Nombre:</i>	Prensa de Compresión
<i>Marca:</i>	Soiltest
<i>Modelo:</i>	CT – 900
<i>Función:</i>	Brindar la carga axial para la compresión de cilindros de hormigón y especímenes de materiales de construcción
<i>Observaciones:</i>	Norma de ensayo ASTM C – 39 / AASHTO T - 22

### 3.2 Diseño de Experimentos

En esta etapa se definen las reglas para la planeación, el diseño, y la realización de experimentos. El resultado del diseño de experimentos permitirá organizar la información obtenida y analizarla, principalmente a través de procesos de entrada y salida, que permitan identificar las variables en estudio y su relación con aquellas de los resultados (o a través de la formulación de un modelo que facilite el planteamiento de relaciones matemáticas entre los ingresos y las salidas). Esta relación está relacionada con la prueba de validez de las hipótesis previamente formuladas.

Las entradas, para este experimento, se refieren a las diferentes proporciones de días en los cuales se efectuará el estudio así como también los porcentajes de limolita correspondientes.

Los factores externos, representan las condiciones ambientales que influyen el proceso, en este caso, el tipo de curado bajo el que se realizará el experimento.

Las salidas, representan a las variables de interés, es decir, a los valores de resistencia a la compresión obtenidos para este caso.

### 3.3 Prueba con 0% de aditivo

Es necesario para este estudio, obtener datos del cemento Pórtland tipo I con 0% de aditivo, para de esta manera, generar datos de control que nos permitan poder ejercer una comparación con los datos obtenidos con el cemento con el porcentaje de limolita para cada día, así se podrá determinar si existe una variación en las propiedades referentes a la resistencia.

### 3.4 Experimentación

Este estudio consta de dos partes importantes: el análisis del cemento con 10% de aditivo para determinar si existe variación en el valor referente a la resistencia a la compresión en comparación con el 0% de aditivo y la prueba con un porcentaje de puzolana (limolita) correspondiente al 12.5% como porcentaje de validación.

Antes de cualquier prueba se debe preparar el material a utilizar (Limoita) hasta que alcance una granulometría adecuada para el experimento la misma que corresponde a 45 [ $\mu$ ].

Inicialmente el material fue receptado en estado rocoso y para poder iniciar el proceso se debe disminuir el tamaño del material, el mismo que pasa por varios procesos de molienda entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Trituración manual (Uso de combo)
- Trituradora de mandíbulas
- Trituradora de rodillos
- Cuarteador
- Molino de disco
- Molino de Bolas

El orden anterior es el que se debe seguir para la adecuada trituración del material. Vale recalcar que tanto para la trituradora de mandíbulas así como también para la trituradora de rodillos y el molino de discos es necesario que el material sea ingresado mínimo dos veces para que el tamaño de la limolita disminuya lo suficiente para poder continuar con la siguiente trituración. Una vez que el material llega al molino de bolas, se requiere que la limolita permanezca un tiempo de entre 45 minutos a 90 minutos para que pueda reducir el tamaño del material lo mayormente posible.

Luego de que el material se encuentre molido, se debe tomar una muestra representativa de dicho material (100 [gr]). Como cierta manera

de comprobación, se debe usar tamices de diferente grado los cuales permitirán conocer si es que el material alcanzó la granulometría deseada, esto se logra si es que, hasta el tamiz denominado fondo, se reúne un 70 a 80% del material.

A continuación se presenta la tabla con los datos de la limolita al pasar por los diferentes tamices:

**TABLA 7**  
**TAMICES**

<b># Tamiz</b>	<b>Masa (gr)</b>
50	5
100	8
200	12
325	75

Una vez obtenido la granulometría adecuada se procede a realizar la mezcla para la colocación en los respectivos moldes.

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

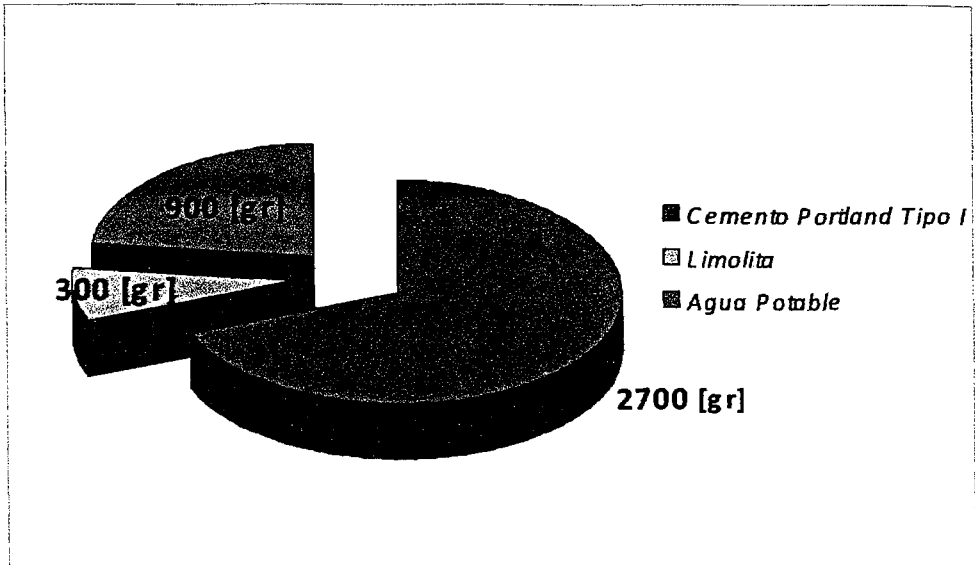
- *Caso: 10% de limolita.*-

**Masa\_total= 3000 [gr]**

**Masa\_agua= 900 [gr]**

**Masa\_Limolita= 0.10\*(3000) = 300 [gr]**

**Masa\_Cemento= 0.90\*(3000)= 2700 [gr]**



**FIG. 3.1 DISTRIBUCIÓN DE MASAS AL 10% DE LIMOLITA**

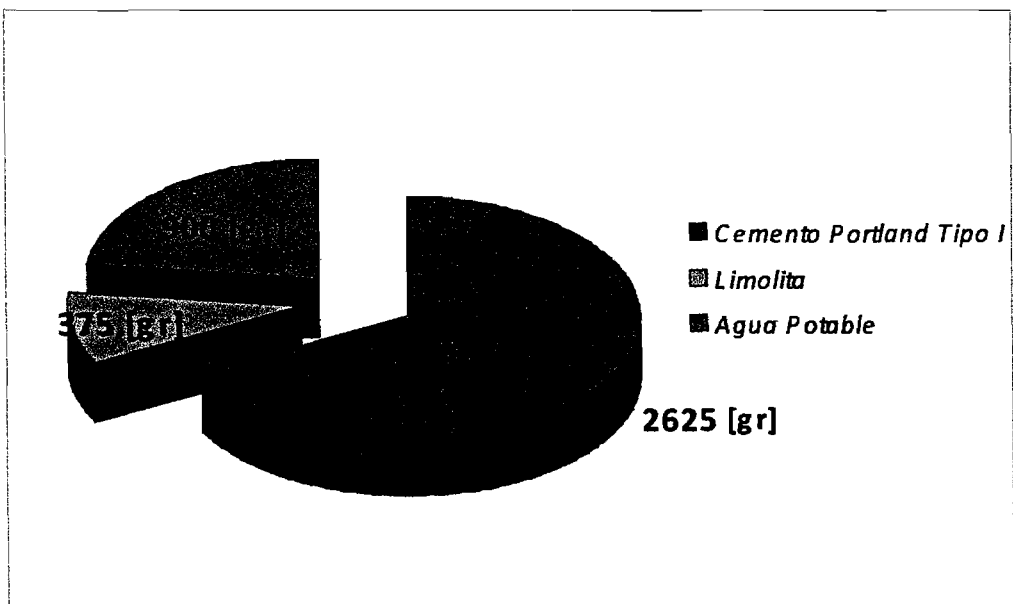
- Caso: 12.5% de limolita (Validación).-

Masa\_total= 3000 [gr]

Masa\_agua= 900 [gr]

Masa\_Limolita=  $0.125 \cdot (3000) = 375$  [gr]

Masa\_Cemento=  $0.875 \cdot (3000) = 2625$  [gr]



**FIG. 3.2 DISTRIBUCIÓN DE MASAS AL 12.5% DE LIMOLITA**

Para este efecto se procederá a formar probetas (cubos) con esta cantidad específica de limolita; cabe indicar que se requerirán moldes para el análisis a los 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25 y 28 días para obtener datos suficientes que nos permitan obtener un modelo matemático con el menor rango de error posible. Además, las probetas serán sometidas a un curado húmedo (curado bajo agua). La idea principal del experimento es poder someter a esfuerzos o pruebas mecánicas, a cada una de las probetas obtenidas y en su tiempo adecuado, para así, poder obtener valores de resistencia mecánica a la compresión y poder ejercer una comparación para determinar si existe mejora en dicho valor al ser comparado con el control (0% de aditivo).

Los moldes deben estar debidamente limpios y lubricados (Ver ANEXO) y la mezcla agua-cemento-limolita combinada de la manera más homogénea posible para así proceder a verter la mezcla en cada uno de los moldes. Mediante el uso de un apisonador, se debe inducir a la mezcla a que elimine la mayor cantidad de burbujas de aire posible para que al compactarse no existan fisuras que puedan alterar nuestros resultados (Ver ANEXO).

De esta manera se prepara la mezcla para colocarla en cada uno de los moldes y dejar a los mismos reposar por veinte y cuatro horas para su correcta y adecuada compactación (Ver ANEXO). Posterior a ello se procede a desmoldar cada una de las muestras y se las sumerge en agua para efectuar el curado húmedo (Ver ANEXO).

Finalmente, cada una de las muestras se las somete al ensayo de compresión respectivo a los días de curado (Ver ANEXO).

### 3.5 Modelización del experimento

Los resultados derivados de la experimentación, deben conducirnos a algún modelo matemático. Se requerirá una función matemática que nos explique de qué manera están relacionadas las variables y para esto se hará uso del análisis de regresión múltiple.

Los métodos de regresión se usan para determinar la mejor relación funcional entre las variables, y aplicado a este estudio resulta bastante apropiado ya que se podrá conocer de qué manera se encuentran relacionados el esfuerzo de ruptura en función del porcentaje de limolita y los días de curado. Una vez obtenido el modelo para 7, 14, 21 y 28 días, se procederá a obtener una ecuación general dependiente del tiempo (días) y porcentaje de limolita. Y como es necesario saber si este modelo es confiable, se requerirá realizar un ajuste a 4, 11, 18 y 25 días. Con todos estos datos, se procederá a realizar una gráfica cuyas variables serán los días de curado, porcentaje de limolita y los valores de resistencia a la compresión que nos permitirá observar y verificar el comportamiento de la variable dependiente en función de las variables independientes.

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

### 4.1 Tabulación de Datos y Resultados.-

Mediante el ensayo de compresión aplicado a cada una de las muestras y para porcentajes de experimento y validación correspondientes a 10% y 12,5% respectivamente, se obtuvieron los siguientes datos:

- Experimentación: 10% Limolita

**TABLA 8**

**DATOS EXPERIMENTALES (10% - 7 DÍAS)**

Condiciones Iniciales	Delta L [plg]	Fuerza [N]		
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
T = 25,1 [°C]	0,005	14240	12460	22250
	0,01	52955	49395	69865
	0,015	93895	60965	114365
	0,02	104130	105910	178000
HR= 73,4 [%]	0,025	144625	166875	213600
	0,03	186900	204700	-
	0,035	218050	-	-
	0,04	233625	-	-



**TABLA 9**  
**DATOS EXPERIMENTALES (10% - 14 DÍAS)**

	Condiciones Iniciales	Delta L [plg]	Fuerza [N]		
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
DÍAS 14	T = 25,7 [°C]	0,005	7565	11570	6675
		0,01	24030	42275	17800
		0,015	58740	74315	44500
		0,02	86330	122375	82770
	HR= 72,9 [%]	0,025	137950	171325	126825
		0,03	186900	213600	182450
		0,035	209150	222500	209150
		0,04	213600	-	220275

**TABLA 10**  
**DATOS EXPERIMENTALES (10% - 21 DÍAS)**

	Condiciones Iniciales	Delta L [plg]	Fuerza [N]		
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
DÍAS 21	T = 25,9 [°C]	0,005	8455	4005	6675
		0,01	26700	14240	18690
		0,015	57850	18245	35155
		0,02	95675	40495	69865
	HR= 70,2 [%]	0,025	140175	80100	117925
		0,03	193575	126825	166875
		0,035	231400	171325	213600
		0,04	271450	218050	244750
		0,045	-	249200	255875

**TABLA 11**  
**DATOS EXPERIMENTALES (10% - 28 DÍAS)**

	Condiciones Iniciales	Delta L [µg]	Fuerza [N]		
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
DÍA 28	T = 26,1 [°C]	0,005	5340	4450	4895
		0,01	15130	10235	11125
		0,015	36490	18690	24920
		0,02	96120	52065	54735
	HR= 71,2 [%]	0,025	178000	93895	87220
		0,03	244750	173550	133500
		0,035	255875	213600	-

- Validación: 12,5% Limolita

**TABLA 12**

**DATOS EXPERIMENTALES (12,5% - 4 DÍAS)**

	Condiciones Iniciales	Delta L [plg]	Fuerza [N]		
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
DÍA 4	T = 25,3 [°C]	0,005	3234	1960	3920
		0,01	8624	4410	12250
		0,015	16660	6664	24990
		0,02	28812	10486	38024
		0,025	41160	13720	45668
		0,03	55370	20384	56350
		0,035	66150	32144	73500
	HR= 69,2 [%]	0,04	83300	45570	93100
		0,045	98000	61250	112700
		0,05	112700	73500	124950
		0,055	124950	90650	-
		0,06	128380	104370	-
		0,065	-	120050	-

TABLA 13

## DATOS EXPERIMENTALES (12,5% - 11 DÍAS)

	Condiciones Iniciales	Delta L [plg]	Fuerza [N]		
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
DIA 11	T = 25,9 [°C]	0,005	18245	12460	10235
		0,01	72090	73425	67195
		0,015	131275	135725	100125
	HR= 70,8 [%]	0,02	169100	193575	149075
		0,025	209150	231400	193575
		0,03	222500	-	233625

TABLA 14

## DATOS EXPERIMENTALES (12,5% - 18 DÍAS)

	Condiciones Iniciales	Delta L [plg]	Fuerza [N]		
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
DIA 18	T = 26,1 [°C]	0,005	6675	2225	5340
		0,01	21360	6675	10235
		0,015	56070	12460	37380
		0,02	126825	41830	82770
	HR= 69,8 [%]	0,025	160200	89000	142400
		0,03	206925	153525	209150
		0,035	242525	215825	249200
		0,04	-	251425	-

**TABLA 15**  
**DATOS EXPERIMENTALES (12,5% - 25 DÍAS)**

	Condiciones Iniciales	Delta L [plg]	Fuerza [N]		
			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
DÍA 25	T = 26,4 [°C]	0,005	6675	4005	7565
		0,01	20915	10235	20470
		0,015	52510	18245	37380
		0,02	87220	40940	70310
	HR= 65,5[%]	0,025	144625	71200	129050
0,03		198025	93450	178000	
0,035		242525	140175	226950	
0,04		264775	169100	-	
0,045		-	195800	-	

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

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

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

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

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

En donde,  $\varepsilon$  representa la deformación del material;  $\Delta L$  corresponde a la variación en la longitud y  $L$  equivale a la longitud del lado del cubo (muestra).

