3.
4. II

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Análisis del Comportamiento de la Resistencia a la Compresión del Cemento Tipo I con la Adición de Limolita al 10%, con un Curado al Aire"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentada por:

Daniel Patricio Laverde Chica

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la vida y permitirme estar rodeado de personas especiales, a mi director de tesis en el Ing. Mauricio Cornejo por el apoyo brindado, a las personas que colaboraron de una u otra forma para la realización de este trabajo, a mis abuelitos por apoyarme en cada momento y especialmente a mi madre por darme la oportunidad de poder estudiar.

DEDICATORIA

ESTE TRABAJO REALIZADO CON ESFUERZO POR VARIOS MESES, ESTÁ DEDICADO A MIS PADRES, ABUELITOS, FAMILIARES Y AMIGOS.

3.

4. V

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

_____

Phd. Cecilia Paredes V.

DELEGADA DEL DECANO DE LA FIMCP

Ing. Mauricio Cornejo M.

DIRECTOR DE TESIS

PRESIDENTE

_____

Ing. Rodrigo Perugachi B.

VOCAL

3.

4. VI

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"

Daniel Patricio Laverde Chica

RESUMEN

El presente proyecto se encuentra enmarcado en el Tópico de Graduación "Simulación del comportamiento de materiales", y busca mejoras en las propiedades de un material compuesto debido a la exigencia en las características de los productos. En este caso, se examinará el efecto de la adición de un aditivo de Limolita al 10% en un cemento que será estudiado para tiempos de curado específicos.

Como objetivo general será el analizar el efecto que tiene la introducción de un material puzolánico como la Limolita y el tiempo de curado en la resistencia a la compresión del material compuesto como el cemento mediante el modelo teórico y el análisis estadístico.

Para cumplir nuestro objetivo se hará uso de la literatura técnica recopilada, para conocer antecedentes relacionados con el tema a tratar. Se realizará una simulación en lenguaje de programación MatLab que contemple el modelo matemático que

describa la resistencia a la compresión del cemento. Con esto, se compararán los resultados calculados con los obtenidos experimentalmente para ajustar el modelo y validarlo. La metodología a seguir se basará en un diseño experimental del cemento con el aditivo.

Luego de la experimentación se analizarán estadísticamente todos los datos y resultados, finalmente poder conocer si existe cambio o mejoras en las propiedades del material experimentado. Las pruebas ser realizarán en los laboratorios de la FIMCP en la ESPOL, en supervisión y guía de los profesores asignados para el tópico.

3.
4. 9

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN……..II

ÍNDICE GENERAL……IV

ABREVIATURAS……VII

SIMBOLOGÍA……..IX

ÍNDICE DE FIGURAS……..XI

ÍNDICE DE TABLAS……..XIV

INTRODUCCIÒN……1

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES……..4

1.1. Planteamiento del problema……..4

1.1.1. Justificación……
……..5

1.2. Objetivos……..7

3.

4. 10

1.2.1. Objetivo General……7

1.2.2. Objetivos específicos……8

1.3. M

etodología…… 10

1.4. Estructura de la tesis…… 12

CAPITULO 2

2. MARCO TEORICO……..14

2.1. Cemento……14

2.1.1. Proceso de Fabricación del cemento……...16

2.1.2. Tipos de cemento……22

2.2. Limolita……29

2.3.

Métodos de curado del cemento……30

2.4. Otras investigaciones relacionadas……36

CAPITULO 3

3. METODOLOGIA……41

3.1. Diseño Factorial……..41

3.2. Protocolo de experimentación……..44

3.3. Implementación del modelo matemático……63

3.
4. 11

3.3.1. Modelación en computadora……..68

CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS……74

4.1. Tabulación de Datos y Resultados……..74

4.2. Análisis de Resultados…….89

4.3. Identificación de Cambios de Propiedades……..102

4.4. Verificación del Modelo…….. 120

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES……127

5.1. Conclusiones……...127

5.2. Recomendaciones……..131

APENDICES

BIBLIOGRAFIA

ABREVIATURAS

A/C	Relación agua cemento
ASTM	American Society testing and Materials
CM	Material Compuesto
CME	Cuadrados medios del error
CMT	Cuadrados medios de los tratamientos
C_3A	aluminato tricálcico
β-C_2S	β-silicato dicálcico
C_3S	Silicato Tricálcico
^oC	Grados centígrados
ºF	Grados Farenheit
g	Gramos
GLD	Grados de libertad del denominador
h	Horas
HR	Humedad Relativa
HRB	Valor de dureza Rockwell B
in	pulgadas

IC	Intervalo de confianza
Kg	kilogramos
Kgf	Kilogramos fuerza
K-S	Kolmogorov-Smirnov
Lbf	libras fuerza
m	Metros
min	Minutos

mm	milímetros
m^2	metros cuadrados
m^3	Metros cúbicos
MPa	Mega pascales
N	Newton
N-R	Newton-Raphson
SCEf	Suma de los cuadrados del error (modelo completo)
SCEr	Suma de los cuadrados del error (modelo reducido)
%H2O	Porcentaje de agua
%cemI	Porcentaje de cemento Tipo I

SIMBOLOGIA

ε	deformación
L_f	longitud final expresada en mm
L_o	longitud inicial expresada en mm
M_0	Marca del dial o reloj comparador.
F	fuerza expresada en Newtons

F_0	Valor de la fuerza de, la máquina de compresión
σ	Valor del esfuerzo, expresado en MPa.
A	área, expresada en mm^2.
T	Valor de la temperatura ambiente, expresada en ºC
α	Intervalo de confianza para el error.
E	Módulo de elasticidad
λ	Magnitud de la deformación en la zona plástica.
	Delta de deformación
	Deformación plástica
	Valor del esfuerzo corrector en la iteración n+1
	Valor del esfuerzo en la iteración n
	Función de la fluencia corrector en la iteración n+1
	Valor del módulo plástico en la iteración n+1
	Delta de deformación en la zona plástica.
	Esfuerzo último
	Esfuerzo en la fluencia
a	Constante del material dependiente del esfuerzo último
m	Constante del Material relacionado con deformación plástica

	H_0	Hipótesis Nula
	H_a	Hipótesis alterna
μ		Media de los tratamientos.
	σ^2	Varianza
F		Estadístico de Fisher tabulado
F_o		Estadístico de Fisher calculado.
R^2		Correlación

ÍNDICE DE FIGURAS

Pag.

