

**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 20% de Limolita con un curado bajo  
agua al cemento Portland tipo I”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Henry Roberto Gómez Bernal

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser la luz de la vida a mis padres y mis hermanas, por todo el apoyo incondicional. A mi esposa y mis hijos por ser la extensión de mi vida. Finalmente a mi Director de Tesis, por su dirección y apoyo para culminar este trabajo.

## DEDICATORIA

ESTE TRABAJO ESTÁ  
DEDICADO A MIS  
PADRES, GLADYS  
VICTORIA, QUIEN HA  
SIDO UN PUNTAL EN MI  
FORMACION Y MI PADRE  
CARLOS LUIS QUIEN ME  
HA TRANSMITIDO  
RESPONSABILIDAD Y  
BUENOS PRONCIPIOS.

## 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



BIBLIOTECA "GONZALO ZEVALLOS G."  
F. I. M. C. P.

## 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”



Henry Roberto Gómez Bernal

## RESUMEN

En la actualidad, el cemento Pórtland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del concreto este estudio se enfoca en determinar el cambio en la resistencia a la compresión con la introducción de 20% 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 efectuó la debida modelación del experimento, obteniendo las curvas teóricas y experimentales con un error mínimo de graficación.

Como conclusión se obtuvo que el mejor tratamiento al añadir 20% de limolita se alcanzó a los 28 días aunque al analizar con porcentajes adicionales tales como 5, 10, 15 y 25% resultó que, al 10% de limolita y a 21 días de curado se alcanza una mejora significativa en el valor correspondiente a la resistencia a la compresión con respecto al tratamiento control

# INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES	
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.1.1. Justificación del Estudio.....	4

1.1.2. Hipótesis.....	6
1.2. Objetivos.....	7
1.2.1 Objetivo General.....	7
1.2.2 Objetivos Específicos.....	7
1.3. Metodología.....	8
1.4. Estructura de la tesis.....	10

## CAPITULO 2

### 2. MARCO TEORICO

2.1 Generalidades.....	12
2.2 Tipos de Cemento.....	19
2.3 Propiedades del Cemento.....	27
2.4 Métodos de curado.....	33
2.5 Otras investigaciones .....	35

## CAPITULO 3

### 3. ANALISIS ESTADISTICO

3.1 Recopilación de datos.....	38
--------------------------------	----

3.2	Diseño de Experimentos.....	39
3.3	Prueba con 0% de aditivo.....	40
3.4	Experimentación.....	40
3.5	Modelación del experimento.....	42

## CAPITULO 4

### 4. COMPARACION DE CAMBIOS DE PROPIEDADES

4.1	Tabulación de datos y resultados.....	44
4.2	Análisis de resultados.....	52
4.3	Identificación de cambio de propiedades.....	70

## CAPITULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones.....	77
5.2	Recomendaciones.....	79

## ANEXOS

•	Código fuente.....	124
•	Fotos.....	126

## BIBLIOGRAFIA



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Metodología de la Investigación.....	8
Figura 3.1	Proceso de molienda.....	406
Figura 4.25	Gráfico en el espacio-esfuerzo de ruptura Experimentación.....	76
Figura 4.26	Gráfico en el espacio-esfuerzo de ruptura- Validación.....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Cementos Sustituídos A Base De Cemento Pórtland.....	23
Tabla 2.	Cementos Generados Con Desechos Químicamente.....	26
	Activados	
Tabla 3.	Principales Acciones Que Afectan La Durabilidad Del Concreto.....	31
Tabla 21.	Ecuación polinómica de la dispersión De Experimentación.....	46
Tabla 22.	Ecuación polinómica de la dispersión De Validación.....	47
Tabla 23.	Resumen de resultados con los datos de Experimentación.....	49
Tabla 24.	Resumen de resultados con los datos de validación .....	50
Tabla 25.	Resultados de esfuerzos .....	51
Tabla 26	Análisis de varianza de experimentación.....	54
Tabla 27	Comparación de modelos estadísticos	

	Experimentación.....	55
Tabla 28	Comparación de modelos estadísticos	
	Experimentación.....	56
Tabla 29	Comparación de modelos estadísticos	
	Validación.....	57
Tabla 30	Estadísticas de la regresión de experimentación.....	58
Tabla 31	Valores P para coeficientes de regresión.....	59
Tabla 32	Análisis de residuales de experimentación.....	60
Tabla 33	Estadísticas De La Regresión de validación.....	61
Tabla 34	Análisis de varianza de validación.....	62
Tabla 35	Valores P para coeficientes de regresión	
	Validación.....	62
Tabla 36	Análisis De Residuales de validación.....	63
Tabla 37	Error entre modelo teórico y práctico-	
	fase experimentación.....	65
Tabla 38	Error entre modelo teórico y práctico-	
	fase validación.....	67

Tabla 39	Análisis De Tukey de rupturaza y limolita.....	70
Tabla 40	Análisis de Tukey de ruptura y días de curado.....	71
Tabla 41	Análisis de Tukey para selección del mejor.....	71
Tabla 42	Análisis De Tukey del tipo IV.....	72
Tabla 43	Análisis De Tukey de ruptura y días de curado -validación.....	73
Tabla 44	Análisis de Tukey para selección del mejor Validación.....	73
Tabla 45	Análisis de selección del mejor Con tipo IV.....	74

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el cemento Pórtland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto. Una variedad de reacciones químicas en el concreto pueden causar expansión en ciertas condiciones. Una de las más notables es la que involucra a los sulfatos (por ejemplo, de calcio, magnesio, sodio, potasio) que forman productos expansivos. Cuando las expansiones son excesivas y no controladas, tiene lugar a las fisuras y eventualmente la destrucción de la estructura.

Este trabajo se enfoca en modelar el comportamiento de un material compuesto como el cemento ya que en la actualidad se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en las construcciones. Por esta razón, surge la necesidad de predecir exactamente sus propiedades e investigar experimentalmente aditivos que mejoren las mismas.

El desarrollo de esta investigación se basará en realizar ensayos mecánicos a cubos mezclados por cemento PORTLAND tipo I con cierto aditivo a un porcentaje y a tiempos de reacción diferentes para así, estudiar la afectación que la adición de la puzolana tiene hacia la resistencia a la compresión por cada tiempo de ensayo. Además, se incluirá el estudio de material referencial (0% puzolana) para cada una de las condiciones de curado establecidas con la cual se permitirá la comparación con los compuestos que incluyen los aditivos.

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 Pórtland comercial para, mediante el uso de ciertos porcentajes de aditivos y a diferentes tiempos de ensayos, descubrir si existen mejoras significativas en lo referente a su resistencia en la calidad del Cemento Pórtland Tipo I.

Se conocerá la relación que tiene el tiempo de curado en las propiedades mecánicas del compuesto, específicamente, la resistencia a la compresión, además de conocer, el efecto de la concentración del material versus el tiempo de reacción, para de esta manera, poder descubrir nuevos materiales resistentes que puedan ser utilizados en la industria para de esta manera, lograr un campo más amplio con respecto a materiales útiles en la construcción con mayor resistencia a la compresión.

# **CAPITULO 1**

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1 Planteamiento del problema**

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

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

En este proyecto se analiza la influencia de la incorporación al cemento blanco de puzolana natural (hasta 25%) activada físicamente la resistencia a la compresión. Las previas investigaciones indican que los cementos ternarios presentan un mejor comportamiento resistente que los cementos binarios y que las máximas resistencias a

compresión en las primeras edades (2 y 7 días) se alcanzan con hasta 13% de puzolana natural, mientras que a edades más avanzadas se trasladan a mayores contenidos de puzolana y escoria.

### **1.1.1. Justificación del estudio.**

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

Para aplicaciones en la construcción, las puzolanas naturales son consideradas en general como materiales de naturaleza silícea ó silico-aluminoso, los que no tienen en si mismos propiedades aglomerantes pero que pueden finamente dividido y en presencia de humedad reaccionar con la cal a temperatura ambiente y formar por vía topo química productos estables y prácticamente

insolubles de características semejantes a los formados durante la hidratación del cemento Pórtland.

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

Como consecuencia de esta reacción química, se produce el refinamiento de los granos y la segmentación de los poros,

aumentando la densidad de la matriz, la resistencia y la inmunidad de la pasta frente al ingreso de los agentes agresivos.

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

### **1.1.2 Hipótesis**

La hipótesis del presente estudio indica que al añadir 20% de limolita al cemento Pórtland tipo I se obtiene variación en el valor correspondiente a 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 20% de limolita en el cemento Pórtland tipo I curado en agua

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Aplicando el software matemático *Matlab* y los conocimientos de Inelasticidad para los materiales, generar un código fuente óptimo que nos permita conocer el comportamiento ideal del cemento en un gráfico Esfuerzo vs. Deformación.
- Mediante método de *Regresión 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). con los valores mencionados.

- Comparar, estadísticamente, los resultados obtenidos individualmente con aquellos referentes al 0% de aditivo para que se pueda determinar si existe algún cambio significativo en el valor referente a la resistencia a la compresión.

### 1.3 Metodología

La metodología de la tesis está siguiendo los pasos de la siguiente figura:

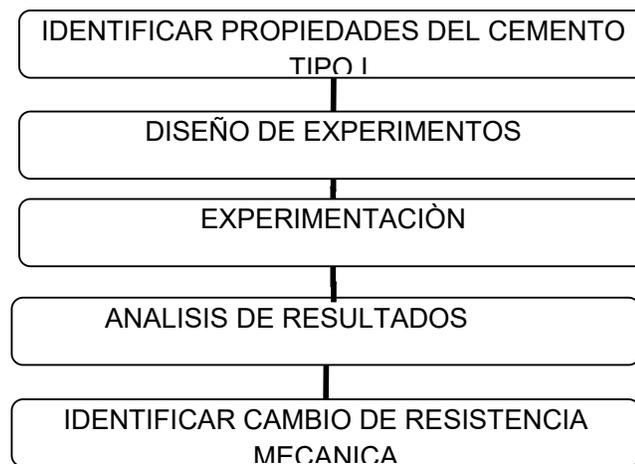


Figura 1.1 Metodología de la Investigación

Para la ejecución del experimento, el material a analizarse será una pasta de cemento compuesto que comprende Cemento Portland tipo I, 20% de Limolita y agua.

Esta mezcla se formará en cubos cuyo lado es 50.8 mm. (3 réplicas) para cada porcentaje, siendo la función de respuesta la resistencia a la compresión uní axial al tiempo de ensayo.

Las variables independientes que se incluirán en el trabajo serán el porcentaje de aditivo (20%) y tiempo de curado en agua.

La relación agua/mezcla (0.3) y la granulometría del material utilizado serán valores constantes.

Con el porcentaje mencionado del puzolánico se realizaran ensayos mecánicos a 7, 14, 21 y 28 días y se verifica el cambio de resistencia a la compresión.

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. También se realizará las pruebas que se llamará

validación con porcentajes y días intermedios para convalidar nuestro experimento.

Se analizará los datos obtenidos aplicando herramientas estadísticas con un 95% de confianza pero previo a dicho análisis se comprobará estadísticamente que existe diferencia significativa entre las medias de las muestras.

Con los datos grupales, se aplicará un programa estadístico para seleccionar el mejor tratamiento.

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

La tesis comprende lo siguiente:

El Capítulo 1 se denomina **Generalidades** y consta el planteamiento del problema y la justificación correspondiente, el objetivo tanto general como específico, la metodología y la estructura.

El Capítulo 2 se refiere al **Marco Teórico** en el que se presenta la literatura investigada tal como generalidades del cemento, propiedades, clase de cemento, usos y proceso de hidratación, cemento puzolánico, limolita y métodos de curado.

El Capítulo 3 será denominado **Análisis Estadístico**; se proyectará en él los datos recogidos del experimento y se aplicará herramientas estadísticas con una confianza de 95% para seleccionar el tratamiento más óptimo.

El Capítulo 4 se llama **Comparación de cambio de propiedades** y proyecta el cambio de propiedades con el porcentaje de aditivo y tiempos de curado en tablas comparándolo con el cemento blanco.

Finalmente, el Capítulo 5 se llama **Conclusiones y Recomendaciones**, inferiremos con respecto a los objetivos planteados al inicio del proyecto.

# CAPÍTULO 2

## **2. MARCO TEÓRICO.**

### **2.1 Generalidades**

El concreto es una mezcla de agregados inertes, y de cemento y agua que es la parte activa (pegamento); y opcionalmente aditivos, siendo al inicio una estructura plástica, uniforme y moldeable y que luego es capaz de fraguar y adquirir una consistencia rígida debido a la reacción química producida por el cemento y el agua que le da propiedades aislantes y resistentes, siendo bastante útil para la construcción.

Esta pasta es el resultado de la combinación química del cemento y el agua, que es considerada fase continua del concreto, ya que siempre está unida con algo de ella misma a través de todo el conjunto [1].

En las mezclas, las proporciones de estos componentes están controlados por varios requisitos:

- La masa de concreto fresco debe de ser trabajable.

- El concreto endurecido debe poseer la resistencia y durabilidad deseada; y
- El costo del producto resultante debe ser el mínimo compatible con calidad deseada.

El agregado es la fase discontinua del concreto que ocupa las  $\frac{3}{4}$  partes del volumen del concreto, que se divide en fino y grueso. El resto es ocupado con agua, cemento y vacíos, que son pequeños poros de aire en la masa. Después de un tiempo determinado, la cantidad de agua libre depende del grado de combinación entre cemento y agua y de la pérdida de agua por evaporación de la masa. El agregado tiene 3 funciones principales:

1. Proveer un complemento relativamente barato para el material cementante.
2. Proveer una masa de partículas de calidad adecuada para resistir la acción de cargas, desgaste, precolación de humedad y acción climatérica
3. Reducir los cambios volumétricos que resultan del proceso, de endurecimiento y cambios de humedad de la pasta agua - cemento.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en la relación con la cantidad de Cemento.

A continuación se presenta algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el esfuerzo.
- Se reducen las tendencias de contracción.

Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad de concreto ya que las mezclas quedan más rígidas. Para una calidad dada de concreto, las mezclas más rígidas son las más económicas. Por lo tanto, la consolidación del concreto por vibración permite una mejora en la calidad del concreto y en la economía. Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se puede modificar

agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación. Los aditivos se usan comúnmente para:

- (1) Ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento,
- (2) reducir la demanda de agua,
- (3) aumentar la trabajabilidad,
- (4) incluir intencionalmente aire, y
- (5) ajustar otras propiedades del concreto.

Después de una relación óptima y procesos adecuados como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado, y curado, el concreto endurecido queda como un material de construcción resistente, no combustible, durable, resistencia al desgaste y prácticamente impermeable. El concreto es un excelente material de construcción porque puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturizados para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones. El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano.

Los ingredientes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una

mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona si no que fluye como líquido viscoso sin segregarse. El revenimiento se utiliza como una medida de la consistencia del concreto. Un concreto de bajo revenimiento tiene una consistencia dura. Se necesita una mezcla plástica para tener resistencia y para mantener su homogeneidad durante el manejo y la colocación, se puede utilizar aditivos superfluidificantes para adicionar fluidez al concreto en miembros de concretos delgados o fuertemente reforzados.

Las materias primas que se utilizan en la fabricación del cemento son materiales arcillosos, calizos y margosos fundamentalmente. Además, también se suelen utilizar otros productos naturales o artificiales, como puzolana, escorias, residuos de bauxita, minerales de hierro, pirita tratada, arena y areniscas entre otros. Los materiales calizos son rocas constituidas especialmente por carbonato cálcico, habitualmente impurificados por otros materiales como sílice, sales magnésicas y compuestos de hierro o azufre. Los materiales arcillosos son rocas compuestas por silicato de aluminio hidratado, impurificado por sílice y por compuestos alcalinos de aluminio o de hierro principalmente. Las margas son mezclas naturales más o menos íntimas de caliza y arcillas en proporción variable.

El proceso de fabricación del cemento consta de las siguientes etapas:

*1. Mezcla de materias primas y obtención del crudo del cemento.-*

Como en general no hay yacimientos que suministren todos los componentes de lo que sería el cemento natural, en la mayoría de los casos es necesaria la aportación de arcillas o de materiales portadores de sílice e incluso la adición de calizas con alto contenido en carbonato cálcico. Esta mezcla que se realiza sobre bases químicas se denomina crudo del cemento.

*2. Trituración y desecación del crudo del cemento.-*

Se tritura la materia prima en molinos adecuados y se somete a la desecación, pues sólo pueden molerse las materias secas, ya que de lo contrario se formarían barro o pastas. Este proceso se realiza en secadores de tambor o en secadores rápidos que se basan en el procedimiento de precipitar el material a secar en una corriente de gas.

*3. Molturación y ensilado del crudo de cemento:*

La molturación del cemento se efectúa en dos fases. La primera que se realiza en unos molinos de bolas reduciendo el material a una especie de arenilla y la segunda que consiste en el paso por los molinos de refino, combinados con separadores de aire y separadores centrífugos, luego se almacena en silos, quedando homogénea su

mezcla y se dispone para su posterior cocción en los hornos. En general la composición de estos molinos y hornos es metálica, preferentemente de acero-manganeso con adición de cromo (12-14% Manganeso, 15% Cromo). Las bolas suelen ser de acero forjado, principalmente acero-cromo-níquel ya que presentan mayor resistencia a la abrasión, y mayor índice de dureza.