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

La siguiente tabla presenta los valores correspondientes a los esfuerzos de ruptura de cada muestra así como también el promedio de ellos.

**TABLA 16**  
**ESFUERZOS DE RUPTURA INDIVIDUALES PARA CEMENTO CON**  
**DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMOLITA Y A DIFERENTES DÍAS**  
**DE CURADO (EXPERIMENTACIÓN)**

<b>EXPERIMENTACIÓN</b>								
<i>Unidad:</i> <i>[Mpa]</i>		<i>Tipo I</i>	<i>Tipo IV</i>	<i>5%</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>	<i>20%</i>	<i>25%</i>
<b>7</b>	<b>M1</b>	89,79	47,13	71,74	93,45	61,1	57,91	25.42
	<b>M2</b>	90,64	48,07	72,13	81,88	56,4	62,66	24.13
	<b>M3</b>	87,22	51,84	69,58	85,44	58,67	73,29	23.70
<b>14</b>	<b>M1</b>	99,19	65,98	68,6	85,44	83,66	79,40	61.71
	<b>M2</b>	97,48	57,5	61,74	89	90,78	82,85	81.20
	<b>M3</b>	89,79	57,5	69,58	88,11	97,9	84,58	74.12
<b>21</b>	<b>M1</b>	102,6	76,35	83,66	108,6	89	86,31	76.70
	<b>M2</b>	108,6	74,46	78,32	99,68	93,45	83,70	79.29
	<b>M3</b>	76,96	75,41	71,2	102,4	85,44	72,49	87.05
<b>28</b>	<b>M1</b>	95,77	70,69	117,5	102,4	85,44	106,15	83.60
	<b>M2</b>	97,48	70,69	101,5	85,44	91,67	96,66	86.18
	<b>M3</b>	94,06	55,61	120,2	53,4	96,12	95,80	90.49

**TABLA 17**  
**ESFUERZOS DE RUPTURA INDIVIDUALES PARA CEMENTO CON**  
**DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMOLITA Y A DIFERENTES DÍAS**  
**DE CURADO (VALIDACIÓN)**

<b>VALIDACIÓN</b>								
<i>Unidad:</i> <i>[Mpa]</i>		<i>Tipo I</i>	<i>Tipo IV</i>	<i>7.5%</i>	<i>12.5%</i>	<i>17.5%</i>	<i>22.5%</i>	<i>27.5%</i>
<b>4</b>	<b>M1</b>	80,38	46,18	49	51,35	44,1	43,67	56.70
	<b>M2</b>	82,94	45,32	43,12	48,02	43,1	46,52	56.05
	<b>M3</b>	80,38	46,18	41,16	49,98	45,67	44,62	50.35
<b>11</b>	<b>M1</b>	101,8	59,38	59,78	89	81,88	56,96	66.36
	<b>M2</b>	82,94	52,78	69,58	92,56	84,55	46,52	64.64
	<b>M3</b>	108,6	56,56	51,94	93,45	76,54	58,86	55.16
<b>18</b>	<b>M1</b>	108,6	63,15	81,88	97,01	80,99	65,59	70.67
	<b>M2</b>	109,5	64,1	82,77	100,6	89,36	76,81	77.57
	<b>M3</b>	108,6	59,95	85,44	99,68	83,66	59,55	78.43
<b>25</b>	<b>M1</b>	90,64	70,69	89,89	105,9	89,36	71,63	75.84
	<b>M2</b>	81,23	63,15	98,79	78,32	92,74	68,18	59.47
	<b>M3</b>	106	54,67	84,55	90,78	89	68,60	81.88

Todo este procedimiento se lo efectúa con la finalidad de poder determinar la pendiente de la zona elástica de la pasta de cemento que correspondería al módulo de elasticidad del material. Para este efecto, se procede a graficar la dispersión de puntos para cada día y cada porcentaje y se puede notar mediante los valores de confiabilidad que la mejor tendencia que se ajusta a los datos es la tendencia cúbica de la cual se obtiene la ecuación de tercer grado para que, mediante la segunda derivada, se pueda adquirir el punto en donde se produce un cambio de concavidad. Este punto de concavidad servirá de guía para poder determinar el punto de fluencia que, justamente se refiere al punto

de intersección de la curva esfuerzo deformación y una paralela a la línea de la zona elástica que pasa por el punto de deformación. Luego se procede a calcular las pendientes punto a punto con la finalidad de comprobar que el valor obtenido del punto de fluencia, mediante la aplicación de la segunda derivada, sea el correcto ya que puede darse el caso que en la gráfica esfuerzo deformación se presenten dos cambios de concavidad debido a posibles datos aberrantes, y que el valor 'x' proporcionado por la segunda derivada no corresponda verdaderamente al punto de fluencia que es el que nos interesa. Entonces, determinando la pendiente punto a punto se puede comprobar en qué rango de valores la pendiente deja de sufrir incrementos y ese justamente será el punto correspondiente a la fluencia.

Las tablas y gráficas de los valores descritos anteriormente junto con la obtención del punto de fluencia para cada una de los días se pueden consultar en el Anexo B.

**TABLA 18.1**

**RESUMEN: MUESTRA 1 - 10% - 7 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [MPa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [MPa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
4905,51	93,45	0.01778	87,22	0,02032

De la gráfica esfuerzo vs. Deformación se obtiene la ecuación característica y aplicando la segunda derivada igualada a cero resulta el valor de x correspondiente al cambio de concavidad.

$$\text{Ecuación: } y = -7E12 x^3 + 2E11x^2 + 3E9x - 674242$$



Aplicando segunda derivada e igualando a cero:  $y'' = 0$ , se obtiene  $x = 0.0095$ , sin embargo con los resultados de la obtención de la pendiente acumulada punto a punto se verifica que el punto de fluencia se produce en  $x = 0.01778$ . En la tabla 18.1, se presenta una tabla resumida con los valores más representativos de la muestra como lo son el módulo de elasticidad promedio, el valor  $x$  correspondiente a la fluencia, el esfuerzo de fluencia, la deformación máxima y el esfuerzo de ruptura.

Estos últimos valores son requeridos para, mediante el uso de la herramienta Matlab y su respectivo código fuente (Ver ANEXO C) poder ajustar la curva teórica a la experimental. Esto se produce mediante la variación de constantes propias del material, denotadas como  $a$  y  $m$  cuyos valores son 0,6 y 0,06 respectivamente para este caso.

**TABLA 19.1**  
**RESUMEN: MUESTRA 2 - 10% - 7 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
5372,70	81,88	0.01524	81,88	0,01524

$$\text{Ecuación: } y = -4E12 x^3 + 3E11 x^2 + 1E9 x + 211905$$

Aplicando  $y'' = 0$  resulta  $x = 0.025$  sin embargo, el punto de fluencia correspondería a  $x = 0.01524$ . En la tabla 19, se presenta una tabla resumida con los valores más representativos de la muestra como lo son el módulo de elasticidad promedio, el valor  $x$  correspondiente a la fluencia, el esfuerzo de fluencia, la deformación máxima y el esfuerzo de

ruptura. Los valores correspondientes a  $a$  y  $m$  para esta muestra son 0.8 y 0.05 respectivamente.

Este mismo procedimiento se aplica para cada una de las muestras subsiguientes en las cuales se colocará la ecuación característica así como los valores respectivos de  $a$  y  $m$ .

**TABLA 20.1**

**RESUMEN: MUESTRA 3 - 10% - 7 DÍAS**

<b>Eprom elástica [MPa]</b>	<b>Esf. Ruptura [MPa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [MPa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
7007,874016	85,44	0.01016	71,2	0,0127

$$\text{Ecuación: } y = -5E13 x^3 + 1E12 x^2 + 1E9 x + 76286$$

Los valores de  $m$  y  $a$  son 0.05 y 2 respectivamente

**TABLA 21.1**

**RESUMEN: MUESTRA 1 - 10% - 14 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
4905,51	85,44	0.01524	74,76	0,02032

$$\text{Ecuación: } y = -3E13 x^3 + 8E11 x^2 - 2E9 x + 1E6$$

Los valores de  $m$  y  $a$  son 0.05 y 0.5 respectivamente.

**TABLA 22.1**

**RESUMEN: MUESTRA 2 - 10% - 14 DÍAS**

<b>Eprom elástica [MPa]</b>	<b>Esf. Ruptura [MPa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [MPa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
5606,29921	89	0.01524	85,44	0,01778

$$\text{Ecuación: } y = -3E13 x^3 + 9E11 x^2 - 9E8 x + 795606$$

Los valores de m y a son 0.05 y 0.2 respectivamente.

**TABLA 23.1**

**RESUMEN: MUESTRA 3 - 10% - 14 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
4788,7139	88,11	0.01524	72,98	0,02032

$$\text{Ecuación: } y = -2E13 x^3 + 9E11 x^2 - 3E9 x + 2E6$$

Los valores de m y a son 0.05 y 0.9 respectivamente.

**TABLA 24.1**

**RESUMEN: MUESTRA 1 - 10% - 21 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
5343,50	108,58	0.02032	108,58	0,02032

$$\text{Ecuación: } y = -1E13 x^3 + 6E11 x^2 - 6E8 x + 516020$$

Los valores de m y a son 0.05 y 0.9 respectivamente.

**TABLA 25.1**

**RESUMEN: MUESTRA 2 - 10% - 21 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
4360,454943	99,68	0.02286	99,68	0,02286

$$\text{Ecuación: } y = -9E12 x^3 + 5E11 x^2 - 2E9 x + 2E6$$

Los valores de m y a son 0.9 y 0.1 respectivamente.

**TABLA 26.1**

**RESUMEN: MUESTRA 3 - 10% - 21 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>'X' Fluencia</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
4817,91339	102,35	0.02032	97,9	0,02286

$$\text{Ecuación: } y = -2E13 x^3 + 6E11 x^2 - 3E9 x + 3E6$$

Los valores de m y a son 0.9 y 0.1 respectivamente.

**TABLA 27.1**

**RESUMEN: MUESTRA 1 - 10% - 28 DÍAS**

<b>Eprom elástica [MPa]</b>	<b>Esf. Ruptura [MPa]</b>	<b>Esf. Fluencia [MPa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
6423,88	102,35	97,90	0,01778

$$\text{Ecuación: } y = -4E13 x^3 + 1E11 x^2 - 7E9 x + 4E6$$

Los valores de m y a son 1 y 0.3 respectivamente

**TABLA 28.1**

**RESUMEN: MUESTRA 2 - 10% - 28 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
4805,40	85,44	85,44	0,01778

$$\text{Ecuación: } y = -2E13 x^3 + 4E11 x^2 - 2E9 x + 2E6$$

Los valores de m y a son 0.8 y 0.05 respectivamente

**TABLA 29.1**

**RESUMEN: MUESTRA 3 - 10% - 28 DÍAS**

<b>Eprom elástica [MPa]</b>	<b>Esf. Ruptura [MPa]</b>	<b>Esf. Fluencia [MPa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
3503,94	53,4	53,4	0,01524

$$\text{Ecuación: } y = 5E13 x^3 + 2E11 x^2 - 8E9 x + 300905$$

Los valores de m y a son 2 y 0.2 respectivamente

**TABLA 30.1**

**RESUMEN: MUESTRA 1 - 12.5% - 4 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
1788,83	51,35	49,98	0,03048

$$\text{Ecuación: } y = -2E13 x^3 + 130947E11 x^2 - 9.2442E9 x + 0.2944$$

Los valores de m y a son 1.5 y 0.7 respectivamente

**TABLA 31.1**

**RESUMEN: MUESTRA 2 - 12.5% - 4 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
1454,27	48,02	48,02	0,03302

$$\text{Ecuación: } y = -5E13 x^3 + 7E11 x^2 - 4E08 x + 1E6$$

Los valores de m y a son 0.9 y 0.5 respectivamente

**TABLA 32.1**

**RESUMEN: MUESTRA 3 – 12.5% - 4 DÍAS**

<b>Éprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
1967,72	49,98	49,98	0,0254

$$\text{Ecuación: } y = -3E13 x^3 + 5E11 x^2 + 9E9 x + 336627$$

Los valores de m y a son 1.2 y 0.05 respectivamente

**TABLA 33.1**

**RESUMEN: MUESTRA 1 – 12.5% - 11 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
6891,0761	89	52,51	0,01524

$$\text{Ecuación: } y = -1E13 x^3 + 4E11 x^2 - 3E10 x + 1E6$$

Los valores de m y a son 0.9 y 0.08 respectivamente

**TABLA 34.1**

**RESUMEN: MUESTRA 2 – 12.5% - 11 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
7621,063	92,56	77,43	0,0127

$$\text{Ecuación: } y = -6E13 x^3 + 2E11 x^2 - 9E9 x + 532587$$

Los valores de m y a son 1 y 0.3 respectivamente

TABLA 35.1

## RESUMEN: MUESTRA 3 – 12.5% - 11 DÍAS

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
6131,89	93,45	93,45	0,01524