Figura 1.1 Metodología de la tesis……. 10
Figura 2.1 Trituración primaria y secundaria……..…….. 17
Figura 2.2 Molienda y homogenización……. 18
Figura 2.3 Calcinación…….…… 19
Figura 2.4 Molienda…….…… 20
Figura 2.5 Producción del cemento Portland…… 21
Figura 2.6 Curvas de resistencia a la compresión frente al tiempo de curado para morteros preparados …… 33
Figura 2.7 Relación agua cemento…… 34
Figura 2.8 Resistencia a la compresión del hormigón en función de A/C…… 35
Figura 2.9 Comparación de resistencias muestra/patrón…… 40
Figura 3.1 Pesaje y Trituradora de mandíbulas…… 47
Figura 3.2 Trituradora de Rodillos y Separador…… 47
Figura 3.3 Tamices y Tamizador Eléctrico…… 48

Figura 3.4 Molino de Discos…… 49

Figura 3.5 Molino de Bolas y Tamices…….. 50

Figura 3.6 Instrumento de medición de peso..…… 52

Figura 3.7 Moldes…….. 54

Figura 3.8 Máquinas para el ensayo…….. 55

Figura 3.9 Preparación de la Pasta…… 59

Figura 3.10 Curado y almacenamiento…… 60

Figura 3.11 Ensayo de Compresión…… 62

Figura 3.12 Distribución de las Resistencias……..63

Figura 3.13 Propiedad m del material……...71

Figura 3.14 Gráfica del esfuerzo vs. Deformación (modelo matemático). 73

Figura 4.1 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/10/7)……..78

Figura 4.2 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/10/14)……79

Figura 4.3 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/10/21)……80

Figura 4.4 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/10/28)……81

Figura 4.5 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/12.5/4)……..83

Figura 4.6 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/12.5/11)……84

Figura 4.7 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/12.5/18)……85

Figura 4.8 Gráfica Esfuerzo vs. Deformación (G3/12.5/25)……86

Figura 4.9 Gráfica Esfuerzo último vs. Curado – 10% Limolita……..88

Figura 4.10 Gráfica Esfuerzo último vs. Curado – 12.5% Limolita……89

Figura 4.11 Histograma – Normalidad de los datos al 10% limolita.....92

Figura 4.12 Gráfica de la distribución normal de los datos al 10%.....93

Figura 4.13 Datos ajustados a un modelo polinomial de tercer grado - 10%.....97

Figura 4.14 Histograma – Normalidad de los datos al 12.5 % limolita.....99

Figura 4.15 Gráfica de la distribución normal de los datos al 12.5%.....99

Figura 4.16 Datos ajustados a un modelo polinomial de tercer grado - 12.5%.....101

Figura 4.17 Ingreso de Datos al Programa……..105

Figura 4.18 Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje……..109

Figura 4.19 Esfuerzo de Ruptura vs. Días……..109

Figura 4.20 Gráfica de esfuerzos últimos, días y porcentajes de aditivos.111

Figura 4.21 Esfuerzo de Ruptura vs. Porcentaje (Validación)……..116

Figura 4.22 Esfuerzo de Ruptura vs. Días (Validación)……117

Figura 4.23 Gráfica de esfuerzos últimos, días y porcentajes de aditivos (validación)……..118

Figura 4.24 Gráfica global de esfuerzos últimos, días y porcentajes……..119

Figura 4.25 Validación del modelo a los 7 días..... 121

Figura 4.26 Validación del modelo a los 14 días…… 121

Figura 4.27 Validación del modelo a los 21 días..... 122

Figura 4.28 Validación del modelo a los 28 días..... 122

Figura 4.29 Validación del modelo a los 4 días..... 124

Figura 4.30 Validación del modelo a los 11 días..... 124

Figura 4.31 Validación del modelo a los 18 días..... 125

Figura 4.32 Validación del modelo a los 25 días..... 125

3.

4. 20

ÍNDICE DE TABLAS

Pag.

Tabla 1 Tipos de cemento…….. 23

Tabla 2 Prescripciones mecánicas de los cementos…….. 26

Tabla 3 Tipos de cementos mezclados…… 27

Tabla 4 Modelos para la determinación de RC a diferentes edades… 38

Tabla 5 Resistencias a la compresión simple…….. 39

Tabla 6 Porcentajes obtenidos en los distintos tamizados…… 51

Tabla 7 Variaciones permisibles para los moldes…….. 53

Tabla 8 Tabla de mezcla total…… 57

Tabla 9 Tolerancias permisibles en el tiempo de la prueba……. 61

Tabla 10 Temperatura y Humedad relativa – 10% Limolita…… 77

Tabla 11 Resistencia a los 7 días – 10% Limolita…… 78

Tabla 12 Resistencia a los 14 días – 10% Limolita…… 79

3.

