

# **ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

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

“Referir la variación existente en la Resistencia a la Compresión correspondiente al Cemento Portland Tipo I mediante la Adición de 15% de Limolita y Curado Bajo Agua”

### **TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

### **INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Javier Adrian Albarracín Narváez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser el que guía mis pasos. A mis padres, por todo el sacrificio realizado, por ser mi apoyo incondicional y mi ejemplo a seguir. A mis hermanos, por su apoyo y ayuda. Finalmente a mi Director de Tesis, por su dirección y apoyo para culminar este trabajo.

## **DEDICATORIA**

ESTE TRABAJO ESTÁ  
DEDICADO A MIS PADRES,  
QUE HAN SIDO MI EJEMPLO,  
QUE HAN CULTIVADO EN MI LA  
FORTALEZA DEL TRABAJO Y  
EL DESEO DEL TRIUNFO.

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Dra. Cecilia Paredes V.  
DELEGADA DEL DECANO DE LA  
FIMCP  
PRESIDENTE

---

**Ing. Mauricio Cornejo M.**  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Rodrigo Perugachi B.  
VOCAL

## DECLARACION EXPRESA

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

---

Javier Adrian Albarracín Narváez

## RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento de la pasta de cemento con la adición de puzolanas naturales, utilizando métodos numéricos. Coordinar los trabajos de modelación con la experimentación de laboratorio, con el objetivo de lograr el mayor ajuste de los modelos con la realidad del comportamiento del material compuesto.

Se analizará el comportamiento del cemento al introducir un 15% de porcentaje de aditivo (limolita) en diferentes tiempos de curado; también haremos una comparación de resultados obtenidos mediante la modelación por computadora y datos obtenidos de la experimentación en el laboratorio.

Se realizarán las pruebas necesarias para garantizar nuestra hipótesis de investigación mediante un análisis estadístico para lo cual usaremos el método más adecuado para nuestra experimentación.

Se tomarán muestras de limolita de los campos de la Cemento Nacional para luego realizar los debidos procesos de pesado, medición, y mezcla con el cemento tipo I que servirá como base, se tendrán 3 muestras para cada día en este caso con el 15 % de aditivo , luego de obtener las muestras a analizar usaremos el tipo de curado en agua para el tiempo que hemos establecido que son de 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25, 28 días, para sacarlas en esos tiempos y realizar las pruebas necesarias y así obtener los resultados de sus propiedades mecánicas para al final realizar una

comparación con la muestra base para así poder valorizar nuestra hipótesis de investigación.

Para nuestro análisis estadístico usamos una confiabilidad del 95%, con el programa STATISTICA, trabajamos los datos y los evaluamos con ANOVA el cual nos arroja los valores de la media, varianza, errores estándar etc.

# INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
SIMBOLOGÍA.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES.....	2
<b>1.1</b> Planteamiento del Problema.....	2
<b>1.1.1</b> Justificación del Estudio.-.....	3
<b>1.2</b> Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.1 Objetivos Específicos.....	4
<b>1.3</b> Metodología.....	5
<b>1.4</b> Estructura de la Tesis.....	7



## CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO.....	9
2.1 Generalidades.....	9
2.2 Agua para Concreto.....	12
2.2.1 Usos del Agua.....	12
2.2.2 Requisitos de Calidad.....	14
2.2.3 Características Físico-químicas.....	14
2.2.4 Efectos en el Concreto.....	15
2.2.5 Verificación de Calidad.....	16
2.3 Aspectos Influidos en el Concreto.....	17
2.3.1 Materiales Contaminantes.....	17
2.3.2 Limo y Arcilla.....	18
2.3.3 Materia Orgánica.....	18
2.3.4 Sales Orgánicas.....	18
2.4 Propiedades del Cemento.....	19
2.4.1 Propiedades Mecánicas del Concreto.....	19
2.4.2 Peso Específico.....	20

2.4.3 Porosidad y Absorción.....	20
2.4.4 Resistencia Mecánica.....	21
2.4.5 Resistencia a la Abrasión.....	22
2.4.6 Modulo de Elasticidad.....	22
2.5 Estado del Arte de la modelación del comportamiento de la pasta de cementos Puzolánicos.....	23

### CAPITULO 3

3. METODOLOGIA.....	27
3.1 Recolección de Datos.....	27
3.2 Diseño de Experimentos.....	28
3.3 Prueba sin Aditivo.....	29
3.4 Experimentación.....	29
3.5 Modelación de la Experimentación.....	33

### CAPITULO 4

4. ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS.....	35
4.1 Tabulación de Datos y Resultados.....	35

4.2 Análisis de Resultados.....	38
4.3 Identificación de cambio de propiedades.....	63

## CAPITULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	64
5.2 Recomendaciones.....	65

## ANEXOS

- Código fuente
- Fotos

## BIBLIOGRAFIA



## SIMBOLOGIA

°C	Grados centígrados
Hr	Horas
Km	Kilómetros
Kg	kilogramos
m	Metros
mm	milímetros
min	Minutos
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
TON	Toneladas
g/cm <sup>3</sup>	Gravedad específica
N/ mm <sup>2</sup>	Esfuerzo

## INDICE DE FIGURA

Figura 1.1 Metodología de la investigación.....	4
Figura 2.1 Estructura simplificada del cemento.....	10
Figura 4.1 Grafica esfuerzo de ruptura experimentacion.....	40
Figura 4.2 Grafica esfuerzo de ruptura validacion.....	41
Figura 4.4 Superficie de respuesta.....	46
Figura 4.5 Superficie de respuesta (validacion).....	48

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1. Valores medios del Coeficiente de expansión térmica lineal de los agregados, según el tipo de roca.....	23
TABLA 2. verificación de masa en los tamices.....	31
TABLA 3. Composición del mortero con 15% de Limolita.....	31
TABLA 4. Composición del mortero con 17.5% de Limolita.....	32
TABLA 5 Error Grafica Experimental vs Teórica (Experimentación).....	38
TABLA 6 Error Grafica Experimental vs Teórica (Validación).....	39
TABLA 7 Esfuerzo de Ruptura( Experimentación).....	40
TABLA 8 Esfuerzo de Ruptura(Validación).....	40
TABLA 9 Esfuerzo de Ruptura vs % Limolita/Días de Curado (Experimentación).....	42
TABLA 10 Esfuerzo de Ruptura vs % Limolita/Días de Curado (Validación).....	42

TABLA 11 Análisis de Tukey por porcentaje de limolita.....	43
TABLA 12 Análisis de Tukey por Días de Curado.....	44
TABLA 13 Resultado del Análisis de TUKEY (Experimentación).....	44
TABLA 14 Resultados Cemento TIPO IV.....	45
TABLA 15 Análisis de TUKEY (Validación).....	46
TABLA 16 Resultados del Análisis de TUKEY (Validación).....	47
TABLA 17 Resultados de Cemento TIPO IV (Validación).....	47
TABLA 18 Comparación de Modelos Estadísticos Polinomiales para Datos Experimentales.....	50
TABLA 19 Comparación de Modelos Estadísticos Polinomiales para Datos de Validación.....	51
TABLA 20 Estadísticas de la Regresión.....	53
TABLA 21 Análisis de Varianza.....	53
TABLA 22 P-Values para coeficientes de Regresión (con Intercepción).....	55
TABLA 23 P-Values para coeficientes de Regresión (sin Intercepción).....	55
TABLA 24 Análisis de Residuales.....	56
TABLA 25 Estadísticas de la Regresión.....	57
TABLA 26 Análisis de Varianza.....	57



TABLA 27 P-Values para coeficientes de Regresión (con Intercepción).....	58
TABLA 28 P-Values para coeficientes de Regresión (sin Intercepción).....	58
TABLA 29 Análisis de Residuales (Validación).....	59
TABLA 30 Error entre Modelo Teórico y Práctico – Fase Experimentación.....	61
TABLA 31 Error entre Modelo Teórico y Practico – Fase Validación.....	62

# INTRODUCCION

En la actualidad, el cemento Portland 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.

Este trabajo se enfoca en identificar el comportamiento de la resistencia a la compresión de un material compuesto como el cemento ya que en la actualidad se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en las diversas construcciones.

El desarrollo de esta investigación se basará en realizar ensayos mecánicos a compuestos formados por cemento Portland tipo I con ciertos aditivos a diferentes porcentajes 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 las condiciones de curado establecidas con la cual se permitirá la comparación con los compuestos que incluyen los aditivos.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. GENERALIDADES.**

### **1.1 Planteamiento del Problema.**

El cemento Portland es el tipo de cemento más utilizado para la preparación del hormigón o concreto.

En la actualidad se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en las nuevas construcciones. Por esta razón, surge la necesidad de analizar exactamente sus propiedades e investigar experimentalmente aditivos que mejoren las mismas.

Esta investigación se basa en realizar ensayos mecánicos al cemento PORTLAND tipo I con ciertos aditivos a diferentes porcentajes y a tiempos de curado diferentes, de esta forma podemos estudiar el efecto 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.

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

Debido a que en el sector industrial existe una alta competencia por encontrar mejores resultados en las construcciones, así también existe una alta exigencia del mercado por la necesidad de productos de buena calidad, es por esto que nace la oportunidad de realizar un análisis del comportamiento del cemento Portland agregando ciertos porcentajes de aditivos y a diferentes tiempos de curado, determinar si existen mejoras significativas en lo referente a su resistencia en la calidad del Cemento Portland Tipo I.

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

Lo se busca con este experimento es conocer el efecto que tiene agregar un determinado porcentaje de puzolana versus el tiempo de curado, en las propiedades mecánicas del

compuesto, en este caso, la resistencia a la compresión. De esta forma, podemos encontrar nuevos materiales resistentes que puedan ser utilizados en la industria, construcción con una mayor resistencia a la compresión.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo general.**

Referir la variación existente en la Resistencia a la Compresión correspondiente al Cemento Portland Tipo I mediante la Adición de 15% de Limolita y Curado Bajo Agua.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Por medio de herramientas referentes al programa Matlab y conocimientos de Inelasticidad, generar un código fuente adecuado que nos permita conocer el comportamiento ideal del cemento en un grafico esfuerzo vs. Deformación.
- Mediante teoría de Regresión Lineal Múltiple, obtener un modelo matemático que genere la relación existente entre una variable dependiente (Resistencia a la compresión) y dos variables independientes (Porcentaje de limolita y Días de curado).

- Comparar, estadísticamente, los resultados obtenidos individualmente con aquellos referentes al 0% de aditivo para que podamos determinar si existieron o no mejoras significativas en el valor referente a la resistencia a la compresión.

### 1.3 Metodología.

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

El material a analizarse será una pasta de cemento compuesto que comprende Cemento Pórtland tipo I, 15% de Limonita, Agua.

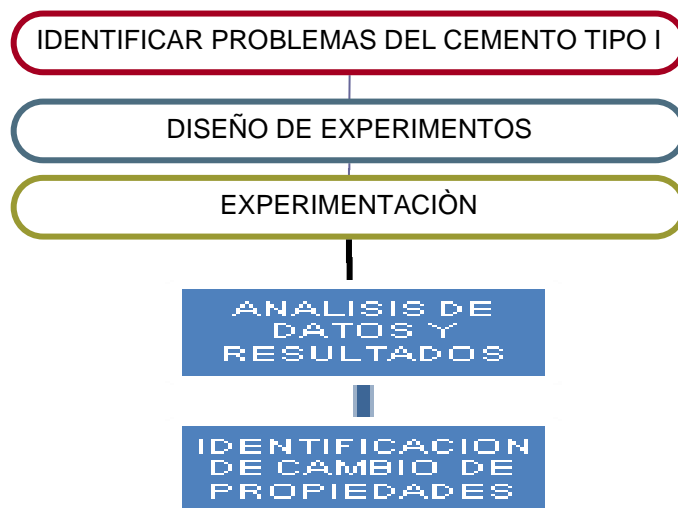


FIGURA 1.1 METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta mezcla se formará en cubos de 50 mm<sup>3</sup> (3 replicas) para las pruebas requeridas, siendo la variable de respuesta la resistencia a la compresión uniaxial al tiempo de ensayo.

Las variables independientes que se incluirán en el trabajo serán el porcentaje de aditivo (15%) y las condiciones de curado (Curado en agua). Las variables cuyos valores se mantendrán constantes serán la relación agua/mezcla y la granulometría del material utilizado.

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

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

Mediante el uso del diseño de experimentos, se realizará la planificación y el análisis de la experimentación y se utilizarán Software estadístico, para determinar si existen diferencias significativas de los valores de las medias (Método Anova) y además mediante la inferencia estadística simultánea para comparaciones múltiples con el mejor tratamiento, se

seleccionará el tratamiento más adecuado que proporcione cuál de estos tiempos es mejor para el proceso de curado.

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

Además, se utilizarán conocimientos de elementos finitos para realizar la debida modelación del comportamiento teórico de la Pasta de Cemento.

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

La estructura de la siguiente tesis es la siguiente:

El Capítulo 1 se llama Generalidades aquí se detalla información acerca del planteamiento del problema, justificación del estudio, los objetivos general y específicos. Además de la metodología y la estructura de la Tesis.

En el Capítulo 2 denominado Marco Teórico, se presenta una descripción de ciertas características y conceptos básicos referentes al tema de este proyecto así como los conceptos de ciertas herramientas estadísticas y de simulación que se



utilizarse en el estudio. También, se hará referencia a cierto caso de estudio que describe un procedimiento similar como el aplicado en esta tesis.

El Capítulo 3, denominado Análisis Estadístico; en él se detalla la toma de datos, preparación de probetas además de la experimentación. así como también se realizará una adecuada descripción referente al diseño de experimentos y prueba sin aditivo.

El Capítulo 4, en este capítulo nos referiremos principalmente a la comparación de cambio de propiedades, en el cual se realizará una tabulación de datos y resultados con su respectiva ponderación también se identificará el cambio de propiedades que sufrirá el material al ser expuesto a varios porcentajes de aditivo y a diferentes tipos de curado.

El Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones, estará compuesto de las respuestas a los objetivos planteados inicialmente, así como también constará, todas las precauciones a tomar para futuros experimentos respecto a lo ocurrido en la evolución de este.

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Generalidades

El concreto es un material durable y resistente pero, dado que se trabaja en su forma líquida, prácticamente puede adquirir cualquier forma. .Esta combinación de características es la razón principal por la que es un material de construcción tan popular para exteriores.

El cemento exhibe su mayor utilidad al ser transformado en concreto y mortero. El primero surge básicamente de la combinación de cemento, gravilla, arena y agua; mientras que el segundo resulta de mezclar cemento, arena y agua. Los concretos sirven como elementos estructurales en la construcción, mientras que los morteros sirven como materiales de pega en mampostería (paredes). El productor de concreto está íntimamente vinculado con la industria del cemento, dado que éste constituye su principal materia prima [1].

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo.

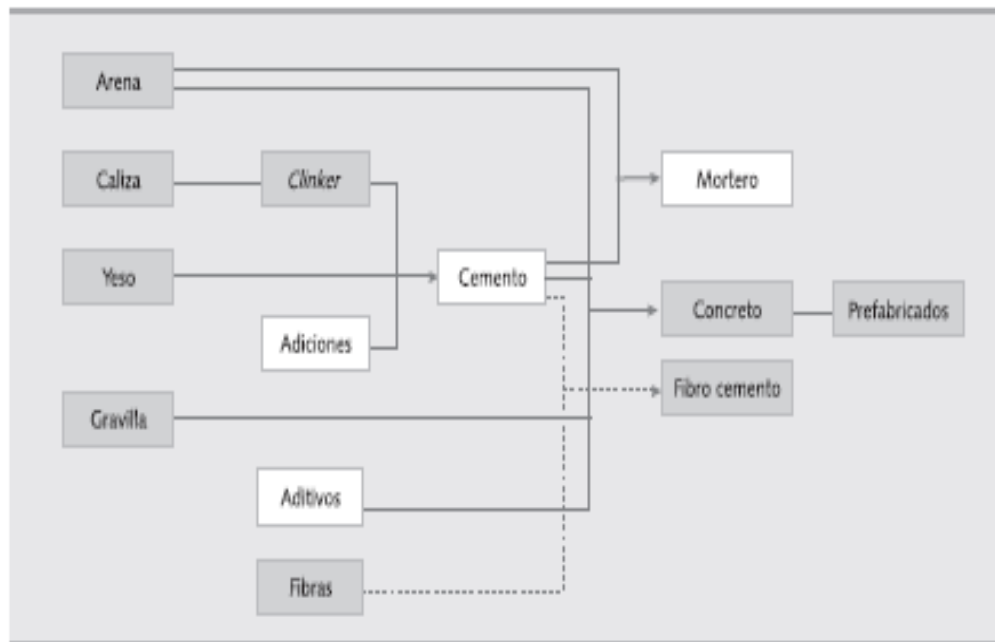


Figura 2.1.- ESTRUCTURA SIMPLIFICADA DEL CEMENTO [2]

Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una revoltura de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire.

La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para

convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

La representación común del concreto convencional en estado fresco, lo identifica como un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido.

Consecuentemente con ello, el comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida.
2. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con todo lo cual debe resultar potencialmente asegurada la calidad de la matriz cementante.

Finalmente, la compatibilidad y el buen trabajo de conjunto de la matriz cementante con los agregados, depende de diversos factores tales como las características físicas y químicas del cementante, la

composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, y la forma, tamaño máximo y textura superficial de éstos.

## 2.2 Agua para concreto

El agua en el concreto endurecido que no está químicamente fijada al aglomerante, está físicamente fijada en los poros del concreto. En los poros más pequeños, el agua está más firmemente ligada por absorción en los productos de la reacción. Esta agua puede secarse sólo con una humedad Relativa (HR) muy baja. En los poros capilares el agua está ligada por meniscos produciendo una presión del agua de los poros muy baja, negativa. Puesto que hay una relación entre la presión de agua en los poros y la humedad relativa en el aire por encima de un menisco, la HR se usa como una medida del estado de humedad en el concreto [3].

### 2.2.1 Usos del agua

En relación con su empleo en el concreto, el agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas. En el primer caso es de USO interno como agua de mezclado, y en el segundo se emplea exteriormente cuando el concreto se cura con agua, aunque en estas aplicaciones las características del agua tienen efectos de

diferente importancia sobre el concreto, es usual que se recomiende emplear de una sola calidad en ambos casos. Así, normalmente, en las especificaciones para concreto se hace referencia en primer término a los requisitos que debe cumplir el agua para elaborar el concreto, porque sus efectos son más importantes, y después se indica que el agua que se utilice para curarlo debe ser del mismo origen, o similar, para evitar que se subestime esta segunda aplicación y se emplee agua de curado con características inadecuadas[4].

Como componente del concreto convencional, el agua suele representar aproximadamente entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo de agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera. Una práctica bastante común consiste en utilizar el agua potable para fabricar concreto sin ninguna verificación previa, suponiendo que toda agua que es potable también es apropiada para elaborar concreto; sin embargo, hay ocasiones en que esta presunción no se cumple, porque hay aguas potables aderezadas con citratos o con pequeñas cantidades de azúcares, que no afectan su potabilidad pero pueden hacerlas inadecuadas para la fabricación de concreto.