TABLA 36.1

## RESUMEN: MUESTRA 1 – 12.5% - 18 DÍAS

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
5456,13	97,01	97,01	0,01778

$$\text{Ecuación: } y = -3E13 x^3 + 1E12 x^2 - 2E9 x + 633788$$

Los valores de m y a son 0.9 y 0.35 respectivamente

TABLA 37.1

## RESUMEN: MUESTRA 2 – 12.5% - 18 DÍAS

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
4949,31	100,57	100,57	0,02032

$$\text{Ecuación: } y = -1E13 x^3 + 7E11 x^2 - 4E9 x + 3E6$$

Los valores de m y a son 0.8 y 0.06 respectivamente

TABLA 38.1

## RESUMEN: MUESTRA 3 – 12.5% - 18 DÍAS

Eprom elástica [Pa]	Esf. Ruptura [Pa]	Esf. Fluencia [Pa]	Def. Máxima
5606,30	99,68	99,68	0,01524

$$\text{Ecuación: } y = -2E13 x^3 + 9E11 x^2 - 4E9 x + 2E6$$

Los valores de m y a son 2 y 0.8 respectivamente

TABLA 39.1

## RESUMEN: MUESTRA 1 – 12.5% - 25 DÍAS

Eprom elástica [Pa]	Esf. Ruptura [Pa]	Esf. Fluencia [Pa]	Def. Máxima
5456,1305	105,91	97,01	0,02032

$$\text{Ecuación: } y = -2E13 x^3 + 8E11 x^2 - 3E9 x + 2E6$$

Los valores de m y a son 0.6 y 0.1 respectivamente

TABLA 40.1

## RESUMEN: MUESTRA 2 – 12.5% - 25 DÍAS

Eprom elástica [Pa]	Esf. Ruptura [Pa]	Esf. Fluencia [Pa]	Def. Máxima
3426,07	78,32	78,32	0,02286

$$\text{Ecuación: } y = -6E13 x^3 + 4E11 x^2 - 1E9 x + 1E6$$

Los valores de m y a son 1 y 0.08 respectivamente



**TABLA 41.1**  
**RESUMEN: MUESTRA 3 – 12.5% - 25 DÍAS**

<b>Eprom elástica [Pa]</b>	<b>Esf. Ruptura [Pa]</b>	<b>Esf. Fluencia [Pa]</b>	<b>Def. Máxima</b>
5105,73678	90,78	90,78	0,01778

$$\text{Ecuación: } y = -6E13 x^3 + 5E11 x^2 - 1E9 x + 1E6$$

Los valores de m y a son 0.8 y 0.9 respectivamente

#### **4.2 Análisis de Resultados**

Una vez obtenidos los gráficos que contienen los datos teóricos y experimentales para cada una de las muestras, se procede a calcular el error de dicha deducción la misma que se obtiene tomando valores en los puntos críticos de nuestra grafica (esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura) tanto para la curva teórica como para la experimental. Todo esto *para poder calcular cuánta diferencia significativa hubo entre ambas curvas.*

Un ejemplo de lo descrito anteriormente se aprecia a continuación:

- Para la muestra 1 del Día 4 al 12.5% de Limolita se toman los puntos fluencia y ruptura tanto para la curva experimental como para la teórica obteniéndose los siguientes datos:

$$\sigma \text{ fluencia [teórico]} = 50[\text{MPa}]$$

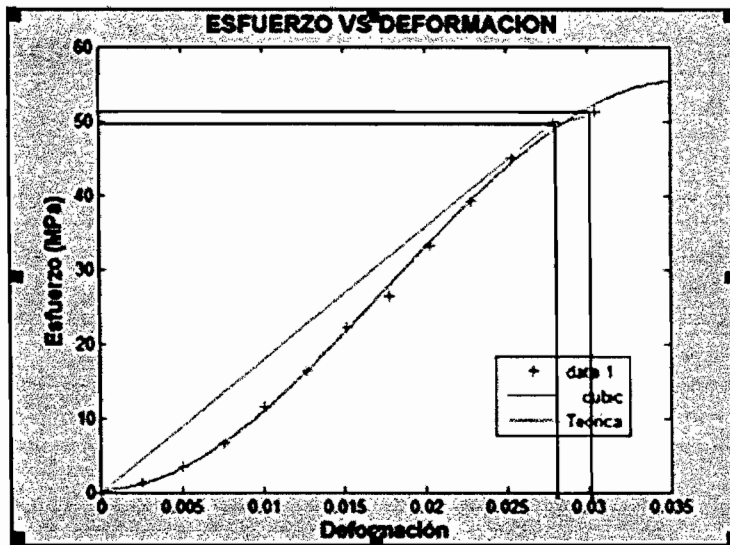
$$\sigma \text{ fluencia [practico]} = 49.90 [\text{MPa}]$$

$\sigma$  ruptura [teórico]= 51 [MPa]

$\sigma$  ruptura [practico]= 51.35 [MPa]

$$\text{Error [total]} = \left\{ \left[ \frac{(\sigma \text{ fluencia [teórico]} - \sigma \text{ fluencia [practico]})}{\sigma \text{ fluencia [teórico]}} \right] * 100 \right\} + \left\{ \left[ \frac{(\sigma \text{ ruptura [teórico]} - \sigma \text{ ruptura [practico]})}{\sigma \text{ ruptura [teórico]}} \right] * 100 \right\} / 2$$

$$\text{Error [total]} = \left\{ \left[ \frac{(50-49.90)}{50} \right] * 100 \right\} + \left\{ \left[ \frac{(51-51.35)}{51} \right] \right\} = 0.44\%$$



**FIG. 4.25 ESFUERZO – DEFORMACIÓN – TABULACIÓN DE ERROR**

De la misma manera se procede para cada uno de las gráficas obtenidas teniendo como resultado la siguiente tabla (Ver Tabla 41) con los errores respectivos a cada una de ellas:

TABLA 42

**TABULACIÓN DE ERROR ENTRE MODELO EXPERIMENTAL Y  
MODELO MATEMÁTICO – PARTE EXPERIMENTACIÓN**

		<b>EXPERIMENTACION</b>				
		<b>Experimental</b>		<b>Modelo Matlab</b>		
<b>Días_Curado</b>	<b>Muestra</b>	<b>Esf_Fluen.</b>	<b>Esf_Rupt.</b>	<b>Esf_Fluenc.</b>	<b>Esf_Rupt.</b>	<b>Error (%)</b>
7	M 1	87,22	93,45	86	92	1,50
	M 2	81,88	81,88	80	80	2,35
	M 3	71,2	85,44	71	85	0,40
14	M 1	74,76	85,44	75	85	0,42
	M 2	85,44	89	85	89	0,26
	M 3	72,98	88,11	72	90	1,73
21	M 1	108,58	108,58	109	109	0,39
	M 2	99,68	99,68	90	90	10,76
	M 3	97,9	102,35	95	100	2,70
28	M 1	97,9	102,35	99	100	1,73
	M 2	85,44	85,44	79	79	8,15
	M 3	53,4	53,4	48	48	11,25

TABLA 43

**TABULACIÓN DE ERROR ENTRE MODELO  
EXPERIMENTAL Y MODELO MATEMÁTICO – PARTE  
VALIDACIÓN**

		<b>VALIDACION</b>				
		<b>Experimental</b>		<b>Modelo Matlab</b>		
<b>Días_Curado</b>	<b>Muestra</b>	<b>Esf_Fluen.</b>	<b>Esf_Rupt.</b>	<b>Esf_Fluenc.</b>	<b>Esf_Rupt.</b>	<b>Error (%)</b>
4	M 1	49,9	51,35	50	51	0,44
	M 2	48,02	48,02	48	48	0,04
	M 3	49,98	49,98	50	50	0,04
11	M 1	52,51	89	51	88	2,05
	M 2	77,43	92,56	78	91	1,22
	M 3	93,45	93,45	91	91	2,69
18	M 1	97,01	97,01	97	97	0,01
	M 2	100,57	100,57	101	101	0,43
	M 3	99,68	99,68	100	100	0,32
25	M 1	97,01	105,91	98	108	1,47
	M 2	78,32	78,32	78	78	0,41
	M 3	90,78	90,78	90	90	0,87

**- Análisis de varianza: Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje de Días vs. Días de Curado**

Uno de los objetivos del presente estudio es poder determinar mediante métodos estadísticos, si existe una relación adecuada que vincule la variable dependiente que en este caso corresponde al esfuerzo de ruptura, con las variables independientes como lo son el porcentaje de Limolita y los días de curado. Es por esto que, se decide utilizar el método de regresión múltiple para poder obtener dicha relación.

Inicialmente se plantea la hipótesis nula para el análisis ANOVA que es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_n$$

Es decir, que mediante esta hipótesis se asevera que no existen diferencias significativas entre las medias de los datos.

Así mismo, se plantea una opción alternativa, es decir la hipótesis alterna, en caso de rechazar la nula, indicando que si existen diferencias significativas entre las medias muestrales del experimento.

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \dots \neq \mu_n$$

Para poder aceptar o rechazar la hipótesis nula referente a la varianza se debe calcular el valor F el mismo que debe resultar de la siguiente ecuación:

$$F = \frac{R^2 / k}{(1 - R^2) / (n - (k + 1))}$$

De donde  $n$  equivale al número de observaciones y  $k$  corresponde a los niveles. Calculando dicho valor se obtiene;

$$F = \frac{0.97/2}{(1-0.97)/(24-(2+1))} = 485$$

Se rechaza la nula si:  $F > F_{0.05}$

$$F_{0.05(2, 21)} = 3.4668$$

Efectivamente se cumple que  $F > F_{0.05}$ , entonces se puede rechazar la hipótesis nula y por lo tanto se puede concluir que, estadísticamente hablando, existen diferencias significativas con las medias muestrales del experimento.

**TABLA 44**

**ANÁLISIS DE VARIANZA (FASE EXPERIMENTACIÓN)**

<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>					
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	163684,204	81842,102	358,88	5,80743E-17
Residuos	22	5017,03294	228,047		
Total	24	168701,237			

Una vez analizado la varianza, se plantea la hipótesis nula para la regresión múltiple la misma que es:

$$H_0 = \beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$$

A su vez, se debe plantear una hipótesis alternativa la cual se describe a continuación:

$$H_a \neq \beta_0 \neq \beta_1 \neq \beta_2 \neq 0$$

Para poder determinar la mejor relación existente se efectuó varios análisis con la finalidad de encontrar la mejor distribución. De acuerdo a escasez de información respecto a qué comportamiento poseen estas variables con la función de respuesta, se procede a analizar funciones lineales, cuadráticas, cúbicas y logarítmicas para poder determinar cuál de ellas proporcionan mejor confiabilidad y un valor de p-value aceptable para poder rechazar la hipótesis nula a favor de la hipótesis alterna.

De acuerdo a programas estadísticos y luego de analizar opciones polinomiales para la relación requerida se obtiene la siguiente tabla resumida que muestra claramente las ecuaciones para varios grados polinomiales, así como la confiabilidad de cada uno, todo esto tanto para datos experimentales como para datos de validación:

TABLA 45

**COMPARACIÓN DE MODELOS ESTADÍSTICOS POLINOMIALES  
PARA DATOS EXPERIMENTALES**

Días	Modelos de ajuste	Ecuación	R <sup>2</sup> (%)	P
7	Lineal	Esf. Rupt. = 89,91 - 2,315 (%)	44,80	0,216
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 80,85 - 0,762 Porcentaje - 0,0518 (%)**2	45,60	0,881
	Cúbico	Esf. Rupt. = 83,9 - 1,62 (%) + 0,013 (%)**2 - 0,00145 (%)**3	45,60	0,989
14	Lineal	Esf. Rupt. = 78,05 + 0,1230 (%)	0,90	0,878
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 41,43 + 6,400 (%) - 0,2092 (%)**2	93,60	0,033
	Cúbico	Esf. Rupt. = 18,75 + 12,77 (%) - 0,6952 (%)**2 + 0,01080 (%)**3	99,90	0,06
21	Lineal	Esf. Rupt. = 91,33 - 0,3228 (%)	6,00	0,692
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 68,58 + 3,577 (%) - 0,1300 (%)**2	39,80	0,4
	Cúbico	Esf. Rupt. = 0,42 + 22,72 (%) - 1,590 (%)**2 + 0,03245 (%)**3	94,00	0,205
28	Lineal	Esf. Rupt. = 104,5 - 0,7024 (%)	18,90	0,464
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 122,4 - 3,768 (%) + 0,1022(%)**2	32,90	0,584
	Cúbico	Esf. Rupt. = 214,0 - 29,50(%) + 2,064(%)**2- 0,04361 (%)**3	98,60	0,094

TABLA 46

**COMPARACIÓN DE MODELOS ESTADÍSTICOS POLINOMIALES  
PARA DATOS DE VALIDACIÓN**

<b>Días</b>	<b>Modelos de ajuste</b>	<b>Ecuación</b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>P</b>
<b>4</b>	Lineal	Esf. Rupt. = 41,47 + 0,3672 (%)	32,40	0,316
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 54,41 - 1,401 (%) + 0,05051 (%)**2	53,90	0,436
	Cúbico	Esf. Rupt. = - 0,78 + 10,48 (%) - 0,6978 (%)**2 + 0,01425 (%)**3	97,90	0,138
<b>11</b>	Lineal	Esf. Rupt. = 81,21 - 0,634 (%)	10,30	0,599
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 37,15 + 5,384 (%) - 0,1719 (%)**2	36,70	0,457
	Cúbico	Esf. Rupt. = - 164,3 + 48,77 (%) - 2,904 (%)**2 + 0,05203 (%)**3	99,00	0,082
<b>18</b>	Lineal	Esf. Rupt. = 97,36 - 0,8498 (%)	34,00	0,302
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 87,82 + 0,453 (%) - 0,0372 (%)**2	36,30	0,814
	Cúbico	Esf. Rupt. = - 62,36 + 32,79 (%) - 2,074 (%)**2 + 0,03879 (%)**3	100,00	0,015
<b>25</b>	Lineal	Esf. Rupt. = 102,1 - 1,054 (%)	65,10	0,099
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 96,25 - 0,252 (%) - 0,02291 (%)**2	66,10	0,824
	Cúbico	Esf. Rupt. = 20,98 + 15,96 (%) - 1,044 (%)**2 + 0,01944 (%)**3	86,10	0,443



Claramente se puede observar que en la mayoría de modelos la confiabilidad es bastante baja ya que el coeficiente de determinación  $R^2$  oscila entre 6% y 50% a excepción del día 14 en donde se obtienen modelos cuadráticos y cúbicos con confiabilidades de alrededor del 90% pero que no cumplen con el rango requerido para el valor p que deben ser menores a 0.05 para poder, con razones estadísticamente sustentables, rechazar la hipótesis nula a favor de la alterna y así asegurar que existe una relación capaz de vincularme la función de respuesta con las variables independientes.