4. 22

Tabla 13 Resistencia a los 21 días – 10% Limolita…… 80

Tabla 14 Resistencia a los 28 días – 10% Limolita…… 81

Tabla 15 Temperatura y Humedad relativa – 12.5% Limolita…… 82

Tabla 16 Resistencia a los 4 días – 12.5% Limolita…… 83

Tabla 17 Resistencia a los 11 días – 12.5% Limolita…….. 84

Tabla 18 Resistencia a los 18 días – 12.5% Limolita…….. 85

Tabla 19 Resistencia a los 25 días – 12.5% Limolita…….. 86

Tabla 20 Resistencia última y módulo de Elasticidad – 10% Limolita…. 87

Tabla 21 Resistencia última y módulo de Elasticidad – 12.5% Limolita. 88

Tabla 22 Suma de cuadrados para identificar fuentes de variación…….94

Tabla 23 Análisis de Varianza – 10%…….. 95

Tabla 24 Análisis de Varianza con Excel – 10%…….. 96

Tabla 25 Errores estándar e intervalos de confianza – 10%…….. 96

Tabla 26 Análisis de Varianza con Excel – 12.5%…… 100

Tabla 27 Errores estándar e intervalos de confianza – 12.5%…….. 101

Tabla 28 Datos grupales para Análisis Estadístico…….. 102

Tabla 29 Distribución Normal de los Datos…….. 105

Tabla 30 Medias no Ponderadas…….. 106

Tabla 31 Tabla de Anova para datos grupales…… 107

Tabla 32 Prueba de Tukey para comparar entre Tratamientos……. 108

Tabla 33 Intervalos de confianza de esfuerzo de ruptura a distintos días…….. 110

Tabla 34 Datos grupales para Análisis Estadístico (Validación)…… 112

Tabla 35 Distribución Normal de los Datos (Validación)..... 113

Tabla 36 Medias no Ponderadas (Validación)..... 113

Tabla 37 Tabla de Anova para datos grupales (Validación)..... 114

Tabla 38 Prueba de Tukey para comparar entre Tratamientos (Validación)..... 115

Tabla 39 Intervalos de confianza de esfuerzo de ruptura a distintos días (Validación)..... 117

Tabla 40 Datos de a y m para ajuste del modelo – 10% limolita..... 123

Tabla 41 Datos de a y m para ajuste del modelo – 12.5% limolita..... 126

INTRODUCCIÓN

Hoy en día el cemento es uno de los productos más usados en el mercado y en si el concreto es de uso común, o convencional. El cemento es un material compuesto, de varios. Un cemento puede ser un compuesto químico único, pero la más de las veces es una mezcla.

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

El día a día, y el avance tecnológico, requieren de construcciones y edificaciones de mayor volumen con gran resistencia, y con materiales más económicos. La clasificación de un cemento puede realizarse en función de, la naturaleza de sus componentes, su categoría resistente, o, en su caso, por sus características especiales, por lo que las investigaciones llevan a la adición de materiales alternos que mejoren las propiedades del cemento.

Una de las características importantes, en la resistencia del cemento es, el tiempo de curado, cabe diferenciar dos términos muy importantes, fraguado y endurecimiento. El fraguado y el endurecimiento no dependen del secado, ni de procesos externos, como la reacción con el dióxido de carbono de la atmósfera. Ocurren no solo si la pasta se deja al aire, sino también cuando se la sumerge en agua. Con un buen cemento hidráulico la resistencia mecánica es previsible y su desarrollo es uniforme y relativamente rápido. El producto tiene baja permeabilidad al agua y es casi insoluble en ella. En condiciones normales, por tanto, el agua no destruye el material endurecido

El curado significa dejar la pasta en reposo mientras se producen el fraguado y endurecimiento que pueden verificarse en diversas condiciones: el aire, bajo el agua o en vapor saturado. Con el curado existe un mantenimiento del contenido de

humedad y una temperatura, de manera que se puedan desarrollar las propiedades deseadas

En la actualidad, la investigación en ciencia e ingeniería de materiales ha traspasado las fronteras de los países industrializados alcanzando países en vías de desarrollo como el nuestro, y además proyectándose a ser un puntal para su desarrollo

Investigaciones, de gran índole han sido desarrolladas, en base al tema a tratar, con resultados de distintos tipos, y variedades de métodos utilizados. . Encuadrados en esta realidad, el mejoramiento o la creación de productos es un reto tecnológico dentro del marco de la competitividad global al que deben enfrentarse cotidianamente los países en general, y las empresas en particular.

Es por eso, este trabajo de investigación, se basa en la experimentación, y estudio de un material compuesto, este es el Cemento Tipo I. Pero esto, que sólo representa la previsión de emplear el material potencialmente adecuado, no basta para obtener estructuras resistentes y durables, pues requiere conjugarse con el cumplimiento de previsiones igualmente eficaces en cuanto al diseño, especificación, construcción y mantenimiento de las propias estructuras. En la investigación se utilizó la limolita como adición en la fabricación del cemento puzolánico, con el fin de mejorar sus propiedades, y obtener un cemento igualmente resistente y más económico. El objetivo es desarrollar la aplicación

de la limolita como un componente básico de las mezclas de hormigones y morteros, demostrado mediante ensayos y pruebas.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

Planteamiento del Problema

La industria de cemento se encuentra considerada, dentro de las ramas más productivas de nuestro país, considerada como una de las más grandes consumidoras de energía en todas sus formas, incidiendo en altos consumos como uno de los componentes fundamentales en el costo de fabricación del producto.

Hoy en día, en nuestro país la demanda de mejores requerimientos de materiales en el ámbito de la construcción, pone a prueba a las industrias, especializadas en proveer de dichos materiales. En general la demanda se incrementa conforme aumenta la población nacional, teniendo en cuenta que la industria de producción de cemento se encuentra casi monopolizada. En la actualidad no existe un material alternativo al cemento que pueda ser utilizado como material de bajo costo en construcciones de gran volumen. La temática de la presente tesis se basa en la experimentación y el análisis de una posible mejora en la resistencia uniaxial a la compresión, la hidratación y el tiempo de fraguado de un material compuesto como el hormigón, mediante la adición de un tipo de aditivo, a un porcentaje determinado y con un medio de curado específico el cual puede ser agua o aire.

Con el cual se puede lograr mejoras a diversos problemas y además se pueden mejorar las propiedades tecnológicas de construcción del hormigón, teniendo en cuenta que el concreto es el material que ha tenido el mayor uso en la construcción de edificios e infraestructura en la historia de la civilización.

Justificación del Problema

En la actualidad, la investigación en ciencia e ingeniería de materiales ha traspasado las fronteras de los países industrializados alcanzando países en vías de desarrollo como el nuestro, y además proyectándose a ser un puntal para su desarrollo. Encuadrados en esta realidad, el mejoramiento o la creación de productos es un reto tecnológico dentro del marco de la competitividad global al que deben enfrentarse cotidianamente los países en general, y las empresas en particular. La confluencia del interés científico y tecnológico con el interés social y de desarrollo convierte al estudio de los materiales de construcción en una rama interesante de estudio y profundización del conocimiento.