#### *4. Cocción del crudo o clinkerización:*

Este procedimiento se realiza en dos tipos de hornos: verticales automáticos u horizontales. Los hornos verticales son los tradicionales y poco usados en la actualidad. Generalmente se calientan con carbón de bajo contenido en productos volátiles para evitar pérdidas de calor. Los hornos rotatorios horizontales constan de un tubo cilíndrico de hierro de gran diámetro recubierto de material refractario que a menudo contiene cromo y son los más empleados en la actualidad. Su combustible puede ser carbón pulverizado, petróleo o gas natural con un suplemento de aire. La mezcla de crudo al someterla a cocción, expulsa el agua de hidratación de la arcilla y a temperaturas de 700 y 1.000 C, la caliza o carbonato cálcico, cede dióxido de carbono y se convierte en óxido cálcico o cal viva, que al aumentar la temperatura reacciona con los demás componentes de la mezcla. Cuando la temperatura alcanza 1.400 a 1.450 C se produce la fusión completa del material formándose entonces el clínker. Finalmente, el clínker

resultante sedimenta en forma de pepitas y este es enfriado y entonces pulverizado. En este momento puede añadirse yeso, sulfato cálcico u otros aditivos generalmente en cantidades inferiores al 5% con la misión de controlar el tiempo de fraguado y otras propiedades de la mezcla.

De esta forma es posible obtener una amplia variedad de cementos, tales como Pórtland normal, de fraguado rápido, hidráulico, metalúrgico, hidrófobo, marítimo, para pozos de petróleo y de gas, para autopistas o preso, expansivo y magnésico, entre otros.

#### *5. Molturación y ensilado del cemento.-*

Una vez mezclado con estas sustancias, se procede a la molturación en los mismos molinos en que se realiza la operación en crudo y se ensila en grandes depósitos listos para su transporte y uso.

## **2.2 Tipos de Cemento**

- 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 ferroaluminato 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 tricálcico y el agua [2].

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.

- Los Cementos con adiciones son los materiales alternativos tienen cabida como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento Pórtland. Parte de la generación de CO<sub>2</sub> viene de des-carbonatación del CaCO<sub>3</sub> que representa alrededor del 80% de la materia prima (0.3Kg CO<sub>2</sub> /Kg cemento). El uso de fuentes de CaO diferentes puede aliviar parcialmente tal situación. Por otro lado, es posible usar cenizas y escorias como materias primas. Se puede definir un material adhesivo alternativo como aquel que tenga propiedades cementosas o latentes (que requieren ser potenciadas externamente), esto es, que pueda emplearse como sustituto parcial o total del cemento Portland.
- El Cemento Pórtland Puzolánico constituido con puzolanas que son aquellos materiales de composición rica en SiO<sub>2</sub>, 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, principalmente  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ; la reacción que describe tal proceso es llamada “reacción puzolánica”.

- El Cemento de escoria de alto horno sale como materiales de reemplazo del cemento Pórtland generalmente se requiere un estado estructural amorfo (como los vidrios), esto es, con alta energía interna y por ende inestables termodinámicamente y muy reactivos químicamente.

El cemento Pórtland (cemento base) puede reemplazarse por los materiales indicados en la tabla 2. En todos los casos se obtienen mejores propiedades de resistencia y de durabilidad. Los materiales como la sílice condensada y la escoria inducen propiedades de alta resistencia mecánica.

**Tabla 1. Cementos sustituidos a base de Cemento Pórtland**

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

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 la 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 Pórtland.

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.

- Tenemos otros cementos en el que los desechos químicamente activados, por ejemplo las escorias de alto horno activadas. En este caso no se usa cemento Pórtland 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 activo: 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 Pórtland. 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 Pórtland. 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 2. 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

Las propiedades tienen características físicas y químicas de sus componentes y dependen de:

1. Clase del cemento
2. Calidad del agua
3. Proporción relativa de agua y cemento a menor relación agua cemento mayor resistencia y mejor calidad de concreto.
4. Grado de combinación química alcanzado entre agua y cemento (proceso llamado de "hidratación" del cemento) y que depende del tiempo, temperatura y humedad. El periodo en el que el cemento está sujeto a condiciones favorables de humedad y temperatura para su hidratación se llama "CURADO". Usualmente en construcción este periodo es de 3 a 14 días. En el laboratorio de 28 días. El curado es esencial, para obtener un buen concreto. Los requisitos para obtener un buen concreto son:

1. Usar materiales de calidad y bajo costo
2. Proporcionar y dosificar adecuadamente dichos materiales.
3. Mezclar, transportar y colocar adecuadamente el concreto (para evitar segregación y lograr una buena compactación).

4. Mantener las condiciones de curado adecuadas (para que la hidratación del cemento sea lo mas completa posible).

A continuación detallamos propiedades más importantes:

El tamaño de la partícula es aproximadamente, del 85% al 95 %, más pequeña de 45  $\mu\text{m}$ ; la fineza que es la distribución de tamaño de partículas y que afecta al calor disipado y la tasa de hidratación. Los efectos de la fineza más grande en la resistencia de la pasta se manifiestan durante los primeros siete días. Hay varios métodos para medirlas (ASTM C 115).

La solidez se refiere a la habilidad de la pasta endurecida para mantener su volumen (ASTM C 115).

La consistencia se refiere a la movilidad relativa de pasta de cemento fresco a su habilidad de fluir. (ASTM C 187)

El tiempo de fraguado es determinar (1) el tiempo que transcurra desde el momento que el agua es adicionado hasta que la pasta deja de fluir y es plástico (llamado inicialmente Curado) y (2) el tiempo requerido para que la pasta adquiera cierto grado de dureza (llamado set) / (ASTM C191). El tiempo de fraguado es afectado por la fineza, la relación agua-cemento y algo adicional que puede ser usado.

El calor de Hidratación es el calor generado cuando el cemento y agua reaccionan. Un aumento en la fineza, contenido de cemento y temperatura de curado aumenta esta propiedad. (ASTM C 186 y C 595)

La densidad y densidad relativa (gravedad específica) es definida como la masa de una unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyendo al aire entre las partículas. Es reportado como mega gramos por metro cúbico (ASTM C 188). Una densidad relativa de 3.15 es asumida para cemento Pórtland.

La densidad de la mayor parte de cemento es definida como la masa de las partículas de cemento más partículas de aire por unidad de volumen.

La resistencia a la compresión es influenciada por el tipo de cemento, o más precisamente, la composición y fineza del cemento 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.

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.

Los factores que inciden en la resistencia como se aprecia en la tabla 4, que 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 3. Principales acciones que afectan la durabilidad del concreto**

<b>Natural eza de las accion es</b>	<b>Identificación de los medios y agentes activos</b>	<b>Manifestación común de los efectos en el concreto</b>
<p>Físicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mecánicas</li> <li>- Fenomenológicas</li> </ul>	<p>Cargas ordinarias; cargas sostenidas (fluencia); cargas repetidas (fatiga); sobrecargas (sismo y otras); impacto; fricción; flujo de agua y empuje de viento.</p> <p>Variaciones de humedad y temperatura; sobre elevación autógena de temperatura; ciclos de congelación y deshielo; alta presión hidrostática sostenida o variable; altas temperaturas permanentes o eventuales (incendio); corrientes eléctricas; radiaciones.</p>	<p>Agrietamientos; deformaciones; abrasión mecánica; erosión hidráulica; cavitación; fallas estructurales parciales y totales (colapso).</p> <p>Agrietamientos; descostramientos; fallas de adherencia (matriz-agregado); aumento de porosidad; corrosión del refuerzo; desintegración superficial e interna; fallas estructurales, manchas y cambios de color. Deficiente resistencia mecánica del concreto en la estructura.</p>

<p>Químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Internas</li> <li>- Externas</li> </ul>	<p>Reacciones deletéreas cemento-agregado; sustancias nocivas en el agua de mezclado; falta de sanidad en el cemento.</p> <p>Aguas y suelos con sustancias agresivas; aguas muy puras; gases y emanaciones; sustancias químicas de diversas índoles.</p>	<p>Agrietamientos; desintegración progresiva hasta la falla estructural; corrosión del refuerzo; descostramientos .</p> <p>Agrietamientos; descostramientos ; desintegración progresiva hasta la falla estructural; lixiviación y aumento de porosidad; corrosión del refuerzo; carbonatación.</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, poniendo énfasis en la eliminación de vacíos en su constitución.

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 los esfuerzos mecánicos y las aplicaciones de la estructura. La propiedad que se apunta a obtener en el concreto es una determinada resistencia mecánica y durabilidad. [3] .

#### **2.4. Métodos de curado**

Curado es el mantenimiento de un contenido húmedo satisfactorio la temperatura en concreto por un periodo de tiempo inmediatamente seguido y terminado tal que las propiedades puedan desarrollar. El curado tiene una influencia fuerte en las propiedades de dureza del concreto, aumentara durabilidad, resistencia, resistencia a la abrasión, estabilidad en volumen y resistencia a congelamiento.

El concreto puede ser mantenido húmedo por tres métodos de curado:

1. Métodos que mantienen la presencia de agua mezclada en el, concreto durante el período temprano de endurecimiento, por medio inmersión, rociando de agua.
2. Métodos que reducen la pérdida de agua mezclada en la superficie del concreto, por medio de cubrir con hojas de papel o plástico.
3. Métodos que aceleran la ganancia de resistencia suministrando calor y adicional humedad al concreto.

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

La determinación de estos dos estados, cuyo lapso comprendido entre ambos se llama tiempo de fraguado de la mezcla, es muy poco precisa y sólo debe tomarse a título de guía comparativa. El tiempo de

fraguado inicial es el mismo para los cinco tipos de cemento enunciados y alcanza un valor de 45 a 60 minutos, el tiempo de fraguado final se estima en 10 horas aproximadamente. En resumen, puede definirse como tiempo de fraguado de una mezcla determinada, el lapso necesario para que la mezcla pase del estado fluido al sólido. Así definido, el fraguado no es sino una parte del proceso de endurecimiento. Es necesario colocar la mezcla en los moldes antes de que inicie el fraguado y de preferencia dentro de los primeros 30 minutos de fabricada. Cuando se presentan problemas especiales que demandan un tiempo adicional para el transporte del concreto de la fábrica a la obra, se recurre al uso de “retardantes” del fraguado, compuestos de yeso o de anhídrido sulfúrico; de igual manera, puede acelerarse el fraguado con la adición de sustancias alcalinas o sales como el cloruro de calcio.

## **2.5 Otras investigaciones**

Una de las propiedades importantes para la aplicación de materiales en estructuras es el modulo de elasticidad, el cual debe ser predicho y estudiar el efecto de la adición de puzolana y métodos de curado.

Estudios han demostrado que agregando puzolanas aumentan la resistencia y durabilidad del concreto.

Nassif, Sukswang y Mohamed [4] propone la evaluación del modelo con varios porcentajes de puzolanas, relación agua a cemento y puzolanas y varios métodos de curado comparado a especímenes de control a 3, 7,14.

Se resuelve que a 28 y 90 días el módulo elástico y raíz cuadrada de la resistencia a la compresión son proporcionales e influenciados por los constituyentes de la mezcla, pero las ecuaciones predictivas de ACI-318 y ACI-363 no concuerdan con los valores con las puzolanas.

En otro documento para el modelo matemático para la predicción de la resistencia a la compresión basado en las ecuaciones de Knudsen [5], nos dice que hay buen argumento entre el modelo y los resultados experimentales obtenidos respaldado en la cantidad de calor desprendido durante las 48 horas de hidratación de cemento, con el objetivo de establecer una relación directa entre el análisis cinético del proceso de hidratación y la resistencia como una propiedad final del cemento.

En otro experimento concerniente a generar un modelo de predicción del desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto con cenizas volátiles, se encuentra una ecuación estimada para el desarrollo de esta propiedad, la misma que expresa un coeficiente que indica la actividad de las cenizas volátiles como función del tiempo,

contenido de ceniza volátil y área específica de Blaine. Esta ecuación nos explica el incremento temprano de la resistencia debida a la ceniza volátil como parte de agregado fino, el decrecimiento de la resistencia temprana debido a la ceniza volátil con parte de cemento, el incremento a largo plazo de la resistencia a largo plazo debido a la reacción puzolánica y la relación entre la proporción de reemplazo de la ceniza volátil y la proporción de resistencia incremento/disminución.

# **CAPÍTULO 3**

## **3. ANALISIS ESTADISTICO**

### **3.1 Recopilación de Datos**

Con la finalidad de comprobar la variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento se añade al cemento tipo I, que es el de control, diferentes porcentajes de limolita a diferentes días de curado en agua.

Se mezcla con un porcentaje de 20% del mineral limolita para varios días de curado de 7, 14, 21 y 28 días, con relación agua/cemento de 0.3 y se espera 24 horas para retirarlo del molde e inmediatamente sumergirlos en agua y codificamos cada muestra. De esta manera, se podrá efectuar una comparación con el control y se desarrollará un modelo matemático, el mismo que deberá ser validado para identificar la existencia de la mejora en el valor de la resistencia a la compresión de la pasta de cemento, con proporciones de limolita del: 7.5, 12.5, 17.5, 22.5 y 27.5 %, para de esta manera, lograr el porcentaje de error entre ambos rangos de días para validar el modelo matemático que se generará.

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

### **3.2 Diseño de Experimentos**

Identificando las variables de entrada y salida, se establece la hipótesis que avalice un modelo que mejor las relaciones por medio de soportes estadísticos.

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

### 3.3 Prueba con 0% de aditivo

Con datos del cemento con 0% de aditivo, que es de control más los datos de diferentes porcentajes de limolita para cada tiempo se determina si existe una mejora en las propiedades referentes a la resistencia a la compresión.

### 3.4 Experimentación

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

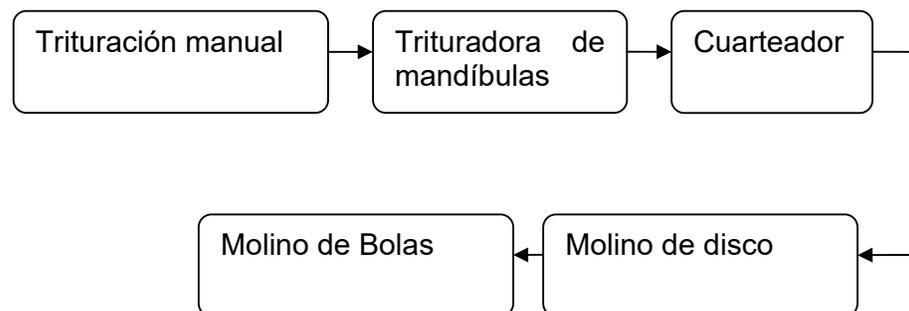


Figura 3.1. Proceso de molienda

Luego el producto pasa por un juego de tamices de # 50, 100, 200 y 325 quedando depositado 5, 8, 12, y 75 gramos, respectivamente,

para lo que utilizaremos el último valor que fue depositado en el fondo del tamiz.

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

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

En dos prensas de compresión (Ver ANEXO-1 ) ubicada en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a una temperatura y humedad relativa específica y cumplido el tiempo de curado, se somete a esfuerzos axiales, de donde se obtiene valores de resistencia mecánica a la compresión y deformación .

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

- Con 20% de limolita:-

Masa total= 3000 [gr.]

Masa agua= 900 [gr.]

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

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

- Con 22.5% de limolita (Validación):

Masa total= 3000 [gr.]

Masa agua= 900 [gr.]

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

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

### **3.5 Modelación del experimento.**

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

Con los esfuerzos de ruptura de todas las muestras y aplicando métodos de regresión se determina la mejor relación entre las variables de entrada (días de curado y porcentaje de limolita), para la

fase de experimentación, que para convalidar y encontrar el error experimental se compara la evaluación en la ecuación mencionada con el dato del experimento en los días de curado y porcentaje de la validación.

# CAPITULO 4

## 4. COMPARACION DE CAMBIOS DE PROPIEDADES

### 4.1. Tabulación de datos y resultados

El anexo-2 abarca las tablas desde la 5 hasta la 12 que comprende los datos de fuerza dada en Newton, desplazamiento en metros, condiciones ambientales tanto la humedad relativa como la temperatura, medida del cubo y fecha que se experimentó según los días de curado.

Con los datos se calcula los esfuerzos  $\sigma$  respectivos en Mega pascales para cada desplazamiento, según fuerza aplicada F y A que corresponde al área de la superficie del cubo, donde el último valor corresponderá al de ruptura. (Ver ecuación 1)

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

Se halla la deformación  $\varepsilon$  en cada punto con la ecuación 2, donde  $\Delta L$  es la variación en la longitud para cada fuerza aplicada y L equivale a la longitud del lado del cubo en el sentido axial

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

Los resultados se agrupa en al anexo-3 que comprende las tablas desde la 13 hasta la 20, y con la finalidad de descubrir la región elástica y la plástica de la pasta de cemento se calcula la pendiente de punto a punto en la gráfica de esfuerzo vs. Deformación, la cual es el módulo de elasticidad o Young, que según teorías la pendiente de la zona elástica es mayor que la pendiente de la zona plástica del material que se prueba.

Se grafica la dispersión de los datos para cada día de curado y porcentaje de limolita (ver anexo-4), y se aprecia que la mejor tendencia es un polinomio cúbico (ver tabla 21) que con el criterio de punto de inflexión y se calcula la segunda derivada y se iguala a cero para hallar el cambio de concavidad, que cuyo punto es el valor de la deformación elástica y su ordenada es el esfuerzo de fluencia.

Además para comprobar el punto de fluencia se verifica el cambio de pendiente punto a punto y, cuando decae este valor se entra a la zona plástica.