De igual manera ocurre con los valores de validación, cuyos coeficientes de determinación son bastante bajos aunque existen ciertos días en donde los modelos se ajustan con confiabilidades bastante representativas. El problema es que no se puede hallar una ecuación que sea válida para todos los días de curado y todos los porcentajes lo que nos hace concluir que, dichas distribuciones polinomiales no se ajustan de manera adecuada a los datos por lo que se debe buscar otras alternativas de ajuste.

Adicional a estos análisis se efectuó uno suplementario para determinar que ocurría si la tendencia era logarítmica con lo que se obtuvo resultados bastante confiables.

La ecuación logarítmica base para nuestros datos es la siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * \ln(x_2)$$

Una vez que se ejecuta la regresión lineal, se obtiene los siguientes resultados:

**TABLA 47**

**ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN (FASE EXPERIMENTAL)**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,985
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,970
R <sup>2</sup> ajustado	0,923
Error típico	15,101
Observaciones	24

La tabla 48 la cual indica claramente que el  $\beta_0$  referente a la intercepción *no* posee una probabilidad aceptable ya que el valor es mayor a 0.05 con lo cual se entiende que no existe una relación claramente definida para ese coeficiente con el esfuerzo de ruptura.

TABLA 48

**VALORES P PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN (ECUACIÓN LOGARITMICA CON INTERCEPCIÓN) – FASE EXPERIMENTAL**

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
<i>Intercepción</i>	27,262	16,483	1,654	0,113
<i>Variable X 1</i>	-0,895	0,348	-2,575	0,018
<i>Variable X 2</i>	23,851	5,700	4,184	0,000

Por esta razón, se vuelve a evaluar la regresión pero descartando en valor de dicho coeficiente ya que para la ecuación representativa no aplica.

Los coeficientes obtenidos para la regresión múltiple se enlistan a continuación con su respectiva probabilidad:

TABLA 49

**VALORES P PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN (ECUACIÓN LOGARÍTMICA SIN INTERCEPCIÓN) – FASE EXPERIMENTAL**

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
<i>Intercepción</i>	0,000	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Porcentaje</i>	-0,744	0,348	-2,135	0,044
<i>Dias de Curado</i>	32,785	1,890	17,348	0,000

**TABLA 50 ANÁLISIS DE RESIDUALES – FASE EXPERIMENTAL**

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico Y</i>	<i>Residuos</i>	<i>Res. estándares</i>
1	73,673	15,547	1,119
2	69,198	1,952	0,141
3	64,723	22,197	1,598
4	60,248	-31,378	-2,259
5	55,772	8,848	0,637
6	51,297	-26,877	-1,935
7	90,206	5,284	0,380
8	85,730	-19,090	-1,374
9	81,255	6,265	0,451
10	76,780	14,000	1,008
11	72,304	9,966	0,717
12	67,829	4,511	0,325
13	99,876	-3,816	-0,275
14	95,401	-17,671	-1,272
15	90,926	12,614	0,908
16	86,450	2,850	0,205
17	81,975	-1,135	-0,082
18	77,500	3,510	0,253
19	106,738	-10,968	-0,789
20	102,262	10,768	0,775
21	97,787	-17,387	-1,252
22	93,312	-2,232	-0,161
23	88,837	10,703	0,770
24	84,361	1,539	0,111

Luego de este análisis se obtiene el modelo estadístico para a parte *experimental* que queda de la siguiente manera:

$$\text{Esfuerzo de Ruptura} = - 0.74 * (\% \text{ Limo}) + 32.79 * \ln (\text{DC})$$

De donde, DC son los días de curado. De la misma manera se procede para los datos de validación.

**TABLA 51**

**ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN (FASE VALIDACIÓN)**

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,982
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,963
R <sup>2</sup> ajustado	0,916
Error típico	15,463
Observaciones	24

**TABLA 52**

**ANÁLISIS DE VARIANZA (FASE VALIDACIÓN)**

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	138454,5	69227,266	289,51	5,16E-16
Residuos	22	5260,491	239,113		
Total	24	143715,0			

TABLA 53

**VALORES P PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN (ECUACIÓN LOGARITMICA CON INTERCEPCIÓN) – FASE VALIDACIÓN**

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	42,680	9,126	4,677	0,000
Variable X 1	-0,964	0,246	-3,911	0,001
Variable X 2	18,773	3,266	5,748	1,04964E-05

TABLA 54

**VALORES P PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN (ECUACIÓN LOGARITMICA SIN INTERCEPCIÓN) – FASE VALIDACIÓN**

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	-0,510	0,316	-1,613	0,121
Variable X 2	32,294	2,121	15,225	3,6397E-13

**TABLA 55 ANÁLISIS DE RESIDUALES – FASE VALIDACIÓN**

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico para Y</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	44,770	36,460	2,463
2	40,944	3,486	0,235
3	38,394	11,386	0,769
4	35,844	8,456	0,571
5	33,294	11,606	0,784
6	30,743	25,307	1,709
7	77,439	20,331	1,373
8	73,613	-13,183	-0,890
9	71,063	20,607	1,392
10	68,513	12,477	0,843
11	65,963	-11,853	-0,801
12	63,412	-0,052	-0,004
13	93,343	15,537	1,049
14	89,517	-6,157	-0,416
15	86,967	12,123	0,819
16	84,417	0,253	0,017
17	81,867	-14,547	-0,983
18	79,317	-1,317	-0,089
19	103,952	-11,312	-0,764
20	100,126	-9,046	-0,611
21	97,576	-5,906	-0,399
22	95,026	-4,666	-0,315
23	92,476	-23,026	-1,555
24	89,925	-14,085	-0,951

Luego de este análisis se obtiene el modelo estadístico para la *validación* que resulta de la siguiente manera:

$$\text{Esfuerzo de Ruptura} = -0.51 * (\% \text{ Limo}) + 32.294 * \ln (DC)$$

De donde DC equivalen a los días de curado.

El método de regresión es un instrumento útil para el análisis e interpretación de datos y permite hacer predicciones sobre el comportamiento del sistema en estudio; por lo cual se puede efectuar una comprobación de que los datos obtenidos experimentalmente se ajustan de la mejor manera a dicha ecuación pudiendo además obtener el porcentaje de error con el que se produce este ajuste lo cual se presenta en la siguiente tabla:



ERROR ENTRE MODELO TEÓRICO Y PRÁCTICO – FASE EXPERIMENTACIÓN

Esfuerzo de Ruptura Promedio vs. Porcentajes de Limolita		Esfuerzo de Ruptura Promedio [MPa]					
Porcentajes [%]	Día 7		Día 14		Día 28		Error [%]
	(Experimental)	(Modelo)	(Experimental)	(Modelo)	(Experimental)	(Modelo)	
0	89,22	63,80	95,49	86,52	95,77	109,25	10,37
5	71,15	60,08	66,64	82,80	113,03	105,53	22,49
10	86,92	56,36	87,52	79,08	80,4	101,81	10,67
15	28,87	52,64	90,78	75,36	82,27	71,64	20,46
20	64,62	48,92	82,27	71,64	72,34	67,92	14,84
25	24,42	45,20	45,97	67,92			6,51
	Día 21 (Experimental)	Día 21 (Modelo)	Día 28 (Experimental)	Día 28 (Modelo)			Error [%]
0	96,06	99,81	95,77	109,25			12,34
5	77,73	96,09	113,03	105,53			7,63
10	103,54	92,37	80,4	101,81			21,03
15	89,3	88,65	91,08	98,09			7,14
20	80,84	84,93	99,54	94,37			5,48
25	81,01	81,21	85,9	90,65			5,24

Mediante la ecuación referente a regresión lineal también se puede obtener datos teóricos referentes a la parte de validación, compararlos con los obtenidos en la práctica y calcular el porcentaje de error con el que se estiman esos datos así como se muestran a continuación:

$$\text{Esfuerzo de Ruptura} = -0.51 * (\text{Porcentaje Limo}) + 32.294 * \ln(\text{Días de Curado})$$

Ejemplo:

- Porcentaje de Validación: 22.5%
- Día: 11

Reemplazando en la ecuación se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Esf. Ruptura} &= -0.51 * 22.5 + 32.294 * \ln(11) \\ \text{Esf. Ruptura} &= 61.87 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

Comparando este valor 'teórico' con el obtenido en la práctica el cual fue de: 49.78 [MPa] se obtiene un error correspondiente a:

$$\text{Error} = \frac{(\text{Valor.teórico} - \text{Valor.experimental})}{\text{Valor.teórico}} \times 100\%$$

$$\text{Error} = 12,55 \text{ [%]}$$

De la misma manera se aplica para el resto de datos y se obtiene los siguientes resultados:

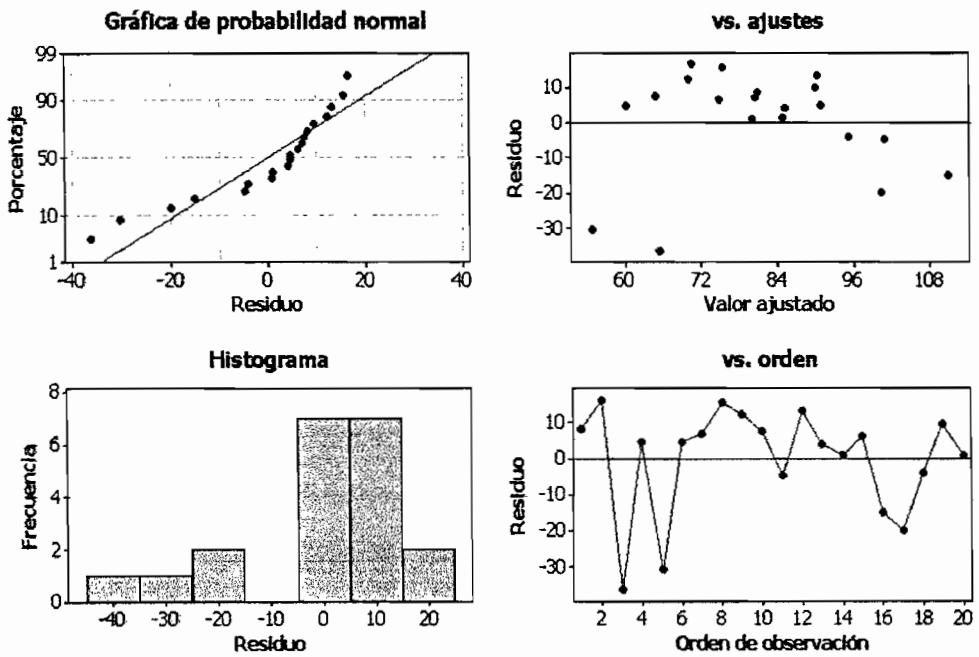
TABLA 57

ERROR ENTRE MODELO TEÓRICO Y PRÁCTICO -- FASE VALIDACIÓN

Esfuerzo de Ruptura Promedio vs. Porcentajes de Limolita - Validación		Esfuerzo de Ruptura Promedio [MPa]						
Porcentajes [%]	Día 4		Día 11		Día 18		Día 25	
	(Experimental)	(Modelo)	(Experimental)	(Modelo)	(Experimental)	(Modelo)	(Experimental)	(Modelo)
0	81,23	45,45	97,77	78,61	92,64	105,53	91,67	96,23
7,5	44,43	39,87	60,43	73,03	91,08	99,95	90,36	92,51
12,5	49,78	36,15	91,67	69,31	91,67	96,23	90,36	92,51
17,5	44,3	32,43	80,99	65,59	91,67	96,23	90,36	92,51
22,5	44,9	28,71	54,11	61,87	91,67	96,23	90,36	92,51
27,5	56,05	24,99	63,36	58,15	91,67	96,23	90,36	92,51
	Día 18 (Experimental)	Día 18 (Modelo)	Día 25 (Experimental)	Día 25 (Modelo)	Error [%]	Error [%]	Error [%]	Error [%]
0	108,88	94,76	92,64	105,53	14,90	12,22	91,67	96,23
7,5	83,36	89,18	91,08	99,95	6,38	7,59	90,36	92,51
12,5	99,09	85,46	91,67	96,23	15,95	4,74	90,36	92,51
17,5	84,67	81,74	90,36	92,51	3,58	2,32	90,36	92,51
22,5	67,32	78,02	69,45	88,79	13,72	21,78	69,45	88,79
27,5	78	74,30	75,84	85,07	4,98	10,85	75,84	85,07

Mediante el siguiente gráfico, se comprueba la normalidad de los datos que es una de las suposiciones fundamentales en las que está basado el análisis de varianza.

### Gráficas de residuos para Esf. Ruptura



**FIG. 4.26 RESIDUOS PARA ESFUERZO DE RUPTURA**

### 4.3 Identificación de cambio de propiedades

#### - **Selección del mejor tratamiento**: Fase de Experimentación

Para poder determinar el mejor tratamiento en lo referente a porcentajes y en lo referente a días de curado, se procede a aplicar, mediante el software estadístico, el método de Tukey, el mismo que se lo realiza en dos partes:

- Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje
- Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Días de curado

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

#### - **Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje**

Se procede a analizar cuál es el mejor tratamiento respecto al porcentaje de limolita. El método consiste en separar las variables en factores, en este caso tenemos porcentaje de limolita. Por

cada nivel de porcentaje se obtiene la media. Como se lo puede observar en la siguiente tabla:

**TABLA 58**  
**ANÁLISIS DE TUKEY: ESFUERZO DE RUPTURA VS.**  
**PORCENTAJE DE LIMOLITA )**

	Día 7	Día 14	Día 21	Día 28	Media
<b>0%</b>	89.22	95.49	96.06	95.77	94.14
<b>5%</b>	71.15	66.64	77.73	113.03	82.14
<b>10%</b>	86.92	87.52	103.54	80.4	89.60
<b>15%</b>	28.87	90.78	89.3	91.08	75.01
<b>20%</b>	64.62	82.27	80.84	99.54	81.82
<b>25%</b>	24.42	72.34	81.01	85.9	65.92

De la tabla 57 se obtiene que el mayor valor de esfuerzo de ruptura ocurre con un 0% de aditivo, pero para efectos de comparación con el control se toma el segundo mejor valor que ocurre con un *10% de limolita en curado bajo agua*.