Los medios para realizar el estudio de los materiales es uno de los aspectos más importantes a considerarse. La aplicación de métodos numéricos a la resolución de problemas vinculados a las propiedades de respuesta de un material, al variar su composición, es uno de los principales puntos a tratar en la presente tesis.

La presente temática se impulsa por la metodología científico-tecnológica, con herramientas computacionales y de laboratorio. Con este estudio se busca encontrar un material, en este caso tiene como base el cemento, más la adición de un aditivo en cierto porcentaje, que mientras este expuesto a distintos tiempos de curado, presente una mejora en las propiedades mecánicas. Para mi caso en particular se designa realizar una mezcla con una pasta de cemento más la adición de aditivo específicamente será limolita a un 10%, esto porcentaje será analizado a diferentes tiempos de fraguado comparando la resistencia a la compresión, con respecto al tipo de curado será en aire.

Objetivos

Objetivo General

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

Comparar los datos obtenidos de resistencia a la compresión durante los diferentes ensayos realizados en Laboratorio con el modelo matemático obtenido por medio de la computadora y observar si ha mejorado la resistencia a la compresión uniaxial de un material compuesto como el cemento de manera significativa con respecto al cemento Tipo I. Para dicho efecto se utilizará una adición de 10% de Limolita.

Objetivos Específicos

Identificar las propiedades del cemento, las clases de cemento que existen y principalmente el cemento tipo I, a su vez conocer sobre los aditivos que se le agrega al cemento poniendo énfasis en la limolita.

Realizar un diseño del experimento, basado en la mezcla entre cemento y aglomerante, añadiendo un 10% de limolita, esto será realizado en prismas de 50 mm3, para cada tiempo de curado se realizaran 3 probetas, dando un total de 15 probetas.

Realizar los ensayos de compresión respectivos a cada probeta dependiendo del tiempo de curado de las mismas, para esto se realizaran 3 pruebas para cada tiempo de curado los cuales serán de 7,14, 21 y 28 días respectivamente, y obtener datos experimentales, también se realizará una mezcla de 12,5% de limolita, realizando los ensayos de compresión a 4, 11, 18 y 25 días, para validación.

Analizar los datos obtenidos mediante la experimentación, utilizando métodos estadísticos, y analizarlos mediante la utilización de un programa computacional, para este fin se usará STATISTICA y con esto modelar el comportamiento del material compuesto asignado, mediante métodos numéricos, a su vez analizar los resultados que nos dan los distintos tratamientos como es la resistencia a la compresión, la velocidad de hidratación, en función del tiempo de fraguado y compararlos con los resultados a otros porcentajes establecidos, incluyendo la referencia. Identificar cambios significativos en las propiedades del compuesto

que permitan concluir con éxito el desarrollo de la experimentación a desarrollar y el análisis minucioso que se implementará.

Metodología

La figura 1.1, muestra la metodología planteada para la presente tesis, la cual sigue un esquema describiendo en orden cada uno de los puntos para el estudio progresivo de los objetivos planteados.

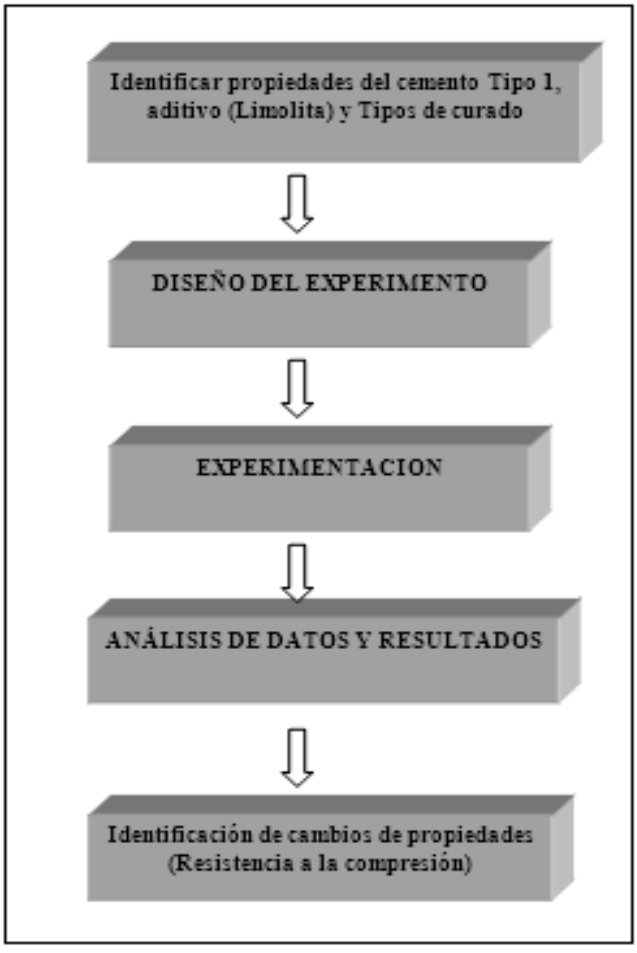


FIGURA 1.1 METODOLOGÍA DE LA TESIS

Para el primer paso, referido a la identificación de propiedades del cemento tipo I, que en este caso es el material que se va a utilizar en nuestro experimento, es la base de todos los análisis y se deben conocer todas las propiedades que presenta tal compuesto, tanto físicas como químicas.

.

Viéndolo desde un punto de vista macroscópico. Junto con esto se debe conocer las propiedades del aditivo a utilizar en mi caso la limolita, conociendo también sus propiedades, y el tipo de curado a utilizar.

Una vez identificados y conociendo las propiedades de los materiales a usar en nuestro compuesto, procedemos a realizar el diseño del experimento, en el cual se consideran las variables dependientes e independientes que afectan las propiedades en la formulación.

Una vez conocidos todos los datos y variables, se procederá a realizar las probetas correspondientes y los respectivos ensayos, a distintos tiempos de curado ya establecidos para el desarrollo del tópico, estos son (7,14, 21 y 28 días juntamente con la validación).