### 2.2.2 Requisitos de calidad

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para concreto no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que básicamente se refieren a sus características físico-químicas y a sus efectos sobre el comportamiento y las propiedades del concreto.

### 2.2.3 Características físico-químicas

Refiriéndose a las características físico-químicas del agua para concreto, no parece haber consenso general en cuanto a las limitaciones que deben imponerse a las sustancias e impurezas cuya presencia es relativamente frecuente, como puede ser el caso de algunas sales inorgánicas (cloruros, sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto, etc.

Cuando el agua de uso previsto es potable, cabe suponer en principio que sus características físico-químicas son adecuadas para hacer concreto, excepto por la posibilidad de que contenga alguna sustancia saborizante, lo cual puede detectarse fácilmente al probarla.

#### 2.2.4 Efectos en el concreto

En diversas especificaciones y prácticas recomendadas, al establecer la calidad necesaria en el agua de mezclado, se pone más énfasis en la valuación de los efectos que produce en el concreto, que en la cuantificación de las sustancias indeseables e impurezas que contiene. Esto aparentemente se justifica porque tales reglamentaciones están dirigidas principalmente a construcciones urbanas, industriales o similares, cuyo concreto se produce en localidades donde normalmente se dispone de suministro de agua para uso industrial o doméstico.

No siempre ocurre así durante la construcción de las centrales eléctricas, particularmente de las hidroeléctricas, en donde es necesario acudir a fuentes de suministro de agua cuya calidad es desconocida y con frecuencia muestra señales de contaminación. En tal caso, es prudente determinar en primer término las características físico-químicas del agua y, si estas son adecuadas, proceder a verificar sus efectos en el concreto.

Los efectos indeseables que el agua de mezclado de calidad inadecuada puede producir en el concreto, son a corto, mediano y largo plazo. Los efectos a corto plazo



normalmente se relacionan con el tiempo de fraguado y las resistencias iniciales, los de mediano plazo con las resistencias posteriores (a 28 días o más) y los de largo plazo pueden consistir en el ataque de sulfatos, la reacción álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo. La prevención de los efectos a largo plazo se consigue por medio del análisis químico del agua antes de emplearla, verificando que no contenga cantidades excedidas de sulfatos, álcalis, cloruros y dióxido de carbono disuelto, principalmente. Para prevenir los efectos a corto y mediano plazo, se acostumbra precalificar el agua mediante pruebas comparativas de tiempo de fraguado y de resistencia a compresión a 7 y 28 días. En estas pruebas se comparan especímenes elaborados con mezclas idénticas, en las que sólo cambia la procedencia del agua de mezclado: agua destilada en la mezcla-testigo y el agua en estudio en la mezcla de prueba.

#### 2.2.5 Verificación de la calidad

La verificación de la calidad del agua de uso previsto para elaborar el concreto, debe ser una práctica obligatoria antes de iniciar la construcción de obras importantes, como es el caso de las centrales para generar energía eléctrica. Sin

embargo, puede permitirse que esta verificación se omita en las siguientes condiciones:

- 1) El agua procede de la red local de suministro para uso doméstico y no se le aprecia olor, color ni sabor; no obstante que no posea antecedentes de uso en la fabricación de concreto.
- 2) El agua procede de cualquier otra fuente de suministro que cuenta con antecedentes de uso en la fabricación de concreto con buenos resultados, y no se le aprecia olor, color ni sabor.

## 2.3 Aspectos influidos en el concreto

### 2.3.1 Materiales contaminantes

Existen diversos materiales que con cierta frecuencia acompañan a los agregados, y cuya presencia es inconveniente por los efectos adversos que producen en el concreto. Entre dichos materiales contaminantes, los más comunes son los finos indeseables (limo y arcilla), la materia orgánica, el carbón y el lignito, las partículas ligeras y los terrones de arcilla y otras partículas desmenuzables [5].

Si bien lo deseable es disponer de agregados completamente libres de estas materias perjudiciales, en la práctica esto no siempre es factible, por lo cual se hace

necesario tolerarlas en proporciones suficientemente reducidas para que sus efectos nocivos resulten poco significativos.

### 2.3.2 Limo y arcilla

El limo es el material granular fino, sin propiedades plásticas, cuyas partículas tienen tamaños normalmente comprendidos entre 2 y 60 micras aproximadamente, en tanto que la arcilla corresponde al material más fino, integrado por partículas que son menores de 2 micras y que sí posee propiedades plásticas.

### 2.3.3 Materia orgánica

La materia orgánica que contamina los agregados suele hallarse principalmente en forma de humus, fragmentos de raíces y plantas, y trozos de madera. La contaminación excesiva con estos materiales, básicamente en la arena, ocasiona interferencia en el proceso normal de hidratación del cemento, afectando la resistencia y durabilidad del concreto.

### 2.3.4 Sales inorgánicas

Las sales inorgánicas que ocasionalmente pueden hallarse como contaminación en los agregados de origen natural son los sulfatos y los cloruros, principalmente estos últimos,

como ocurre en los agregados de procedencia marina. La presencia excesiva de estas sales en el seno del concreto es indeseable por los daños que pueden ocasionar, si bien difieren en su forma de actuar y en la manifestación e intensidad de sus efectos.

## 2.4 Propiedades del Concreto

### 2.4.1 Propiedades mecánicas del concreto

Endurecimiento del concreto con la edad. La combinación del cemento con el agua de la mezcla se realiza lentamente lográndose hidratar a los 30 días en las mejores condiciones del laboratorio, sólo un poco más del 80% del cemento empleado [4].

En el transcurso del tiempo, el cemento continúa su proceso de hidratación tomando el agua necesaria del ambiente atmosférico, corriendo parejas con su propio endurecimiento y formando una curva asintótica a los valores más elevados de la fatiga de ruptura.

Los concretos fabricados con cemento Tipo m, Alta Resistencia Rápida, alcanzan a los 7 días la resistencia correspondiente a los 28 días del cemento Tipo I, pero a los dos años ambas resistencias son prácticamente iguales.

Cuando se efectúa la ruptura del cilindro a los 28 días de colado, la fatiga correspondiente a esa ruptura se representa por  $f' "$  y constituye el valor base al cual se refieren las especificaciones.

#### 2.4.2 Peso específico

Es frecuente citar el término densidad al referirse a los agregados, pero aplicado más bien en sentido conceptual. Por definición, la densidad de un sólido es la masa de la unidad de volumen de su porción impermeable, a una temperatura especificada, y la densidad aparente es el mismo concepto, pero utilizando el peso en el aire en vez de la masa. Ambas determinaciones suelen expresarse en gramos entre centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ) y no son rigurosamente aplicadas en las pruebas que normalmente se utilizan en la tecnología del concreto, salvo en el caso del cemento y otros materiales finamente divididos.

#### 2.4.3 Porosidad y absorción

La porosidad de un cuerpo sólido es la relación de su volumen de vacíos entre su volumen total, incluyendo los vacíos, y se expresa como porcentaje en volumen. Todas las rocas que constituyen los agregados de peso normal son porosas en mayor o menor grado, pero algunas poseen un sistema de poros que incluye numerosos vacíos relativamente grandes (visibles al microscopio), que en su mayoría se hallan interconectados, y que las hace permeables.

De este modo algunas rocas, aunque poseen un bajo porcentaje de porosidad, manifiestan un coeficiente de permeabilidad comparativamente alto, es decir, más que el contenido de vacíos influye en este aspecto su forma, tamaño y distribución. Por ejemplo, una roca de estructura granular con 1 por ciento de porosidad, puede manifestar el mismo coeficiente de permeabilidad al agua, que una pasta de cemento hidratada con 50 por ciento de porosidad pero con un sistema de poros sub-microscópicos. [6]

#### 2.4.4 Resistencia mecánica

De acuerdo con el aspecto general del concreto convencional, las partículas de los agregados permanecen dispersas en la pasta de cemento y de este modo no se produce cabal contacto permanente entre ellas. En tal concepto, la resistencia mecánica del concreto endurecido, especialmente a compresión, depende más de la resistencia de la pasta de cemento y de su adherencia con los agregados, que de la resistencia propia de los agregados Solos. Sin embargo, cuando se trata del concreto de muy alta resistencia, con valores superiores a los 500 kg./cm<sup>2</sup>, o del concreto compactado con rodillo (CCR) en que si se produce contacto entre las partículas de los agregados, la resistencia mecánica de éstos adquiere mayor influencia en la del concreto.

#### 2.4.5 Resistencia a la abrasión

La resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgaste, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, es una característica que suele considerarse como un índice de su calidad en general, y en particular de su capacidad para producir concretos durables en condiciones de servicio donde intervienen acciones deteriorantes de carácter abrasivo. Asimismo, se le considera un buen indicio de su aptitud para soportar sin daño, las acciones de quebrantamiento que frecuentemente recibe el agregado grueso en el curso de su manejo previo a la fabricación del concreto.

#### 2.4.6 Módulo de elasticidad

Las propiedades elásticas del agregado grueso, son características que interesan en la medida que afectan las correspondientes del concreto endurecido, en particular su módulo de elasticidad y su relación de Poisson.

**TABLA 1. VALORES MEDIOS DEL COEFICIENTE DE EXPANSIÓN  
TÉRMICA LINEAL DE LOS AGREGADOS, SEGÚN EL TIPO DE  
ROCA.[7]**

Tipo de Roca	Coeficiente de Expansión Térmica lineal Cea, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Calcedonia o pedernal	11.8
Cuarcita	10.3
Cuarzo	11.1
Arenisca	9.3
Mármol	8.3
Caliza silíceo	8.3
Granito	6.8
Dolerita	6.8
Basalto	6.4
Caliza	5.5

## 2.5 Estado del Arte de la modelación del comportamiento de la pasta de cemento puzolánicos

El desarrollo de la resistencia del concreto es afectado por muchos factores como composición del cemento y finura, relación de agua-cemento, agregados, tiempo y temperatura de curado [8]. Los primeros estudios realizados para producir y programar las resistencias finales



de morteros de cementos han sido basados en asunciones de que cada constituyente del mineral clínker independientemente afecta a las propiedades mecánicas del producto hidratado. Sin embargo, un enfoque más directo describe el efecto de la composición de un compuesto, de la porosidad y resistencia del cemento Portland, fue usado por Joens y Osbaeck. De acuerdo a estos autores, el desarrollo de la micro-estructura de pasta de cemento debería ser cuantificada desde el punto de vista cinético. Recientemente, autores como Tsvilis y Parisskis, mostraron que la finura del cemento es un factor importante que influencia en la resistencia temprana mientras las propiedades químicas y mineralógicas contribuyen al desarrollo de la resistencia en los años posteriores. El propósito de esta investigación fue desarrollar un modelo matemático que describa realmente el efecto de la hidratación temprana en las propiedades del cemento Portland conteniendo varios porcentajes de humo de sílice con escoria. Estos estudios mostraron el efecto del reemplazo del humo de sílice en el desarrollo de la resistencia a la compresión en el modelo del cemento a diferentes tiempos de hidratación (3, 7, 28 y 120 días). Los morteros que contenían 5 y 8% de masa de humo de sílice, mostraron resistencias a la compresión más altas, este comportamiento puede ser tribuido al efecto doble del humo de sílice que actúa tanto como puzolana así como micro-relleno.

Otras investigaciones se realizaron respecto al estudio del efecto de los materiales puzolánicos y los métodos de curado en el modulo elástico del concreto, en los cuales se obtuvo que el modulo de

elasticidad de un material es una propiedad fundamental requerida para la modelación del comportamiento constitutivo del mismo y para su apropiado uso en varias aplicaciones estructurales[9]. Los resultados mostraron que agregando humo de sílice se obtiene como resultado un incremento en la resistencia a la compresión y el modulo de elasticidad a edades tempranas, sin embargo, no existe cambio en el modulo a los 28 y 56 días. Además, agregando un 20% de ceniza volátil con varios porcentajes de humo de sílice, se obtiene un efecto adverso tanto en los valores de resistencia como en el modulo de elasticidad a todas las edades para 90 días. Esto también muestra que el curado en seco y el curado compuesto reduce el modulo de elasticidad comparándolo con un curado húmedo. Resultados mostraron que el modulo elástico de un concreto de alto funcionamiento es proporcional a la resistencia a la compresión.

Un concreto de alto desempeño es uno de los materiales nuevos más significativos permitidos por el estado y las agencias locales para utilizarlo en construcción y rehabilitación de edificios, autopistas y puentes por lo que es necesario predecir propiedades como modulo de elasticidad, durabilidad, deslizamiento y permeabilidad. Estos estudios dieron como resultado aseveraciones que indican que la adición de humo de sílice al concreto de alto funcionamiento reduce la tasa de incremento del modulo de elasticidad con el tiempo debido a la alta tasa de hidratación del concreto conteniendo humo de sílice. A temprana edad, el concreto de humo de sílice tiene una ganancia de resistencia más alta pero decrece gradualmente para el concreto

ordinario. El módulo elástico es más alto a temprana edad con una disminución gradual del tiempo. Además, la adición de ceniza volátil al cemento de alta resistencia incrementa el módulo elástico sobre el concreto ordinario; sin embargo, la tasa de cambio del módulo elástico para el concreto de ceniza volátil permanece igual. Por otro lado, cuando humo de sílice es agregado al concreto de ceniza volátil, la tasa de cambio del módulo elástico es reducido.

Respecto a los resultados referentes a los métodos de curado, se obtuvo que las muestras que usaron curado húmedo mostraron un incremento de módulo de elasticidad con la edad mientras que los curados de tipo seco y curado compuesto mostraron menos incremento y a veces una disminución del módulo, además la resistencia a la compresión del concreto continua con el incremento con la edad independiente del curado, aunque esto no se cumple para el módulo elástico.

# CAPÍTULO 3

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Recolección de Datos

Este experimento se lo realiza con la finalidad de descubrir la influencia que se genera en el cemento en el valor correspondiente a la resistencia a la compresión al agregar, a su estado natural o de control, los diferentes porcentajes de limolita en una proporción definida de días y un tipo específico de curado.

Para este análisis se utilizara el cemento Portland tipo I con un porcentaje de 15% del aditivo natural limolita para diferentes días de ensayo: 7, 14, 21 y 28 días con un curado bajo agua. De esta forma, se podrá efectuar una comparación con el 0% aditivo y además se logrará desarrollar un modelo matemático por medio de herramientas estadísticas, que nos permita ajustar los datos experimentales a dicho modelo. Con dicho análisis estadístico se logrará obtener una ecuación que nos permita relacionar los independientes con la variable de respuesta y así, con los datos de validación, comprobar que dicha ecuación se cumpla en ambos casos con un porcentaje de error determinado.

Luego, se encontrara 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 determinar cuáles serian las condiciones para obtener un mejor tratamiento.

### **3.2 Diseño de Experimentos**

Como podemos apreciar los días de curado húmedo y los porcentajes de adición de limolita no están dispuestos aleatoriamente, por lo que descartaríamos el modelo completamente aleatorizados.

En esta etapa se definen la planeación, el diseño, y la realización de experimentos. El diseño de experimentos permitirá organizar la información obtenida y analizarla, principalmente a través de procesos de entrada y salida, que permitan identificar las variables en estudio.

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

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

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

### **3.3 Prueba sin Aditivo**

El cemento tipo I es el cemento conocido también como cemento sin aditivo, este será la base de nuestra experimentación ya que establecerá el control para los siguientes porcentajes y diferentes curados. Las pruebas para el cemento sin aditivo también serán realizadas a 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25 y 28 días. Estas pruebas servirán para comparar e incluso comprobar que las pruebas y los resultados estén correctamente realizados conforme aumente el porcentaje de aditivo y los días de curado.

### **3.4 Experimentación**

El experimento comienza con la obtención de los datos del control que es el cemento sin aditivos. Luego se prepara las probetas con la pasta de cemento que en este caso contendrá el 15 % de limolita.

Se prepara 8 probetas las cuales serán analizadas como se lo explico anteriormente a los 4, 7, 11, 14, 18, 21, 25 y 28 días de curado.

El material con el que se va a trabajar en el presente estudio es la limolita, la cual fue concedida por la Cemento Nacional de sus propios yacimientos. La limolita se la encuentra en estado rocoso por lo que debe ser sometida al siguiente proceso:

Se realizo la molienda de la limolita por diferentes procesos de molido para obtener una granulometría de 45 micras que es la del cemento los cuales los veremos a continuación.

Primero a nuestra roca de limolita la trituramos en forma manual con un combo para que su tamaño disminuya y poder introducirla a la trituradora de mandíbulas que es por la primer maquina que ingresamos nuestro material. Luego se la llevo a la siguiente maquina que es la trituradora de rodillos para continuar con la reducción del tamaño de grano (Ver Anexo I Foto1 2 y 3).

Una vez terminado este proceso se procedió a cuartear el material para dividirlo en dos porciones.

Tomamos una parte del material cuarteado para llevarlo a la siguiente máquina que es el molino de disco (Ver Anexo I Foto 4) .

Una vez terminado el proceso en el molino de disco lo llevamos al último proceso que es el molino de bolas 90 minutos hasta llegar al tamaño de grano deseado. Luego del Molino de bolas tomamos una muestra de 100 gr representativa de todo el material existente en el recipiente. Una vez pesado la limolita se toman cuatro tamices #50, #100, #200, #325 y el fondo por los cuales deberá pasar la limolita para que verificar que pase un 80% de su totalidad (Ver Anexo Foto 5 6 y 7).

Estos tamices se los coloca en forma vertical y luego se los lleva a una maquina que es él tamizador eléctrico. Luego de quince minutos se procedió a revisar cuanto de la masa total había pasado por los diferentes tamices. (Ver Anexo Foto 8)

TABLA 2. VERIFICACIÓN DE MASAS DE LOS TAMICES

LIMOLITA	
# Tamis	Masa (gr)
50	5
100	8
200	12
325	75

Luego de la obtención de la limolita con las micras requeridas. Se procede con la experimentación. Para ello se dispone de moldes de bronce los cuales deben estar totalmente limpios, libres de herrumbre o de algún residuo que pueda interactuar con nuestra mezcla. Para no rayar las paredes de los moldes se usa una lija de agua # 600.

Luego de secar estos moldes se aplico una delgada capa de aceite para que la mezcla no se pegue en las paredes del molde. Para conformar la Pasta de cemento se requirió de limonita, cemento Pórtland tipo I y agua tanto para el porcentaje de experimentación como para la validación como lo podemos observar en las siguientes tablas.

TABLA 3. COMPOSICIÓN DEL MORTERO CON 15% DE LIMOLITA

15% Limolita	
Material	Masa(gr)
Limolita	450
Portland Tipo I	2550
Agua	900
Masa Total	3900



La preparación del mortero para los días de validación la cual tendrá un porcentaje de 17.5% de Limolita la preparamos de la misma manera.