- *Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Días de Curado*

Para este segundo factor (días de curado) se obtuvo las medias por cada día en los diferentes porcentajes, lo cual se presenta en la tabla 58:

TABLA 59

**ANÁLISIS DE TUKEY: ESFUERZO DE RUPTURA VS. DÍAS DE  
CURADO**

	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>21</b>	<b>28</b>
<b>0%</b>	89.22	95.49	96.06	95.77
<b>5%</b>	71.15	66.64	77.73	113.03
<b>10%</b>	86.92	87.52	103.54	80.4
<b>15%</b>	28.87	90.78	89.3	91.08
<b>20%</b>	64.62	82.27	80.84	99.54
<b>25%</b>	24.42	72.34	81.01	85.9
<b>Media</b>	60.87	82.51	88.08	94.29

De la tabla 58 se obtiene que los dos mejores tratamientos se encuentran a los 28 y 21 días de curado respectivamente.

Como se puede apreciar, este método estadístico utiliza las medias por lo que se tiene más de una alternativa y no siempre el valor más alto que nos resulta es el mejor método, dado que los valores que se encuentran alrededor pueden ser muy altos o muy bajos.

TABLA 60

**ANÁLISIS DE TUKEY: SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO**

	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>21</b>	<b>28</b>
<b>0%</b>	89.22	95.49	96.06	95.77
<b>10%</b>	86.92	87.52	103.54	80.4

La tabla 59 muestra en resumen la selección en conjunto del mejor tratamiento.

TABLA 61

**ANÁLISIS DE TUKEY: SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO  
(CEMENTO PORTLAND TIPO IV)**

	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>21</b>	<b>28</b>
<b>TIPO IV</b>	49.01	60.33	75.46	65.66

En la tabla 60 se observan los resultados correspondientes al cemento comercial tipo IV para 7, 14, 21, 28 de curado en agua, el mejor valor de esfuerzo de ruptura ocurre a los 21 días el cual al compararlo con el resultado obtenido en la tabla 59 de la cual el mejor resultado se da a los 21 días se puede aseverar que existe una mejora en el esfuerzo de ruptura.



**- Selección del mejor tratamiento: Fase de Validación**

De la misma manera que en la fase de experimentación, se efectúa el análisis Tukey para la selección del mejor tratamiento en comparación con el 0% de aditivo; para lo cual se lo realiza en dos partes:

- Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje
- Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Días de curado
- Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Días de Curado vs. Porcentaje de Limolita

Se procede de igual manera para el análisis en la parte de experimentación y se puede observar que la mejor respuesta ocurre al 0% y 12.5% de limolita y a 18 y 25 días de curado.

**TABLA 62**

**ANÁLISIS DE TUKEY: ESFUERZO DE RUPTURA VS. DÍAS DE CURADO (VALIDACIÓN)**

	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>25</b>	
<b>0%</b>	81.23	97.77	108.88	92.64	95.13
<b>7.5%</b>	44.43	60.43	83.36	91.08	69.83
<b>12.50%</b>	49.78	91.67	99.09	91.67	83.05
<b>17.50%</b>	44.3	80.99	84.67	90.36	75.08
<b>22.50%</b>	44.9	54.11	67.32	69.45	58.95
<b>27.50%</b>	56.05	63.36	78	75.84	68.31
	53.45	74.72	86.89	85.17	

**TABLA 63**  
**ANÁLISIS DE TUKEY: SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO**  
**(VALIDACIÓN)**

	4	11	18	25
0%	81.23	97.77	108.88	92.64
12.50%	49.78	91.67	99.09	91.67

La mejor respuesta se la encuentra a los 18 días y 0% de limolita.

**TABLA 64**  
**ANÁLISIS DE TUKEY: SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO –**  
**VALIDACIÓN (CEMENTO PORTLAND TIPO IV)**

	4	11	18	25
TIPO IV	45.89	56.24	62.4	62.84

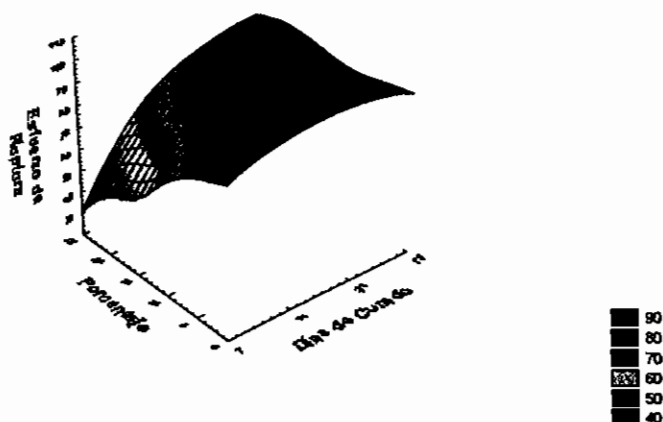
En la tabla 63 se observan los resultados correspondientes al cemento comercial tipo IV para 4, 11, 18, 25 de curado en agua, en donde el mejor valor de esfuerzo de ruptura ocurre a los 25 días el cual se compara con el resultado obtenido en la tabla 62

De la cual el mejor resultado se da a los 18 días. Se puede decir que existe una mejora en el esfuerzo de ruptura.

### - Análisis en el Espacio

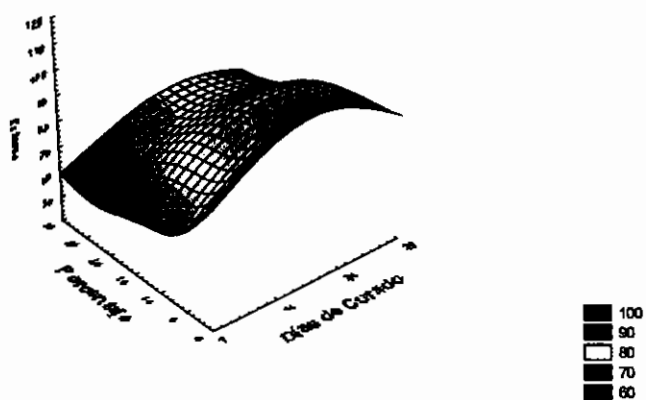
Todo el comportamiento descrito y demostrado previamente es fácilmente visible en el espacio tridimensional en donde se puede observar que el mayor esfuerzo de ruptura se lo obtiene a los 21 días de curado con un 10% de limolita.

**GRAFICA DE SUPERFICIE**



**FIG. 4.27 GRÁFICO EN EL ESPACIO – ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE DE LIMOLITA VS. DÍAS DE CURADO**

## GRAFICA DE SUPERFICIE



**FIG. 4.28 GRÁFICO EN EL ESPACIO – ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE DE LIMOLITA VS. DÍAS DE CURADO (VALIDACIÓN)**

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Mediante un código fuente adecuado desarrollado por la herramienta Matlab se pudo verificar que la pasta de cemento es un material elasto-plástico.
- En base a los datos experimentales se obtuvo información referente a las propiedades mecánicas de la pasta del cemento (Módulo de elasticidad, Esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura) a diferentes porcentajes de limolita los mismos que permitieron ajustar la curva ideal esfuerzo deformación correspondientes a la pasta de cemento y así poder compararla con la curva experimental para obtener un porcentaje de error de dicho ajuste.
- Para el modelamiento matemático referente a nuestros datos experimentales se requirieron de constantes positivas ( $a$  y  $m$ ) que son propias de cada material con las cuales se pudo realizar un ajuste adecuado tanto de la curva teórica y curva experimental.

- Mediante herramientas estadísticas se obtuvieron varias posibles ecuaciones que relacionan la variable dependiente (esfuerzo de ruptura) con las variables independientes (porcentaje de limolita y días de curado) pero la única que se ajustó con un alto grado de confiabilidad fue la ecuación obtenida mediante regresión múltiple logarítmica la misma que se presenta a continuación y que es válida para 0, 5, 10, 15, 20 y 25% de limolita así como para 7, 14, 21, y 28 días de curado en agua.

$$\text{Esf. Ruptura} = - 0.744 \text{ Porcentaje} + 32.79 \ln (\text{Días de curado})$$

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

## 5.2 Recomendaciones

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

# ANEXOS

## - A. Código fuente

A continuación se presenta el código fuente utilizado para obtener las curvas esfuerzo vs. Deformación experimental.

```
% 10% - DIA 7 - EXPERIMENTAL
```

```
clc;
```

```
clear all;
```

```
ep=[0
```

```
0.00254
```

```
0.00508
```

```
0.00762
```

```
0.01016
```

```
0.0127
```

```
0.01524
```

```
0.01778
```

```
0.02032];
```

```
sigp=[0
```

```
5.696
```

```
21.182
```

```
37.558
```

```
41.652
```

```
57.85
```

```
74.76
```

```
87.22
```

```
93.45];
```

```
plot(ep,sigp, '+')
```



```
xlabel('Deformación'),ylabel('Esfuerzo (MPa)');
title ('ESFUERZO VS DEFORMACION');
```

A continuación se presenta el código fuente utilizado para obtener las curvas esfuerzo vs. Deformación teórica.

```
% 10% - DIA 7 - muestra 1 - TEORICO
clc;
clear all;
E=4905.91; %Varía en cada gráfico
sigmayo=87.22; %Varía en cada gráfico
m=0.06; %Varía en cada gráfico
a=0.6; %Varía en cada gráfico
deltae=0.0025; %DELTA DEFORMACION es fijo
et=0.02032; % máxima defromación, %Varía en cada gráfico
sigman(1,1)=0;
sigmayn(1,1)=sigmayo;
eps=0:deltae:et;
eps=eps';
d=size(eps);
e=d(1,1);
lampdao=10^-8;
lampda(1,1)=0;
for k=1:e-1
sigmatrn1=sigman(k,1)+E*deltae
Fntm1=abs(sigmatrn1)-sigmayn(k,1)
```

```

if Fntrn1>0
deltalampda(1,1)=3; %se asume este valor inicial
Fo=Fntrn1-
deltalampda(1,1)*(E+a*sigmayo*(m/(deltalampda(1,1)+lampdao)^
0.5)*(m-deltalampda(1,1)-
lampdao)/(m+deltalampda(1,1)+lampdao)^2);
Fn1=Fo;
i=1;
Tol=10^-10;
lim=30;
lampda1=deltalampda(i,1)+lampdao;
while abs(Fn1)>=abs(Fo)*Tol&i<lim,
syms deltaepsilon;
Rn1=Fntrn1-
deltaepsilon*(E+a*sigmayo*((m/(deltaepsilon+lampdao))^0.5)*(m-
deltaepsilon-lampdao)/(m+deltaepsilon+lampdao)^2);
Fn(i,1)=Fntrn1-
deltalampda(i,1)*(E+a*sigmayo*((m/(deltalampda(i,1)+lampdao))^
0.5)*(m-deltalampda(i,1)-
lampdao)/(m+deltalampda(i,1)+lampdao)^2);
deldellampda=
(subs(diff(Rn1,deltaepsilon),deltaepsilon,deltalampda(i,1)))^
1*Fn(i,1);
deltalampda(i+1,1)=deltalampda(i,1)+deldellampda;
Fn(i+1,1)=Fntrn1-
deltalampda(i+1,1)*(E+a*sigmayo*((m/(deltalampda(i+1,1)+lampd

```

```

ao))^0.5)*(m-deltalampda(i+1,1)-
lampdao)/(m+deltalampda(i+1,1)+lampdao)^2);
l(1,1)=1;
F(1,1)=log10(abs(Fn(1,1))/abs(Fo));
Fn1=Fn(i+1,1);
l(i+1,1)=i+1;
F(i+1,1)=log10(abs(Fn(i+1,1))/abs(Fo));
i=i+1;
end
delta=deltalampda(i,1);
lampda1=delta + lampdao;
Hp=a*sigmayo*((m/lampda1)^0.5)*(m-lampda1)/(m+lampda1)^2;
sigman(k+1,1)=sigmatrn1-E*delta*sign(sigmatrn1);
sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1)+Hp*delta;
lampdao=lampda1;
lampda(k+1,1)=lampdao;
else
sigman(k+1,1)=sigmatrn1;
sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1);
end
end
size(sigman)
size(eps)
hold on
plot(eps,sigman, 'g')

```

## B. Tablas Experimentales

TABLA 18

**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 -  
10% - 7 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [MPa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	14240	5,696	2242,52	
0,00508	52955	21,182	6096,85	4169,69
0,00762	93895	37,558	6447,24	4928,87
0,01016	104130	41,652	1611,81	4099,61
0,0127	144625	57,85	6377,17	4555,12
0,01524	186900	74,76	6657,48	4905,51
0,01778	218050	87,22	4905,51	4905,51
0,02032	233625	93,45	2452,76	4598,92

**TABLA 19**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 -**  
**10% - 7 DÍAS**

<b>Deformación.</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [MPa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	12460	4,984	1962,20	
0,00508	49395	19,758	5816,54	3889,37
0,00762	60965	24,386	1822,05	3200,26
0,01016	105910	42,364	7077,95	4169,69
0,0127	166875	66,75	9600,79	5255,91
0,01524	204700	81,88	5956,69	5372,70

**TABLA 20**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 - 10% -**  
**7 DÍAS**

<b>Deformación.</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [MPa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	22250	8,9	3503,94	
0,00508	69865	27,946	7498,43	5501,18
0,00762	114365	45,746	7007,87	6003,41
0,01016	178000	71,2	10021,26	7007,87
0,0127	213600	85,44	5606,30	6727,566

**TABLA 21**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 - 10% -**  
**14 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [Pa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	7565	3,026	1191,34	
0,00508	24030	9,612	2592,91	1892,13
0,00762	58740	23,496	5466,14	3083,47
0,01016	86330	34,532	4344,88	3398,82
0,0127	137950	55,18	8129,13	4344,88
0,01524	186900	74,76	7708,66	4905,51
0,01778	209150	83,66	3503,94	4705,29
0,02032	213600	85,44	700,79	4204,72