**TABLA 21**  
**ECUACION POLINOMICA DE LA DISPERSION DE DATOS**  
**DE EXPERIMENTACION**

<b>% LIMOLITA</b>	<b>DIAS</b>	<b>MUESTRA</b>	<b>ECUACION POLINOMICA DE ORDEN 3</b>
20%	7	1	$y = -4E+06x^3 + 231890x^2 - 1096,9x + 1,5183$
	7	2	$y = -2E+06x^3 + 121662x^2 - 98,54x + 0,1709$
	7	3	$y = -2E+06x^3 + 121387x^2 - 618,55x + 1,0082$
	14	1	$y = -2E+07x^3 + 662838x^2 - 196,18x + 0,337$
	14	2	$y = -3E+07x^3 + 832821x^2 - 2118,8x + 1,0645$
	14	3	$y = -3E+07x^3 + 867643x^2 - 981,71x + 0,4498$
	21	1	$y = -1E+07x^3 + 653696x^2 - 3409,3x + 2,2454$
	21	2	$y = -1E+07x^3 + 635557x^2 - 3127,7x + 2,3567$
	21	3	$y = -2E+07x^3 + 761713x^2 - 2677,4x + 1,1481$
	28	1	$y = -2E+07x^3 + 637354x^2 + 1876,2x - 0,8393$
	28	2	$y = -2E+07x^3 + 568221x^2 + 2933,7x - 0,2414$
	28	3	$y = -3E+07x^3 + 1E+06x^2 - 3213,6x + 1,4561$

**TABLA 22**  
**ECUACION POLINOMICA DE LA DISPERSION DE DATOS**  
**DE VALIDACION**

22,50%	4	1	$y = -1E+06x^3 + 90649x^2 - 344,78x + 0,6392$
	4	2	$y = -3E+06x^3 + 133956x^2 + 147,07x + 0,011$
	4	3	$y = -3E+06x^3 + 121025x^2 + 343,22x - 0,2629$
	11	1	$y = -2E+06x^3 + 133090x^2 - 541,82x + 0,719$
	11	2	$y = -3E+06x^3 + 149465x^2 - 407,74x + 0,4752$
	11	3	$y = -2E+06x^3 + 133484x^2 - 583,61x + 0,8222$
	18	1	$y = -2E+07x^3 + 711110x^2 - 3798,6x + 2,448$
	18	2	$y = -3E+07x^3 + 888900x^2 - 2302,6x + 0,9238$
	18	3	$y = -2E+07x^3 + 746165x^2 - 3247,6x + 1,8154$
	25	1	$y = -3E+07x^3 + 866597x^2 - 2047,8x + 0,8892$
	25	2	$y = -2E+07x^3 + 547313x^2 + 30,687x + 0,1883$
	25	3	$y = -3E+07x^3 + 910100x^2 - 2194,5x + 0,629$

En el anexo-5 se presenta las gráficas de la tendencia cúbica y la curva teórica generada con la programación en Matlab y aplicando la teoría de inelasticidad se encuentra un comportamiento muy bueno, en el que se sabe que la región elástica empieza desde cero y avanza con una pendiente determinada que es el módulo de young hasta llegar al punto de fluencia y pasar a la zona plástica con otro valor de pendiente menor.

Para efecto de comprobación se calcula las pendientes punto a punto para verificar la variación de la pendiente que es el módulo de elasticidad,

TABLA 23

## RESUMEN DE RESULTADOS CON LOS DATOS DE EXPERIMENTACION

	Experimentación con 20% a 7 días de curado			Experimento con 20% a 14 días de curado		
	M 1	M 2	M 3	M 1	M 2	M 3
Promedio de módulo de elast. E(MPa):	2225,339	1927,965	1848,12	5293,495	5005,80	5351,03
ESFUERZO FLUENCIA(MPa):	49,3676	50,32	63,61	65,59	53,51	63,87
DEFORMACION MAXIMA	0,0275	0,03	0,0175	0,015	0,0175	0,0175
DEFORMACION ELASTICA	0,0225	0,0275	0,035	0,0125	0,0125	0,0125
m según grafico	0,4	0,4	0,4	0,0087	0,3	0,00087
a según gráfico	3	5	5	0,8	7	0,8
Esfuerzo de ruptura (MPa)	57,91	62,65	73,29	79,40	82,85	84,58
Esfuerzo de ruptura promedio(MPa)	64,62			82,28		
	Experimento con 20% a 21 días de curado			Experimento con 20% a 28 días de curado		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Promedio de módulo de elast. E(MPa):	3840,661	3883,815	4257,812	6904,559	6490,286	5638,72
ESFUERZO FLUENCIA(MPa):	64,73	67,32	44,88	77,67	62,14	62,14
DEFORMACION MAXIMA	0,0225	0,0225	0,0175	0,016	0,016	0,018
DEFORMACION ELASTICA	0,0175	0,0175	0,0125	0,0125	0,01	0,0125
m según grafico	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
a según gráfico	8,8	8,8	8,8	6	6	6
Esfuerzo de ruptura (MPa)	86,31	83,71	72,49	106	96,66	95,80
Esfuerzo de ruptura promedio(MPa)	80,84			99,54		

TABLA 24

## RESUMEN DE RESULTADOS CON LOS DATOS DE VALIDACION

	validación 22,5% de limolita a 4 días de curado			validación 22,5% de limolita a 11 días de curado		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Promedio de módulo de elast. E(MPa):	1.273,63	1.687,78	1.670,90	1.864,23	1.657,09	1.791,16
ESFUERZO FLUENCIA(MPa):	37,00	33,22	33,00	41,77	39,87	47,09
DEFORMACION MAXIMA	0,035	0,030	0,028	0,031	0,030	0,034
DEFORMACION ELASTICA	0,030	0,020	0,020	0,025	0,025	0,025
m según grafico	0,15	0,21	0,21	0,31	0,81	0,81
a según gráfico	2,00	5,15	4,15	4,50	2,50	3,50
Esfuerzo de ruptura (MPa)	43,67	46,51	45,00	56,96	46,52	58,86
Esfuerzo de ruptura promedio(MPa)	44,94			54,11		

	validación 22,5% de limolita a 18 días de curado			validación 22,5% de limolita a 25 días de curado		
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Promedio de módulo de elast. E(MPa):	3.353,64	4.718,12	3.624,89	4.487,96	4.200,27	4.418,91
ESFUERZO FLUENCIA(MPa):	48,33	53,51	35,73	52,64	49,19	36,88
DEFORMACION MAXIMA	0,02	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175	0,0175
DEFORMACION ELASTICA	0,015	0,0125	0,0125	0,0125	0,0125	0,01
m según grafico	0,4	0,4	0,45	0,3	0,1	0,3
a según gráfico	6	5	9,4	3,5	2,5	6,8
Esfuerzo de ruptura (MPa)	65,59	76,81	59,55	71,64	68,18	68,6
Esfuerzo promedio de ruptura (MPa)	67,32			69,4724		

TABLA 25

## RESULTADOS DE ESFUERZO DE RUPTURA A DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMOLITA

ESFUERZO DE RUPTURA [MPa] CON CIERTOS DE LIMOLITA A DIFERENTES DÍAS DE CURADO											
EXPERIMENTO	Días	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio	VALIDACION	Días	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
0%	7	89,79	90,64	87,22	89,22	0%	4	80,38	82,94	80,38	81,23
	14	99,19	97,48	89,79	95,49		11	101,76	82,94	108,6	97,77
	21	102,61	108,6	76,96	96,06		18	108,6	109,45	108,6	108,88
	28	95,77	97,48	94,06	95,77		25	90,64	81,23	106,03	92,63
5%	7	71,74	72,13	69,58	71,15	7,50%	4	49	43,12	41,16	44,43
	14	68,6	61,74	69,58	66,64		11	59,78	69,58	51,94	60,43
	21	83,66	78,32	71,2	77,73		18	81,88	82,77	85,44	83,36
	28	117,48	101,46	120,15	113,03		25	89,89	98,79	84,55	91,08
10%	7	93,45	81,88	85,44	86,92	12,50%	4	51,35	48,02	49,98	49,78
	14	85,44	89	88,11	87,52		11	89	92,56	93,45	91,67
	21	108,58	99,68	102,35	104,13		18	97,01	100,57	99,68	99,09
	28	102,35	85,44	53,4	69,42		25	105,91	78,32	90,78	91,67
15%	7	61,1	56,4	58,67	58,72	17,50%	4	44,1	43,1	45,67	44,29
	14	83,66	90,78	97,9	90,78		11	81,88	84,55	76,54	80,99
	21	89	93,45	85,44	89,30		18	80,99	89,36	83,66	84,67
	28	85,44	91,67	96,12	91,08		25	89,36	92,64	89	90,33
20%	7	57,91	62,66	73,29	64,62	22,50%	4	43,67	46,52	44,62	44,94
	14	79,4	82,85	84,58	82,28		11	56,96	46,52	58,86	54,11
	21	86,31	83,7	72,49	80,83		18	65,59	76,81	59,55	67,32
	28	106,15	96,66	95,8	99,54		25	71,63	68,18	68,6	69,47
25%	7	25,42	24,13	23,7	24,42	27,50%	4	56,7	56,05	50,35	54,37
	14	61,71	81,2	74,12	72,34		11	66,36	64,64	55,16	62,05
	21	76,7	79,29	87,05	81,01		18	70,67	77,57	78,43	75,56
	28	83,6	86,18	90,49	86,76		25	75,84	59,47	81,88	72,40

#### 4.2. Análisis de resultados

Se calcula el porcentaje de error con los esfuerzos de fluencia y ruptura tanto para la teórica y experimental:

Para la muestra 1 del Día 4 al 22.5% de Limolita se toman los puntos fluencia y ruptura tanto para la curva experimental como para la teórica:

$$\sigma \text{ Fluencia [teórico]} = 58.18 \text{ MPa}$$

$$\sigma \text{ Fluencia [practico]} = 54.24 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma \text{ Ruptura [teórico]} = 76.8 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma \text{ Ruptura [practico]} = 76.8 \text{ [MPa]}$$

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

$$\text{Error [total]} = \left\{ \left[ \frac{(58.18 - 54.24)}{58.18} \right] * 100 \right\} + \left\{ \left[ \frac{(76.8 - 76.8)}{76.8} \right] \right\} = 6.77\%$$

También se aplica métodos estadísticos, para encontrar la ecuación que relacione los esfuerzos de ruptura con las variables independientes (porcentaje de Limolita y los días de curado).

Para aplicar el método de regresión múltiple se establece la hipótesis nula y la hipótesis alterna:

$$H_0 = B_0 = B_1 = B_2 = 0$$

$$H_a \neq B_0 \neq B_1 \neq B_2 \neq 0$$

Se revisa con funciones lineales, cuadráticas, cúbicas y logarítmicas para hallar con una confiabilidad de 95% y se rechace la hipótesis nula a favor de la hipótesis alterna y se adopte el mejor modelo estadístico.

De acuerdo a programas estadísticos y luego de analizar opciones de polinomios para la relación requerida se obtiene la siguiente tabla resumida que muestra las ecuaciones para varios grados de polinomios (ver tabla 27), así como la confiabilidad de cada uno, todo esto tanto para datos experimentales como para datos de validación:

Se realiza el Análisis de varianza de ANOVA entre el Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje de Días vs. Días de Curado y se plantea la hipótesis nula y la alterna, para que existan diferencias significativas entre las medias de los datos,

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

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

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

n corresponde el número de observaciones y k son los niveles.

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

Se rechaza la nula si:  $F > F_{0,05}$

$$F_{0,05(2, 21)}=3.4668$$

Se rechaza la hipótesis nula y si existen diferencias significativas con las medias del experimento.

**TABLA 26**

**ANÁLISIS DE VARIANZA EXPERIMENTACION**

<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	163684,2047	81842,102	358,883	5,80743E-17
Residuos	22	5017,032942	228,047		
Total	24	168701,2376			

Para la regresión múltiple se tiene:

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

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

TABLA 27

## COMPARACIÓN DE MODELOS ESTADÍSTICOS POLINOMIALES

## Fase experimentación

Dias	Modelos	Ecuación	R <sup>2</sup> (%)	P
7	Lineal	Esf. = 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.= 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

TABLA 28

## COMPARACIÓN DE MODELOS ESTADÍSTICOS POLINOMIALES

## Fase experimentación

21	Lineal	Esf.= 91,33 - 0,3228 (%)	6,00	0,692
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 68,58 + 3,577 (%) - 0,1300 (%)**2	39,80	0,4
	Cúbico	Esf.= 0,42 + 22,72 (%) - 1,590 (%)**2 + 0,03245 (%)**3	94,00	0,205
28	Lineal	Esf.= 104,5 - 0,7024 (%)	18,90	0,464
	Cuadrático	Esf.= 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 29

**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

Se interpreta que los modelos lineales, cuadráticos y cúbicos tienen un  $R^2$  entre 6% y 50%, se acepta la hipótesis nula y no se acepta las relaciones mencionadas tanto para la experimentación como para la validación.

Por lo expuesto se prueba con una tendencia logarítmica, en la que está definida desde los 4 días de curado hasta los 28 días y desde 0% hasta 27.5% de limolita y no en el valor o días. Ya que la mezcla no está solidificada y no se puede hacer pruebas:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * (\% \text{ de limolita}) + \beta_2 * \ln(\text{días de curado})$$

**TABLA 30**

**ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN DE EXPERIMENTACION**

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

TABLA 31

## VALORES P PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN

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

**TABLA 32****ANÁLISIS DE RESIDUALES DE EXPERIMENTACION**

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico Y</i>	<i>Residuos</i>	<i>Res. estándar</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

Se da como ecuación:

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

$$(\text{Días de Curado})$$

Con los datos de validación se realiza el mismo planteo:

**TABLA 33**

**ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN DE LA VALIDACION**

<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 34

## ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA VALIDACION

	<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	138454,532	69227,266	289,517	5,15776E-16
Residuos	22	5260,491	239,113		
Total	24	143715,023			

TABLA 35

## VALORES P PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN DE VALIDACION

	<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 36

## ANÁLISIS DE RESIDUALES DE VALIDACION

<i>Observación</i>	<i>Pronóstica Y</i>	<i>Residuos</i>	<i>Res. 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:

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

*(Días de Curado)*

**TABLA 37**  
**ERROR ENTRE MODELO TEÓRICO Y PRÁCTICO – FASE EXPERIMENTACIÓN**

Porcentajes [%]	Esfuerzo de Ruptura Promedio [MPa]					
	Día 7 (Experimental)	Día 7 (Modelo)	Error [%]	Día 14 (Experimental)	Día 14 (Modelo)	Error [%]
0	89,22	63,80	39,85	95,49	86,52	10,37
5	71,15	60,08	6,94	66,64	82,80	22,49
10	86,92	56,36	54,23	87,52	79,08	10,67
15	28,87	52,64	45,15	90,78	75,36	20,46
20	64,62	48,92	32,10	82,27	71,64	14,84
25	24,42	45,20	45,97	72,34	67,92	6,51
	Día 21 (Experimental)	Día 21 (Modelo)	Error [%]	Día 28 (Experimental)	Día 28 (Modelo)	Error [%]
0	96,06	99,81	3,76	95,77	109,25	12,34
5	77,73	96,09	18,61	113,03	105,53	7,63
10	103,54	92,37	12,09	80,4	101,81	21,03
15	89,3	88,65	0,73	91,08	98,09	7,14
20	80,84	84,93	4,82	99,54	94,37	5,48
25	81,01	81,21	0,25	85,9	90,65	5,24

Se evalúa con la ecuación obtenida en la fase de experimentación con los datos de validación y se compara con los obtenidos. De esta manera se halla el error experimental.

:

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:

$$\text{Esf. Ruptura} = -0.51 * 22.5 + 32.294 * \ln (11)$$

$$\text{s.f. Ruptura} = 81.86 \text{ [MPa]}$$

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

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

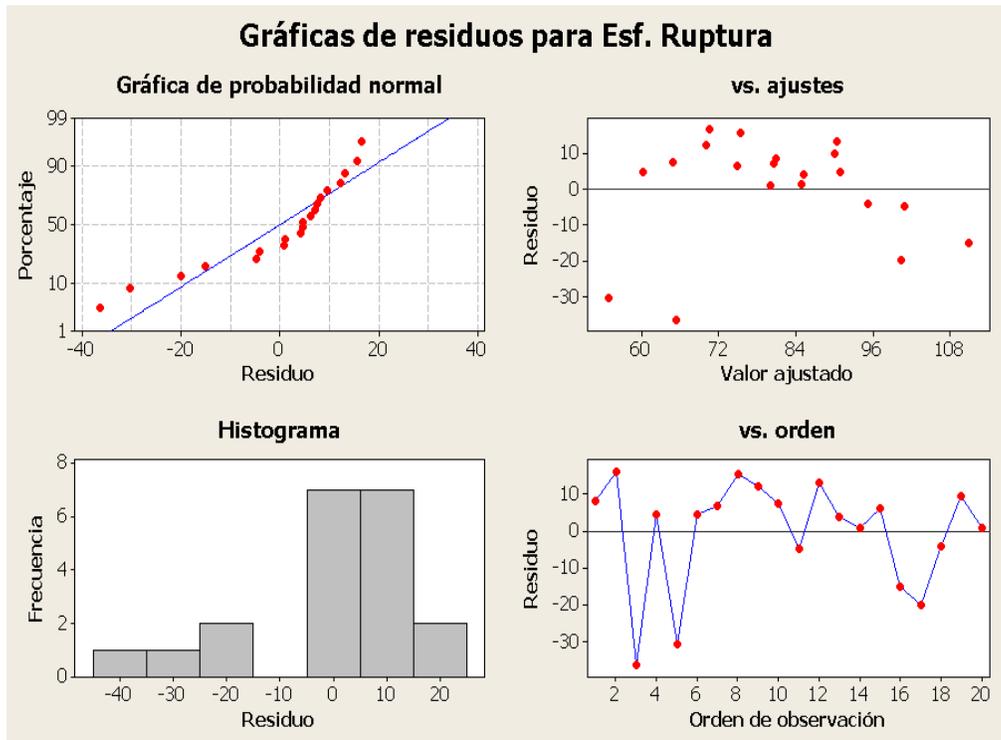
$$\text{Error} = 6.19 \text{ [%]}$$

De la misma manera se aplica para el resto de datos y se obtiene los errores (tabla 37 y 38) siguientes resultados:

**TABLA 38**  
**ERROR ENTRE MODELO TEÓRICO Y PRÁCTICO – FASE VALIDACIÓN**

Porcentajes [%]	Esfuerzo de Ruptura Promedio [MPa]					
	Día 4 (Experimental)	Día 4 (Modelo)	Error [%]	Día 11 (Experimental)	Día 11 (Modelo)	Error [%]
0	81,23	45,45	78,73	97,77	78,61	24,37
7,5	44,43	39,87	36,53	60,43	73,03	24,01
12,5	49,78	36,15	37,71	91,67	69,31	32,25
17,5	44,3	32,43	36,60	80,99	65,59	23,47
22,5	44,9	28,71	56,39	54,11	61,87	12,55
27,5	56,05	24,99	124,29	63,36	58,15	8,95
	Día 18 (Experimental)	Día 18 (Modelo)	Error [%]	Día 25 (Experimental)	Día 25 (Modelo)	Error [%]
0	108,88	94,76	14,90	92,64	105,53	12,22
7,5	83,36	89,18	6,38	91,08	99,95	7,59
12,5	99,09	85,46	15,95	91,67	96,23	4,74
17,5	84,67	81,74	3,58	90,36	92,51	2,32
22,5	67,32	78,02	13,72	69,45	88,79	21,78
27,5	78	74,30	4,98	75,84	85,07	10,85

Se comprueba la normalidad de los datos y se procede al análisis de varianza.