TABLA 4. COMPOSICIÓN DEL MORTERO CON 17.5% DE LIMOLITA

<b>17.5% Limolita</b>	
<b>Material</b>	<b>Masa(gr)</b>
Limolita	525
Portland Tipo I	2475
Agua	900
Masa Total	3900

Luego del pesaje de los materiales se procede al mezclado de los mismos. Primero vertimos la limolita y el cemento Portland tipo I la cual es homogenizada en la maquina mezcladora, contados dos minutos de mezclado agregamos los 900 gr de agua y se continua con el mezclado durante quince minutos (Ver Anexo I Foto 9).

Luego de haber realizado la mezcla esta se la coloca en los moldes la misma que es sometida a un proceso de apisonamiento para que la mezcla se compacte de mejor forma y también se elimine las burbujas de aire internas que nos podrían causar porosidad.

Finalmente se deja que se compacte durante 24 horas para que luego sea desmoldado. Al día siguiente se realiza el desmolde, se los marca para llevar el control de los días de curado y se lo sumerge en agua (Ver Anexo I Foto 10 11 y 12).

Las pruebas de ensayo de compresión se lo realiza en la máquina de ensayos universales, para este caso se dispone de dos maquinas la primera de menor capacidad se realiza las pruebas de 4 días, hay que tomar en cuenta las unidades ya que en esta máquina la fuerza nos da en lbf y la en segunda máquina la fuerza está en kgf y en esta se hizo la experimentación del resto de días. Cuyos resultados se los puede observar en el capítulo 4.

Terminada la experimentación podemos realizar comparaciones según el porcentaje de limolita y el tiempo de curado hasta escoger el que nos devuelva el mejor valor de resistencia mecánica.

### 3.5 Modelación de la Experimentación

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

Los métodos de regresión se usan para determinar la mejor relación funcional entre las variables, y aplicado a nuestro estudio resulta bastante apropiado debido a que requerimos obtener un modelo matemático para cada uno de los días a los que se experimentara una vez obtenido el modelo para 7, 14, 21 y 28 días de curado y 0, 10, 15, 20, 25% de limolita respectivamente, se procederá a obtener un

modelo general dependiente del tiempo y como es necesario saber si este modelo es confiable, se requerirá realizar otro ajuste a 4, 11, 18 y 25 días. Con todos estos datos, se procederá a realizar una grafica cuyas variables serán los días y los valores de resistencia a la compresión. Mediante esta grafico, se obtendrá el porcentaje de error entre ambos rangos de días lo que nos permitirá validar el modelo matemático.

# CAPITULO 4

## 4. ANALISIS DE DATOS Y RESULTADOS

### 4.1 Tabulación de Datos y Resultados

Los resultados luego de los días de curado tanto para la experimentación como para la validación serán analizados en dos grupos 7, 14, 21 y 28 para experimentación y 4, 11, 18 y 25 para la validación.

Para calcular el esfuerzo aplicamos la siguiente formula.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Para calcular el modulo de elasticidad (E) lo hacemos de punto a punto con los valores de esfuerzo y deformación ya que esta es la pendiente.

$$E = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$$

Los puntos que se generan en el grafico Esfuerzo vs Deformación se les aplico una tendencia cúbica porque es la curva que menos puntos desprecia luego sacamos la ecuación de mi curva la cual aplicándole la segunda derivada y esta a su vez igualándola a cero nos da el punto donde cambia de concavidad mi curva que para nuestro calculo seria

nuestro esfuerzo de fluencia y vemos que punto de la deformación está más próximo.

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

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

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

$$\text{Ecuación: } y = -9E11 x^3 + 5E10x^2 - 3E8x + 351978$$

Aplicando segunda derivada e igualando a cero:  $y'' = 0$ , se obtiene  $x = 0.0185$ , sin embargo con los resultados de la obtención de la pendiente punto a punto se verifica que el punto de fluencia se produce en

$x=0.02286$ . En el Anexo I presenta una tabla resumida con los valores más representativos de la muestra como lo son el modulo de elasticidad promedio, el valor  $x$  correspondiente a la fluencia, el esfuerzo de fluencia, la deformación máxima y el esfuerzo de ruptura.

Estos últimos valores son requeridos para, mediante el uso de la herramienta Matlab y su respectivo código fuente (Ver ANEXO IV) poder ajustar la curva teórica a la experimental. Esto se produce mediante la variación de constantes propias del material, denotadas como  $a$  y  $m$  cuyos valores son 1.95 y 1.2 respectivamente para este caso.

Una vez obtenidos nuestros datos se realizaron las conversiones correspondientes de milésimas de pulgada a milímetros y de lbf a newton el área con la que trabajamos todos nuestros datos es  $2.58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Para el análisis que se realizo se usaron los datos por cada muestra, para ello se adopto una tendencia cubica que fue la que mayor cantidad de datos abarca, esta tendencia es graficada contra una teórica en el programa de matlab ajustando los valores de  $a$  y de  $m$  hasta que el valor del esfuerzo de ruptura coincida con el valor experimental y hallar el error.

## 4.2 Análisis de Resultados

De las tendencias de las graficas modeladas en Matlab tomamos los puntos críticos para nuestros análisis que son el esfuerzo de fluencia y el de ruptura, dado que los puntos antes del esfuerzo de fluencia se suponen están en la parte elástica tal como lo podemos observar en la grafica del modelo teórico.

TABLA 5  
ERROR GRAFICA EXPERIMENTAL VS  
TEORICA EXPERIMENTACION 46

Días Curado	Muestras	EXPERIMENTACION				Error (%)
		Experimental		Modelo Matlab		
		Esfuerzo Fluencia	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Esfuerzo Ruptura	
7	M 1	26.08	26.97	26.08	27	0.11
	M 2	16.29	28.93	24	28	3.64
	M 3	19.4	28.93	24.5	28.93	0.21
14	M 1	62.3	83.66	62.3	82	2.02
	M 2	68.53	90.78	68.53	86	5.56
	M 3	57.85	97.9	57.85	97.9	0.00
21	M 1	79.21	89	79.21	88	1.14
	M 2	84.55	93.45	84.55	93.4	0.05
	M 3	58.74	85.44	58.74	85.44	0.00
28	M 1	91.67	96.12	91.67	96.12	0.00
	M 2	60.52	91.67	60.62	92	0.36
	M 3	59.63	96.12	59.63	96.12	0.00

Realizamos el mismo procedimiento para los valores de validación

TABLA 6

## ERROR GRAFICA EXPERIMENTAL VS TEORICA VALIDACION

Dias Curado	Muestras	VALIDACION				Error (%)
		Experimental		Modelo Matlab		
		Esfuerzo Fluencia	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Esfuerzo Ruptura	
4	M 1	40.4	44.1	39.8	43	2.57
	M 2	34.3	43.1	35	42	2.64
	M 3	36.26	45.67	36.5	44.9	1.72
11	M 1	69.42	81.88	69.42	79	3.65
	M 2	63.37	84.55	65	84	0.68
	M 3	27.59	76.54	27.59	76	0.71
18	M 1	49.84	80.99	49.84	78	3.83
	M 2	43.61	89.36	43.61	88	1.55
	M 3	52.51	83.66	52.51	83	0.80
25	M 1	80.63	89.36	80.63	90	0.71
	M 2	59.63	92.74	59.63	92	0.80
	M 3	79.92	89	79.92	88.9	0.11

Luego de obtener el error entre las graficas teórica y experimental. Procedemos a determinar cuál fue el mejor valor de resistencia de compresión con un 15 % de Limolita. Para nuestro análisis hallamos el esfuerzo de ruptura promedio para cada uno de los días. Obteniendo los siguientes resultados:



TABLA 7

## ESFUERZO DE RUPTURA EXPERIMENTACION

Días de Curado	7	14	21	28
<b>15%</b>	28.87	90.78	89.3	91.08

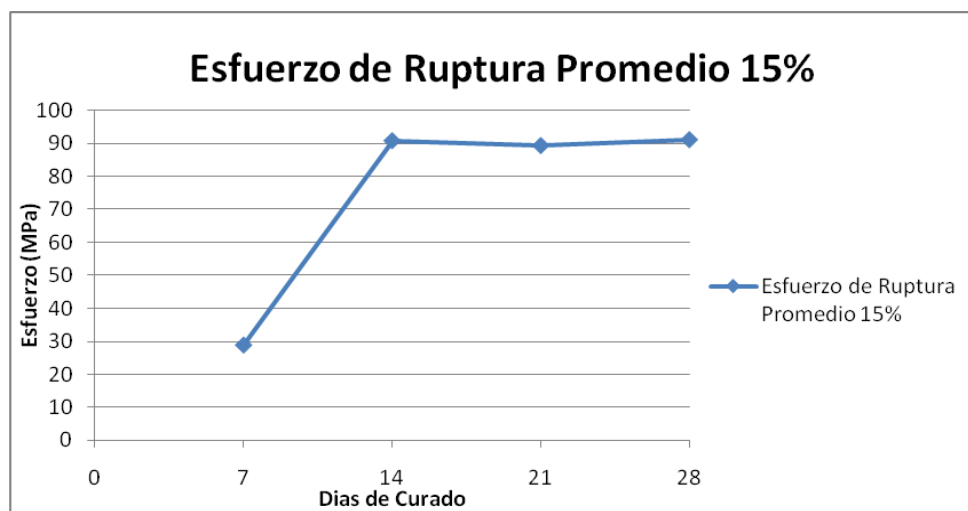


FIGURA 4.1 GRAFICA ESFUERZO DE RUPTURA EXPERIMENTACION

TABLA 8

## ESFUERZO DE RUPTURA VALIDACION

Días de Curado	4	11	18	25
<b>17.50%</b>	44.30	80.99	84.67	90.36

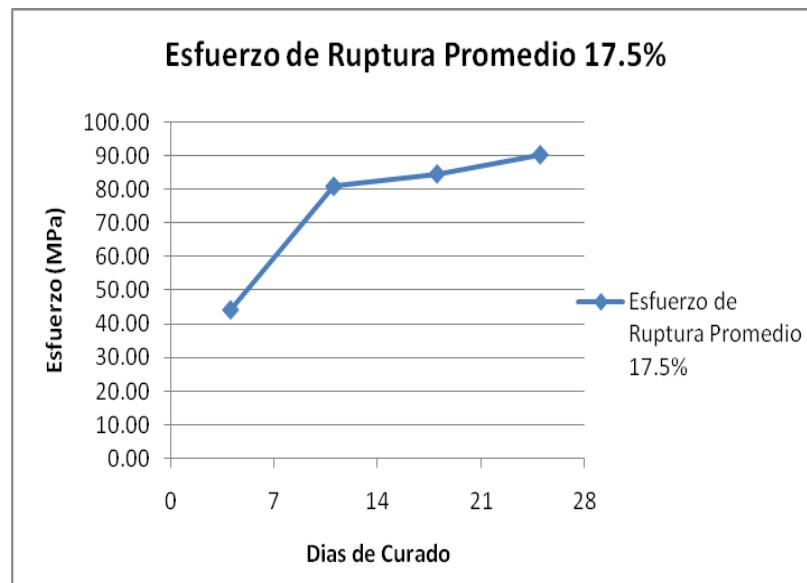


FIGURA 4.2 GRAFICA ESFUERZO DE  
RUPTURA VALIDACION

De donde claramente podemos observar que el valor mas alto de esfuerzo de ruptura para nuestra experimentacion se da a los 28 dias de curado aunque los valores respectivos a 14 y 21 dias son bastante cercanos al mayor. De igual forma en nuestra validacion encontramos que a los 25 dias de curado tenemos un mayor valor de esfuerzo de ruptura. Para analisis grupal recopilamos los esfuerzo de ruptura promedio por cada dia y cada porcentaje y tenemos los siguientes resultados:

## Experimentacion

TABLA 9

## ESFUERZO DE RUPTURA VS % LIMOLITA/DIAS 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

## Validacion

TABLA 10

## ESFUERZO DE RUPTURA VS % LIMOLITA/DIAS DE CURADO

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

## Análisis de selección de mejor tratamiento (Experimentación)

### Análisis de TUKEY Esfuerzo vs % limolita

A continuación con el método de TUKEY se procede a analizar cuál es el mejor tratamiento. El método consiste en separar las variable en factores, en este caso tenemos porcentaje de limolita. Por cada nivel de porcentaje se obtiene la media. Como se lo puede observar en la siguiente tabla:

TABLA 11

#### ANALISIS DE TUKEY POR PORCENTAJE DE LIMOLITA

	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>21</b>	<b>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

De la tabla 11 Se obtiene que el mayor valor de esfuerzo de ruptura ocurrir con un 0% de aditivo, pero para efectos de comparación con el control se toma el segundo mejor valor que ocurre con un 10% de limolita en curado bajo agua.

### Análisis de TUKEY Esfuerzo vs Porcentaje de limolita

Para este segundo factor días de curado se obtuvo las medias por cada día de curado en los diferentes porcentajes presentados en la tabla siguiente:

TABLA 12

#### ANALISIS DE TUKEY POR DIAS 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

De la tabla 12 Se obtiene que los dos mejores tratamientos los encontramos a los 28 y 21 días de curado respectivamente.

Como se lo puede apreciar, este método estadístico utiliza las medias por lo que se tienen más de una alternativa. Y no siempre el valor más alto que nos devuelve el método es el mejor, dado que los valores circundantes pueden ser altos o bajos.

TABLA 13  
 RESULTADO DEL ANALISIS DE TUKEY  
 (EXPERIMENTACION)

	<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

Por medio del análisis anterior se pueden resumir los mejores valores presentados en la tabla 13.

TABLA 14  
 RESULTADOS CEMENTO TIPO IV

	7	14	21	28
TIPO IV	49.01	60.33	75.46	65.66

En la tabla 14 se observan los resultados correspondientes al cemento comercial TIPO IV para 7, 14, 21, 28 de curado en agua, el mejor valor de esfuerzo de ruptura ocurre a los 21 días. el cual se lo compara con el resultado obtenido en la tabla? De la cual el mejor resultado se da a los 21 días. Se puede decir que existe una mejora en el esfuerzo de ruptura.

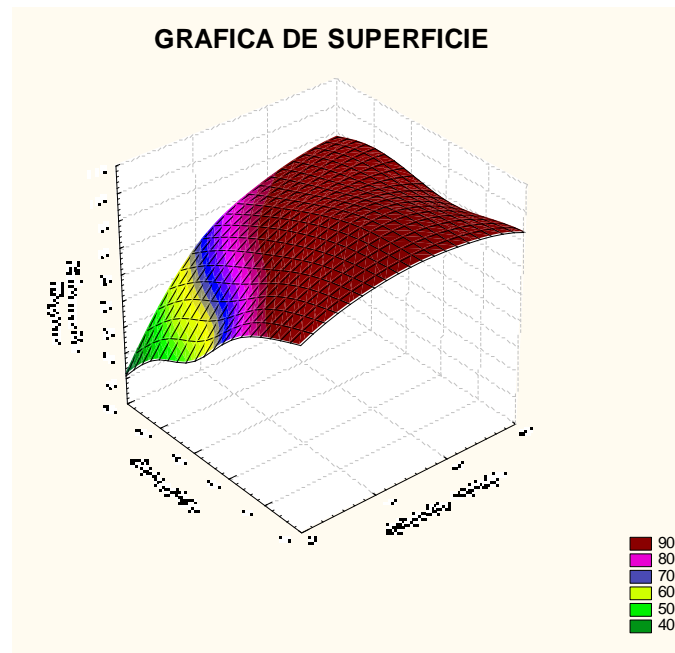


FIGURA 4.4 SUPERFICIE DE RESPUESTA EXPERIMENTACION

#### Validación

Se repite el mismo procedimiento anterior y como se puede observar la mejor respuesta ocurre con el 0% y 12.5% y por días de curado 18 y 25 días.

TABLA 15

#### ANALISIS DE TUKEY (Validación)

	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>18</b>	<b>25</b>	Media
<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
Media	53.45	74.72	86.89	85.17	

TABLA 16

## RESULTADOS DEL ANALISIS DE TUKEY (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

La mejor respuesta la encontramos a los 18 días y 0%.

TABLA 17

## RESULTADOS CEMENTO TIPO IV (Validación)

	4	11	18	25
TIPO IV	45.89	56.24	62.4	62.84

En la tabla 17 se observan los resultados correspondientes al cemento comercial TIPO IV para 4, 11, 18, 25 de curado en agua, el mejor valor de esfuerzo de ruptura ocurre a los 18 días. El cual se lo compara con el resultado obtenido en la tabla? De la cual el mejor resultado se da a los 25 días. Se puede decir que existe una mejora en el esfuerzo de ruptura.



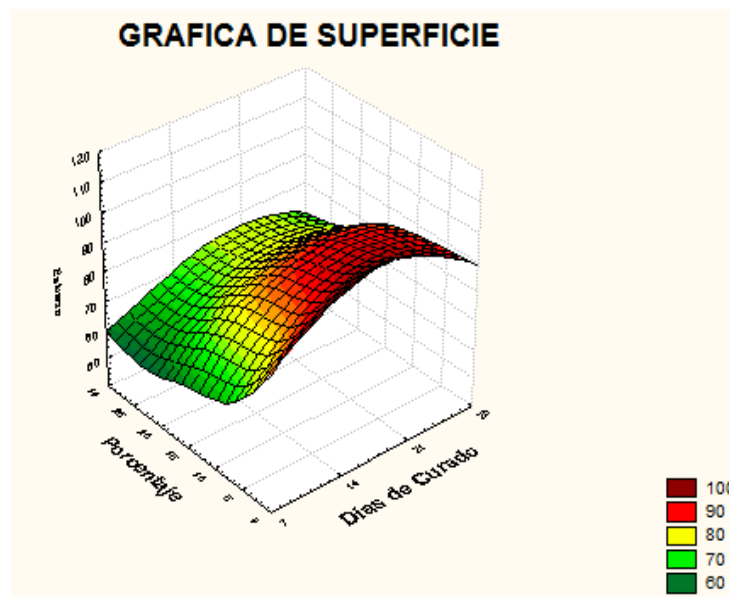


FIGURA 4.5 SUPERFICIE DE RESPUESTA (VALIDACION)

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

Inicialmente, se plantea la hipótesis nula para la regresión múltiple la misma que es:

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

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

$$H_0 \neq B_0 \neq B_1 \neq B_2 \neq 0$$

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

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

TABLA 18

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

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

TABLA 19

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

Días	Modelos de ajuste	Ecuación	R-cuad.(%)	P
4	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
11	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
18	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
25	Lineal	Esf. Rupt. = 102,1 - 1,054 (%)	65,10	0,099
	Cuadrático	Esf. Rupt. = 96,25 - 0,252 (%) - 0,02291 (%)**2	66,10	0,824
	Cúbico	Esf. Rupt. = 20,98 + 15,96 (%) - 1,044 (%)**2 + 0,01944 (%)**3	86,10	0,443

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

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

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

La ecuación logarítmica base para nuestros datos es la siguiente:

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

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

TABLA 20

## ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN

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

TABLA 21

## ANÁLISIS DE VARIANZA

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	163684,2047	81842,102	358,883	5,80743E-17
Residuos	22	5017,032942	228,047		
Total	24	168701,2376			

Es preciso indicar que la hipótesis nula referente al análisis de varianza indica que no existen diferencias significativas con respecto a las medias muestrales esto es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_n = 0$$

Y la alterna corresponde a:

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_n \neq 0$$

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

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

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

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

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

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

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

Inicialmente para la regresión múltiple se aplica la ecuación logarítmica la misma que genera la tabla 48 la cual indica claramente que el Bo referente a la intercepción no posee una probabilidad aceptable ya que el valor es mayor a 0.05 con lo cual se entiende que no existe una relación claramente definida para ese coeficiente con el esfuerzo de ruptura.