**TABLA 22**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 - 10% -**  
**14 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	11570	4,628	1822,047	
0,00508	42275	16,91	4835,433	3328,74
0,00762	74315	29,726	5045,669	3901,05
0,01016	122375	48,95	7568,504	4817,91
0,0127	171325	68,53	7708,661	5396,06
0,01524	213600	85,44	6657,48	5606,30
0,01778	222500	89	1401,575	5005,62

**TABLA 23**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 - 10% -**  
**14 DÍAS**

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]	E [Mpa]	Pendiente [MPa]
0	0	0		
0,00254	6675	2,67	1051,181	
0,00508	17800	7,12	1751,969	1401,57
0,00762	44500	17,8	4204,724	2335,96
0,01016	82770	33,108	6026,772	3258,66
0,0127	126825	50,73	6937,795	3994,49
0,01524	182450	72,98	8759,843	4788,71
0,01778	209150	83,66	4204,724	4705,29
0,02032	220275	88,11	1751,969	4336,12



**TABLA 24**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 - 10% -**  
**21 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [MPa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	8455	3,382	1331,50	
0,00508	26700	10,68	2873,23	2102,36
0,00762	57850	23,14	4905,51	3036,75
0,01016	95675	38,27	5956,69	3766,73
0,0127	140175	56,07	7007,87	4414,96
0,01524	193575	77,43	8409,45	5080,71
0,01778	231400	92,56	5956,69	5205,85
0,02032	271450	108,58	6307,09	5343,50

**TABLA 25**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 - 10% -**  
**21 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [MPa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	4005	1,602	630,71	
0,00508	14240	5,696	1611,81	1121,26
0,00762	18245	7,298	630,71	957,74
0,01016	40495	16,198	3503,94	1594,29
0,0127	80100	32,04	6237,01	2522,83
0,01524	126825	50,73	7358,27	3328,74
0,01778	171325	68,53	7007,87	3854,33
0,02032	218050	87,22	7358,27	4292,32
0,02286	249200	99,68	4905,51	4360,45

**TABLA 26**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 - 10% -**  
**21 DÍAS**

Deformación.	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]	E [MPa]	Pendiente [MPa]
0	0	0		
0,00254	6675	2,67	1051,18	
0,00508	18690	7,476	1892,13	1471,65
0,00762	35155	14,062	2592,91	1845,41
0,01016	69865	27,946	5466,14	2750,59
0,0127	117925	47,17	7568,50	3714,17
0,01524	166875	66,75	7708,66	4379,92
0,01778	213600	85,44	7358,27	4805,40
0,02032	244750	97,9	4905,51	4817,91
0,02286	255875	102,35	1751,97	4477,25

**TABLA 27**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 - 10% -**  
**28 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [MPa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0			
0,00254	5340	2,136	840,94	840,94
0,00508	15130	6,052	1541,73	1191,34
0,00762	36490	14,596	3363,78	1915,49
0,01016	96120	38,448	9390,55	3784,25
0,0127	178000	71,2	12894,488	5606,30
0,01524	244750	97,9	10511,811	6423,88
0,01778	255875	102,35	1751,9685	5756,47

**TABLA 28**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 - 10% -**  
**28 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Pa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	4450	1,78	700,79	700,79
0,00508	10235	4,094	911,02	805,91
0,00762	18690	7,476	1331,50	981,10
0,01016	52065	20,826	5255,91	2049,80
0,0127	93895	37,558	6587,40	2957,32
0,01524	173550	69,42	12544,09	4555,12
0,01778	213600	85,44	6307,09	4805,40

**TABLA 29**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 - 10% -**  
**28 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Pa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	4895	1,958	770,87	770,847
0,00508	11125	4,45	981,10	875,98
0,00762	24920	9,968	2172,44	1308,14
0,01016	54735	21,894	4695,28	2154,92
0,0127	87220	34,888	5115,75	2747,09
0,01524	133500	53,4	7288,19	3503,94

**TABLA 30**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 - 12.5%**  
**- 4 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	3234	1,2936	509,29	
0,00508	8624	3,4496	848,82	679,06
0,00762	16660	6,664	1265,51	874,54
0,01016	28812	11,5248	1913,7	1134,33
0,0127	41160	16,464	1944,57	1296,38
0,01524	55370	22,148	2237,8	1453,28
0,01778	66150	26,46	1697,64	1488,19
0,02032	83300	33,32	2700,79	1639,76
0,02286	98000	39,2	2314,96	1714,79
0,0254	112700	45,08	2314,96	1774,80
0,02794	124950	49,98	1929,13	1788,83
0,03048	128380	51,352	540,157	1684,78

**TABLA 31**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 – 12.5%**  
**- 4 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	1960	0,784	308,66	
0,00508	4410	1,764	385,83	347,24
0,00762	6664	2,6656	354,96	349,82
0,01016	10486	4,1944	601,89	412,83
0,0127	13720	5,488	509,29	432,13
0,01524	20384	8,1536	1049,45	535,01
0,01778	32144	12,8576	1851,97	723,15
0,02032	45570	18,228	2114,33	897,05
0,02286	61250	24,5	2469,29	1071,74
0,0254	73500	29,4	1929,13	1157,48
0,02794	90650	36,26	2700,79	1297,78
0,03048	104370	41,748	2160,63	1369,69
0,03302	120050	48,02	2469,29	1454,27



**TABLA 32**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 – 12.5%**  
**- 4 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	3920	1,568	617,32	
0,00508	12250	4,9	1311,81	964,57
0,00762	24990	9,996	2006,30	1311,81
0,01016	38024	15,2096	2052,60	1497,01
0,0127	45668	18,2672	1203,78	1438,36
0,01524	56350	22,54	1682,21	1479,00
0,01778	73500	29,4	2700,79	1653,54
0,02032	93100	37,24	3086,61	1832,68
0,02286	112700	45,08	3086,614	1972,00
0,0254	124950	49,98	1929,134	1967,72

**TABLA 33**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 – 12.5%**  
**- 11 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Pa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	18245	7,30	2873,23	
0,00508	72090	28,836	8479,53	5676,38
0,00762	131275	52,51	9320,47	6891,08
0,01016	169100	67,64	5956,69	6657,48
0,0127	209150	83,66	6307,09	6587,40
0,01524	222500	89	2102,36	5839,89

**TABLA 34**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 – 12.5%**  
**- 11 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [MPa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	12460	4,984	1962,20	
0,00508	73425	29,37	9600,79	5781,50
0,00762	135725	54,29	9811,02	7124,67
0,01016	193575	77,43	9110,23	7621,06
0,0127	231400	92,56	5956,69	7288,19

**TABLA 34**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 – 12.5%**  
**- 11 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	10235	4,094	1611,81	
0,00508	67195	26,878	8970,08	5290,94
0,00762	100125	40,05	5185,83	5255,91
0,01016	149075	59,63	7708,66	5869,09
0,0127	193575	77,43	7007,87	6096,85
0,01524	233625	93,45	6307,09	6131,89

**TABLA 35**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 – 12.5%**  
**- 18 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	6675	2,67	1051,18	
0,00508	21360	8,544	2312,60	1681,89
0,00762	56070	22,428	5466,14	2943,31
0,01016	126825	50,73	11142,52	4993,11
0,0127	160200	64,08	5255,91	5045,67
0,01524	206925	82,77	7358,27	5431,10
0,01778	242525	97,01	5606,30	5456,13

**TABLA 36**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 – 12.5%**  
**- 18 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	2225	0,89	350,39	
0,00508	6675	2,67	700,79	525,59
0,00762	12460	4,984	911,02	654,07
0,01016	41830	16,732	4625,20	1646,85
0,0127	89000	35,6	7428,34	2803,15
0,01524	153525	61,41	10161,42	4029,53
0,01778	215825	86,33	9811,02	4855,46
0,02032	251425	100,57	5606,30	4949,31

**TABLA 37**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 – 12.5%**  
**- 18 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	5340	2,136	840,94	
0,00508	10235	4,094	770,87	805,91
0,00762	37380	14,952	4274,80	1962,20
0,01016	82770	33,108	7148,03	3258,66
0,0127	142400	56,96	9390,55	4485,04
0,01524	209150	83,66	10511,81	5489,50
0,01778	249200	99,68	6307,09	5606,30

**TABLA 38**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 1 – 12.5%**  
**- 25 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	6675	2,67	1051,18	
0,00508	20915	8,366	2242,52	1646,85
0,00762	52510	21,004	4975,59	2756,43
0,01016	87220	34,888	5466,14	3433,86
0,0127	144625	57,85	9040,16	4555,12
0,01524	198025	79,21	8409,45	5197,51
0,01778	242525	97,01	7007,87	5456,13
0,02032	264775	105,91	3503,94	5212,11



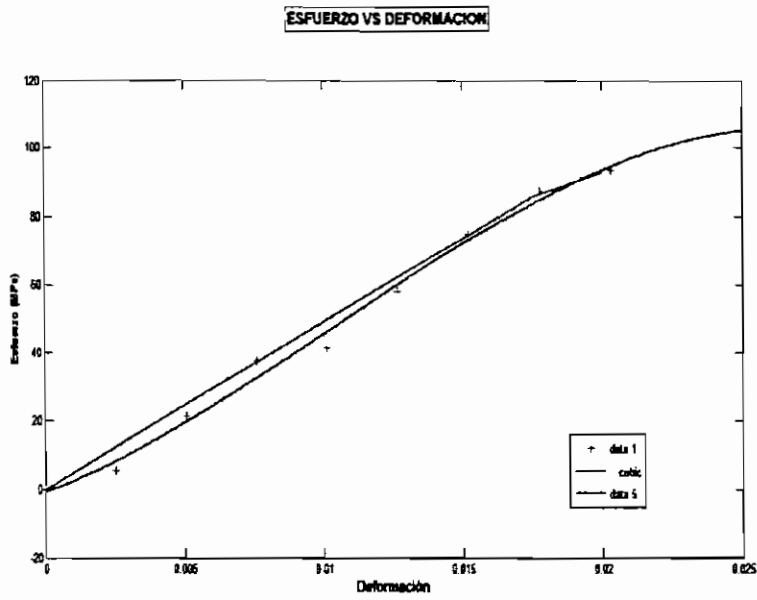
**TABLA 39**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 2 – 12.5%**  
**- 25 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	4005	1,602	630,71	
0,00508	10235	4,094	981,10	805,91
0,00762	18245	7,298	1261,42	957,74
0,01016	40940	16,376	3574,02	1611,81
0,0127	71200	28,48	4765,35	2242,52
0,01524	93450	37,38	3503,94	2452,76
0,01778	140175	56,07	7358,27	3153,54
0,02032	169100	67,64	4555,12	3328,74
0,02286	195800	78,32	4204,73	3426,07

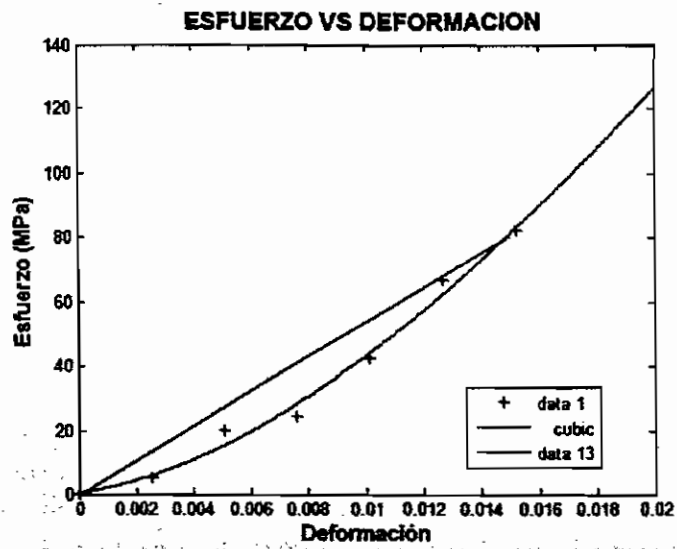
**TABLA 40**  
**ESFUERZOS Y MÓDULO DE ELASTICIDAD: MUESTRA 3 – 12.5%**  
**- 25 DÍAS**

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>E [Mpa]</b>	<b>Pendiente [MPa]</b>
0	0	0		
0,00254	7565	3,026	1191,34	
0,00508	20470	8,188	2032,28	1611,81
0,00762	37380	14,952	2662,99	1962,20
0,01016	70310	28,124	5185,83	2768,11
0,0127	129050	51,62	9250,39	4064,57
0,01524	178000	71,2	7708,66	4671,92
0,01778	226950	90,78	7708,66	5105,74

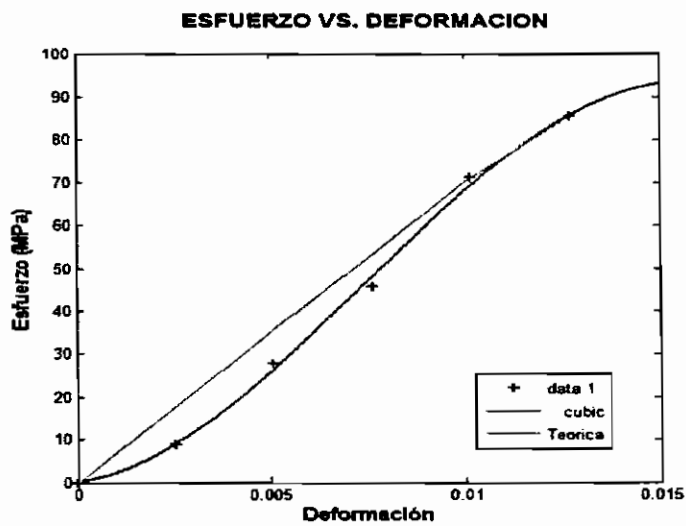
- C. Figuras



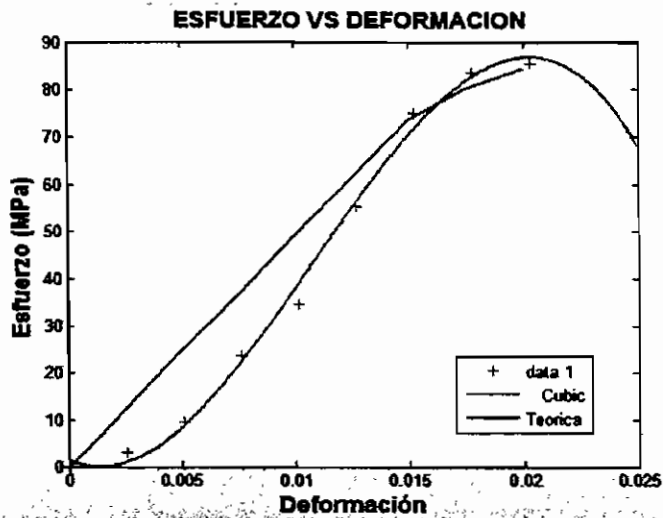
**FIG. 4.1 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 10% - 7 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