Una vez realizados los debidos experimentos, se tomarán los datos obtenidos y se analizaran estadísticamente, y se modelara el compuesto por medio de métodos numéricos y con la ayuda de programas computacionales que permitan simular o aproximar el comportamiento del material.

Finalmente con el respectivo análisis ya establecido y tendiendo conclusiones claras del experimento se conocerán si existen cambios en las propiedades del compuesto que sean claramente significativas y que cumplan con los objetivos planteados al inicio.

Estructura de la tesis

El capítulo 1 se llama “Generalidades”, en este se encuentra estructurado, todo el planteamiento del problema, con su justificación, los objetivos planteados, tanto el general, como los específicos, que a su vez son basados en la metodología a seguir.

El capitulo 2 se llama “Marco Teórico”, este lleva todo la teoría relacionada con el desarrollo de la tesis, y se definirá todo lo relacionado con el cemento, los aditivos a usar, métodos de curado, etc. Y todo lo relacionado con otras investigaciones relacionadas al tema.

El capítulo 3 se llama “Metodología”, aquí se detallará, todo lo relacionada a los métodos a utilizar para el desarrollo estadístico y tratamiento del problema, a su vez se detallará todo el proceso de la experimentación que viene a ser el protocolo de investigación, a su vez se desarrollará un diseño de un modelo matemático que se asemeje al comportamiento de nuestro experimento y se modelará por computadora.

El capítulo 4 se llama “Resultados y Análisis”, en este se tabularán todos los datos obtenidos luego de ser analizados, y se compararán los valores obtenidos para ver si el experimento es significativo en cambios de propiedades, verificando a su vez el modelo.

El capítulo 5 se llama “Conclusiones y recomendaciones”, aquí finalmente se concluye en base a los objetivos planteados anteriormente, y se verificara la validez del experimento, a su vez se detallaran recomendaciones futuras de acuerdo a la investigación.

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cemento

En el sentido más amplio la palabra cemento indica cualquier clase de adhesivo. En construcción e ingeniería civil, indica una sustancia que puede emplearse para unir arena y roca machacada u otros tipos de áridos y formar una masa sólida. De esta manera, se originan materiales como el hormigón, los morteros y diferentes clases de productos derivados del cemento. Un cemento puede ser un compuesto químico único, pero la más de las veces es una mezcla [1].

El cemento "Portland" tiene sus orígenes en la cal u óxido de calcio, a partir del cual y luego de cientos de años de estudios empíricos y científicos, se llega a lo que hoy se conoce como cemento. El uso del cemento Portland continuó extendiéndose hasta convertirse en el material de construcción más utilizado en el mundo. Hoy en día los cementos más importantes son cementos hidráulicos, entre los cuales el cemento Pórtland constituye el ejemplo más familiar. Cuando se le amasa con agua y un

árido, fragua y se endurece a causa de las reacciones químicas que producen entre el agua y los compuestos presentes en el cemento [1,2].

Las propiedades del cemento, además de los componentes principales (Ca y SiO) y de los secundarios (Al O ,FeO y SO Ca, 2H O-yeso-) en el cemento hay otras sustancias en pequeña proporción, como son: alcalis, que suelen provenir de las impurezas feldespáticas de las arcillas; MgO, aportado por arcilla o la caliza, y peligroso por encima de cierto límite (legalmente un 5%) por la lentitud con que se hidrata la magnesia calcinada y la dilatación que la acompaña [2].

La clasificación de un cemento puede realizarse en función de:

- **La naturaleza de sus componentes.**
- **Su categoría resistente.**
- **O, en su caso, por sus características especiales [3].**

El fraguado y el endurecimiento no dependen del secado, ni de procesos externos, como la reacción con el dióxido de carbono de la atmósfera. Ocurren no solo si la pasta se deja al aire, sino también cuando se la sumerge en agua. Con un buen cemento hidráulico la resistencia mecánica es previsible y su desarrollo es uniforme y relativamente rápido. El producto tiene baja permeabilidad al agua y es casi insoluble en ella. En condiciones normales, por tanto, el agua no destruye el material endurecido [1].

2.1.1. Proceso de Fabricación del Cemento

Las materias primas fundamentales son las rocas calcáreas y las arcillas. Estas que se extraen de yacimientos a cielo abierto. La otra materia prima que se utiliza es el yeso, que se incorpora en el

proceso de la molienda, para regular el tiempo de fraguado. El proceso consiste en tomar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas intensivamente, de manera que el compuesto de la caliza (CaO) se vincule íntima y homogéneamente con los compuestos de la arcilla (SiO_2, Al_2O_3 y Fe_2O_3). El producto resultante denominado polvo crudo, ingresa al horno y egresa como clinker. El proceso se completa con la molienda conjunta del clinker y yeso, obteniendo el cemento portland [2].

Trituración primaria. Los bloques de rocas calcáreas y las arcillas provenientes de las canteras, ingresan a la trituradora primaria quedando reducidas a tamaños inferiores a los 10 cm.

Trituración secundaria: Ingresa el material proveniente de la trituradora primaria y sale con tamaños máximos inferiores a 2,5 cm. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (15 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm (3/4 pulg.) para almacenarlas [2,3].

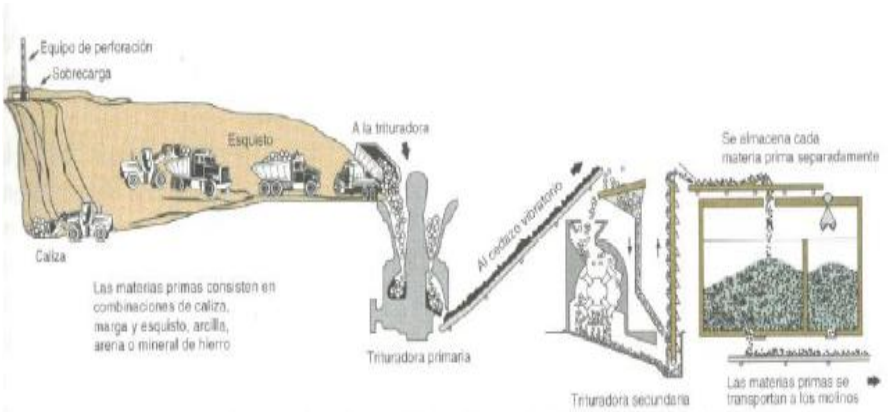


FIG 2.1 TRITURACION PRIMARIA Y SECUNDARIA
Fuente: Carrasco Fernanda, Materiales Cementicios, 2007

Molienda y homogenización: El material resultante de la trituradora secundaria ingresa a un molino, resultando un producto impalpable, denominado polvo crudo. Con el fin de alcanzar la unión íntima de los compuestos, se somete al polvo crudo a un mezclado intensivo, por medio de ciclones de aire. En el molino de cilindros combina la trituración, molienda, secado y clasificación [4].