TABLA 22

**P-VALUES PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN (CON INTERCEPCIÓN)**

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

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

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

TABLA 23

**P-VALUES PARA COEFICIENTES DE REGRESIÓN (SIN INTERCEPCIÓN)**

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



TABLA 24

## ANÁLISIS DE RESIDUALES

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

Luego de este análisis se obtiene el modelo estadístico que queda de la siguiente manera:

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

De la misma manera se procede para los datos de validación:

**TABLA 25**

**ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN**

<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 26**

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

	<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 27

**P-VALUES PARA COEFICIENTES DE  
REGRESIÓN (CON INTERCEPCIÓN)**

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

TABLA 28

**P-VALUES PARA COEFICIENTES DE  
REGRESIÓN (SIN INTERCEPCIÓN)**

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

TABLA 29

## ANÁLISIS DE RESIDUALES (VALIDACIÓN)

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

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

$$\text{Esfuerzo de Ruptura} = -0.51 * (\% \text{ Limolita}) + 32.294 * \text{LN} (\text{Días de Curado})$$

Realizando el respectivo ajuste de los datos tanto experimentales como los de la validación en el modelo estadístico para poder obtener el error se obtiene:

**TABLA 30**  
**ERROR ENTRE MODELO TEÓRICO Y PRÁCTICO – FASE EXPERIMENTACIÓN**

<b>Esfuerzo de Ruptura Promedio vs. Porcentajes de Limolita</b>						
<b>Porcentajes [%]</b>	<b>Esfuerzo de Ruptura Promedio [MPa]</b>					
	<b>Día 7 (Experimental)</b>	<b>Día 7 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>	<b>Día 14 (Experimental)</b>	<b>Día 14 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>
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
	<b>Día 21 (Experimental)</b>	<b>Día 21 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>	<b>Día 28 (Experimental)</b>	<b>Día 28 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>
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

**TABLA 31**  
**ERROR ENTRE MODELO TEÓRICO Y PRÁCTICO – FASE VALIDACIÓN**

<b>Esfuerzo de Ruptura Promedio vs. Porcentajes de Limolita – Validación</b>						
<b>Porcentajes [%]</b>	<b>Esfuerzo de Ruptura Promedio [MPa]</b>					
	<b>Día 4 (Experimental)</b>	<b>Día 4 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>	<b>Día 11 (Experimental)</b>	<b>Día 11 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>
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
	<b>Día 18 (Experimental)</b>	<b>Día 18 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>	<b>Día 25 (Experimental)</b>	<b>Día 25 (Modelo)</b>	<b>Error [%]</b>
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

### 4.3 Identificación de cambio de propiedades

Se puede observar en la Figura 4.28 que el mejor tratamiento se lo consigue con un 10% de limolita y 21 días de curado mientras que la validación presenta el mayor esfuerzo de ruptura a los 18 días de curado y 0% de aditivo.

El análisis de correlación nos indica que el cambio de propiedades en este caso el esfuerzo de ruptura, conforme aumenta el porcentaje de aditivo a un determinado tiempo de curado tiene tendencia a pendiente negativa. Por el contrario cuando el análisis es a un determinado porcentaje el esfuerzo de ruptura tiene pendiente positiva conforme aumentan los días de curado.



# **CAPITULO 5**

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

- Se consiguió programar un código fuente adecuado que nos permitió conocer y verificar que la pasta de cemento es un material elasto-plástico.
- En base a los datos experimentales se obtuvo datos referentes a las propiedades de la pasta del cemento (Modulo de elasticidad, Esfuerzo de fluencia y esfuerzo de ruptura) a (%) de limolita los mismos que permitieron modelar la curva ideal esfuerzo deformación correspondientes a la pasta de cemento y así compararla con la curva experimental para obtener un porcentaje de error de dicha modelación.
- 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 obtuvo una ecuación general que relaciona la variable dependiente (esfuerzo de ruptura) con las variables independientes (porcentaje de limolita y días de curado) la misma que se presenta a continuación y que es válida para 0, 10, 15, 20 y 25% de limolita así como para 7, 14, 21, y 28 días de curado en agua.

$$Esfuerzo = -0.51 * \% Limolita + 32.294 * LN(Dias\_Curado)$$

- Mediante la evaluación en la ecuación anterior de los porcentajes de limolita y días de curado referentes a la validación, se comprueba que los valores obtenidos de esfuerzos de ruptura se ajustan al modelo estadístico con un margen de error correspondiente al 13%.
- Mediante software 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.
- Se puede concluir que existe una mejora del 8% de la resistencia a la compresión con respecto al 0% de limolita en el Cemento Portland tipo I.

## 5.2. Recomendaciones

- Para efectuar este tipo de experimento y poder obtener valores de respuesta más óptimos, se adecue 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 estar 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,
- Se recomienda que exista homogeneidad en el proceso de mezclado.
- 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.

- Se recomienda que las prensas de compresión a utilizarse en la ejecución de este experimento se encuentren en perfectas condiciones de calibración.
- La aplicación de la carga en las probetas de ensayo debe ser suministrada a velocidad constante.
- La superficie de contacto debe estar con el menor relieve posible para que la carga esté uniformemente distribuida.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] \_\_\_\_\_, "Cemento y sus aplicaciones". [www.dnp.gov.com](http://www.dnp.gov.com). Abril 2008
- [2] Orus,F,"Materiales de Construcción", Editorial Dossat. 7 Edicion,720, Madrid, 1977
- [3] \_\_\_\_\_, Manual de Tecnología del Concreto, Limusa, Grupo Noriega Editores, Volumen 3, 381, México, México. 1994.
- [4] TUUTTI,K, " Durabilidad del Concreto", [www.imcyc.com](http://www.imcyc.com)
- [5] Orus,F," Materiales de Construcción". Editorial Dossat. 7 Edición, Madrid, Pag,160, Mayo 2008]
- [6] \_\_\_\_\_ " Aditivos para Concreto Premezclado ",The Euclind Chemical Company, Construcción y Tecnología, [www.eucomex.com.mx](http://www.eucomex.com.mx)
- [7]\_\_\_\_\_ "Manual de Tecnologia del Concreto", limusa,Grupo Noriega Editores, volumen 3, 1994.

[8] Zelic, J. "A mathematical model for prediction of compressive strength in cement-silica fume blends", *Cement & Concrete Composites*, Mayo, 2008.

[9] Nassif, Hani, "Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC", *Cement & Concrete composites*, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), Mayo 2008

# **ANEXOS**

# ANEXO I



**FOTO 1. LIMOLITA EN ROCA**



**FOTO 2. TRITURADORA DE MANDIBULA**



**FOTO 3. TRITURADORA DE RODILLOS**



**FOTO 4. CUARTEADOR DE MATERIAL**





**FOTO 5. MOLINO DE DISCO**



**FOTO 6. MOLINO DE BOLAS**



**FOTO 8. TAMICES**



**Foto 9. TAMIZADOR ELECTRICO**



**Foto 11. MOLDES**



**Foto 12. MEZCLADO**



**Foto 13. MOLDEO**



**Foto 14. MOLDES PREPARADO**

## ANEXO II

TABLA 32

DIA 4 – MUESTRA 1 – 17.5%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo [MPa]</b>	<b>Modulo Elasticidad (MPa)</b>	<b>Pendiente(Mapa)</b>
0	0	0		
0.00254	2156	0.86	339.53	
0.00508	3822	1.53	262.36	300.94
0.00762	7252	2.90	540.16	380.68
0.01016	14700	5.88	1172.91	578.74
0.0127	26950	10.78	1929.13	848.82
0.01524	40964	16.39	2206.93	1075.17
0.01778	58800	23.52	2808.82	1322.83
0.02032	78400	31.36	3086.61	1543.31
0.02286	100940	40.38	3549.61	1766.23
0.0254	110250	44.10	1466.14	1736.22

TABLA 33

RESUMEN DE DATOS DIAS 4 MUESTRA 1 – 17.5%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
1.77E+03	4.41E+01	4.04E+01	0.0254	1.95	1.20

TABLA 34

DIA 4 – MUESTRA 2 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo(MPa)	Modulo Elasticidad(Pa)	Pendiente (Mpa)
0	0	0		
0.00254	1862	0.74	293.23	
0.00508	5096	2.04	509.29	401.26
0.00762	10290	4.12	817.95	540.16
0.01016	20384	8.15	1589.61	802.52
0.0127	31850	12.74	1805.67	1003.15
0.01524	44100	17.64	1929.13	1157.48
0.01778	57820	23.13	2160.63	1300.79
0.02032	71050	28.42	2083.46	1398.62
0.02286	85750	34.30	2314.96	1500.44
0.0254	98000	39.20	1929.13	1543.31
0.02794	107800	43.12	1543.31	1543.31

TABLA 35

RESUMEN DE DATOS DIA 4 – MUESTRA 2 – 17.5%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
1500.437445	4.31E+01	3.43E+01	0.02794	0.2	0.03

TABLA 36

DIA 4 – MUESTRA 3 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo	Modulo Elasticidad (MPa)	Pendiente (Mpa)
0	0	0		
0.00254	3920	1.57	617.32	
0.00508	10780	4.31	1080.31	848.82
0.00762	21070	8.43	1620.47	1106.04
0.01016	33320	13.33	1929.13	1311.81
0.0127	46256	18.50	2037.17	1456.88
0.01524	62720	25.09	2592.76	1646.19
0.01778	75950	30.38	2083.46	1708.66
0.02032	90650	36.26	2314.96	1784.45
0.02286	103880	41.55	2083.46	1817.67
0.0254	110740	44.30	1080.31	1743.94
0.02794	114170	45.67	540.16	1634.50

TABLA 37

RESUMEN DE DATOS DIA 4 – MUESTRA 3 – 17.5%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
1784.448819	45.668	36.26	0.02794	2	0.9

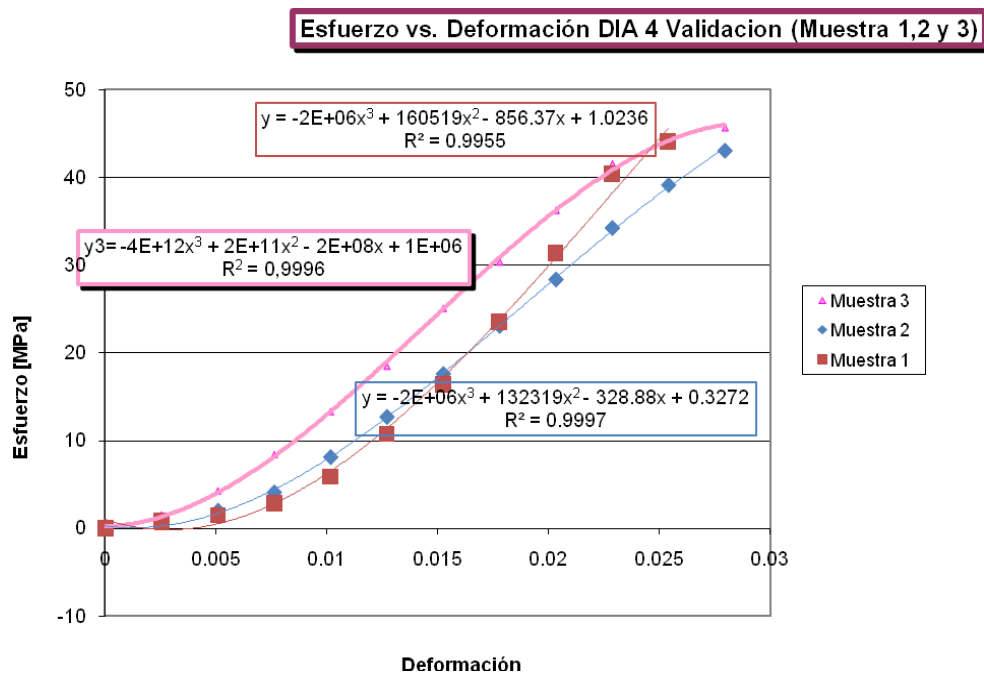


FIGURA 1 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA 4

TABLA 38

DIA 11 – MUESTRA 1 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [Pa]	Modulo Elasticidad (MPa)	Pendiente (MPa)
0	0	0		
0.00254	6230	2.49	981.10	
0.00508	39160	15.66	5185.83	3083.46
0.00762	77875	31.15	6096.85	4087.93
0.01016	106800	42.72	4555.12	4204.72
0.0127	173550	69.42	10511.81	5466.14
0.01524	204700	81.88	4905.51	5372.70

TABLA 39

RESUMEN DE DATOS DIA 11 – MUESTRA 1 – 17.5%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
8549.61	84.55	63.37	0.0127	10	1

TABLA 40

DIA 11 – MUESTRA 2 – 17.5%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo[Pa]</b>	<b>Modulo Elasticidad(Pa)</b>	<b>Pendiente(Pa)</b>
0	0	0		
0.00254	26255	10.50	4134.65	
0.00508	54290	21.72	4414.96	4274.80
0.00762	113030	45.21	9250.39	5933.33
0.01016	158420	63.37	16398.43	8549.61
0.0127	211375	84.55	8339.37	8507.56

TABLA 41

RESUMEN DE DATOS DIA 11 – MUESTRA 2 – 17.5%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
6219.49	76.54	63.19	0.0127	10	1

TABLA 42

DIA 11 – MUESTRA 3 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo	M_Elastic(Pa)	E_Acuml(Pa)
0	0	0		
0.00254	29815	11.93	4695.28	
0.00508	68975	27.59	6166.93	5431.10
0.00762	105465	42.19	5746.46	5536.22
0.01016	157975	63.19	8269.29	6219.49
0.0127	191350	76.54	5255.91	6026.77

TABLA 43

RESUMEN DE DATOS DIA 11 – MUESTRA 3 – 17.5%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
5431.1	76.54	27.59	0.0127	2.5	0.3



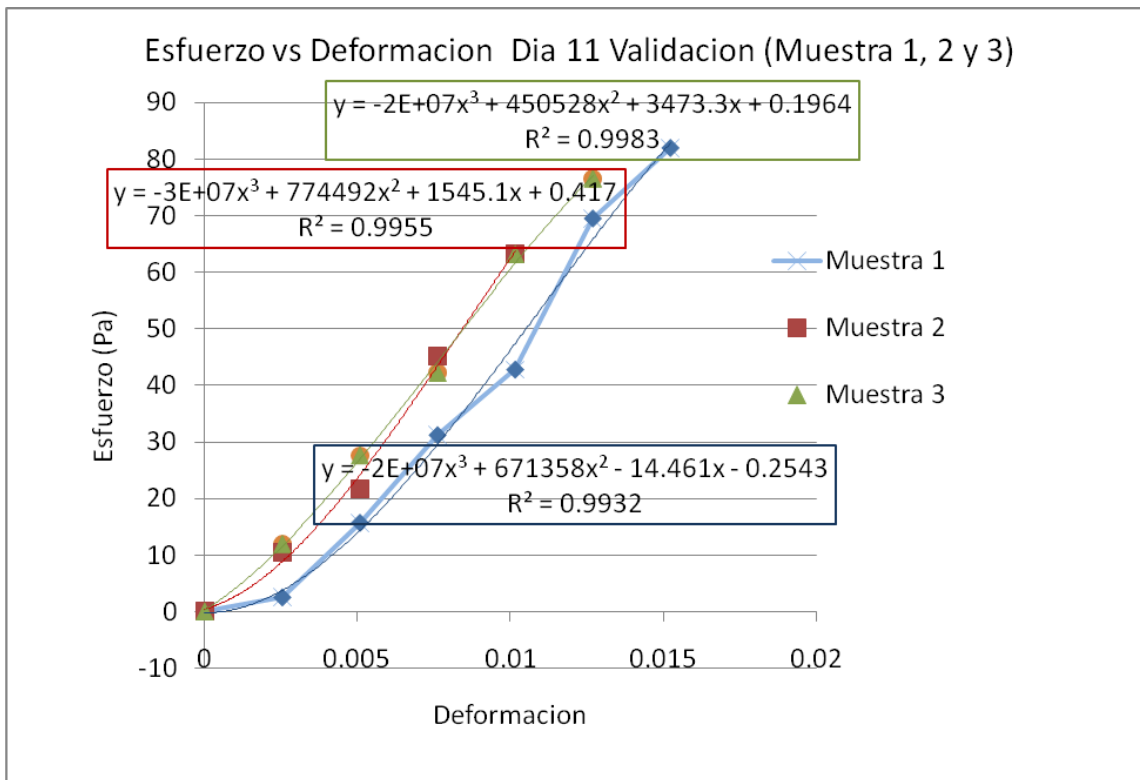


FIGURA 2 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA 11

TABLA 43

DIA 18 – MUESTRA 1 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [Pa]	M_Elastic(Pa)	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	4895	1.96	770.87	
0.00508	12015	4.81	1121.26	946.06
0.00762	32930	13.17	3293.70	1728.61
0.01016	76985	30.79	6937.80	3030.91
0.0127	124600	49.84	7498.43	3924.41
0.01524	184675	73.87	9460.63	4847.11
0.01778	202475	80.99	2803.15	4555.12

TABLA 44

RESUMEN DE DATOS DIA 18 – MUESTRA 1 – 17.5%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
3924.409	80.99	49.84	0.01778	2	0.5

TABLA 45

DIA 18 – MUESTRA 2 – 17.5%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Modulo Elasticidad (MPa)</b>	<b>Modulo de elasticidad promedio(Pa)</b>
0	0	0		
0.0025	2225	0.89	350.39	
0.0051	8900	3.56	1051.18	700.79
0.0076	32485	12.99	3714.17	1705.25
0.0102	69420	27.77	5816.54	2733.07
0.0127	109025	43.61	6237.01	3433.86
0.0152	149075	59.63	6307.09	3912.73
0.0178	198025	79.21	7708.66	4455.01
0.0203	223390	89.36	3994.49	4397.44

TABLA 45

RESUMEN DE DATOS DIA 18 – MUESTRA 2 – 17.5%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
3433.858	89.356	43.61	0.0203	2.3	0.4

TABLA 46

DIA 18 – MUESTRA 3 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo	M_ Elastic(Pa)	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	2670	1.07	420.47	
0.00508	6675	2.67	630.71	525.59
0.00762	22250	8.90	2452.76	1167.98
0.01016	62745	25.10	6377.17	2470.28
0.0127	131275	52.51	10792.13	4134.65
0.01524	182450	72.98	8059.06	4788.71
0.01778	209150	83.66	4204.72	4705.29

TABLA 47

RESUMEN DE DATOS DIA 18 – MUESTRA 3 – 17.5%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
4134.646	83.66	52.51	0.0127	1.9	0.6