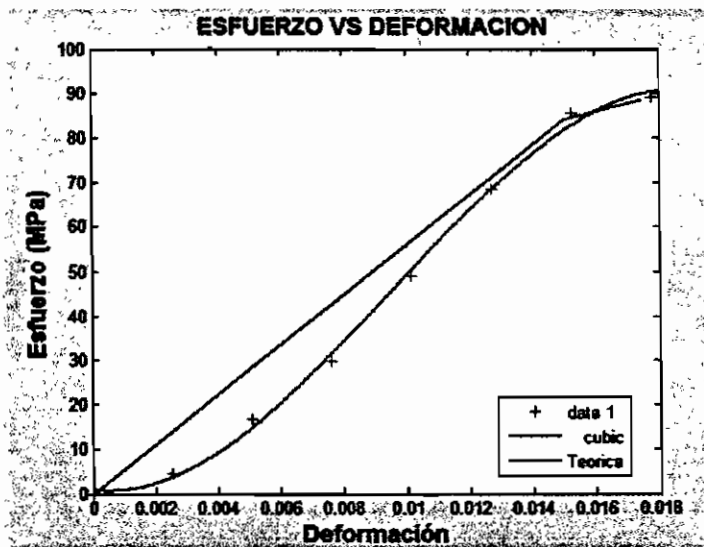
**FIG. 4.2 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 10% - 7 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



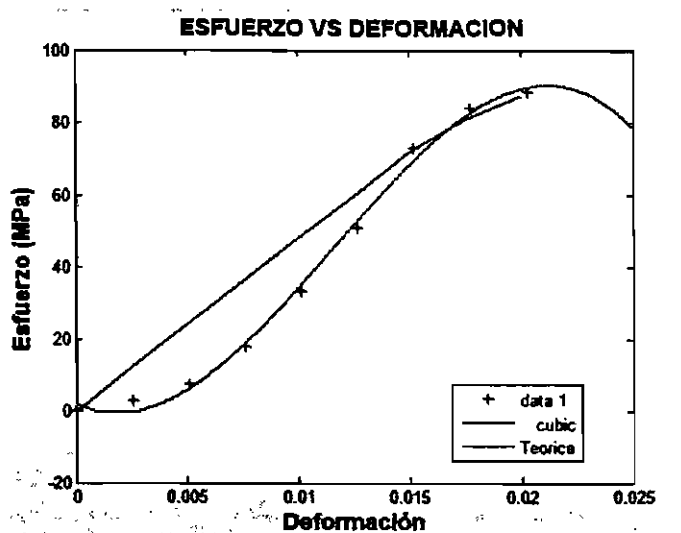
**FIG. 4.3 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 10% - 7 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



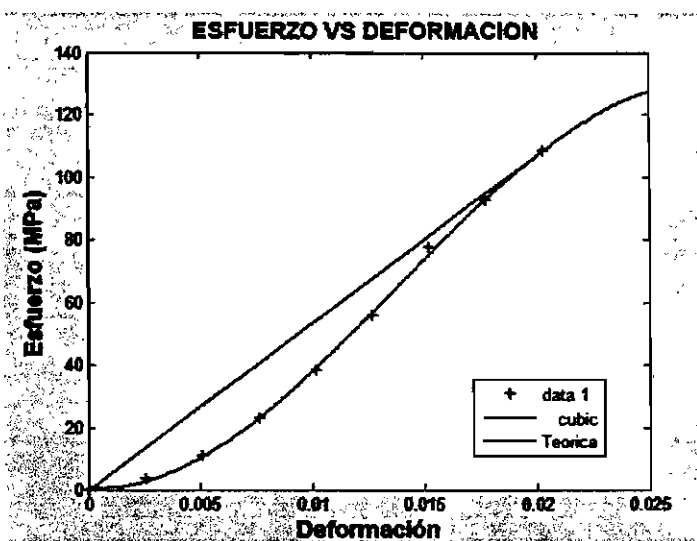
**FIG. 4.4 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 10% - 14 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



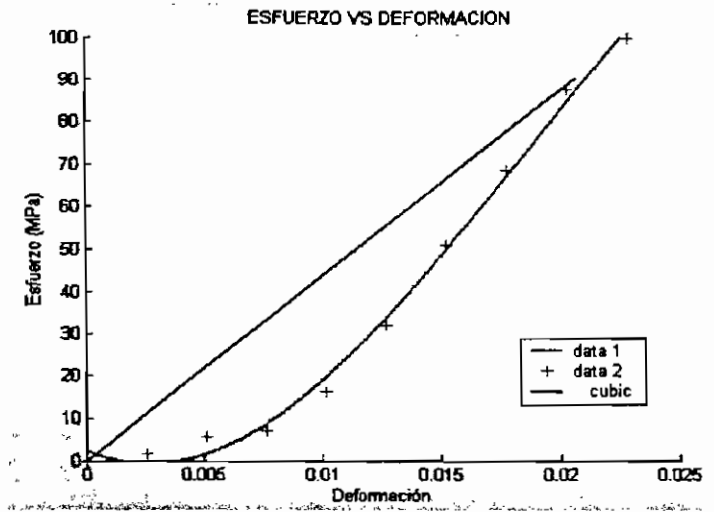
**FIG. 4.5 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 10% - 14 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



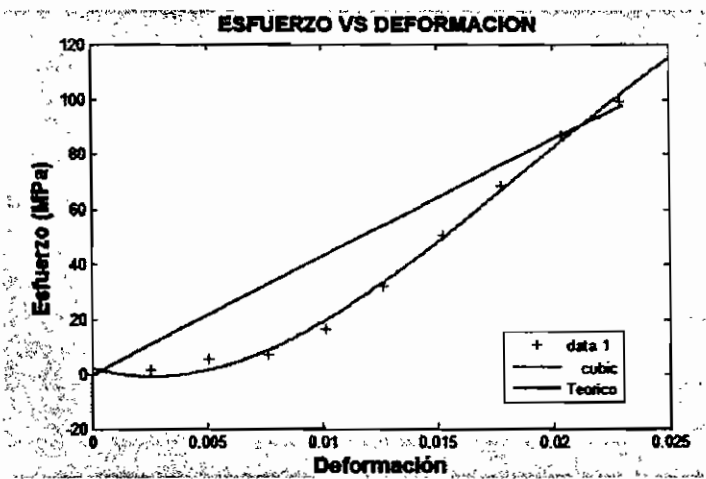
**FIG. 4.6 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 10% - 14 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



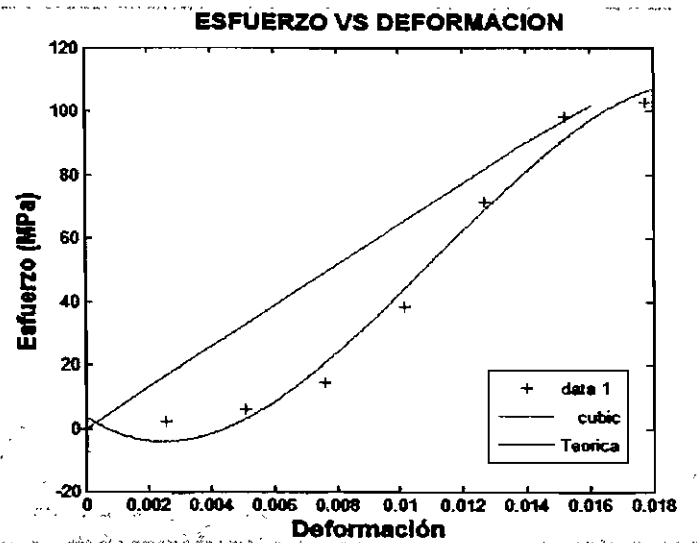
**FIG. 4.7 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 10% - 21 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



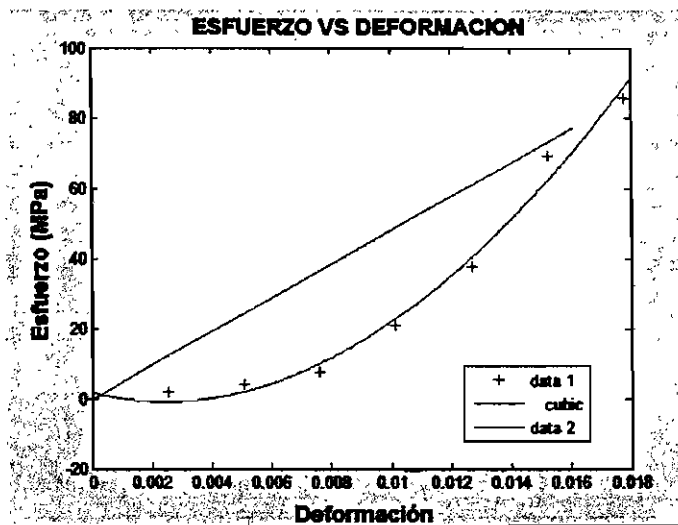
**FIG. 4.8 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 10% - 21 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



**FIG. 4.9 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 10% - 21 DIAS) –  
MODELO MATLAB**

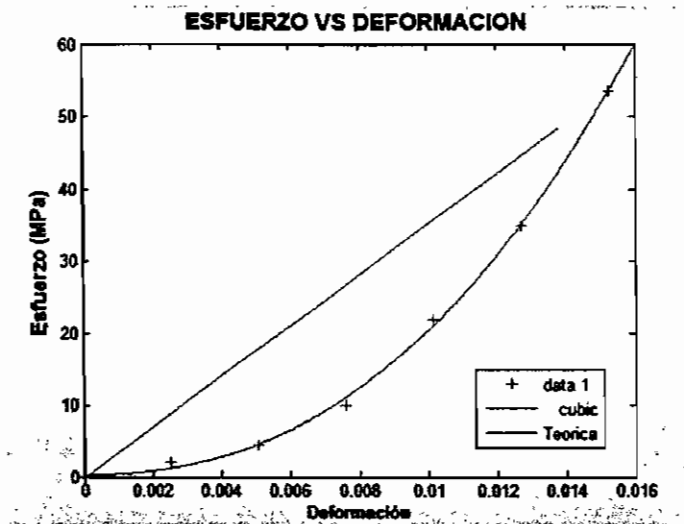


**FIG. 4.10 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 10% - 28 DIAS) –  
MODELO MATLAB**

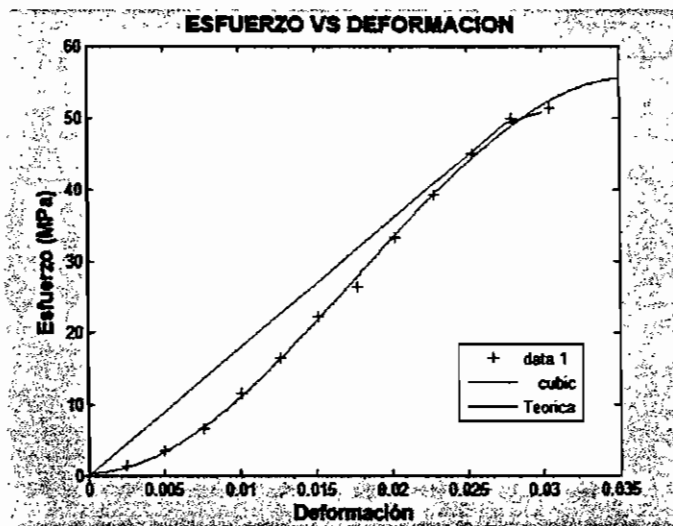


**FIG. 4.11 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 10% - 28 DIAS) –  
MODELO MATLAB**





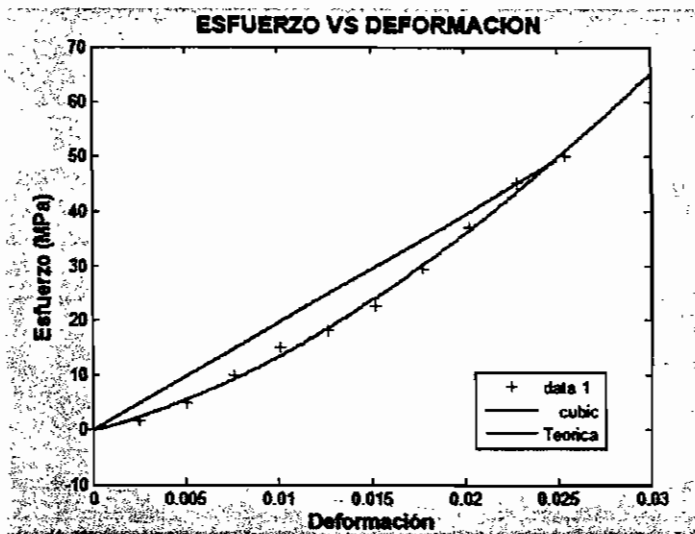
**FIG. 4.12 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 10% - 28 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



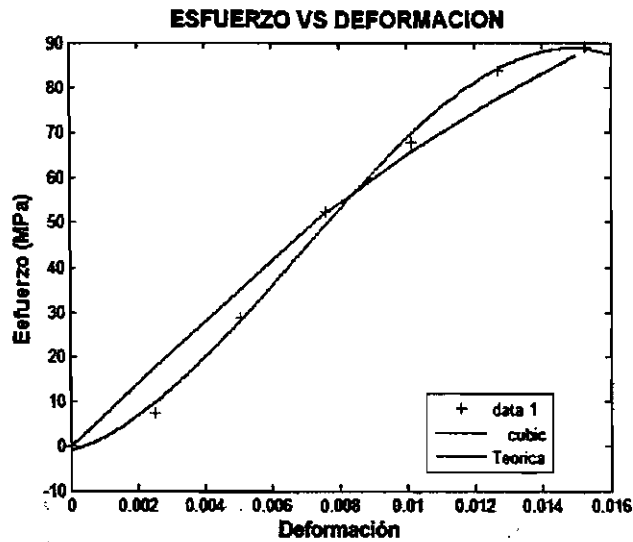
**FIG. 4.13 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 12.5% - 4 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