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

### 4.3 Identificación de cambio de propiedades

#### Fase de Experimentación

En busca del mejor tratamiento para porcentajes de limolita y días de curado se usa un software estadístico, el método de Tukey, que analiza con las dos variables independientes una por una.

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

Primero se analiza individualmente, manteniendo fija la proporción de limolita y variando los días de curado.

Se procede a analizar cuál es el mejor tratamiento respecto al porcentaje de limolita para lo que el método se basa en obtener la media de las réplicas e ir comparando con la de los diferentes porcentajes.

**TABLA 39**  
**ANÁLISIS DE TUKEY: ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE**  
**DE LIMOLITA**

	<b>Día 7</b>	<b>Día 14</b>	<b>Día 21</b>	<b>Día 28</b>	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

- El mayor valor de esfuerzo de ruptura ocurre con un 0% de aditivo, y se compara con el control siendo al 10% de limolita en curado bajo agua. Método de Tukey: Esfuerzo de Ruptura vs. Días de Curado

Con la segunda variable independiente se calcula las medias por cada día en los diferentes porcentajes, lo cual se presenta en la tabla 40

**TABLA 40**  
**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
Media	60.87	82.51	88.08	94.29

Se obtiene que los dos mejores tratamientos sean a los 28 y 21 días de curado respectivamente, que no necesariamente el valor más alto sea el mejor método.

**TABLA 41**  
**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

**TABLA 42**  
**ANÁLISIS DE TUKEY: SELECCIÓN DEL MEJOR**  
**TRATAMIENTO (CEMENTO PORTLAND TIPO IV)**

	7	14	21	28
TIPO IV	49.01	60.33	75.46	65.66

Se presenta los resultados recibidos del 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 41 de la cual el mejor resultado se da a los 21 días se puede aseverar que existe una mejora en el esfuerzo de ruptura.

## Fase de Validación

TABLA 43

**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 44

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

	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>25</b>
<b>0%</b>	81.23	97.77	108.88	92.64
<b>12.50%</b>	49.78	91.67	99.09	91.67

TABLA 45

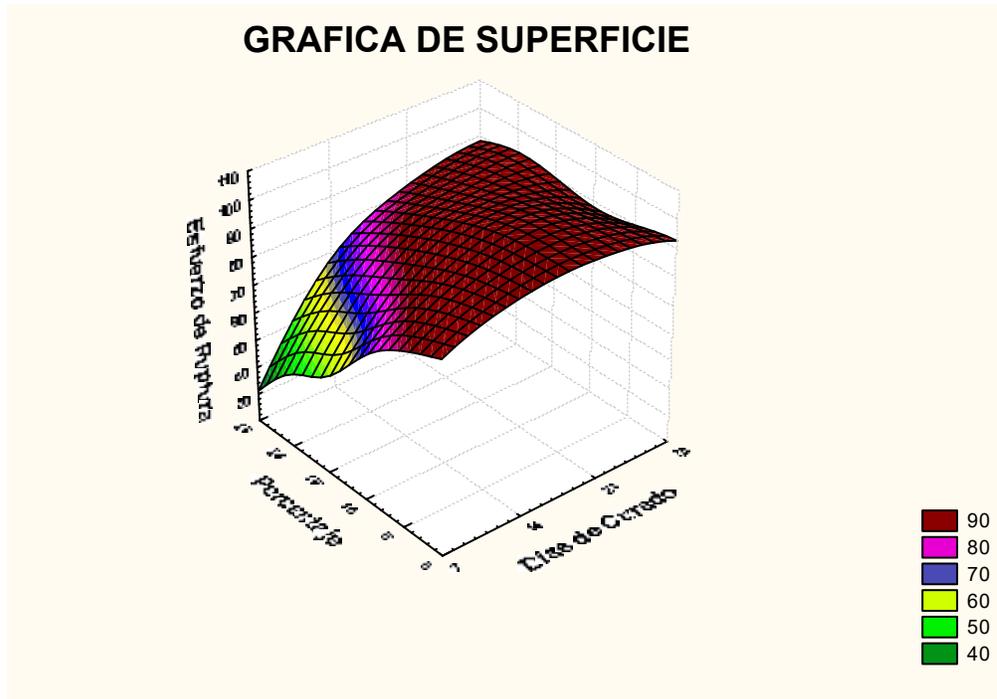
**ANÁLISIS DE TUKEY: SELECCIÓN DEL MEJOR TRATAMIENTO –  
VALIDACIÓN (CEMENTO PORTLAND TIPO IV)**

	4	11	18	25
TIPO IV	45.89	56.24	62.4	62.84

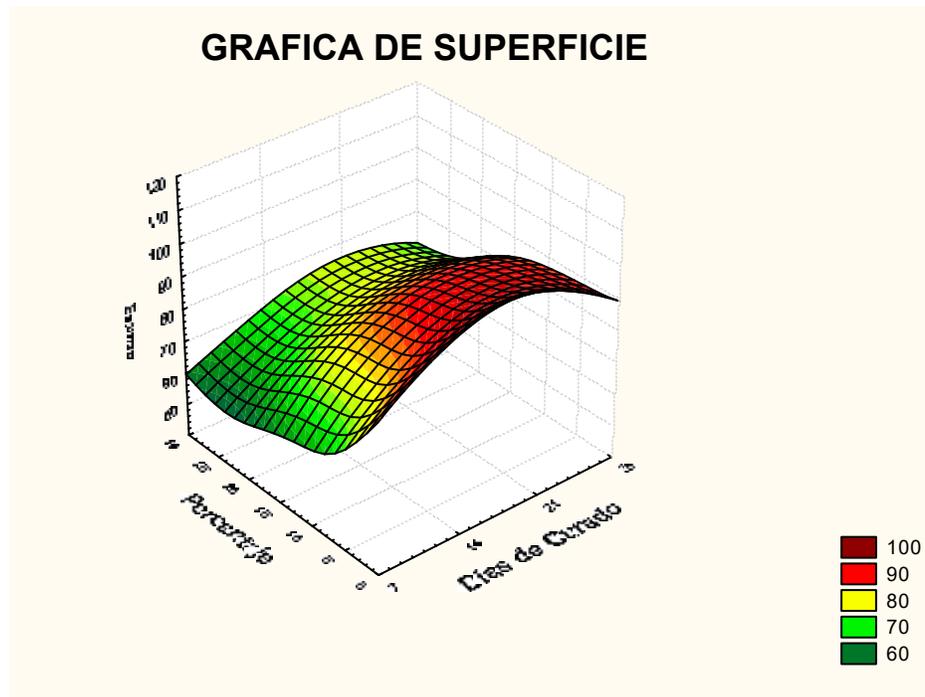
En la tabla 45 se observan los resultados correspondientes al cemento comercial tipo IV para 4, 11, 18, 25 de curado en agua, en donde el mejor valor de esfuerzo de ruptura ocurre a los 25 días el cual se compara con el resultado obtenido en la tabla 62 De la cual el mejor resultado se da a los 18 días, que nos dice que existe una mejora en el esfuerzo de ruptura.

**- Análisis en el Espacio**

Todo el 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 % de limolita.



**FIG. 4.25 GRÁFICO EN EL ESPACIO – ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE DE LIMOLITA VS. DÍAS DE CURADO de EXPERIMENTACION**



**FIG. 4.26 GRÁFICO EN EL ESPACIO – ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE DE LIMOLITA VS. DÍAS DE CURADO DE VALIDACION**

# CAPITULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Mediante un código fuente 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 modelo 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 valida

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 una margen de error correspondiente al 25%.
- Mediante análisis estadístico se determinó que el esfuerzo de ruptura más alto se produjo con la adición del 10% de limolita y a los 21 días de curado en agua con lo cual se pudo determinar que si existe una mejora en la resistencia a la compresión con respecto al 0% de aditivo de Cemento 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.
- En cuanto a la proporción asignada la mayor variación de la resistencia mayor ocurre a los 28 días de curado.

## 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

### ANEXO-1

#### CARACTERISTICAS DE LA MÁQUINA DE EXPERIMENTACIÓN 1

<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, carga máxima :30000 Lbf

#### CARACTERISTICAS DE LA MÁQUINA DE EXPERIMENTACIÓN 2

<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, carga máxima: 30000 Kgf.

## ANEXO-2

## TOMA DE DATOS

TABLA 5

TOMA DE DATOS DE EXPERIMENTACION DETRES REPLICA CON  
20% DE LIMOLITA A 7 DIAS DE CURADO EN AGUA

	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 3</i>
<b>DESPLAZA- MIENTO (m.)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	2940	2450	1960
0,000254	6860	6370	4410
0,000381	14210	13720	7350
0,000508	25970	24500	14210
0,000635	39200	37730	23030
0,000762	53900	51450	35770
0,000889	71050	66150	49000
0,001016	106820	83300	63700
0,001143	127400	101430	79870
0,001270	143570	117600	98000
0,001397	149450	129850	115150
0,001524		151900	131320
0,001651		161700	149450
0,001778			164150
0,001905			178850
0,002032			189140
<b>Humedad relativa:</b>	70,3	<b>exp. 20%7d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	26,6		
<b>Longitud Inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	08/09/2008		

TABLA 6

TOMA DE DATOS DE EXPERIMENTACION DE TRES REPLICAS  
CON 20% DE LIMOLITA A 14 DIAS DE CURADO EN AGUA

	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 3</i>
<b>DESPLAZA- MIENTO (m.)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	23520	16660	19600
0,000254	80360	42140	80360
0,000381	154840	117600	164640
0,000508	245000	216580	256760
0,000635	372400	303800	362600
0,000762	450800	426300	455700
0,000000	0	470400	480200
<b>Humedad relativa:</b>	70	<b>exp. 20%14d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	26		
<b>Longitud inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	15/09/2008		

TABLA 7

TOMA DE DATOS DE EXPERIMENTACION DE TRES REPLICAS  
CON 20% DE LIMOLITA A 21 DIAS DE CURADO EN AGUA

	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 3</i>
<b>DESPLAZAMIENTO (m.)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	4900	6860	4900
0,000254	9800	17640	28420
0,000381	28420	42140	75460
0,000508	94080	101920	159740
0,000635	180320	182280	254800
0,000762	279300	264600	362600
0,000889	367500	382200	411600
0,001016	436100	441000	
0,001143	490000	475300	
<b>Humedad relativa:</b>	69,2	<b>exp. 20%21d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	26,7		
<b>Longitud inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	22/09/2008		

TABLA 8

**TOMA DE DATOS DE EXPERIMENTACION DE TRES REPLICAS  
CON 20% DE LIMOLITA A 28 DIAS DE CURADO EN AGUA**

	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 3</i>
<b>DESPLAZA- MIENTO (m.)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	30380	48020	8820
0,000254	130340	164640	50960
0,000381	230300	235200	120540
0,000508	357700	352800	212660
0,000635	441000	460600	352800
0,000762	588000	524300	480200
0,000813	602700	548800	519400
0,000000	0	0	
<b>Humedad relativa:</b>	74,6	<b>exp. 20%28d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	24,5		
<b>Longitud inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	29/09/2008		

TABLA 9

TOMA DE DATOS DE VALIDACION DE TRES REPLICAS CON  
22.5% DE LIMOLITA A 4 DIAS DE CURADO EN AGUA

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
<b>DESPLAZA- MIENTO (m.) 10<sup>^-3</sup></b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	1960	3430	3430
0,000254	3920	9310	8820
0,000381	7350	18620	20090
0,000508	13426	30870	33810
0,000635	19600	44590	46550
0,000762	28420	58800	58800
0,000889	38710	72520	73500
0,001016	51450	85750	85750
0,001143	61740	98000	97020
0,001270	73500	107800	106820
0,001397	85750	117600	115150
0,001524	95550	120050	
0,001651	106820		
0,001778	112700		
<b>Humedad relativa:</b>	70,1	<b>val. 22,5%4d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	24,7		
<b>Longitud inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	02/09/2008		

TABLA 10

**TOMA DE DATOS DE VALIDACION DE TRES REPLICAS CON  
22.5% DE LIMOLITA A 11 DIAS DE CURADO EN AGUA**

	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 3</i>
<b>DESPLAZA- MIENTO (m.)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	1960	2450	1960
0,000254	4410	5390	3920
0,000381	8820	11270	8820
0,000508	17640	22050	17150
0,000635	28420	33810	27440
0,000762	42140	49000	39690
0,000889	56350	61250	53900
0,001016	73500	75950	68600
0,001143	90650	90650	85750
0,001270	107800	102900	102900
0,001397	132300	117600	121520
0,001524	143570	120050	138670
0,001575	147000		147000
			151900
<b>Humedad relativa:</b>	70,1	<b>val22,5%-11d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	26,6		
<b>Longitud inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	08/09/2008		

TABLA 11

TOMA DE DATOS DE VALIDACION DE TRES REPLICAS CON  
22.5% DE LIMOLITA A 18 DIAS DE CURADO EN AGUA

	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 3</i>
<b>DESPLAZA- MIENTO (m.)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	3920	13720	7840
0,000254	8820	39200	15680
0,000381	23520	120540	37240
0,000508	76440	213640	133280
0,000635	173460	303800	202860
0,000762	274400	401800	308700
0,000889	333200	436100	338100
0,001016	372400		0
<b>Humedad relativa:</b>	68	<b>val22,5%-18d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	25,4		
<b>Longitud inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	14/09/2008		

TABLA 12

TOMA DE DATOS DE VALIDACION DE TRES REPLICAS CON 22.5%  
DE LIMOLITA A 25 DIAS DE CURADO EN AGUA

	<i>Muestra 1</i>	<i>Muestra 2</i>	<i>Muestra 3</i>
<b>DESPLAZA- MIENTO (m.)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>	<b>FUERZA (Newton)</b>
0,000000	0	0	0
0,000127	15680	19600	11760
0,000254	45080	69580	40180
0,000381	120540	134260	115640
0,000508	211680	201880	202860
0,000635	298900	279300	303800
0,000762	382200	357700	338100
0,000889	406700	387100	377300
<b>Humedad relativa:</b>	70	<b>val22,5%-25d</b>	
<b>Temperatura ambiental( C):</b>	26		
<b>Longitud inicial (mm.):</b>	50,8		
<b>Fecha=</b>	22/09/2008		

**ANEXO-3**

**RESULTADOS DE ESFUERZOS**

TABLA 13.