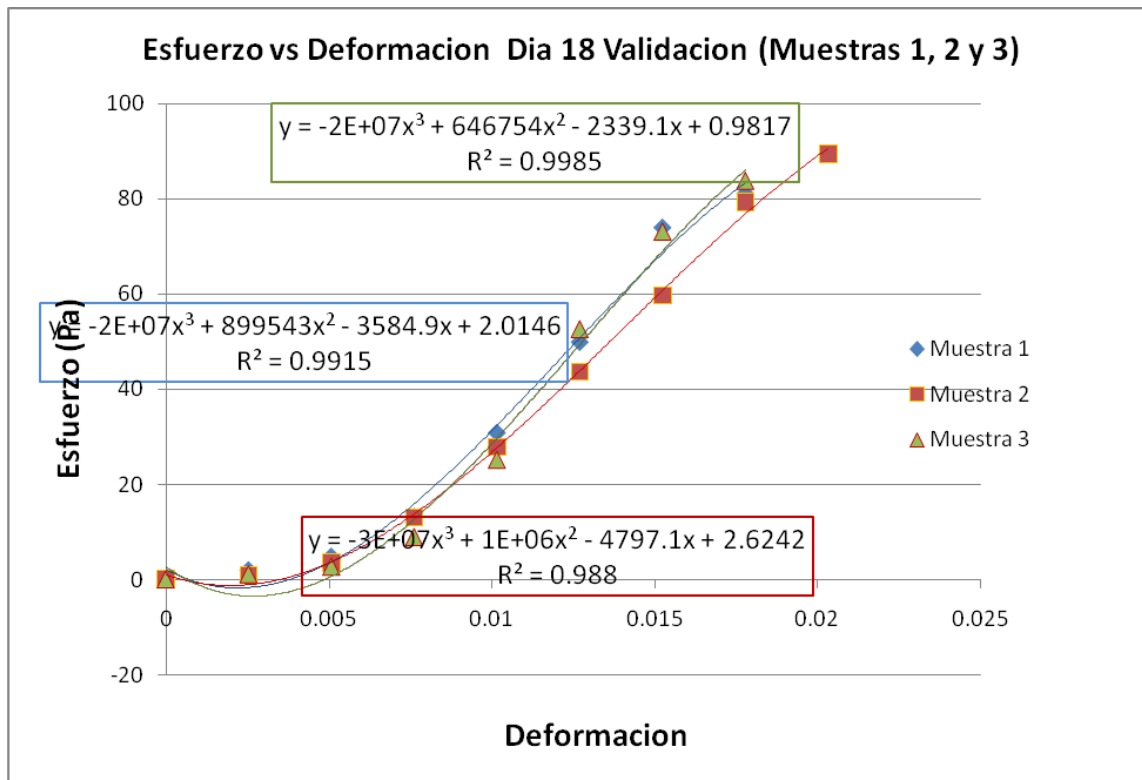


FIGURA 3 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA 18

TABLA 48

DIA 25 – MUESTRA 1 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [Pa]	M_Elastic(Pa)	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	4450	1.78	700.79	
0.00508	11570	4.63	1121.26	911.02
0.00762	27590	11.04	2522.83	1448.29
0.01016	66305	26.52	6096.85	2610.43
0.0127	118815	47.53	8269.29	3742.20
0.01524	201585	80.63	13034.65	5290.94
0.01778	223390	89.36	3433.86	5025.65

TABLA 49

RESUMEN DE DATOS DIA 25 – MUESTRA 1 – 17.5%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
5290.94	89.356	80.634	0.01778	2.5	0.9

TABLA 50

DIA 25 – MUESTRA 2 – 17.5%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>M_Elastic(Pa)</b>	<b>E_Acumul(Pa)</b>
0	0	0		
0.0025	5785	2.31	911.02	
0.0051	8900	3.56	490.55	700.79
0.0076	21360	8.54	1962.20	1121.26
0.0102	45390	18.16	3784.25	1787.01
0.0127	87220	34.89	6587.40	2747.09
0.0152	149075	59.63	9740.94	3912.73
0.0178	208705	83.48	9390.55	4695.28
0.0203	231845	92.74	3644.09	4563.88

TABLA 51

RESUMEN DE DATOS DIA 25 – MUESTRA 2 – 17.5%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
3912.73	92.738	59.63	0.02032	2.1	0.5

TABLA 52

DIA 25 – MUESTRA 3 – 17.5%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo	M_Elastic(Pa)	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	3782.5	1.51	595.67	
0.00508	8455	3.38	735.83	665.75
0.00762	20470	8.19	1892.13	1074.54
0.01016	48950	19.58	4485.04	1927.17
0.0127	81435	32.57	5115.75	2564.88
0.01524	121930	48.77	6377.17	3200.26
0.01778	199805	79.92	12263.78	4495.05
0.02032	222500	89.00	3574.02	4379.92

TABLA 53

RESUMEN DE DATOS DIA 25 – MUESTRA 3 – 17.5%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
4495.05	89	79.922	0.02032	2.8	0.2

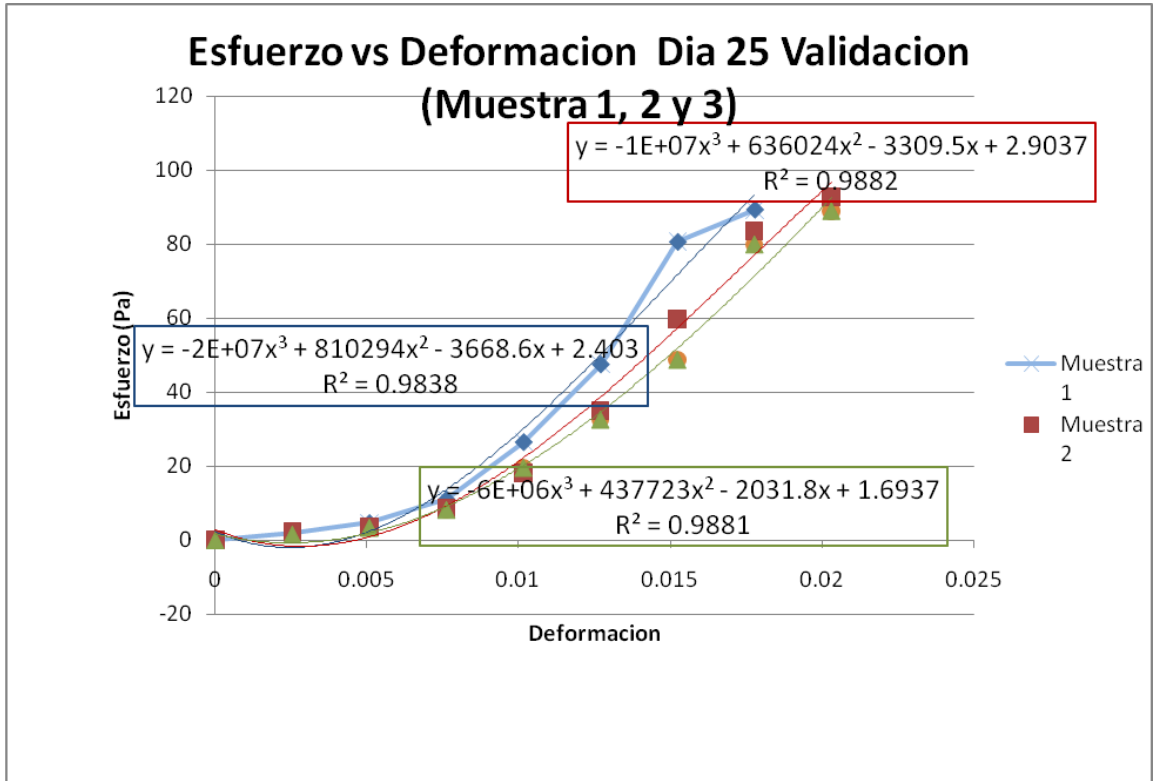


FIGURA 4 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA 25

TABLA 54

DIA 7 – MUESTRA 1 – 15%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [Pa]	Modulo Elastic(Pa)	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	890	0.36	140.16	
0.00508	1780	0.71	140.16	140.16
0.00762	2759	1.10	154.17	144.83
0.01016	6007.5	2.40	511.57	236.52
0.0127	10368.5	4.15	686.77	326.57
0.01524	15797.5	6.32	854.96	414.63
0.01778	21582.5	8.63	911.02	485.55
0.02032	28925	11.57	1156.30	569.39
0.02286	36267.5	14.51	1156.30	634.60
0.0254	43387.5	17.36	1121.26	683.27
0.02794	50730	20.29	1156.30	726.27
0.03048	62077.5	24.83	1787.01	814.67
0.03302	65192.5	26.08	490.55	789.73
0.03556	67417.5	26.97	350.39	805.91

TABLA 54

RESUMEN DE DATOS DIA 7 – MUESTRA 1 – 15%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
789.73349	26.97	2.61E+01	0.03556	0.1	0.1



TABLA 55

DIA 7 – MUESTRA 2 – 15%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo[Pa]	M_ Elastic[Pa]	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	890	0.36	140.16	
0.00508	2225	0.89	210.24	175.20
0.00762	4005	1.60	280.31	210.24
0.01016	7565	3.03	560.63	297.83
0.0127	12460	4.98	770.87	392.44
0.01524	17800	7.12	840.94	467.19
0.01778	23362.5	9.35	875.98	525.59
0.02032	29592.5	11.84	981.10	582.53
0.02286	35600	14.24	946.06	622.92
0.0254	40717.5	16.29	805.91	641.22
0.02794	45167.5	18.07	700.79	646.64
0.03048	48950	19.58	595.67	642.39
0.03302	54512.5	21.81	875.98	660.36
0.03556	61187.5	24.48	1051.18	688.27
0.0381	66750	26.70	875.98	700.79
0.04064	70532.5	28.21	595.67	731.15
0.04318	72312.5	28.93	280.31	669.87

TABLA 56

RESUMEN DE DATOS DIA 7 – MUESTRA 2 – 15%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
641.22047	28.925	16.287	0.04318	3	0.3

TABLA 57

DIA 7 – MUESTRA 3 – 15%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo	M_ Elastic[Pa]	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	1335	0.53	210.24	
0.00508	2892.5	1.16	245.28	227.76
0.00762	6230	2.49	525.59	327.03
0.01016	10902.5	4.36	735.83	429.23
0.0127	17221.5	6.89	995.12	542.41
0.01524	23362.5	9.35	967.09	613.19
0.01778	28925	11.57	875.98	650.73
0.02032	36267.5	14.51	1156.30	713.93
0.02286	41830	16.73	875.98	731.93
0.0254	48505	19.40	1051.18	763.86
0.02794	55180	22.07	1051.18	789.98
0.03048	60075	24.03	770.87	911.02
0.03302	65637.5	26.26	875.98	795.12
0.03556	71200	28.48	875.98	800.90
0.0381	75650	30.26	700.79	794.23
0.04064	76762.5	30.71	175.20	755.54

TABLA 58

RESUMEN DE DATOS DIA 7 – MUESTRA 3 – 15%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
763.85827	28.925	19.402	0.04064	2.5	0.3

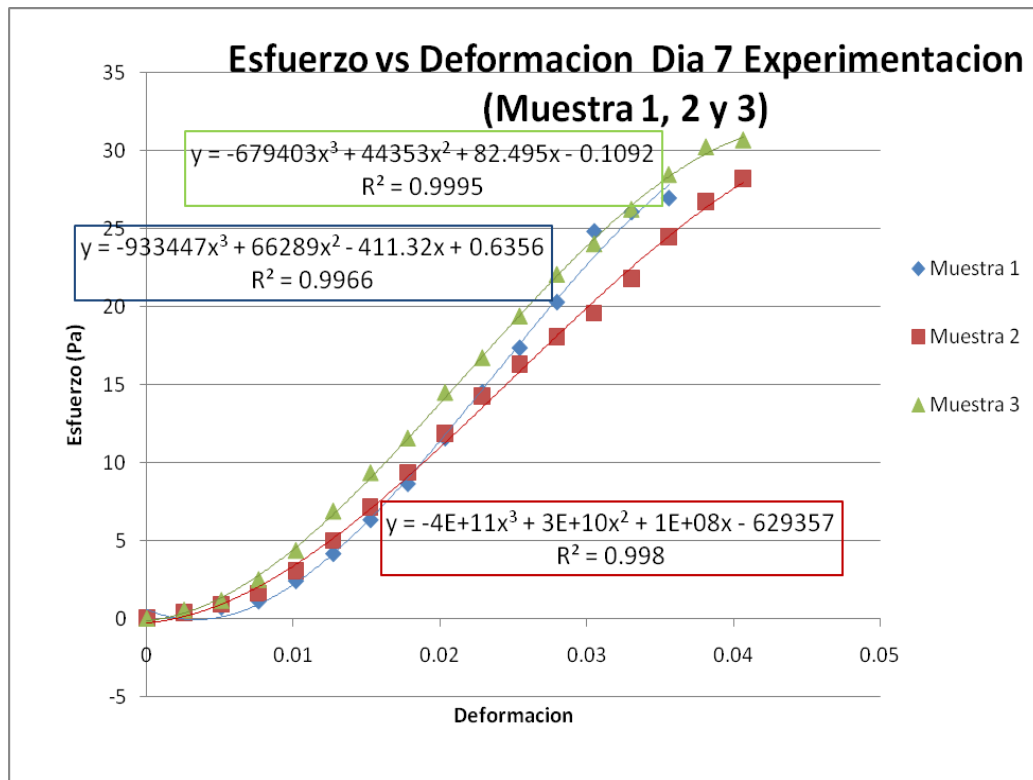


FIGURA 5 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA 7

TABLA 59

DIA 14 – MUESTRA 1 – 15%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [Pa]	Modulo Elasticidad[MPa]	Pendiente(MPa)
0	0	0		
0.00254	9790	3.92	1541.73	
0.00508	30260	12.10	3223.62	2382.68
0.00762	63190	25.28	5185.83	3317.06
0.01016	100570	40.23	5886.61	3959.45
0.0127	155750	62.30	8689.76	4905.51
0.01524	182450	72.98	4204.72	4788.71
0.01778	209150	83.66	4204.72	4705.29

TABLA 60

RESUMEN DE DATOS DIA 14 – MUESTRA 2 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
4905.51	83.66	62.3	0.01778	2.5	0.3

TABLA 61

DIA 14 – MUESTRA 2 – 15%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Modulo Elasticidad[MPa]</b>	<b>Pendiente(MPa)</b>
0	0	0		
0.00254	10680	4.27	1681.89	
0.00508	48505	19.40	5956.69	3819.29
0.00762	75650	30.26	4274.80	3971.13
0.01016	89000	35.60	2102.36	3503.94
0.0127	171325	68.53	12964.57	5396.06
0.01524	186900	74.76	2452.76	4905.51
0.01778	226950	90.78	6307.09	5105.74

TABLA 62

RESUMEN DE DATOS DIA 14 – MUESTRA 2 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
5396.06	90.78	68.53	0.01778	2.8	0.3

TABLA 63

DIA 14 – MUESTRA 3 – 15%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Modulo Elasticidad[MPa]</b>	<b>Pendiente(MPa)</b>
0	0	0		
0.00254	8010	3.20	1261.42	
0.00508	19580	7.83	1822.05	1541.73
0.00762	48950	19.58	4625.20	2569.55
0.01016	89445	35.78	6377.17	3521.46
0.0127	144625	57.85	8689.76	4555.12
0.01524	193575	77.43	7708.66	5080.71
0.01778	226950	90.78	5255.91	5105.74
0.02032	244750	97.90	2803.15	4817.91

TABLA 64

RESUMEN DE DATOS DIA 14 – MUESTRA 3 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
4555.12	97.9	57.85	0.02032	3.5	0.4

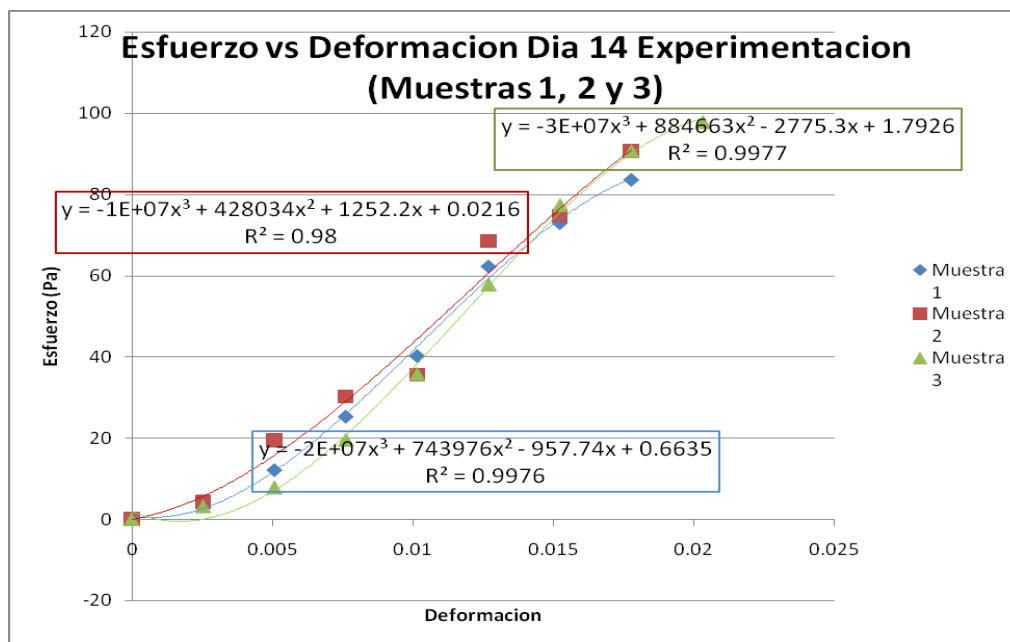


FIGURA 6 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA14

TABLA 65

DIA 21 – MUESTRA 1 – 15%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [Pa]	Modulo Elasticidad[MPa]	Pendiente(MPa)
0	0	0		
0.00254	2225	0.89	350.39	
0.00508	10235	4.09	1261.42	805.91
0.00762	23140	9.26	2032.28	1214.70
0.01016	44500	17.80	3363.78	1751.97
0.0127	83215	33.29	6096.85	2620.94
0.01524	144625	57.85	9670.87	3795.93
0.01778	198025	79.21	8409.45	4455.01
0.02032	222500	89.00	3854.33	4379.92

TABLA 66

RESUMEN DE DATOS DIA 21 – MUESTRA 1 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
4455.01	89	79.21	0.02032	1	0.2

TABLA 67

DIA 21 – MUESTRA 2 – 15%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>M_Elastic[Pa]</b>	<b>E_Acumul(Pa)</b>
0	0	0		
0.00254	4450	1.78	700.79	
0.00508	9345	3.74	770.87	735.83
0.00762	27590	11.04	2873.23	1448.29
0.01016	69420	27.77	6587.40	2733.07
0.0127	99235	39.69	4695.28	3125.51
0.01524	153525	61.41	8549.61	4029.53
0.01778	211375	84.55	9110.24	4755.34
0.02032	233625	93.45	3503.94	4598.92