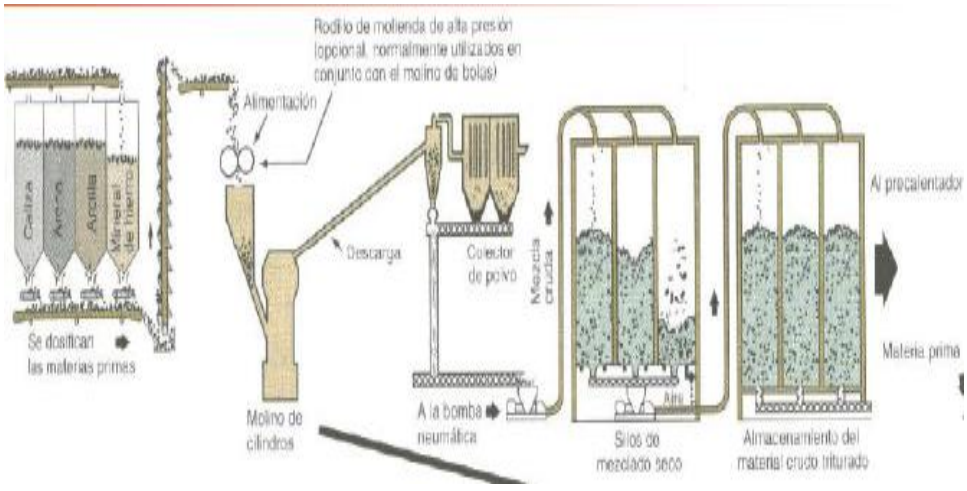


FIG 2.2 MOLIENDA Y HOMOGENIZACION
Fuente: Carrasco Fernanda, Materiales Cementicios, 2007

Calcinación: El polvo crudo ingresa al horno, elevándose la temperatura hasta alcanzar los 1450 ºC, en donde se produce el denominado clinker. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento [2,4].

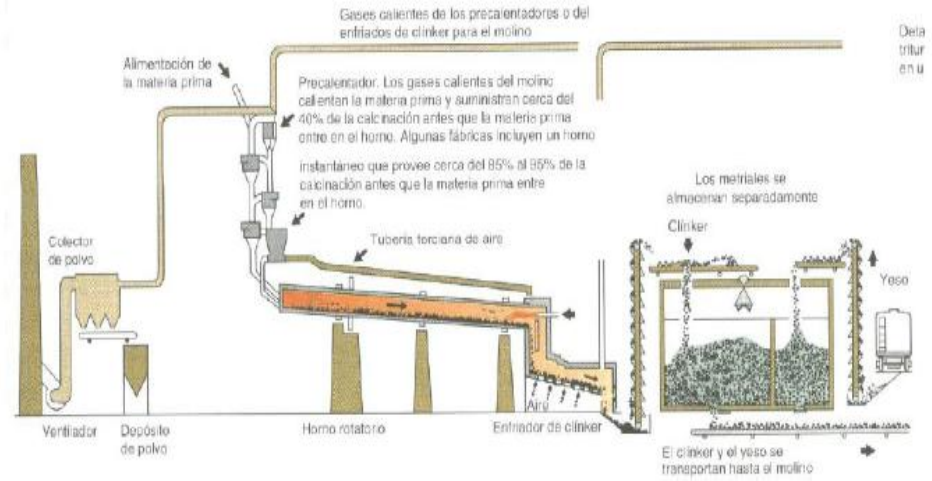


FIG 2.3 CALCINACION
Fuente: Carrasco Fernanda, Materiales Cementicios, 2007

Molienda: Finalmente, el clínker conjuntamente con el yeso se muele hasta obtener el Cemento Portland [2].

Se utilizan dos métodos de manufactura: los procesos mojado y seco. El material sólido después de un secado abrumador, es reducido a un estado fino de división en un tubo mojado o molino de pelota y pasa por un slurry a través de un clasificador de balón o colador. El slurry es bombeado a tanques correctivos donde unas

aspas hacen una mezclan homogénea y permite los ajustes finales en la composición.