## ESFUERZOS CON 20% DE LIMOLITA A 7 DIAS DE CURADO

DEFOR- MACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO (MPa) ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO(MPa)	% FLUENCIA exp. 20%7d
0,0000	0,00			MUESTRA 1  85,25%
0,0025	1,14	455,70	531,65	
0,0050	2,66	607,60	734,18	
0,0075	5,51	1139,25	1006,34	
0,0100	10,06	1822,80	1215,20	
0,0125	15,19	2050,65	1392,42	
0,0150	20,89	2278,50	1573,25	
0,0175	27,53	2658,26	2069,64	
0,0200	41,39	5544,36	2194,12	
0,0225	49,37	3189,91	2225,34	
0,0250	55,63	2506,36	2105,89	
0,0275	57,91	911,40		
0,0000	0,00			
0,0025	0,98	392,00	493,68	
0,0050	2,47	595,35	708,87	
0,0075	5,32	1139,25	949,38	
0,0100	9,49	1670,90	1169,63	
0,0125	14,62	2050,65	1329,13	
0,0150	19,94	2126,60	1464,75	
0,0175	25,63	2278,50	1613,94	
0,0200	32,28	2658,26	1746,85	
0,0225	39,30	2810,16	1822,80	
0,0250	45,57	2506,36	1829,71	
0,0275	50,32	1898,75	1962,05	
0,0300	58,86	3417,76	1927,97	
0,0325	62,66	1519,00		
0,0000	0,00			MUESTRA 3
0,0025	0,76	303,80	341,78	
0,0050	1,71	379,75	379,75	
0,0075	2,85	455,70	550,64	
0,0100	5,51	1063,30	713,93	
0,0125	8,92	1367,10	924,06	
0,0150	13,86	1974,70	1085,00	
0,0175	18,99	2050,65	1234,19	
0,0200	24,68	2278,50	1375,54	
0,0225	30,95	2506,36	1519,00	
0,0250	37,98	2810,16	1622,57	
0,0275	44,62	2658,26	1696,22	
0,0300	50,89	2506,36	1781,91	

0,0325	57,91	2810,16	1817,38	86,79%
0,0350	63,61	2278,50	1848,12	
0,0375	69,30	2278,50	1832,30	
0,0400	73,29	1594,95		

**TABLA 14**

**ESFUERZOS CON 20% DE LIMOLITA A 14 DIAS DE CURADO**

DEFORMACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO (MPa) ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO(MPa)	% FLUENCIA exp. 20%14d
0,0000	0,00			MUESTRA 1      82,60%
0,0025	4,14	1657,09	2830,87	
0,0050	14,15	4004,64	3636,40	
0,0075	27,27	5247,47	4315,35	
0,0100	43,15	6352,19	5247,47	
0,0125	65,59	8975,93	5293,50	
0,0150	79,40	5523,65		
0,0000	0,00			MUESTRA 2      64,58%
0,0025	2,93	1173,78	1484,48	
0,0050	7,42	1795,19	2761,82	
0,0075	20,71	5316,51	3814,77	
0,0100	38,15	6973,60	4280,83	
0,0125	53,51	6145,06	5005,81	
0,0150	75,09	8630,70	4734,55	
0,0175	82,85	3107,05		
0,0000	0,00			MUESTRA 3      63,86%
0,0025	3,45	1380,91	2830,87	
0,0050	14,15	4280,83	3866,55	
0,0075	29,00	5937,92	4522,49	
0,0100	45,22	6490,29	5109,37	
0,0125	63,87	7456,92	5351,03	
0,0150	80,27	6559,33	4833,19	
0,0175	84,58	1726,14		

**TABLA 15**  
**ESFUERZOS CON 20% DE LIMOLITA A 21**  
**DIAS DE CURADO**

DEFOR- MACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO (MPa) ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO(MPa)	% FLUENCIA exp. 20% 21d
0,0000	0,00			MUESTRA 1       75
0,0025	0,86	345,23	345,23	
0,0050	1,73	345,23	667,44	
0,0075	5,01	1311,87	1657,09	
0,0100	16,57	4626,05	2540,88	
0,0125	31,76	6076,01	3279,67	
0,0150	49,19	6973,60	3698,87	
0,0175	64,73	6214,10	3840,66	
0,0200	76,81	4833,19	3835,87	
0,0225	86,31	3797,51		
0,0000	0,00			MUESTRA 2       80,41
0,0025	1,21	483,32	621,41	
0,0050	3,11	759,50	989,65	
0,0075	7,42	1726,14	1795,19	
0,0100	17,95	4211,78	2568,50	
0,0125	32,11	5661,74	3107,05	
0,0150	46,61	5799,83	3846,83	
0,0175	67,32	8285,47	3883,81	
0,0200	77,68	4142,74	3720,79	
0,0225	83,72	2416,60		
0,0000	0,00			MUESTRA 3      61,90
0,0025	0,86	345,23	1001,16	
0,0050	5,01	1657,09	1772,17	
0,0075	13,29	3314,19	2813,61	
0,0100	28,14	5937,92	3590,37	
0,0125	44,88	6697,42	4257,81	
0,0150	63,87	7595,02	4142,74	
0,0175	72,50	3452,28		

TABLA 16

## ESFUERZOS CON 20% DE LIMOLITA A 28 DIAS DE CURADO

DEFOR- MACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO (MPa) ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO(MPa)	% FLUENCIA exp. 20% 28d
0,000000	0,00			MUESTRA 1      73
0,002500	5,35	2.140	4591,53	
0,005000	22,96	7.043	5408,57	
0,007500	40,56	7.043	6300,41	
0,010000	63,00	8.976	6214,10	
0,012500	77,68	5.869	6904,56	
0,015000	103,57	10.357	6288,08	
0,016000	106,16	2.589		
0,000000	0,00			MUESTRA 2      64
0,002500	8,73	3.492	5799,83	
0,005000	29,00	8.107	5523,65	
0,007500	41,43	4.971	6214,10	
0,010000	62,14	8.285	6490,29	
0,012500	81,13	7.595	6156,57	
0,015000	92,35	4.488	5893,53	
0,016000	96,66	4.315		
0,000000	0,00			MUESTRA 3      64,86
0,002500	1,55	621	1795,19	
0,005000	8,98	2.969	2830,87	
0,007500	21,23	4.902	3745,72	
0,010000	37,46	6.490	4971,28	
0,012500	62,14	9.874	5638,72	
0,015000	84,58	8.976	5227,74	
0,017500	91,49	2.762	6371,92	
0,018000	95,80	8.631		

TABLA 17

## ESFUERZOS CON 22.5% DE LIMOLITA A 4 DIAS DE CURADO

DEFOR- MACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO	% FLUENCIA val 22,5%4d
0,000000	0,00			MUESTRA 1
0,002500	0,76	303,80	303,80	
0,005000	1,52	303,80	379,75	
0,007500	2,85	531,65	520,25	
0,010000	5,20	941,78	607,60	
0,012500	7,60	956,97	734,18	
0,015000	11,01	1367,10	857,15	
0,017500	15,00	1594,95	996,85	
0,020000	19,94	1974,70	1063,30	
0,022500	23,92	1594,95	1139,25	
0,025000	28,48	1822,80	1208,29	
0,027500	33,23	1898,75	1234,19	
0,030000	37,03	1519,00	1273,63	84,78
0,032500	41,39	1746,85	1247,75	
0,035000	43,67	911,40		
0,000000	0,00			MUESTRA 2
0,002500	1,33	531,65	721,532	
0,005000	3,61	911,40	962,03	
0,007500	7,22	1443,05	1196,21	
0,010000	11,96	1898,75	1382,29	
0,012500	17,28	2126,60	1519,00	
0,015000	22,79	2202,55	1605,80	
0,017500	28,10	2126,60	1661,41	
0,020000	33,23	2050,65	1687,78	71,42
0,022500	37,98	1898,75	1670,90	
0,025000	41,77	1519,00	1657,09	
0,027500	45,57	1519,00	1550,65	
0,030000	46,52	379,75		
0,000000	0,00			MUESTRA 3
0,002500	1,33	531,65	683,55	
0,005000	3,42	835,45	1037,98	
0,007500	7,78	1746,85	1310,14	
0,010000	13,10	2126,60	1443,05	
0,012500	18,04	1974,70	1519,00	
0,015000	22,79	1898,75	1627,50	
0,017500	28,48	2278,50	1661,41	
0,020000	33,23	1898,75	1670,90	74,46
0,022500	37,60	1746,85	1655,71	
0,025000	41,39	1519,00	1622,57	
0,027500	44,62	1291,15		

TABLA 18.

## ESFUERZO CON 22.5% DE LIMOLITA A 11 DIAS DE CURADO

DEFOR- MACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO	% FLUENCIA val22,5%- 11d
0,000000	0,00			MUESTRA 1
0,002500	0,76	303,80	341,78	
0,005000	1,71	379,75	455,70	
0,007500	3,42	683,55	683,55	
0,010000	6,84	1367,10	881,02	
0,012500	11,01	1670,90	1088,62	
0,015000	16,33	2126,60	1247,75	
0,017500	21,84	2202,55	1424,07	
0,020000	28,48	2658,26	1561,20	
0,022500	35,13	2658,26	1670,90	
0,025000	41,77	2658,26	1864,23	73,33%
0,027500	51,27	3797,51	1854,45	
0,030000	55,63	1746,85	1814,04	
0,031000	56,96	1329,13		
0,000000	0,00			MUESTRA 2
0,002500	0,95	379,75	417,73	

0,005000	2,09	455,70	582,28	
0,007500	4,37	911,40	854,44	
0,010000	8,54	1670,90	1048,11	
0,012500	13,10	1822,80	1265,84	
0,015000	18,99	2354,45	1356,25	
0,017500	23,73	1898,75	1471,53	
0,020000	29,43	2278,50	1561,20	
0,022500	35,13	2278,50	1594,95	
0,025000	39,87	1898,75	1657,09	85,71%
0,027500	45,57	2278,50	1550,65	
0,030000	46,52	379,75		
0,000000	0,00			MUESTRA 3
0,002500	0,76	303,80	303,80	
0,005000	1,52	303,80	455,70	
0,007500	3,42	759,50	664,56	
0,010000	6,65	1291,15	850,64	
0,012500	10,63	1594,95	1025,33	
0,015000	15,38	1898,75	1193,50	
0,017500	20,89	2202,55	1329,13	
0,020000	26,58	2278,50	1476,81	
0,022500	33,23	2658,26	1594,95	
0,025000	39,87	2658,26	1712,33	
0,027500	47,09	2886,11	1791,16	80,00%
0,030000	53,73	2658,26	1752,70	
0,032500	56,96	1291,15	1763,13	
0,033500	58,86	1898,75		

TABLA 19

## ESFUERZOS CON 22.5% DE LIMOLITA A 18 DIAS DE CURADO

DEFOR- MACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO	% FLUENCIA val 22,5%18d
0,000000	0,00			MUESTRA 1
0,002500	0,69	276,18	310,71	
0,005000	1,55	345,23	552,36	
0,007500	4,14	1035,68	1346,39	
0,010000	13,46	3728,46	2444,21	
0,012500	30,55	6835,51	3222,13	
0,015000	48,33	7111,70	3353,64	73,68
0,017500	58,69	4142,74	3279,67	
0,020000	65,59	2761,82		
				MUESTRA 2
0,000000	0,00			
0,002500	2,49	997,82	1380,91	
0,005000	6,90	1764,01	2830,87	
0,007500	21,23	5730,78	3762,98	
0,010000	37,63	6559,33	4280,83	
0,012500	53,51	6352,19	4718,12	69,66
0,015000	70,77	6904,56	4389,33	
0,017500	76,81	2416,60		
				MUESTRA 3
0,000000	0,00			
0,002500	1,43	570,18	552,36	
0,005000	2,76	534,55	874,58	
0,007500	6,56	1519,00	2347,55	
0,010000	23,48	6766,47	2858,49	
0,012500	35,73	4902,24	3624,89	60
0,015000	54,37	7456,92	3402,96	
0,017500	59,55	2071,37		

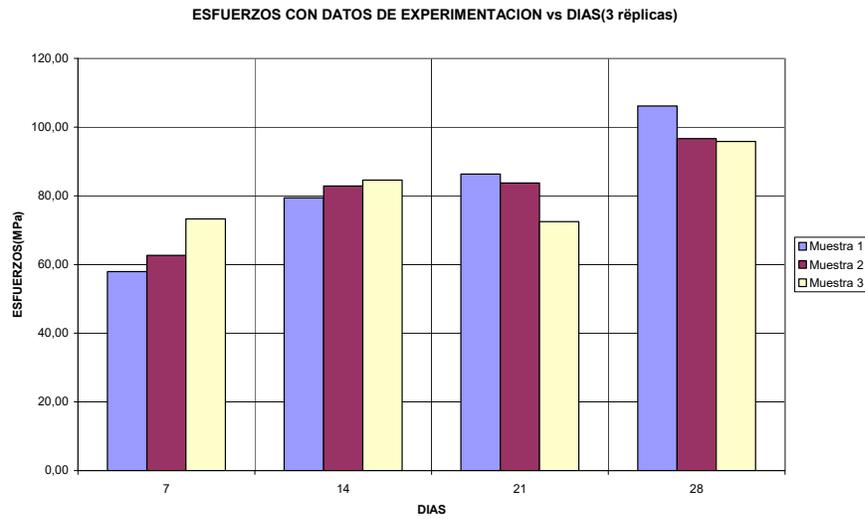
TABLA 20

## ESFUERZOS CON 22.5% DE LIMOLITA A 25 DIAS DE CURADO

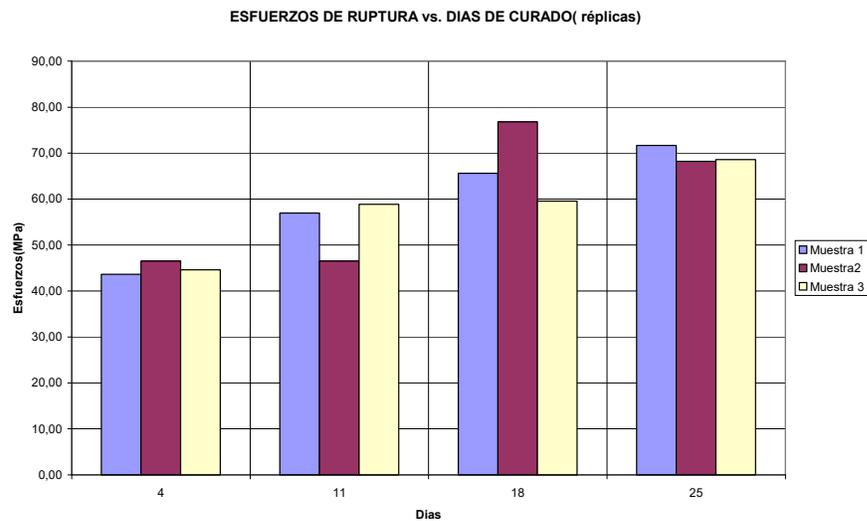
DEFOR- MACION	ESFUERZO (MPa)	CAMBIOS MODULO (MPa) ELASTICIDAD	PROMEDIO ACUMULADO MODULO	% FLUENCIA val22,5%- 25d
0,0000	0,00			MUESTRA 1      73,49%
0,0025	2,76	1104,73	1588,05	
0,0050	7,94	2071,37	2830,87	
0,0075	21,23	5316,51	3728,46	
0,0100	37,28	6421,24	4211,78	
0,0125	52,65	6145,06	4487,96	
0,0150	67,32	5868,88	4093,42	
0,0175	71,63	1726,14		
0,0000	0,00			MUESTRA 2
0,0025	3,45	1380,91	2451,12	
0,0050	12,26	3521,33	3153,08	
0,0075	23,65	4557,01	3555,85	
0,0100	35,56	4764,15	3935,60	
0,0125	49,19	5454,60	4200,27	0,721518987
0,0150	63,00	5523,65	3896,14	
0,0175	68,18	2071,37		
0,0000	0,00			MUESTRA 3
0,0025	2,14	855,27	1461,09	
0,0050	7,31	2066,91	2803,39	
0,0075	21,03	5488,00	3688,36	
0,0100	36,88	6343,27	4418,91	0,537662338
0,0125	55,24	7341,09	4098,18	
0,0150	61,47	2494,55	3920,00	
0,0175	68,60	2850,91		

### ANEXO-4

## DIAGRAMA DE BARRAS DE ESFUERZO DE RUPTURA VS DIAS DE CURADO A 20% DE LIMOLITA



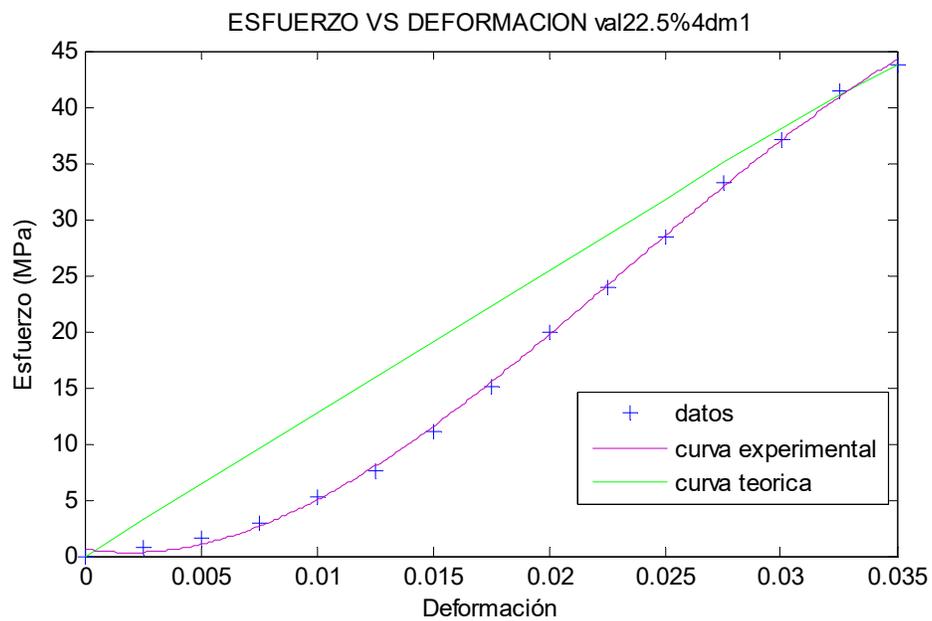
## DIAGRAMA DE BARRAS DE ESFUERZO DE RUPTURA VS DIAS DE CURADO A 22.5% DE LIMOLITA