TABLA 68

RESUMEN DE DATOS DIA 21 – MUESTRA 3 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
4755.34	93.45	84.55	0.01778	1.3	0.1

TABLA 69

DIA 21 – MUESTRA 3 – 15%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo	M_Elastic[Pa]	E_Acumul(Pa)
0	0	0		
0.00254	8010	3.20	1261.42	
0.00508	33375	13.35	3994.49	2627.95
0.00762	79655	31.86	7288.19	4181.36
0.01016	146850	58.74	10581.89	5781.50
0.0127	180225	72.09	5255.91	5676.38
0.01524	213600	85.44	5255.91	5606.30

TABLA 70

RESUMEN DE DATOS DIA 21 – MUESTRA 3 – 15%

Modulo Elasticidad	Esfuerzo Ruptura	Esfuerzo Fluencia	Deformación Maxima	a	m
5781.5	85.44	58.74	0.01524	3	0.2



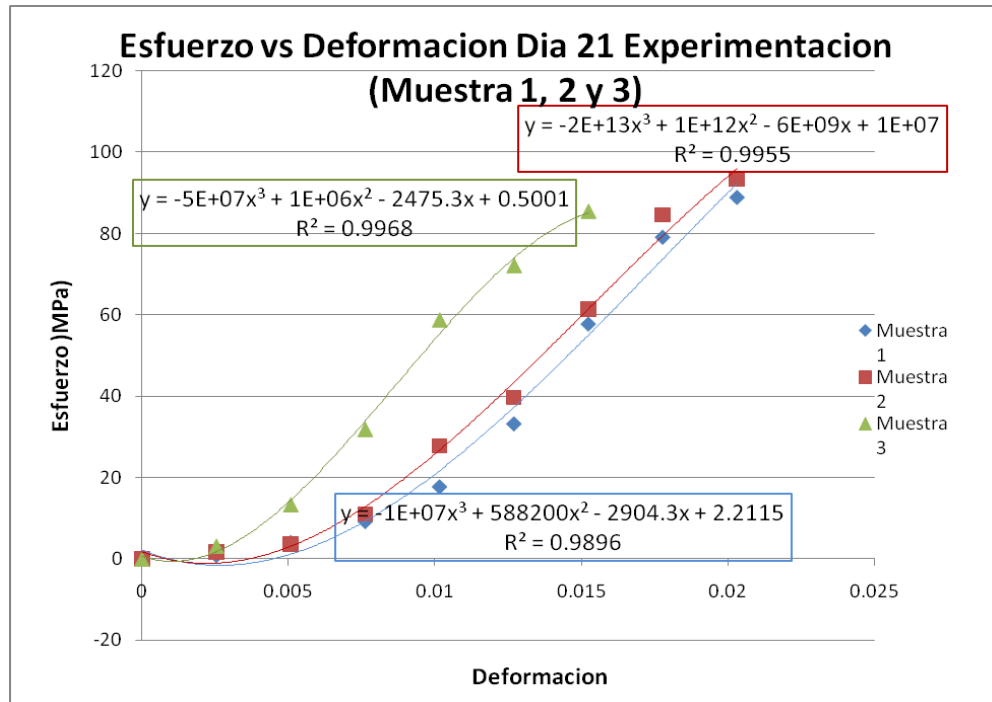


FIGURA 7 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA 21

TABLA 71

DIA 28 – MUESTRA 1 – 15%

Deformación	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]	Modulo Elasticidad(MPa)	Pendiente(MPa)
0	0	0		
0.00254	4450	1.78	700.79	
0.00508	22695	9.08	2873.23	1787.01
0.00762	69865	27.95	7428.35	3667.45
0.01016	126825	50.73	8970.08	4993.11
0.0127	182450	72.98	8759.84	5746.46
0.01524	213600	85.44	4905.51	5606.30

TABLA 71

RESUMEN DE DATOS DIA 28 – MUESTRA 1 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
5746.46	85.44	72.98	0.01524	1.5	0.3

TABLA 72

DIA 28 – MUESTRA 2 – 15%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Modulo Elasticidad(MPa)</b>	<b>Pendiente(MPa)</b>
0	0	0		
0.00254	6230	2.49	981.10	
0.00508	19135	7.65	2032.28	1506.69
0.00762	54290	21.72	5536.22	2849.87
0.01016	98345	39.34	6937.80	3871.85
0.0127	151300	60.52	8339.37	4765.35
0.01524	209150	83.66	9110.24	5489.50
0.01778	229175	91.67	3153.54	5155.79

TABLA 73

DIA 21 – MUESTRA 1 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
4765.35	91.67	60.52	0.01778	1	0.2

TABLA 74

DIA 28 – MUESTRA 3 – 15%

<b>Deformación</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Esfuerzo (Pa)</b>	<b>Modulo Elasticidad (MPa)</b>	<b>Pendiente(MPa)</b>
0	0	0		
0.00254	6675	2.67	1051.18	
0.00508	20915	8.37	2242.52	1646.85
0.00762	52955	21.18	5045.67	2779.79
0.01016	91225	36.49	6026.77	3591.54
0.0127	149075	59.63	9110.24	4695.28
0.01524	189125	75.65	6307.09	4963.91
0.01778	229175	91.67	6307.09	5155.79
0.02032	240300	96.12	1751.97	4730.31

TABLA 75

RESUMEN DE DATOS DIA 28 – MUESTRA 3 – 15%

<b>Modulo Elasticidad</b>	<b>Esfuerzo Ruptura</b>	<b>Esfuerzo Fluencia</b>	<b>Deformación Maxima</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
4695.28	96.12	59.63	0.02032	2	0.2

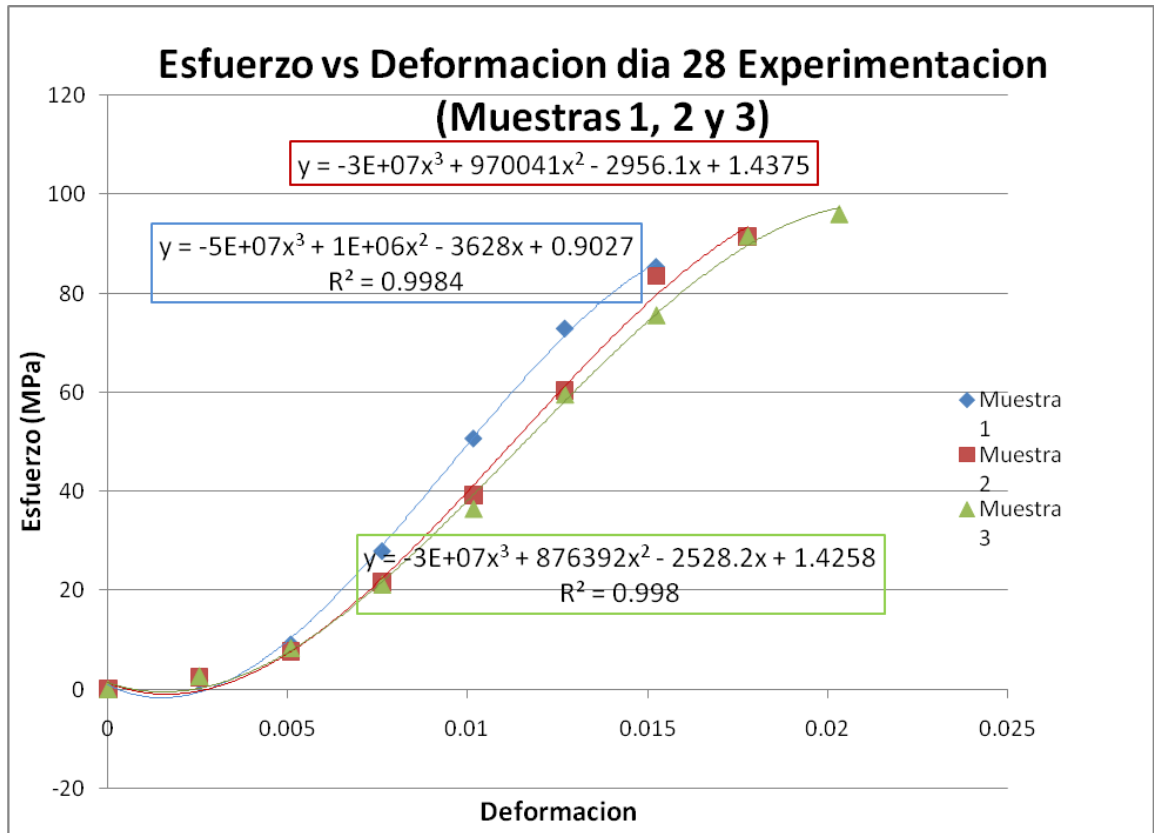


FIGURA 8 ESFUERZO VS DEFORMACION DIA 28

## ANEXO II

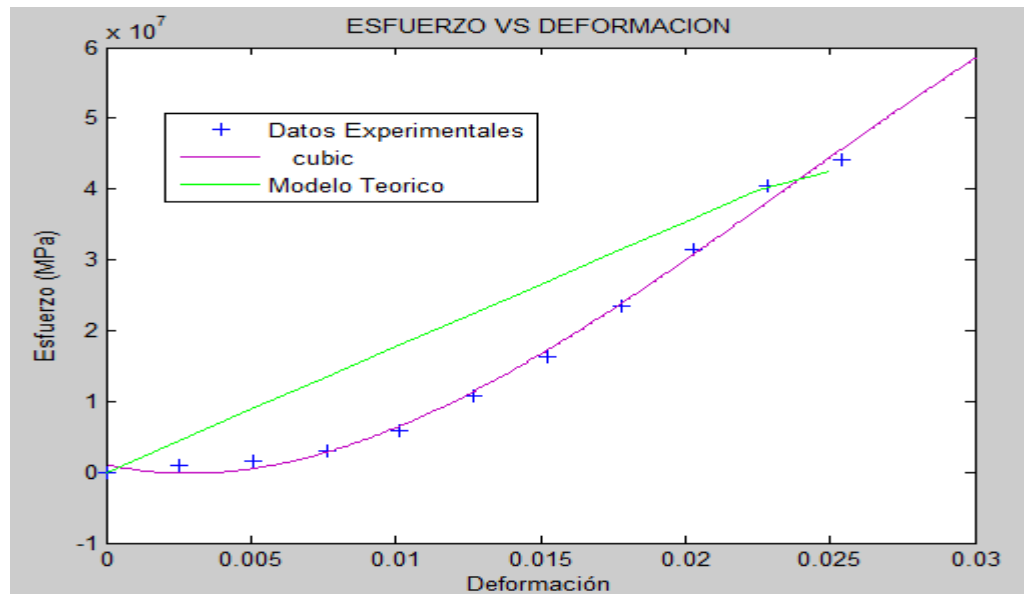


FIGURA 9 MODELACION (DIA 4 - MUESTRA 1 - 17.5%)

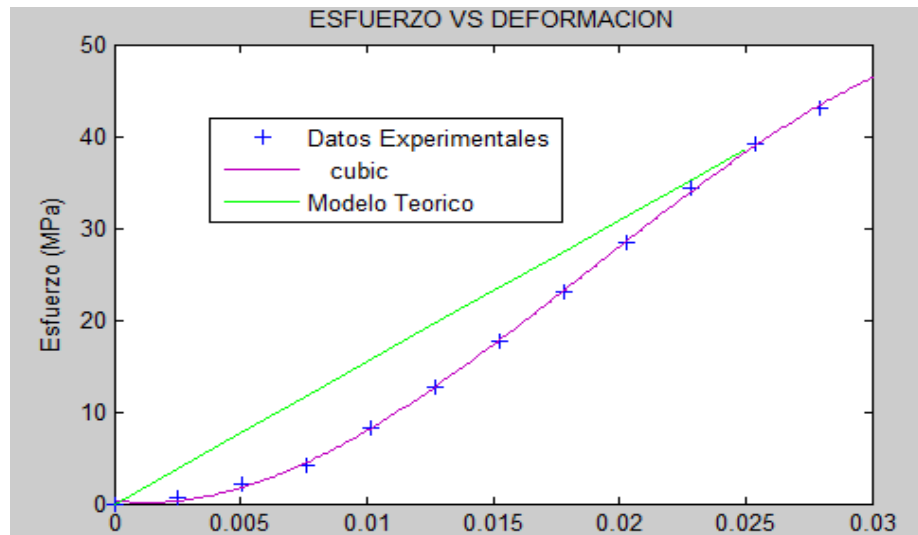


FIGURA 10 MODELACION (DIA 4 - MUESTRA 2 - 17.5%)

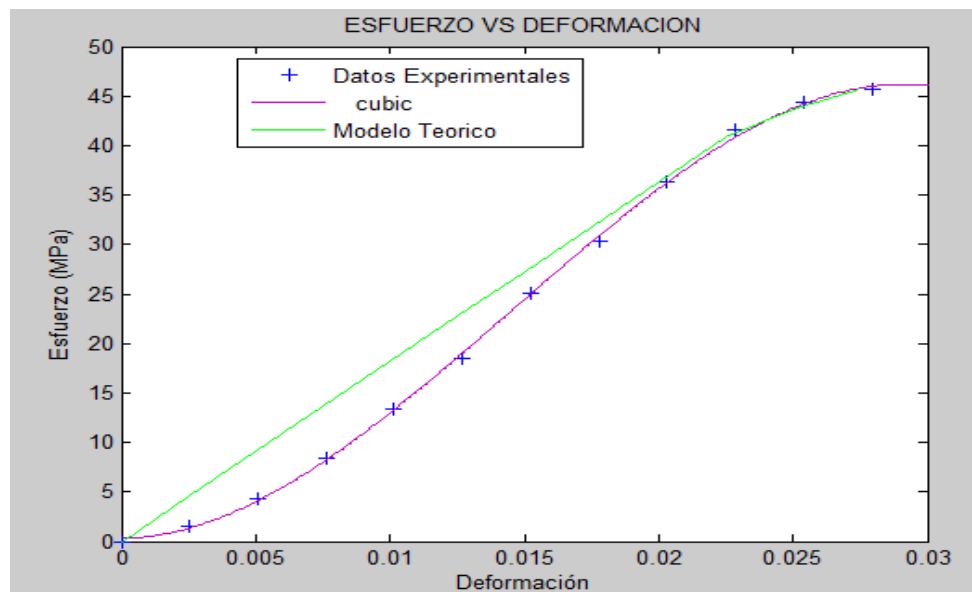


FIGURA 11 MODELACION (DIA 4 - MUESTRA 3 - 17.5%)

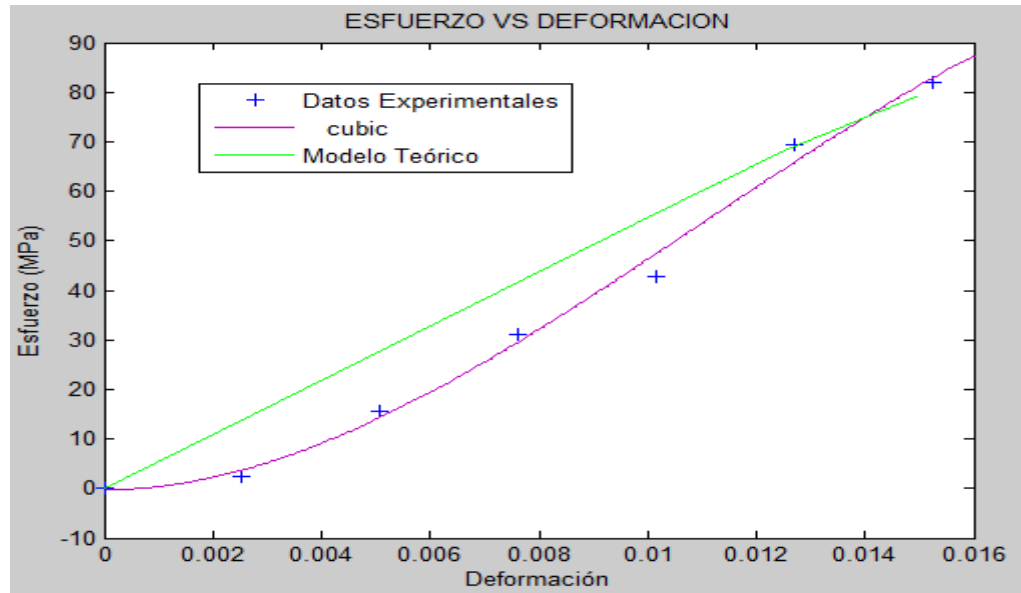


FIGURA 12 MODELACION (DIA 11 - MUESTRA 1 - 17.5%)

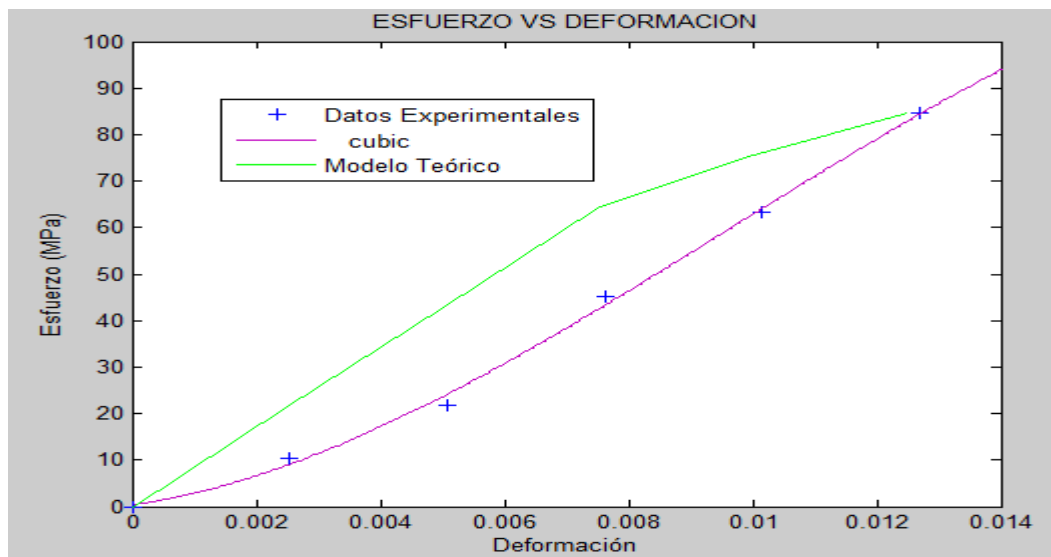
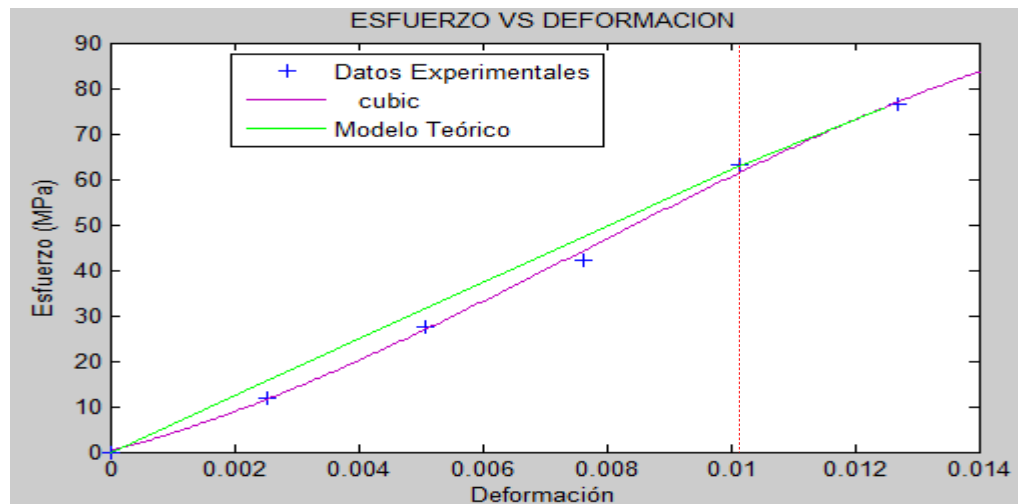