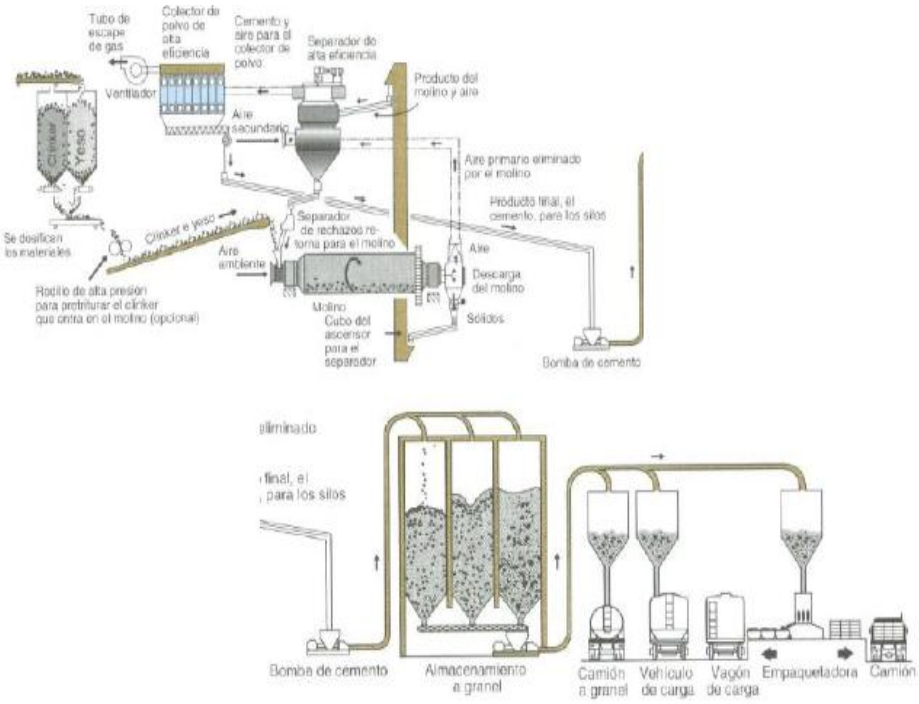


FIG 2.4 MOLIENDA
Fuente: Carrasco Fernanda, Materiales Cementicios, 2007

Los hornos del proceso en seco pueden ser de 150 ft y en el proceso mojado los hornos son de 300 a 500 ft, con esto vemos que no son hornos muy comunes. El diámetro interno usualmente es de 8 a 15 ft y tienen una rotación de ½ a 2 rpm dependiendo del tamaño; están un poco inclinados para que los materiales alimentados en la parte superior viajen lentamente a la parte baja tomando de 2 a 3 hr.

A continuación se muestra un diagrama esquemático de los pasos para la manufactura del Cemento Pórtland

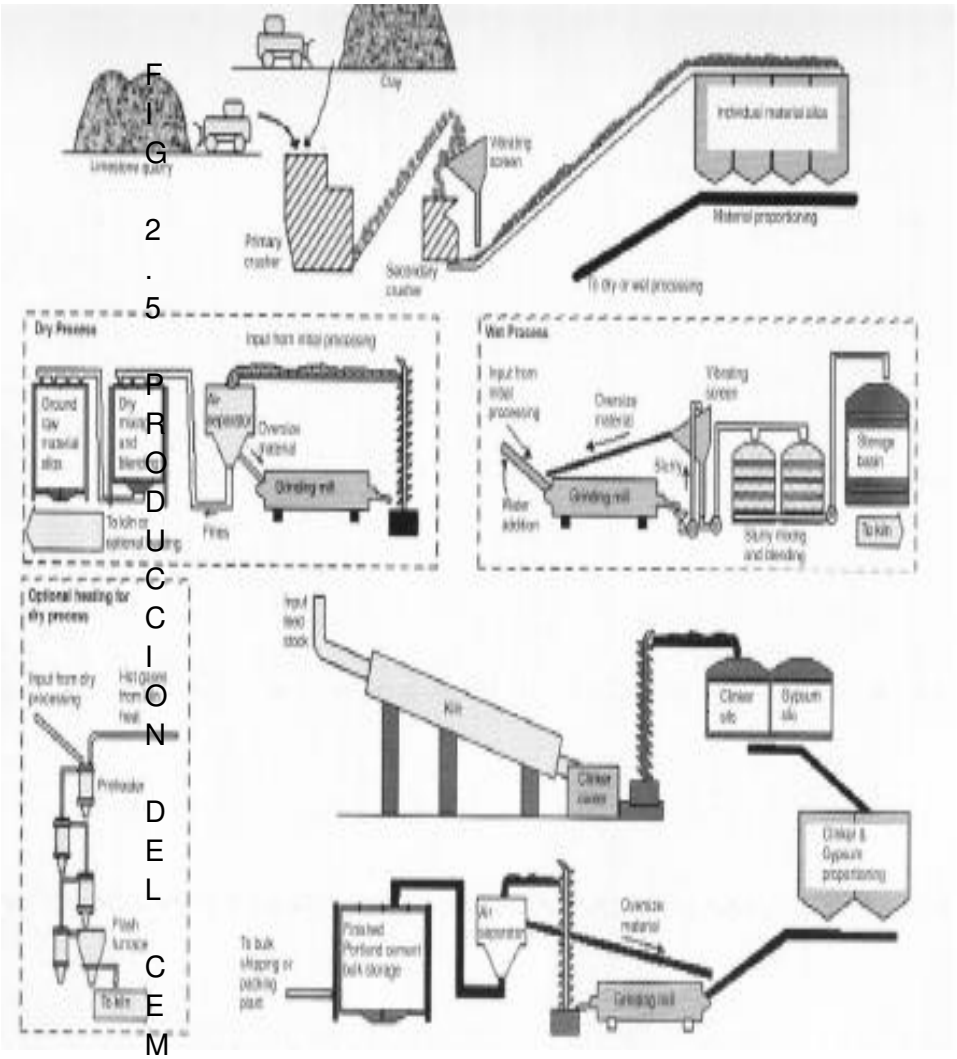


FIG 2.5 PRODUCCION DEL CEMENTO PORTLAND

Fuente: Anónimo, Cemento Pórtland.

2.1.1. Tipos de Cemento

El cemento Pórtland, es con diferencia el más importante en lo que se refiere a la cantidad producida. El clinker contiene cuatro fases principales: silicato tricálcico (C_3S), β-silicato dicálcico (β-C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y solución sólida de ferrito (con composición comprendida aproximadamente entre C_2F y C_6A_2F, y que se acerca con frecuencia a C_4AF [1].

En la mayoría de los países en que se fabrican el cemento Pórtland, existen varios tipos con diferentes características. Las variables más importantes son la velocidad de endurecimiento, la velocidad de desprendimiento de calor y cantidad de calor desprendida durante la hidratación y la resistencia del cemento endurecido al ataque por soluciones de sulfatos. Estas características están influidas por las proporciones relativas de las cuatro fases anteriores mencionadas y por los factores físicos como, la finura alcanzada en la molienda.

TABLA 1

TIPOS DE CEMENTO

Tipo	Nombre	Aplicaciones
I, IA	Normal	Cuando no se necesitan propiedades especiales
II, IIA	Resistencia moderada a los sulfatos	
III, IIIA	Alta resistencia inicial	Construcciones Fast-track, reducción del tiempo de curado en climas fríos
IV	Bajo calor de hidratación	se utiliza en el hormigonado de grandes volúmenes
V	Resistencia alta a	

	los sulfatos	

Tipo I

Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, edificios, estructuras, elementos prefabricados [5].