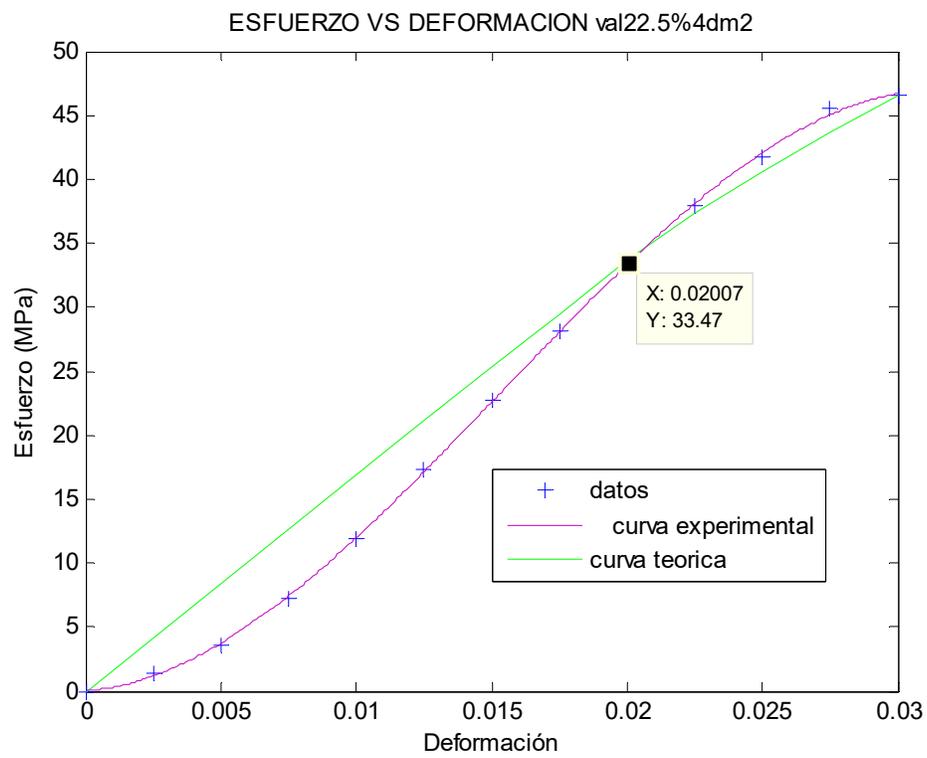
## ANEXO- 5

## DOCE GRÁFICAS CON DATOS DE VALIDACIÓN CON CADA RÉPLICA

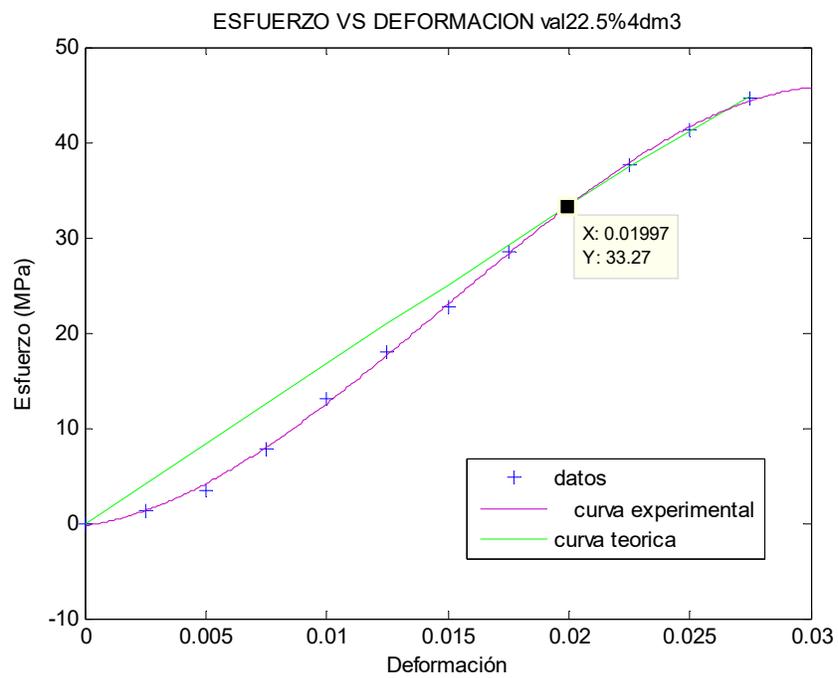
Las siguientes doce graficas corresponden a los datos de validación una para cada réplica:



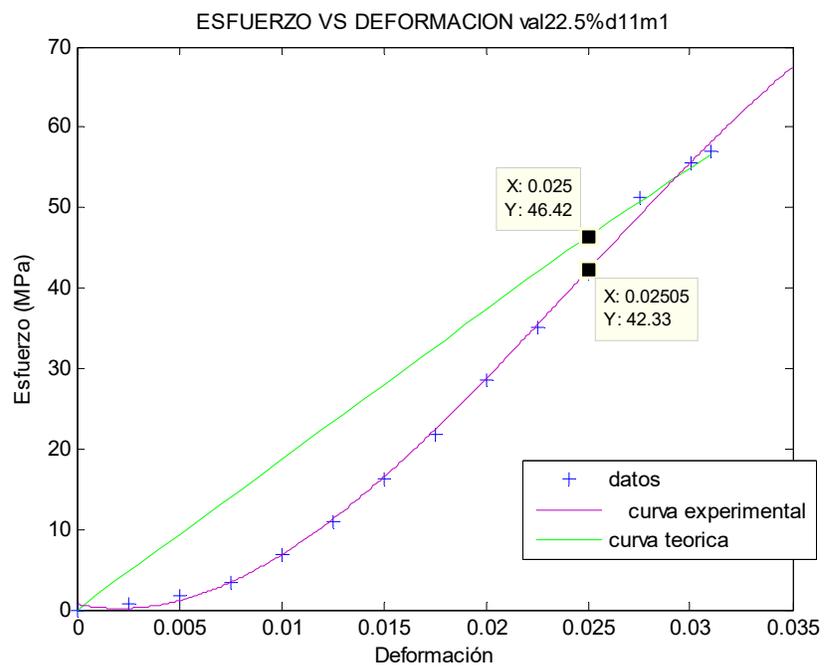
**Fig. 4.1.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 4 días curado en agua con la primera réplica**



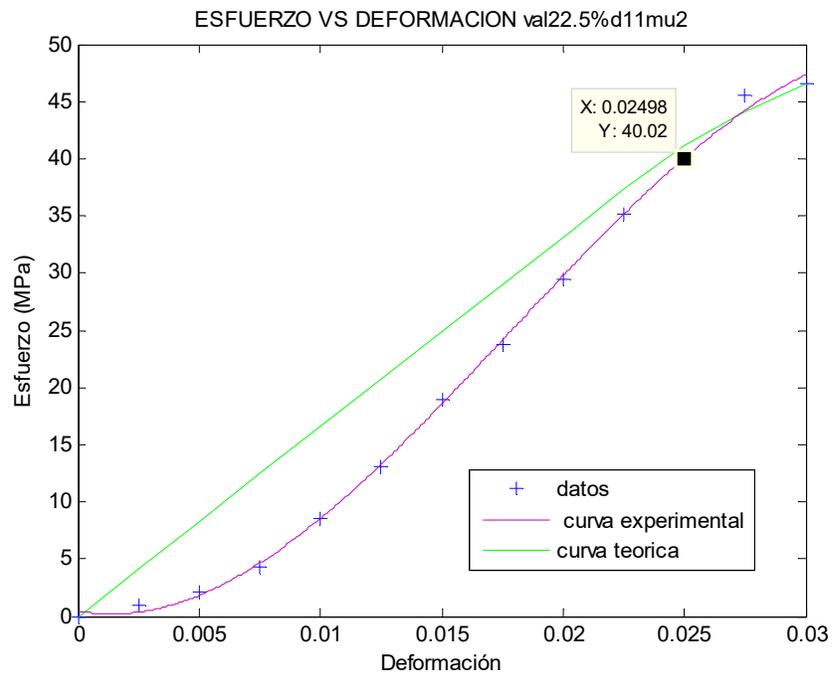
**Fig. 4.2.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limonita a 4 días curado en agua con la segunda réplica**



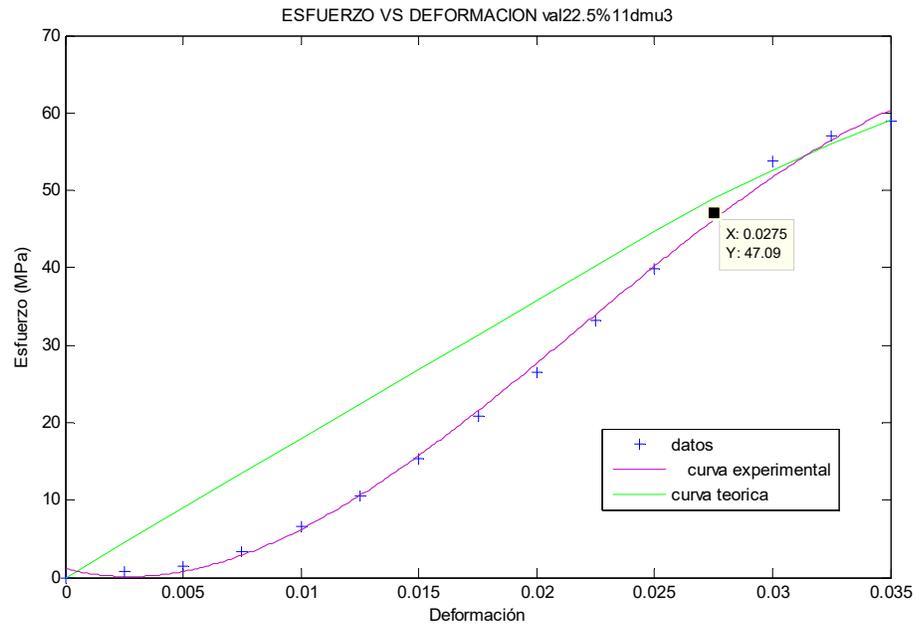
**Fig. 4.3.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limonita a 4 días curado en agua con la tercera réplica**



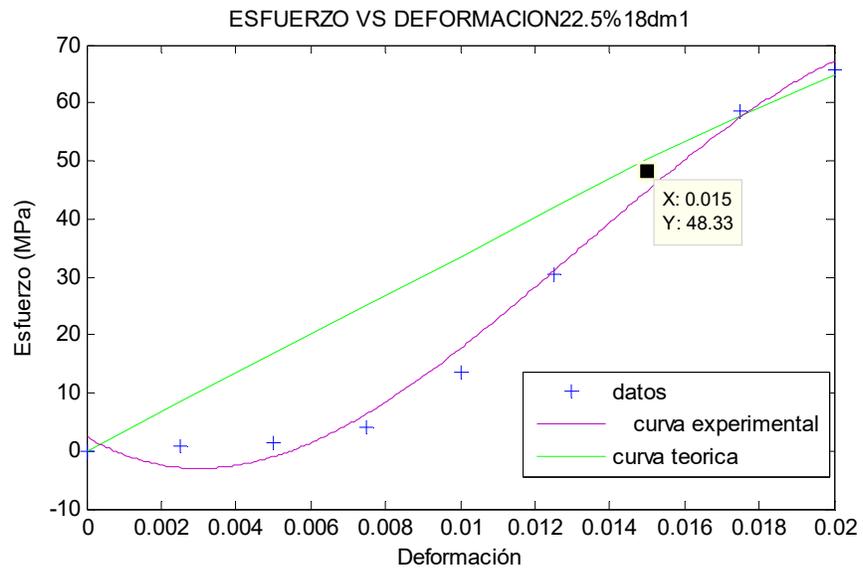
**Fig. 4.4. Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 11 días de curado en agua con la primera réplica**



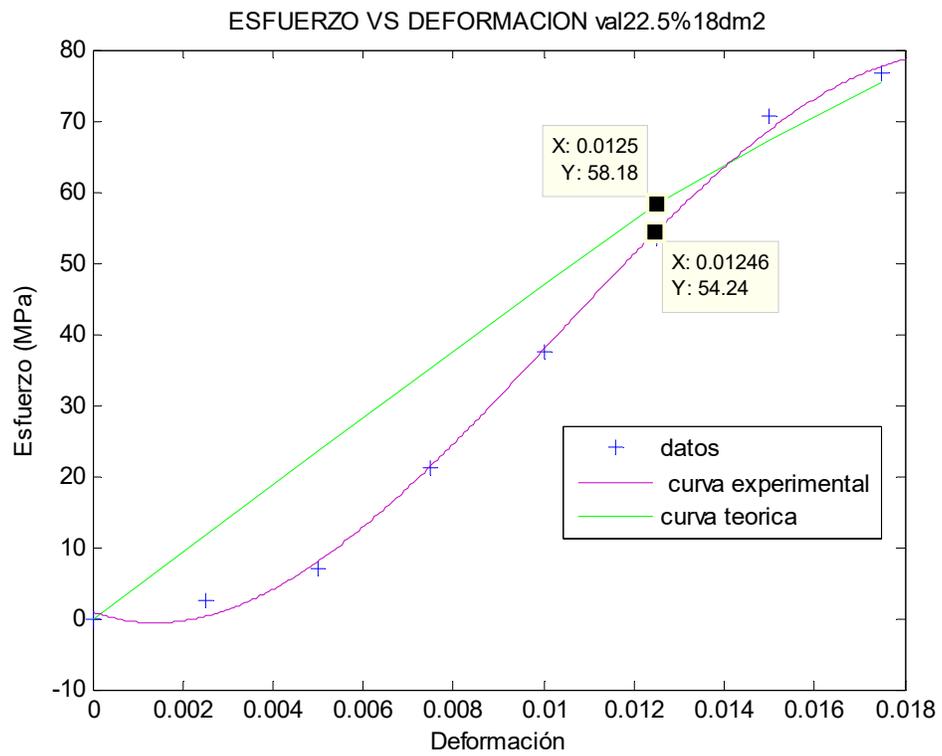
**Fig. 4.5. Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 11 días de curado en agua con la segunda réplica**



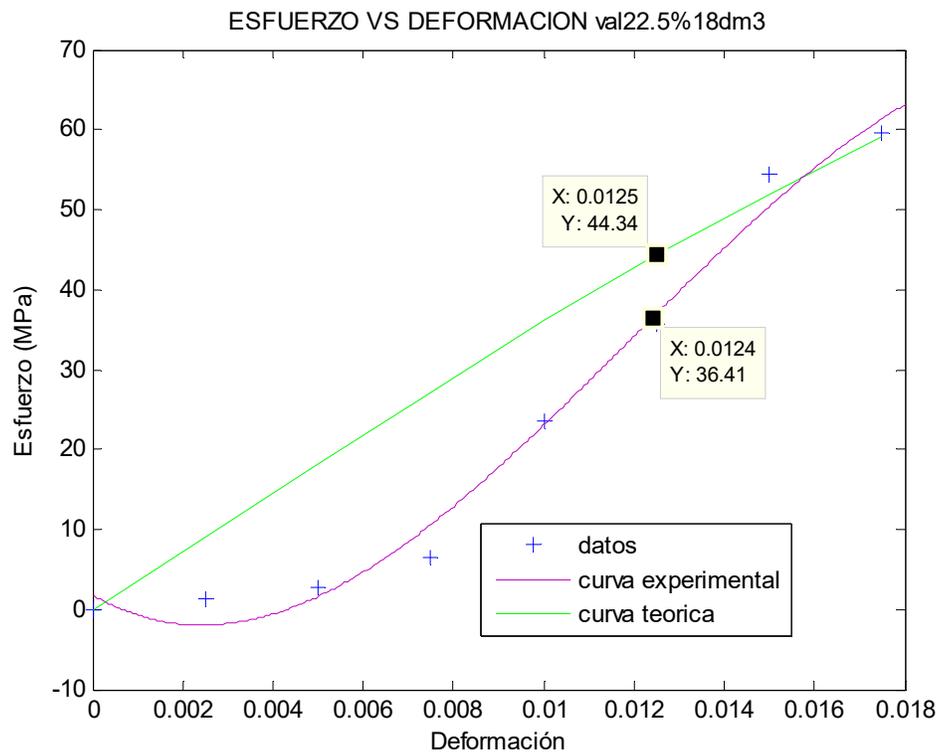
**Fig. 4.6. Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 11 días de curado en agua con la tercera réplica**



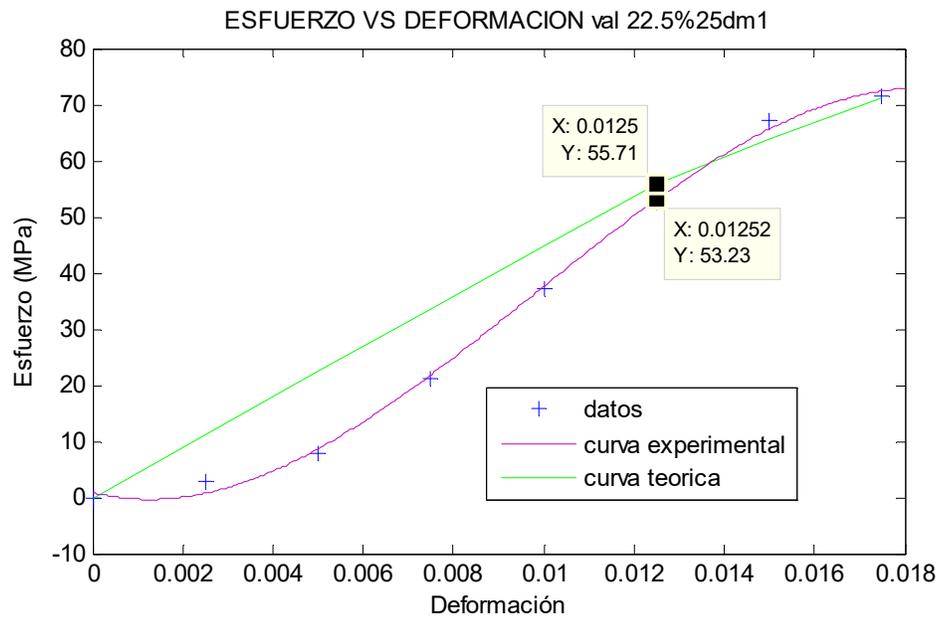
**Fig. 4.7.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 18 días curado en agua con la primera réplica**