FIGURA 13 MODELACION (DIA 11 - MUESTRA 2 - 17.5%)



ZONA ELASTICA

ZONA PLASTICA

FIGURA 14 MODELACION (DIA 11 - MUESTRA 3 - 17.5%)



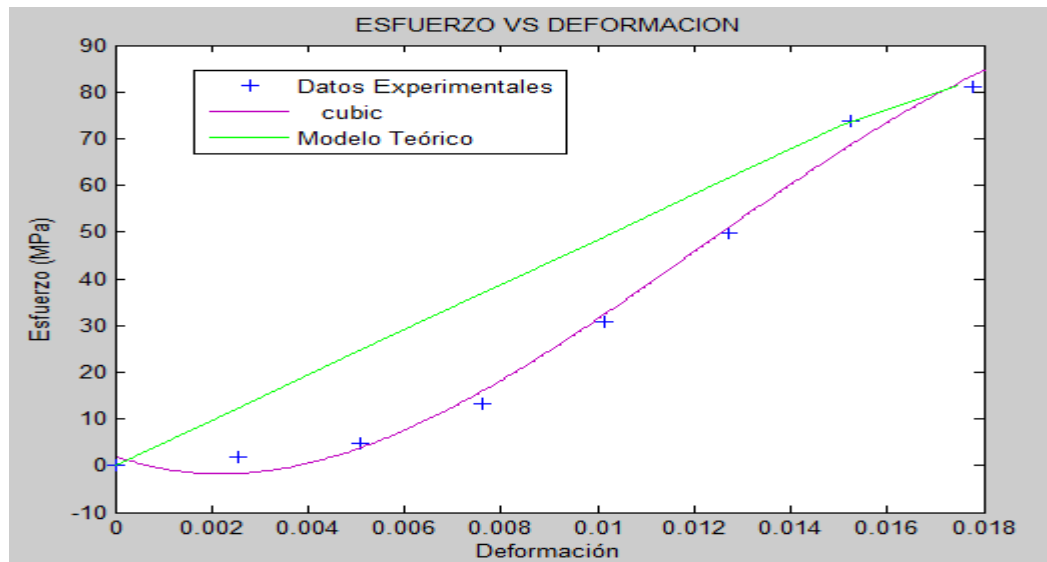


FIGURA 15 MODELACION (DIA 18 - MUESTRA 1 - 17.5%)

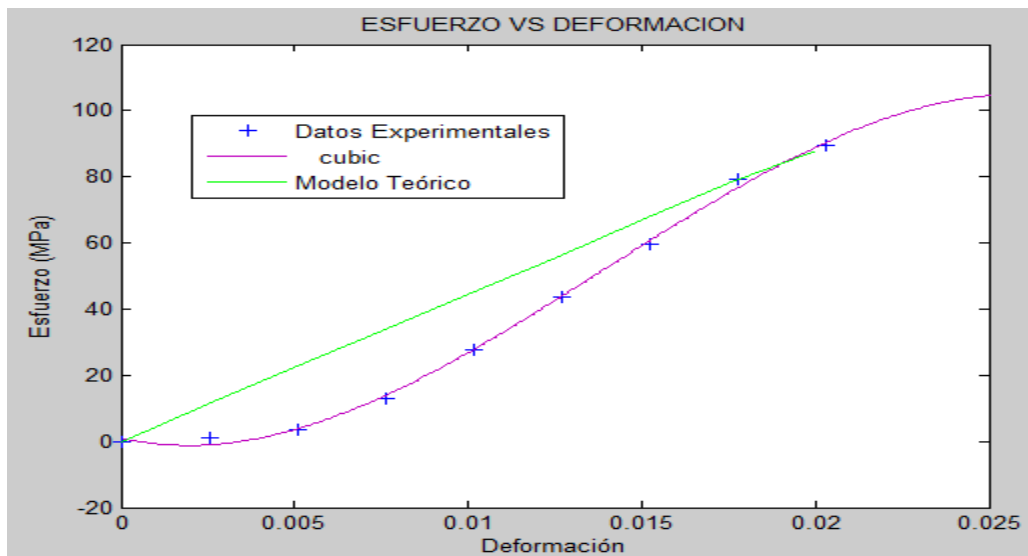


FIGURA 16 MODELACION (DIA 18 - MUESTRA 2 - 17.5%)

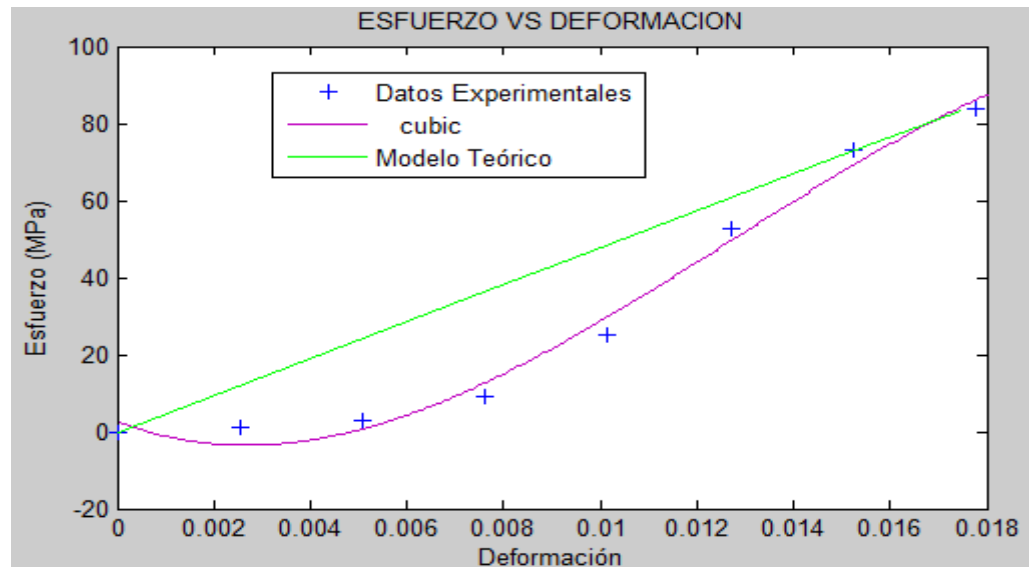


FIGURA 17 MODELACION (DIA 18 - MUESTRA 2 - 17.5%)

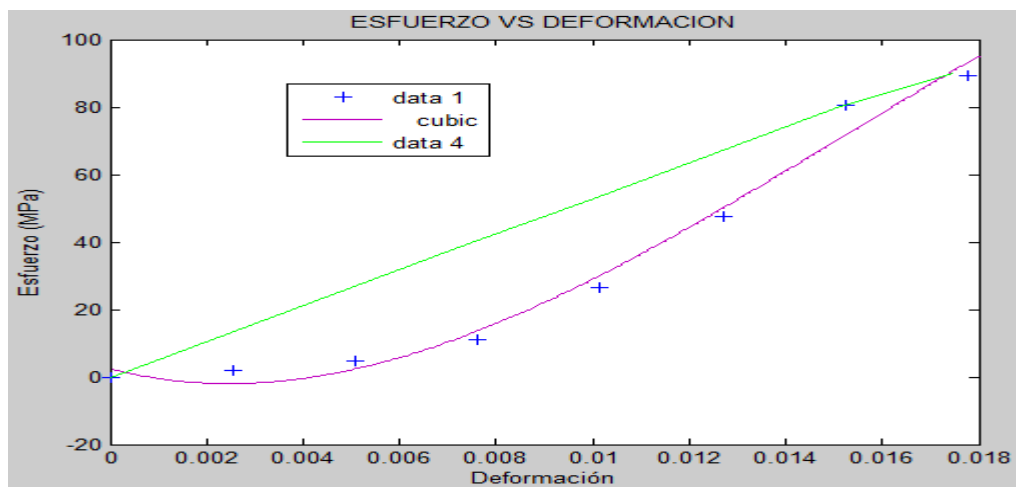


FIGURA 18 MODELACION (DIA 25 - MUESTRA 1 - 17.5%)

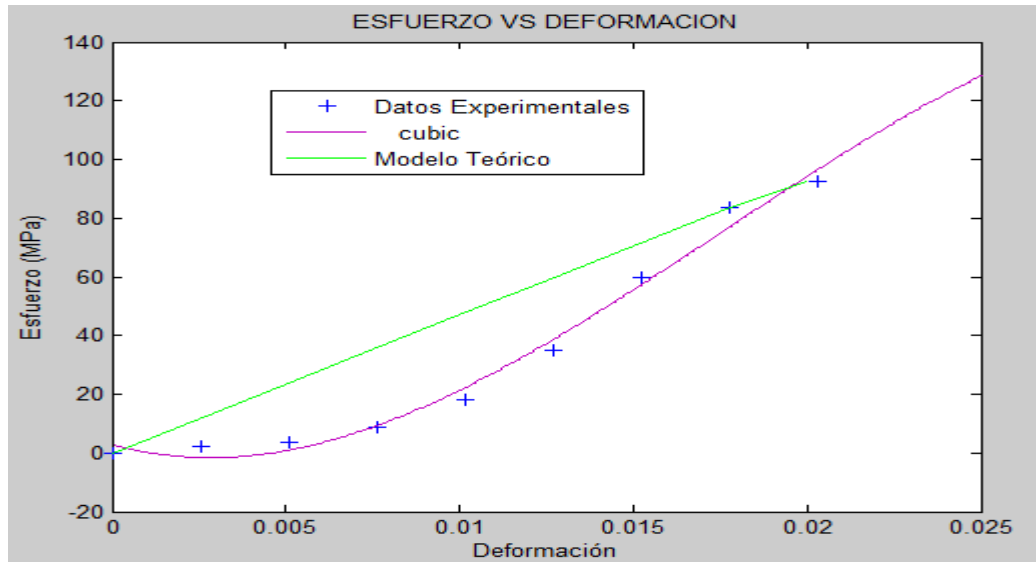


FIGURA 19 MODELACION (DIA 25 - MUESTRA 2 - 17.5%)

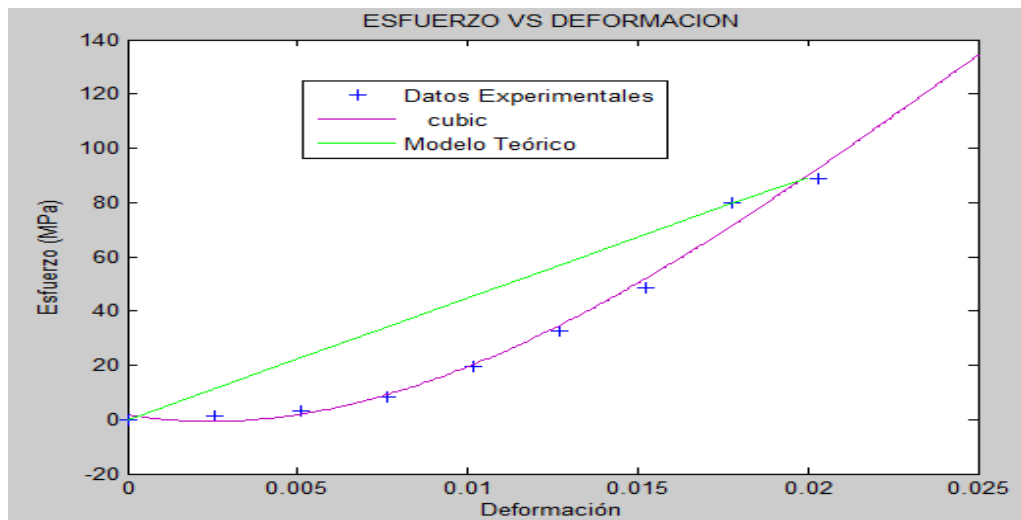


FIGURA 20 MODELACION (DIA 25 - MUESTRA 3 - 17.5%)

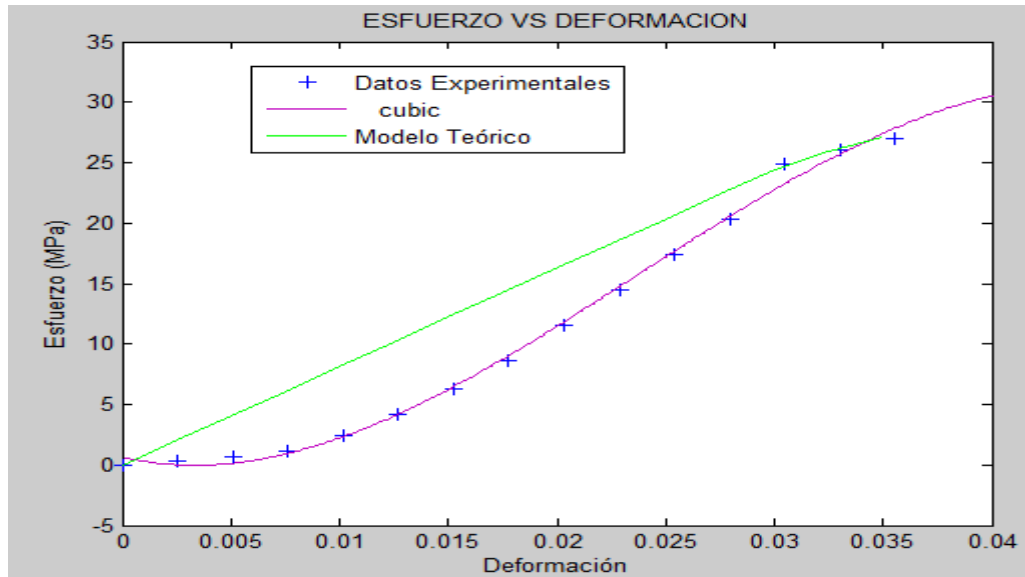


FIGURA 21 MODELACION (DIA 7 - MUESTRA 1 - 15%)

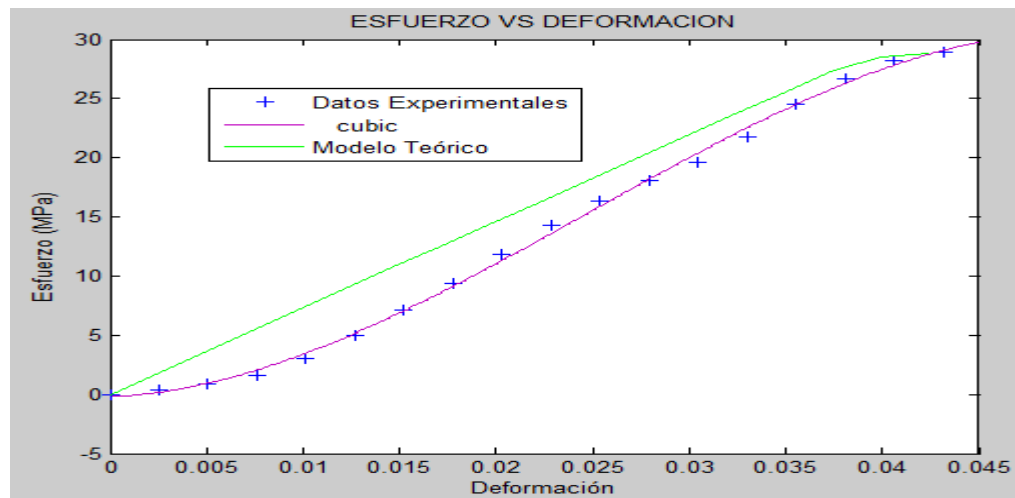


FIGURA 22 MODELACION (DIA 7 - MUESTRA 2 - 15%)

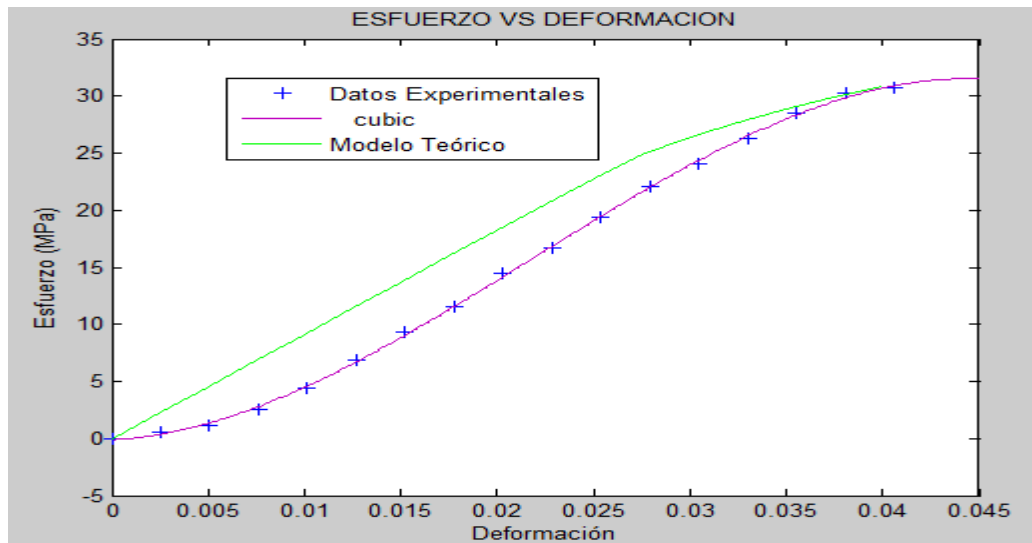


FIGURA 23 MODELACION (DIA 7 - MUESTRA 3 - 15%)