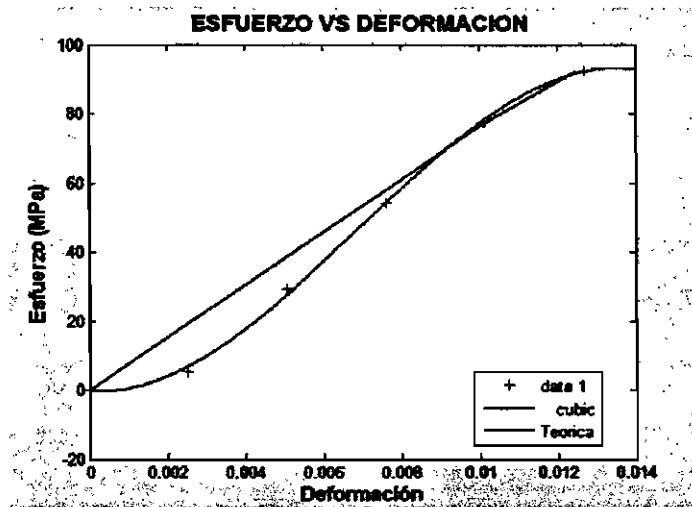
**FIG. 4.14 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 12.5% - 4 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



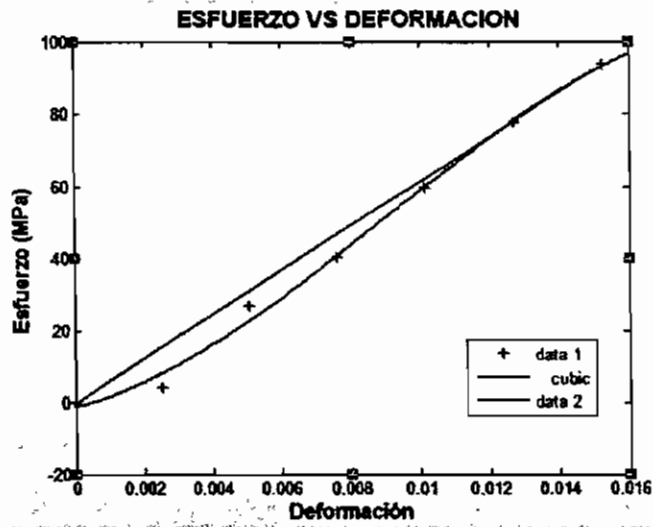
**FIG. 4.15 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 12.5% - 4 DIAS) –  
MODELO MATLAB**



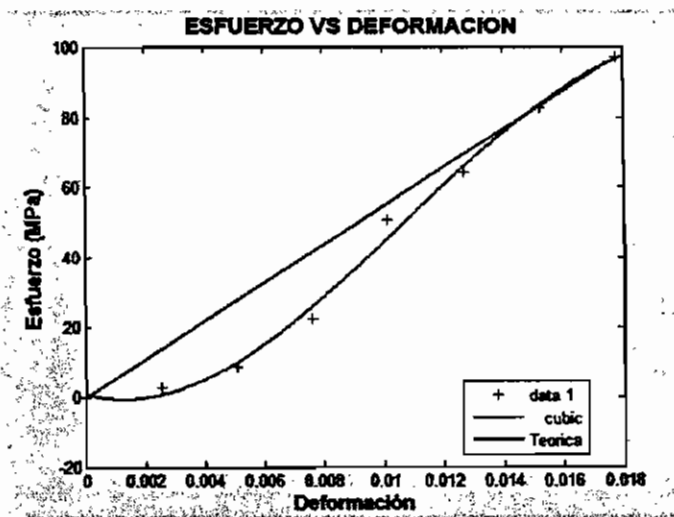
**FIG. 4.16 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 12.5% - 11 DIAS)  
– MODELO MATLAB**



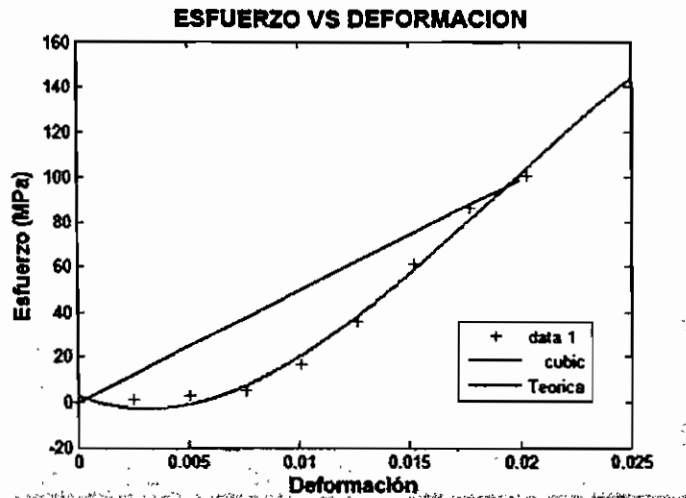
**FIG. 4.17 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 12.5% - 11 DIAS)  
– MODELO MATLAB**



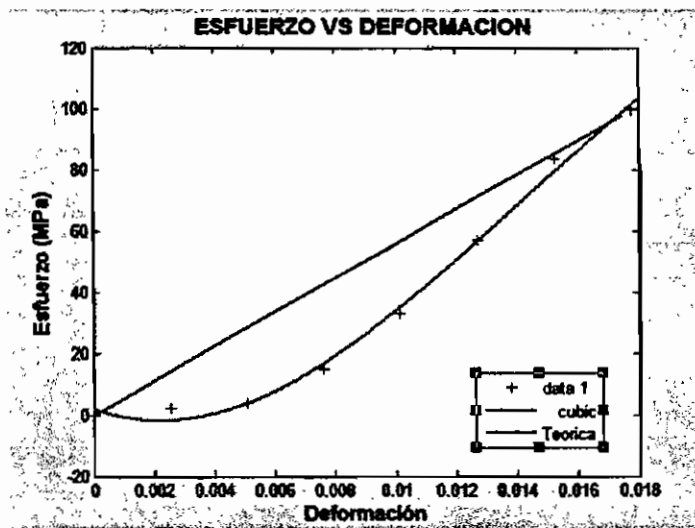
**FIG. 4.18 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 12.5% - 11 DIAS) – MODELO MATLAB**



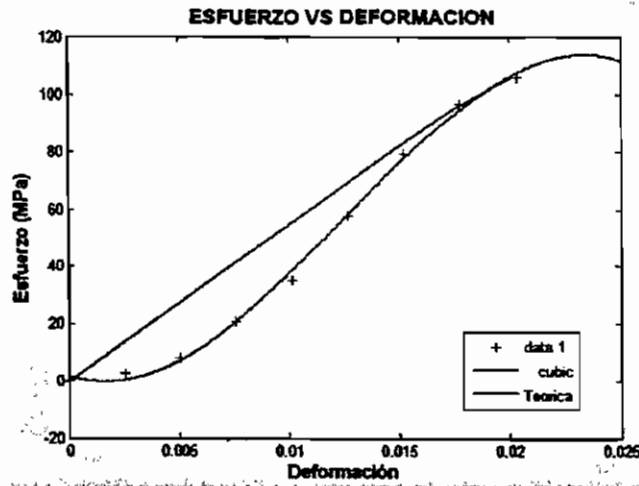
**FIG. 4.19 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 12.5% - 18 DIAS)  
– MODELO MATLAB**



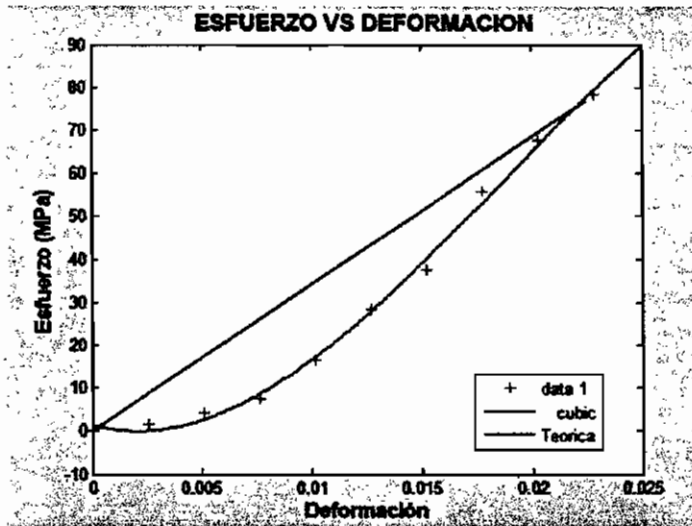
**FIG. 4.20 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 12.5% - 18 DIAS)  
– MODELO MATLAB**



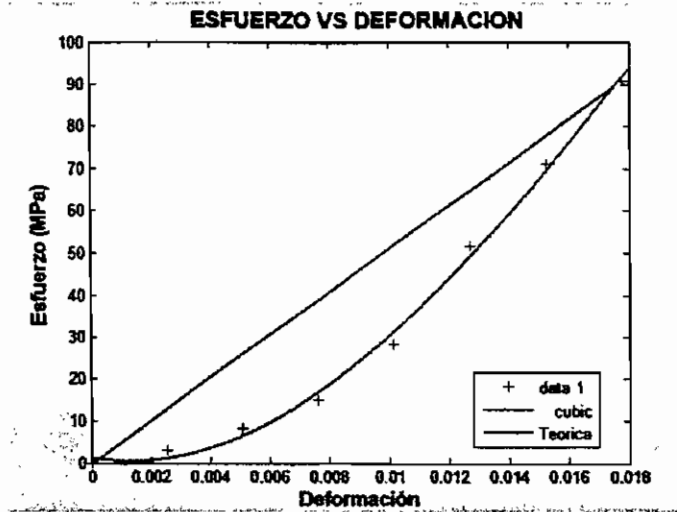
**FIG. 4.21 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 12.5% - 18 DIAS)  
– MODELO MATLAB**



**FIG. 4.22 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M1 – 12.5% - 25 DIAS)  
– MODELO MATLAB**



**FIG. 4.23 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M2 – 12.5% - 25 DIAS)  
– MODELO MATLAB**

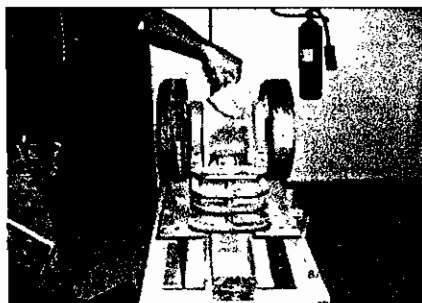


**FIG. 4.24 ESFUERZO – DEFORMACIÓN (M3 – 12.5% - 25 DIAS)  
– MODELO MATLAB**

- D. Fotos



**FOTO 1. LIMOLITA EN ROCA**



**FOTO 2. TRITURADORA DE MANDIBULA**

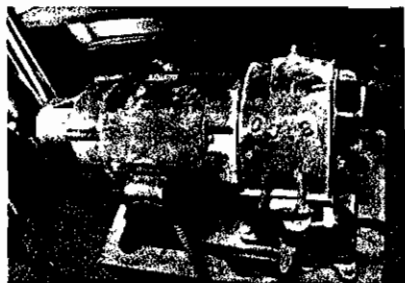


**FOTO 3. TRITURADORA DE RODILLOS**



**FOTO4. CUARTEADOR DE MATERIAL**

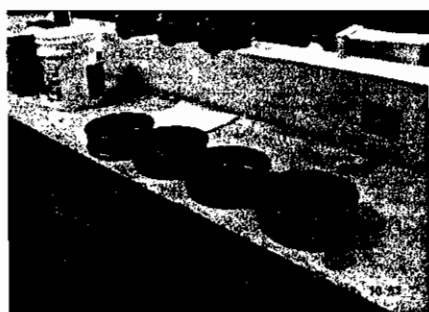




**FOTO 5. MOLINO DE DISCO**



**FOTO 6. MOLINO DE BOLAS**



**FOTO 8. TAMICES**



**Foto 9. TAMIZADOR ELECTRICO**



Foto 11. MOLDES

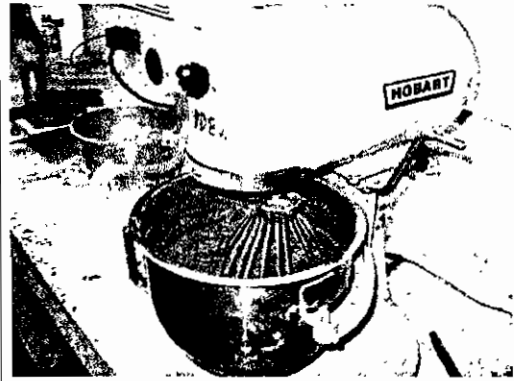


Foto 12. MEZCLADO



Foto 13. MOLDEO

Foto 14. MOLDES PREPARADO



## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Wikipedia. "Cemento". Abril, 2008.
- [2] [7] Romo, M. "Temas de Hormigón armado", Escuela Politécnica del Ejército, Mayo, 2008.
- [3] V.L. Bonavetti. "Cementos compuestos elaborados con puzolana natural y escoria granulada de alto horno", *Materiales de construcción*, Volumen 56, 283, Argentina, Julio-Septiembre, 2006.
- [4] Escalante, J. "Materiales alternativos al cemento Portland". Unidad Saltillo del Cinvestav. [www.cinvestav.mx](http://www.cinvestav.mx), Abril, 2008.
- [5] \_\_\_\_\_, *Manual de Tecnología del Concreto*, Limusa, Grupo Noriega Editores, Volumen 3, 381, México, México. 1994.
- [6] Bravo, E. "Cemento Portland". Mayo, 2008.
- [7] Giraldo, I. "El Cemento", Facultad de Ingeniería Civil, Mayo, 2008.
- [8] \_\_\_\_\_, "¿Qué, por qué y cómo? Curado del concreto en el lugar. El concreto en la práctica", National Ready Mixed Concrete Association, Estados Unidos, 1996.
- [9] Nassif, H. "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HCP", *Cement & Concrete Composites*, Mayo, 2008.
- [10] Zelic, J. "A mathematical model for prediction of compressive strength in cement-silica fume blends", *Cement & Concrete Composites*, Mayo, 2008.