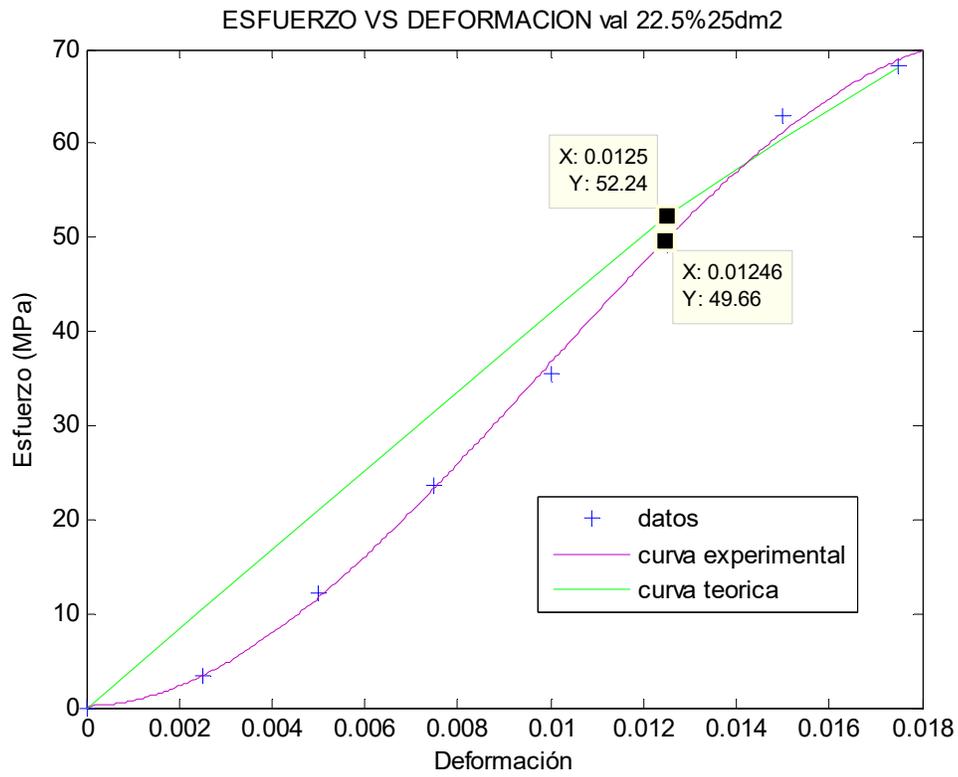
**Fig. 4.8.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 18 días curado en agua con la segunda réplica**



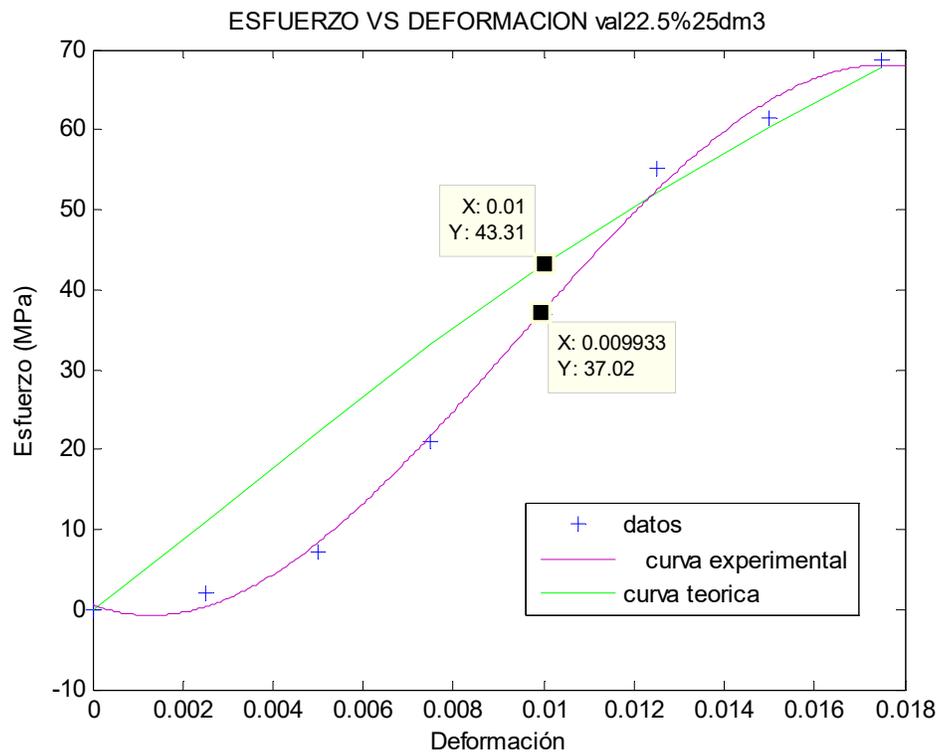
**Fig. 4.9.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 18 días curado en agua con la tercera réplica**



**Fig. 4.10.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limonita a 25 días de curado en agua con la primera réplica**



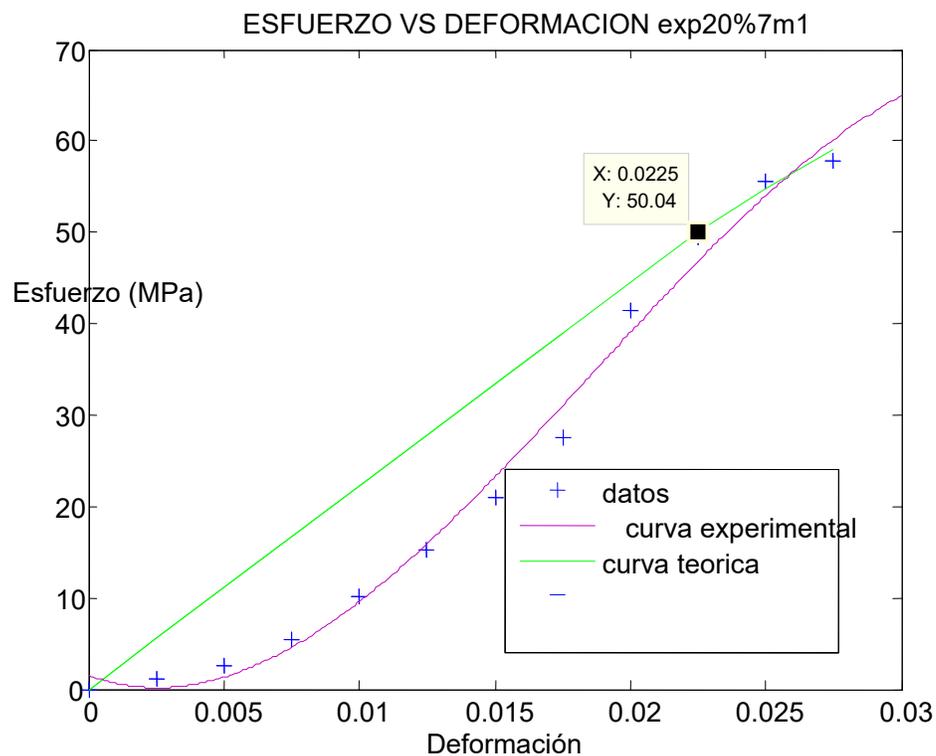
**Fig. 4.11.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 25 días de curado en agua con la segunda réplica**



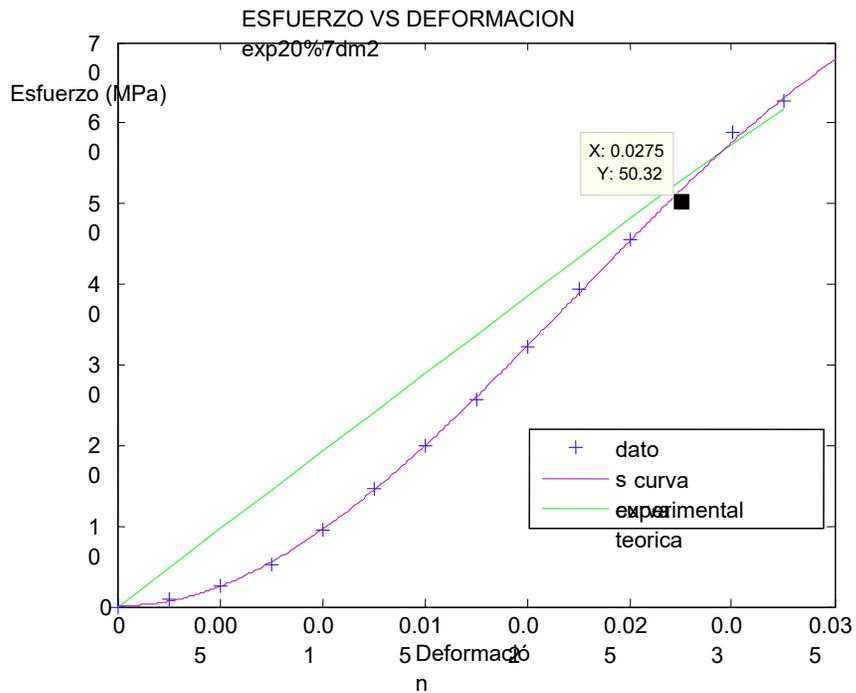
**Fig. 4.12.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 22.5% de limolita a 25 días de curado en agua con la tercera réplica**

**ANEXO-6****Doce gráficas con datos de experimentación con cada réplica**

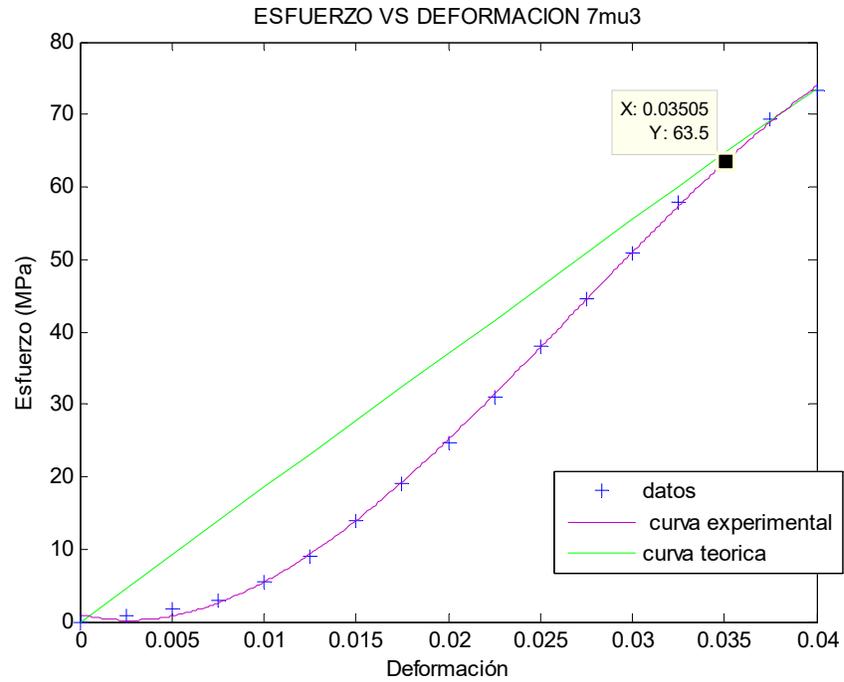
Las siguientes 12 gráficas corresponden con los datos de experimentación:



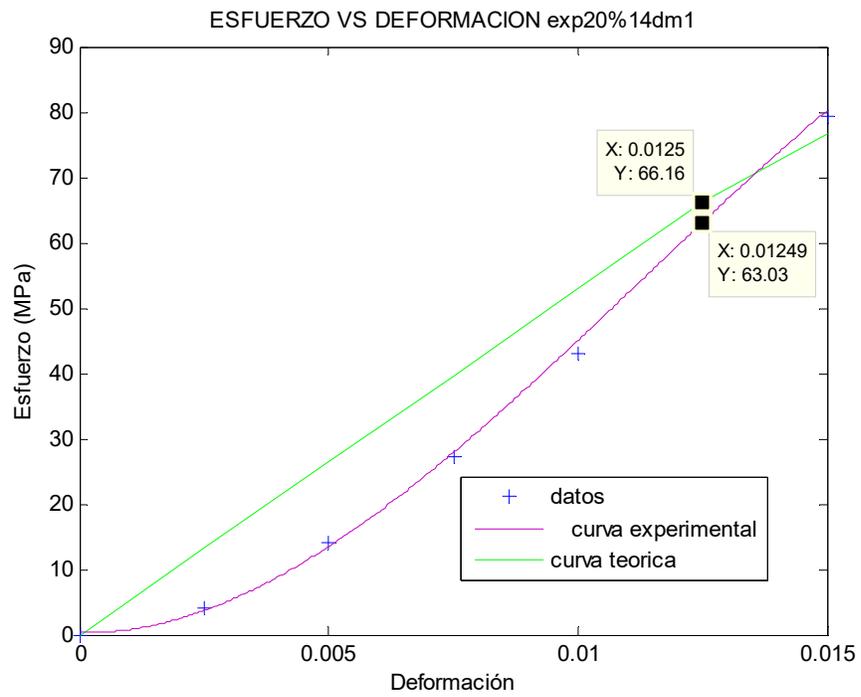
**Fig. 4. 13.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de experimentación con 20% de limolita a 7 días curado en agua con la primera réplica**



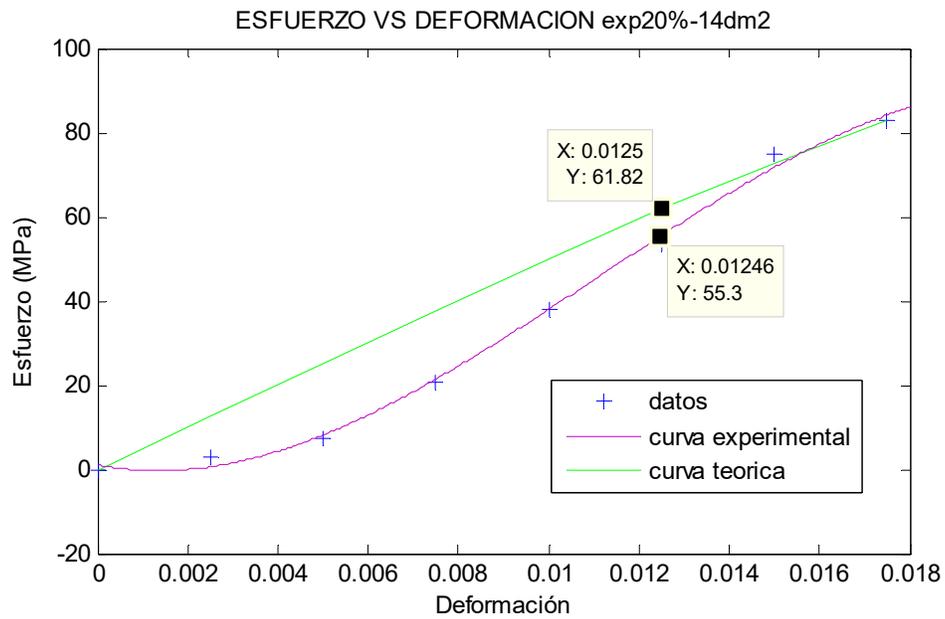
**Fig. 4.14. Esfuerzos vs. Deformación con datos de experimentación con 20% de limolita a 7 días de curado en agua con la segunda réplica**



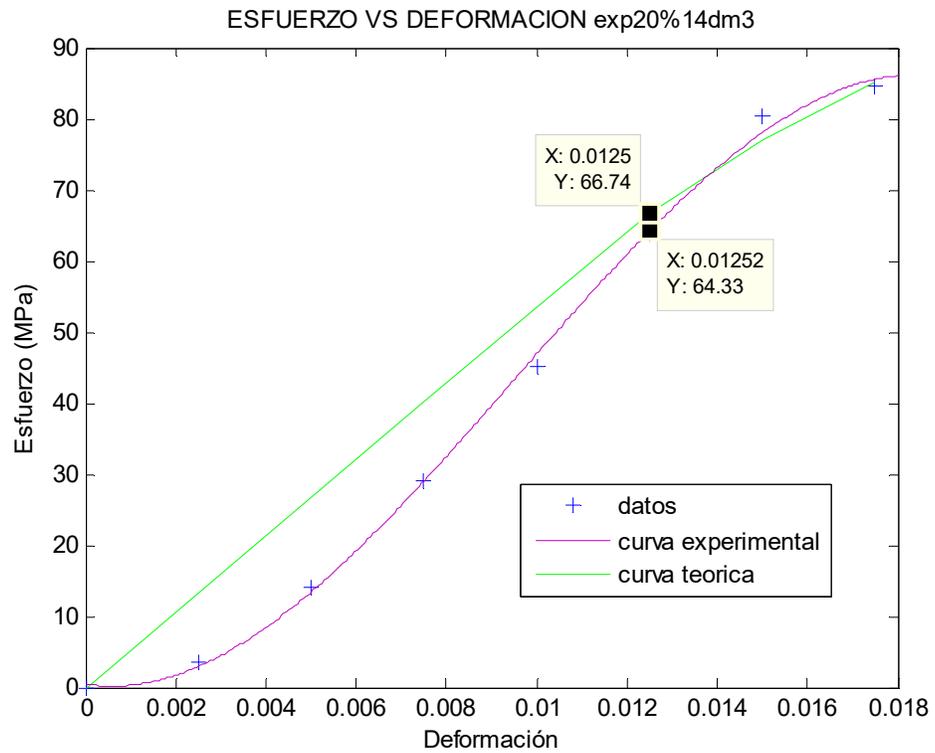
**Fig. 4.15.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación con 20% de limolita a 7 días de curado en agua con la tercera réplica**