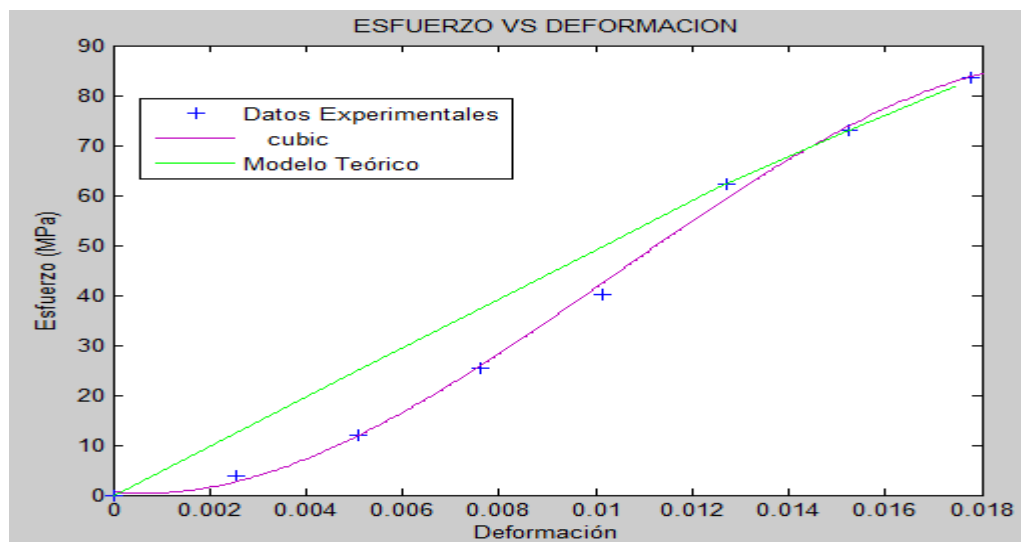


FIGURA 24 MODELACION (DIA 14 - MUESTRA 1 - 15%)

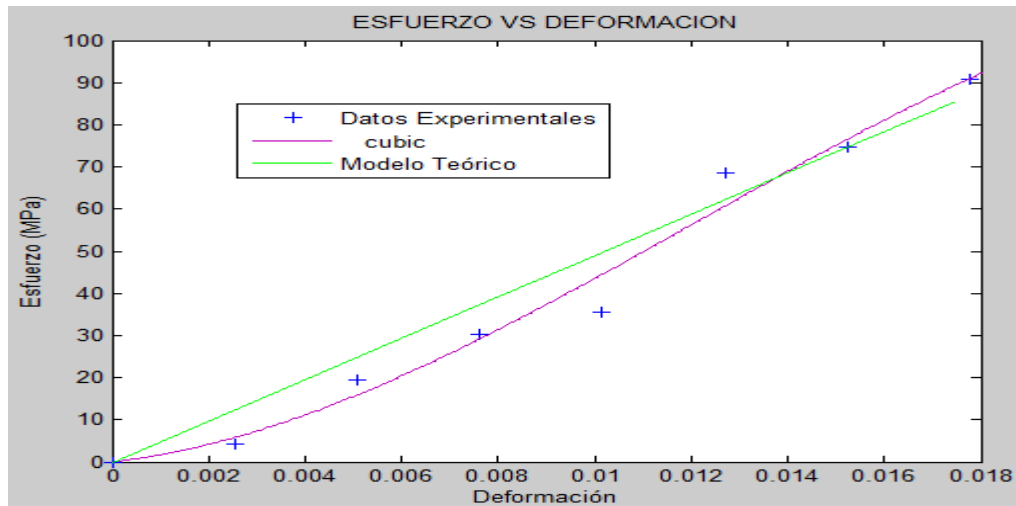


FIGURA 25 MODELACION (DIA 14 - MUESTRA 2 - 15%)

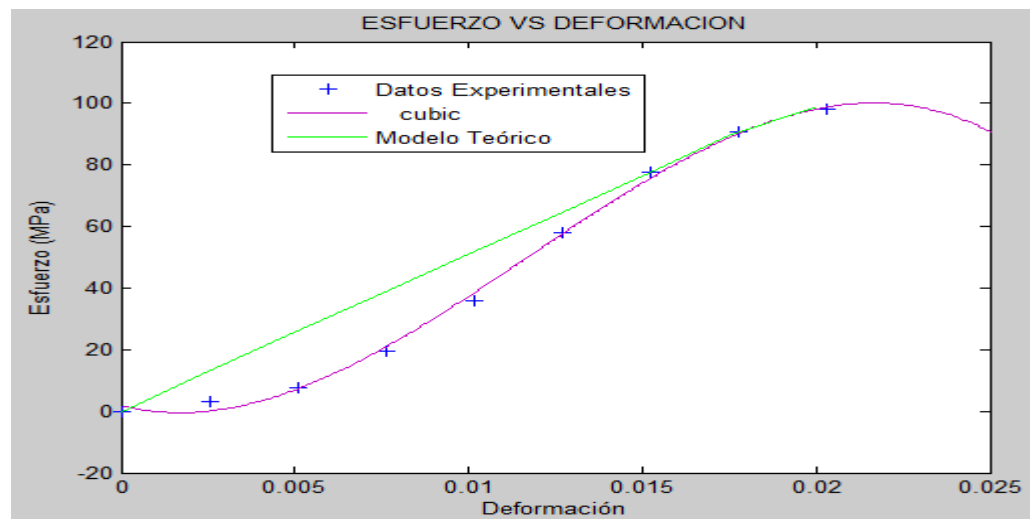


FIGURA 26 MODELACION (DIA 14 - MUESTRA 3 - 15%)

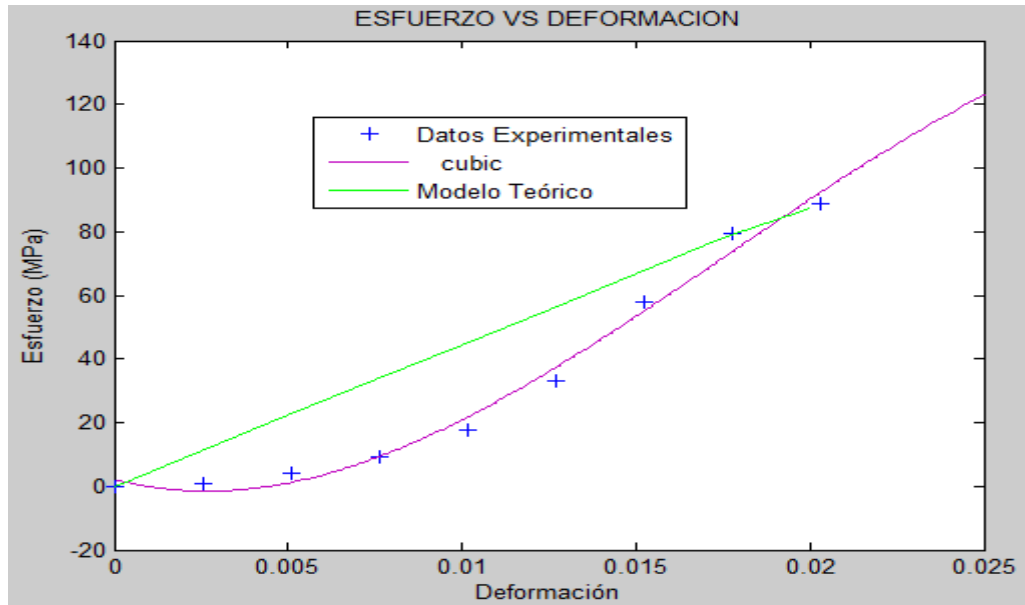


FIGURA 27 MODELACION (DIA 21 - MUESTRA 1 - 15%)

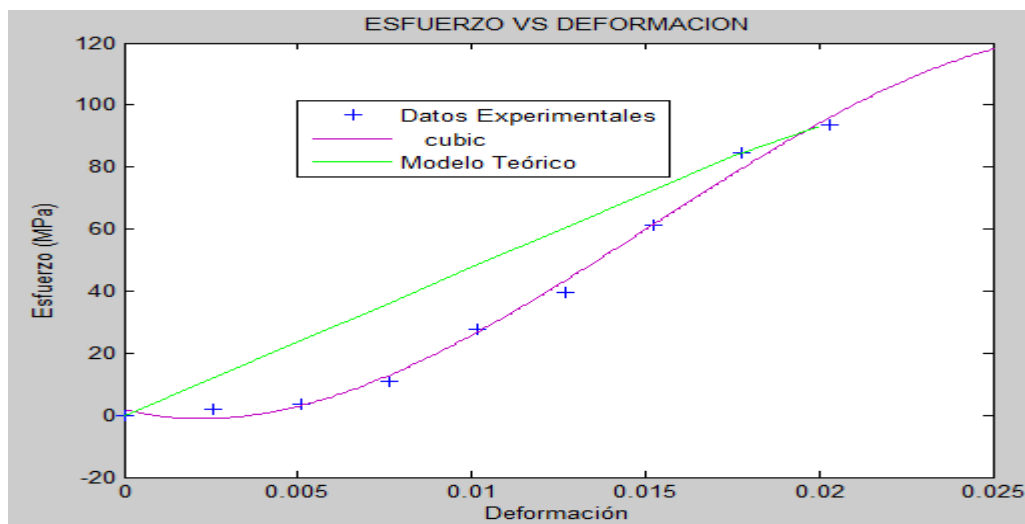


FIGURA 28 MODELACION (DIA 21 - MUESTRA 2 - 15%)

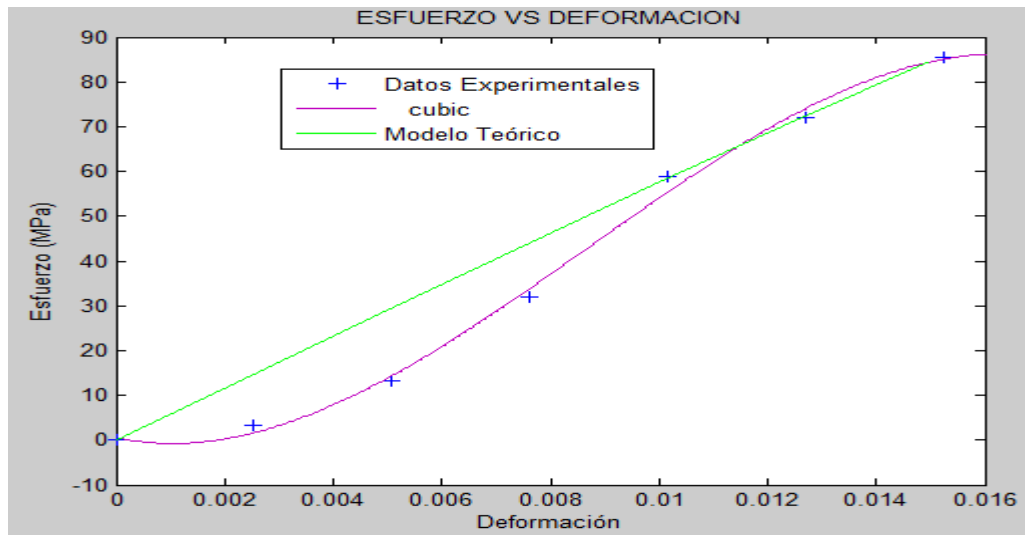


FIGURA 29 MODELACION (DIA 21 - MUESTRA 3 - 15%)

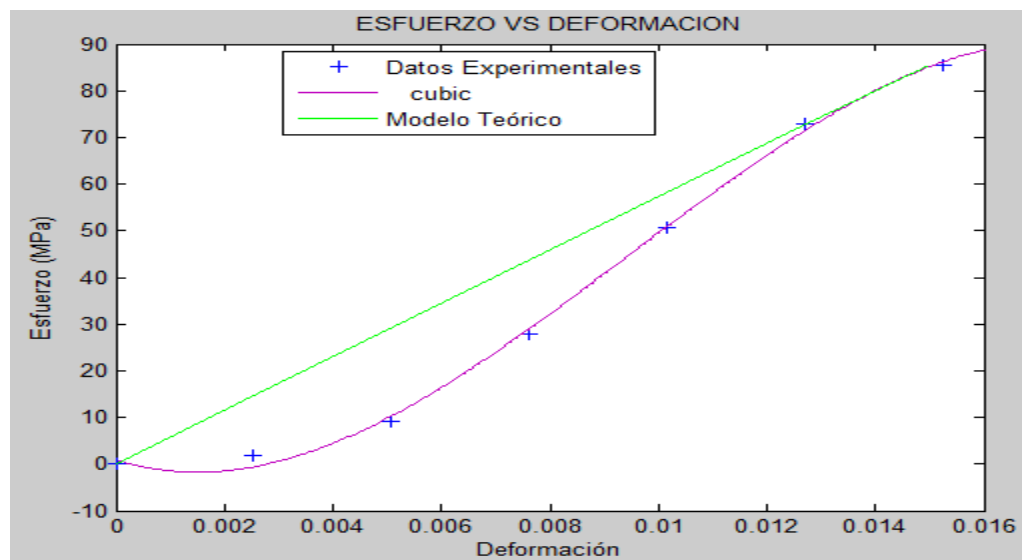


FIGURA 30 MODELACION (DIA 28 - MUESTRA 1 - 15%)



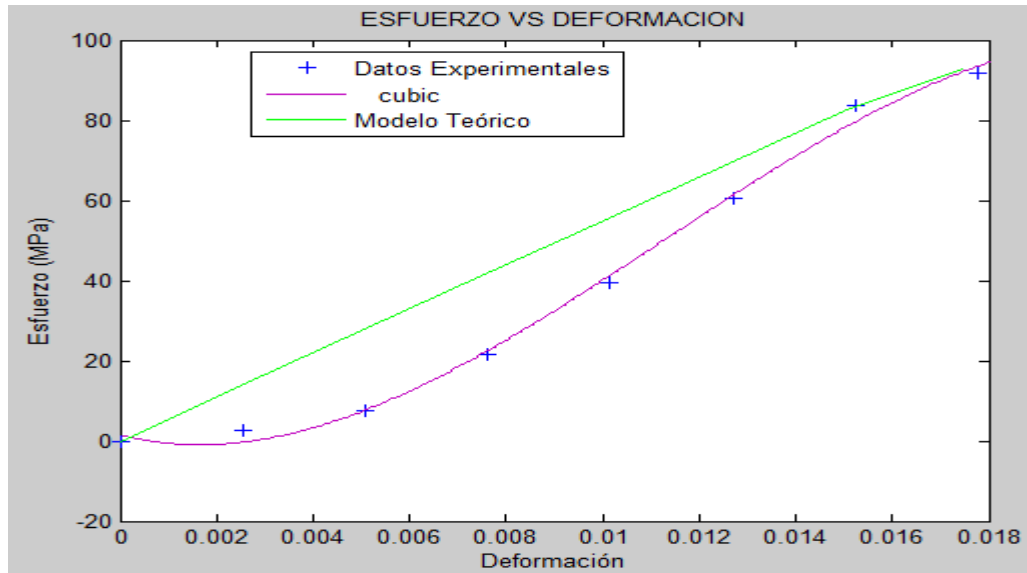


FIGURA 31 MODELACION (DIA 28 - MUESTRA 2 - 15%)

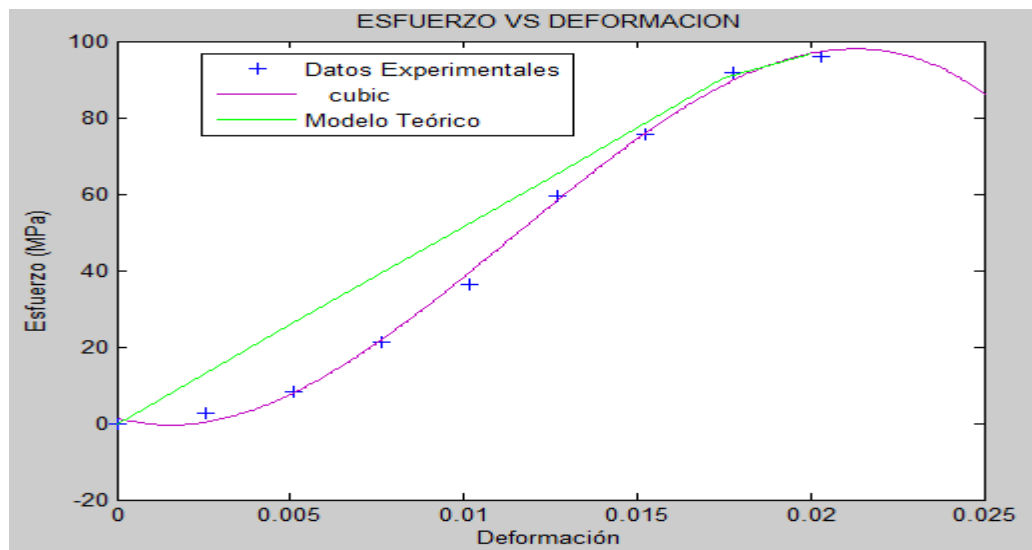


FIGURA 32 MODELACION (DIA 28 - MUESTRA 3 - 15%)

## **ANEXO III**

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

Matlab

```
% 10% - DIA 7 - EXPERIMENTAL
clc;
clear all;
ep=[0
0.00254
0.00508
0.00762
0.01016
0.0127
0.01524
```

```

0.01778
0.02032];
sigp=[0
5.696
21.182
37.558
41.652
57.85
74.76
87.22
93.45];
plot(ep,sigp, '+')
xlabel('Deformación'),ylabel('Esfuerzo (MPa)');
title ('ESFUERZO VS DEFORMACION');

```

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

```

% 10% - DIA 7 - muestra 1 - TEORICO
clc;
clear all;
E=4905.91; %Varía en cada gráfico
sigmayo=87.22; %Varía en cada gráfico
m=0.06; %Varía en cada gráfico
a=0.6; %Varía en cada gráfico
deltae=0.0025; %DELTA DEFORMACION es fijo
et=0.02032; % máxima defromación, %Varía en cada gráfico
sigman(1,1)=0;

```

```

sigmayn(1,1)=sigmayo;
eps=0:deltae:et;
eps=eps';
d=size(eps);
e=d(1,1);
lampdao=10^-8;
lampda(1,1)=0;
for k=1:e-1
sigmatrn1=sigman(k,1)+E*deltae
Fntrn1=abs(sigmatrn1)-sigmayn(k,1)

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

```

```

Fn(i,1)=Fntrn1-
deltalampda(i,1)*(E+a*sigmayo*((m/(deltalampda(i,1)+lampdao))^0.5
)*(m-deltalampda(i,1)-lampdao)/(m+deltalampda(i,1)+lampdao)^2);
deldellampda=
(subs(diff(Rn1,deltaepsilon),deltaepsilon,deltalampda(i,1)))^
1*Fn(i,1);
deltalampda(i+1,1)=deltalampda(i,1)+deldellampda;
Fn(i+1,1)=Fntrn1-
deltalampda(i+1,1)*(E+a*sigmayo*((m/(deltalampda(i+1,1)+lampdao)
)^0.5)*(m-deltalampda(i+1,1)-
lampdao)/(m+deltalampda(i+1,1)+lampdao)^2);
l(1,1)=1;
F(1,1)=log10(abs(Fn(1,1))/abs(Fo));
Fn1=Fn(i+1,1);
l(i+1,1)=i+1;
F(i+1,1)=log10(abs(Fn(i+1,1))/abs(Fo));
i=i+1;
end
delta=deltalampda(i,1);
lampda1=delta + lampdao;
Hp=a*sigmayo*((m/lampda1)^0.5)*(m-lampda1)/(m+lampda1)^2;
sigman(k+1,1)=sigmatrn1-E*delta*sign(sigmatrn1);
sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1)+Hp*delta;
lampdao=lampda1;
lampda(k+1,1)=lampdao;
else
sigman(k+1,1)=sigmatrn1;

```

```
sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1);  
end  
end  
size(sigman)  
size(eps)  
hold on  
plot(eps,sigman, 'g')
```