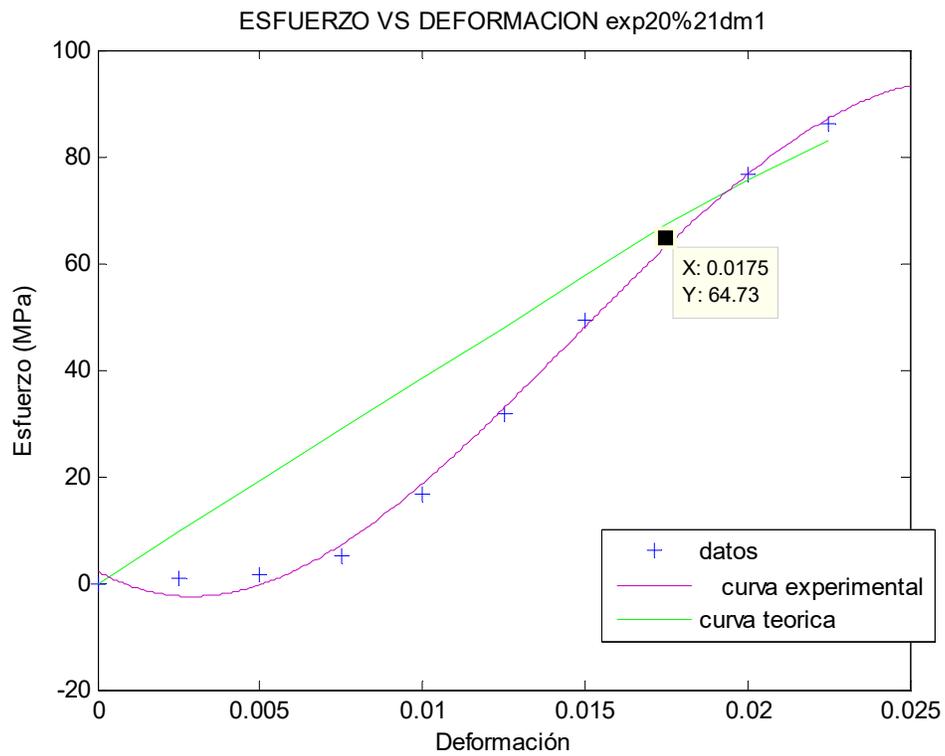
**Fig. 4.16.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de experimentación con 20% de limolita a 14 días de curado en agua con la primera réplica**



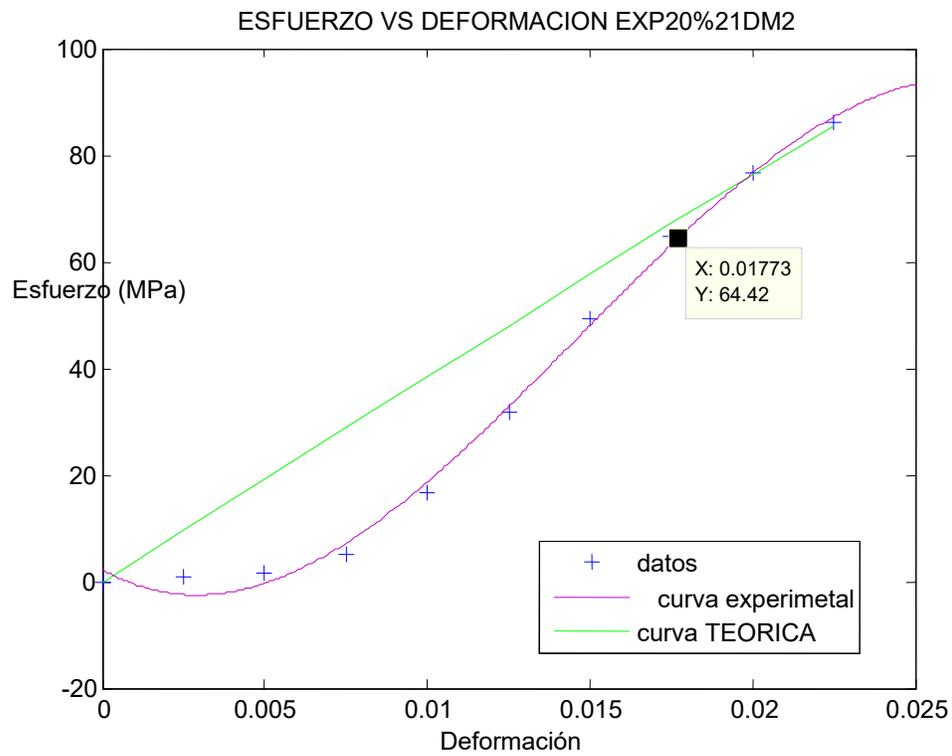
**Fig. 4.17.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de validación al 20% de limolita a 14 días curado en agua con la segunda réplica**



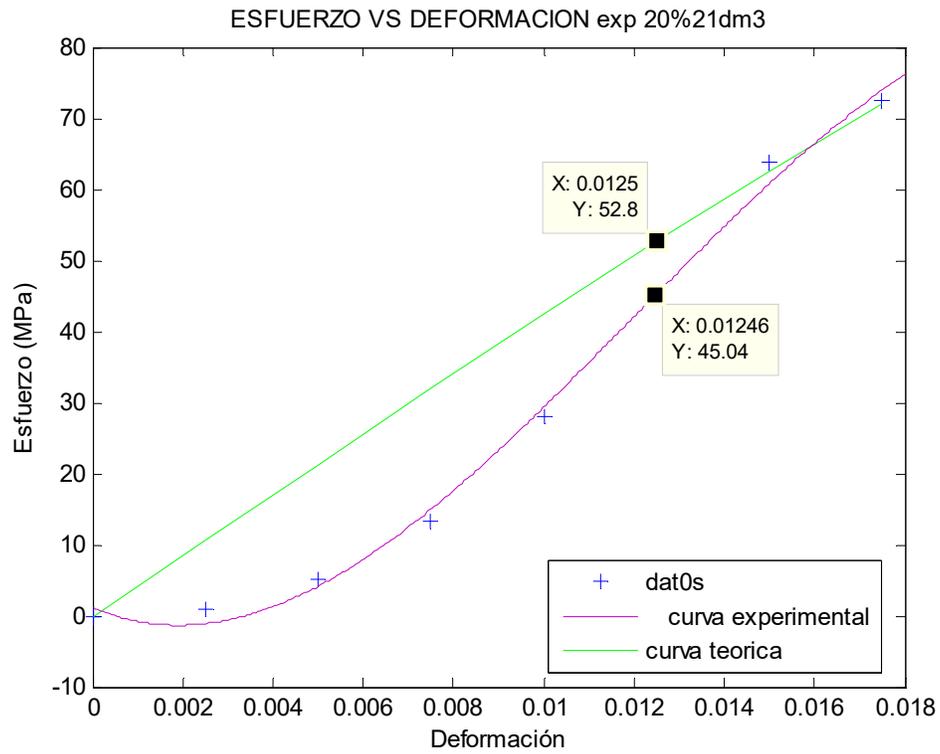
**Fig. 4.18.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de experimentación con 20% de limolita a 14 días de curado en agua con la tercera réplica**



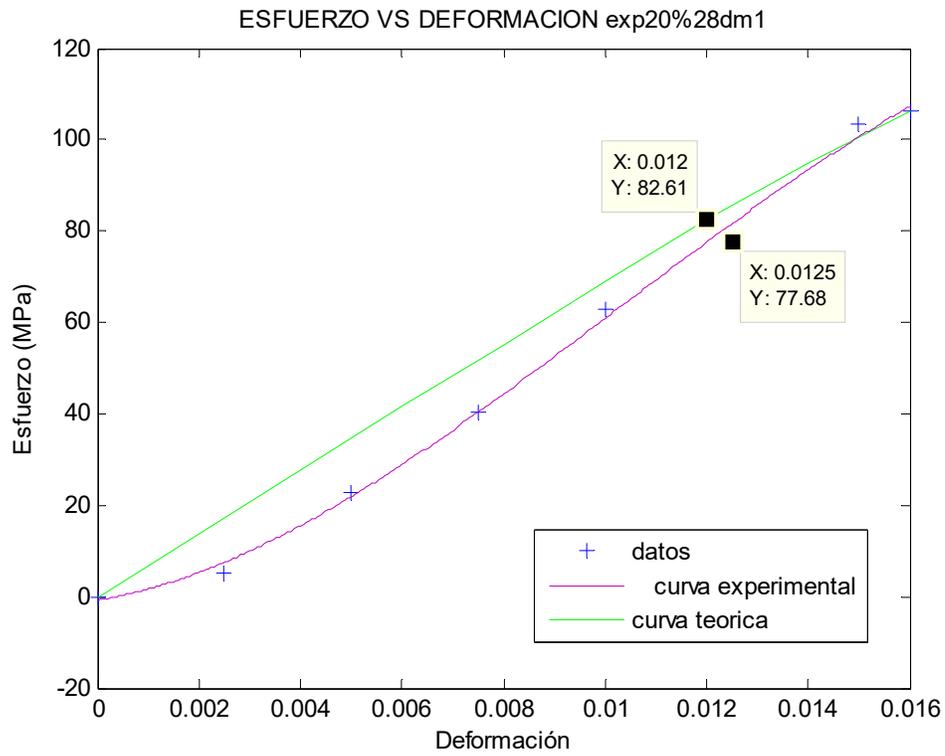
**Fig. 4.19 Esfuerzos vs. Deformación con datos de experimentación con 20% de limolita a 21 días curado en agua con la primera réplica**



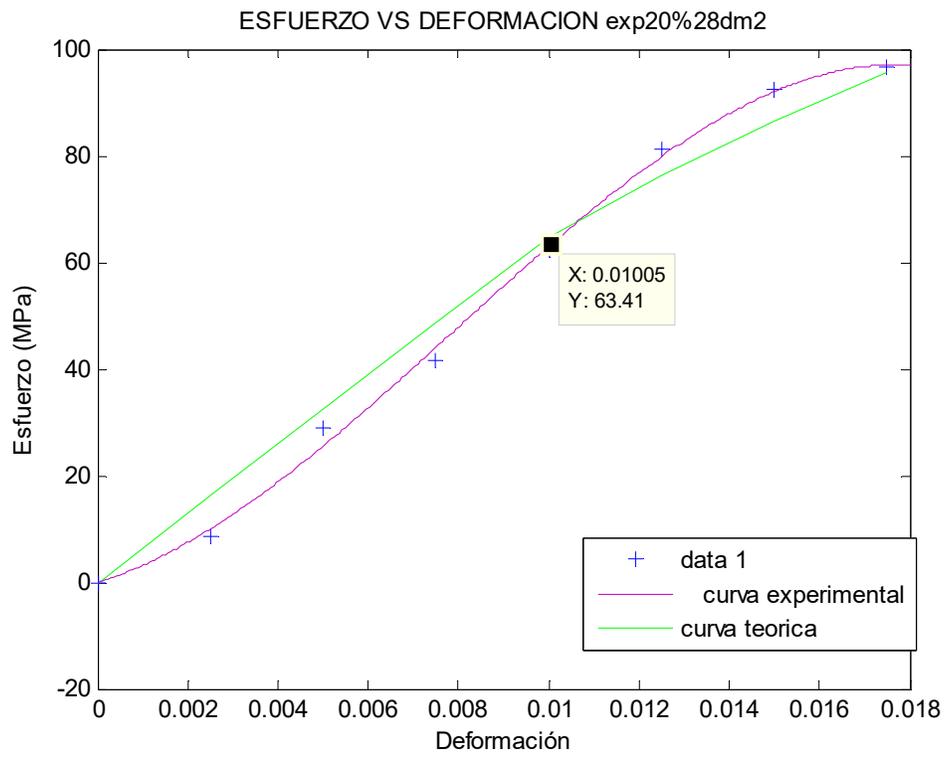
**Fig. 4.20** . \_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de *experimentación* con 20% de limolita a 21 días de curado en agua con la segunda réplica



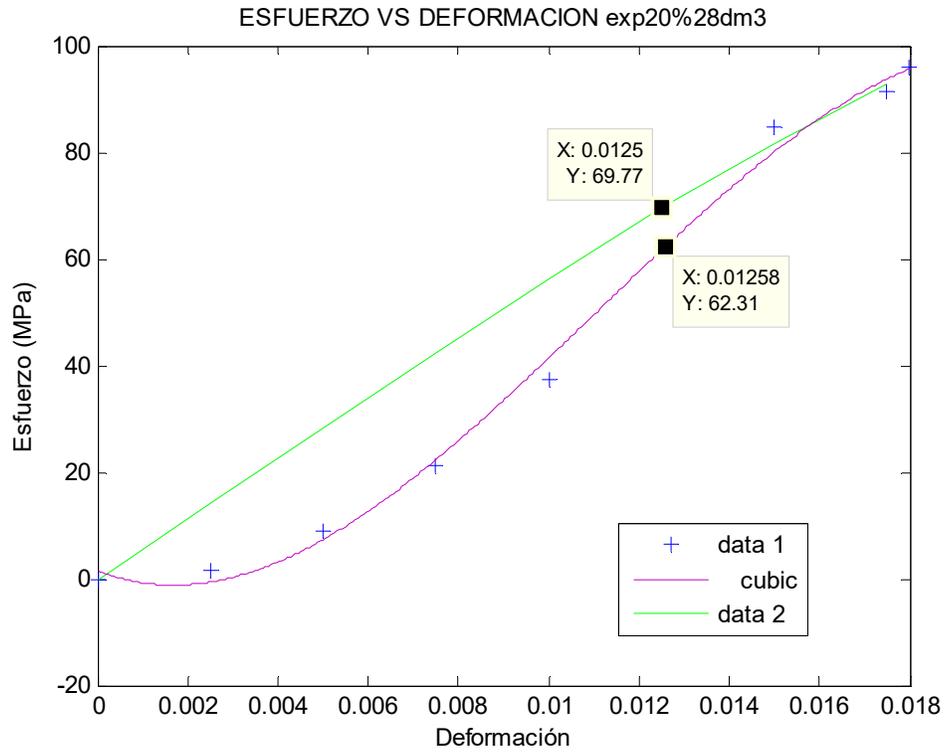
**Fig. 4.21** . \_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de experimentación con 20% de limolita a 21 días curado en agua con la tercera réplica



**Fig. 4.22** . \_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de experimentación con 20% de limonita a 28 días de curado en agua con la primera réplica



**Fig. 4.23.\_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de *experimentación* con 20% de limolita a 28 días curado en agua con la segunda réplica**



**Fig. 4.24** . \_ Esfuerzos vs. Deformación con datos de *experimentación* con 20% de limolita a 28 días de curado en agua con la tercera réplica





## ANEXO-7

**Código fuente**

A continuación se presenta el código fuente utilizado para obtener el valor de  $H'$  mediante el uso de la herramienta computacional Matlab:

```

m=0.003;
a=1;
E=20e9;
delta_e=0.00001;
inc=0:delta_e:0.1
interv=(0.1/delta_e)

sigma_yo=10e6
sigma_n(1,1)=0;
sigma_yn(1,1)=sigma_yo;
deltalam(1,1)=0;
lo=10^-8;
lm(1,1)=0;

%Desarrollo del programa
for c=1:interv
    sigma_tr=sigma_n(c,1)+E*delta_e
    Fn_trn1=abs(sigma_tr)-sigma_yn(c,1)

    if Fn_trn1>0
        Ho=a*sigma_yo*(m/(deltalam(1,1)+lo)^0.5)*(m-deltalam(1,1)-
        lo)/(m+deltalam(1,1)+lo)^2;
        ro=Fn_trn1-deltalam(1,1)*(E+Ho)
        F_n1=ro;
        i=1;
        toler=10^-10;
        lim=20;
        lamda_1=deltalam(i,1)+lo;

        while abs(F_n1)>=abs(ro)*toler&i<lim,
            syms deps;
            R_n1=Fn_trn1-deps*(E+a*sigma_yo*((m/(deps+lo))^0.5)*(m-deps-
            lo)/(m+deps+lo)^2);
            F_n(i,1)=Fn_trn1-
            deltalame(i,1)*(E+a*sigma_yo*((m/(deltalam(i,1)+lo))^0.5)*(m-
            deltalame(i,1)-lo)/(m+deltalam(i,1)+lo)^2);

            d_lamda=- (subs(diff(R_n1,deps),deps,deltalam(i,1)))^-1*F_n(i,1);
            deltalame(i+1,1)=deltalam(i,1)+d_lamda;

```

```

F_n(i+1,1)=Fn_trn1-
deltalam(i+1,1)*(E+a*sigma_yo*((m/(deltalam(i+1,1)+lo))^0.5)*(m-
deltalam(i+1,1)-lo)/(m+deltalam(i+1,1)+lo)^2);

j(1,1)=1;
F(1,1)=log10(abs(F_n(1,1))/abs(ro));
F_n1=F_n(i+1,1);
j(i+1,1)=i+1;
F(i+1,1)=log10(abs(F_n(i+1,1))/abs(ro));
i=i+1;
end

delta=deltalam(i,1);
lamda_1=delta + lo;
Hp=a*sigma_yo*((m/lamda_1)^0.5)*(m-lamda_1)/(m+lamda_1)^2;
sigma_n(c+1,1)=sigma_tr-E*delta*sign(sigma_tr);
sigma_yn(c+1,1)=sigma_yn(c,1)+Hp*delta;
lo=lamda_1;
lm(c+1,1)=lo;

else
    sigma_n(c+1,1)=sigma_tr;
    sigma_yn(c+1,1)=sigma_yn(c,1);
end
end

plot(inc,sigma_n)
grid
xlabel('Deformacion');
ylabel('Esfuerzo');
title('Esfuerzo vs. Deformacion')

```

# **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.