Tipo II

El cemento Pórtland tipo II se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje, siempre y cuando las concentraciones de sulfatos sean ligeramente superiores a lo normal, pero sin llegar a ser severas (En caso de presentarse concentraciones mayores se recomienda el uso de cemento Tipo V, el cual es altamente resistente al ataque de los sulfatos).

Tipo III

Este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Su utilización es para requerimientos particulares, por ejemplo cuando una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas.

Tipo IV

El cemento Pórtland tipo IV se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación sea mantenido a un mínimo, y no tienen que producirse dilataciones durante el fraguado. El desarrollo de resistencias de este tipo de cemento es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento. Los usos y aplicaciones del cemento tipo IV están dirigidos a obras con estructuras de tipo masivo, como por ejemplo grandes presas.

La tabla 2 muestra las especificaciones que deben cumplir los cementos relativos a las características mecánicas, según resistencia y clase.

El número que indica la clase corresponde a la resistencia mínima a compresión a los 28 días, en newtons por milímetro cuadrado (N/mm2), excepto para el tipo V que se refiere a la edad de 90 días.

Los cementos con especificaciones de resistencia a 2 días llevan añadida la letra A, excepto el tipo IV y los tipos I a IV de la clase 55.

TABLA 2

PRESCRIPCIONES MECANICAS DE LOS CEMENTOS [6]

Tipo	**Resistencia**	**Clase**	**resistencia a la compresión**				
			Mínima a 2 días	**Mínima a 7 días**	**Mínima a 28 días**	**Mínima a 28 días**	**Mínima a 90 días**
I a IV	Muy alta	55 A	30	-	55	-	-
		55	25	-			

	Alta	45 A	20	-	45	65	-
		45	-	30			
	Media	35 A	13,5	-	35	55	-
		35	-	20			
	Baja	25	-	15	25	-	-
V	Media	35	Aunque no se exigen valores a 7 y 28 días el fabricante suministra la curva de endurecimiento a efecto de control de obra				35
	Baja	25					25
VI	Muy alta	55	45	-	55	-	-

Cementos Hidráulicos Mezclados

Estos cementos han sido desarrollados debido al interés de la industria por la conservación de la energía y la economía en su producción. La norma ASTM C 595 reconoce la existencia de cinco tipos de cementos mezclados:

TABLA 3

TIPOS DE CEMENTOS MEZCLADOS, ASTM C 595 [6]

Tipo de cemento	***Aplicaciones***
Cemento Portland de escoria de alto horno - Tipo IS.	Construcciones de concreto en general
Cemento Portland puzolana - Tipo IP y Tipo P.	Construcciones en general y el tipo P en construcciones no sean necesarias resistencia altas a edades tempranas.
Cemento de escoria - Tipo S.	Se usa comúnmente donde se requieren resistencias inferiores

Cemento Pórtland modificado con puzolana - Tipo I (PM).	Todo tipo de construcciones de cemento
Cemento Pórtland modificado con escoria - Tipo I (SM).	Todo tipo de construcciones de cemento

Tipo IS. Para producir este tipo de cemento, la escoria del alto horno se muele junto con el clinker de cemento Pórtland, o puede también molerse en forma separada y luego mezclarse con el cemento. El contenido de escoria varía entre el 25 y el 70% en peso.

Tipo IP y Tipo P. El tipo P se utiliza normalmente en estructuras masivas, como estribos, presas y pilas de cimentación. El contenido de puzolana de estos cementos se sitúa entre el 15 y el 40 % en peso.

Tipo S. El contenido mínimo de escoria es del 70% en peso del cemento de escoria

Tipo I (PM). El contenido de puzolana es menor del 15% en peso del cemento terminado.

Tipo I (SM). El contenido máximo de escoria es del 25% del peso del cemento de escoria.

Además, en este tipo de cementos, la norma establece como requisito opcional para los cementos tipo I (SM), I (PM), IS, IP y los denominados con subfijo MS o MH lo siguiente: moderada resistencia a los sulfatos y/o moderado calor de hidratación y en caso del tipo P y PA, moderada resistencia a los sulfatos y/o bajo calor de hidratación. La Norma ASTM C 1157 establece los requisitos de durabilidad para los cementos hidráulicos cuando se utilicen en aplicaciones especiales o para uso general.

2.2. Limolita

La limolita en el cemento es un aditivo que se le agrega luego de ser manufacturado. La limolita es una roca sedimentaria que tiene una composición intermedia en tamaño de grano entre piedras de arena y las areniscas finas y lutitas [7].

Este tipo de rocas proceden de la compactación y cementación de partículas detríticas de tamaño limo (<1/16mm). Como su nombre indica, se compone principalmente (más de 2 / 3) de partículas de tamaño limo, que se define como granos entre 62,5 y 3,9 micrómetros. Las limolitas difieren significativamente de areniscas debido a sus poros más pequeños y una mayor propensión a que contiene una fracción importante de arcilla. La limolita carece de laminaciones, puede contener concreciones. La estratificación es probable que sea oscuro y que tiende a la meteorología en ángulos oblicuos que no guardan relación.

Ya que se trata de un aditivo que agregaremos a la mezcla del cemento también conoceremos sobre los aditivos. En general donde se utilizan la mayor cantidad de aditivos es en el hormigón, para mejorar las propiedades físicas del mismo y acelerar procesos.

Aditivos son materiales distintos del Agua, los agregados y el cemento hidráulico que se utilizan como ingredientes en concretos y morteros y se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. En términos de su función estos pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes. Hay algunos otros, como los inclusores de aire, las puzolanas, los colorantes, etc en una proporción no superior al 5% del peso del cemento [8].

2.3. Métodos de Curado del Cemento

El curado significa dejar la pasta en reposo mientras se producen el fraguado y endurecimiento que pueden verificarse en diversas condiciones: el aire, bajo el agua o en vapor saturado. Con el curado existe un mantenimiento del contenido de humedad y una temperatura, de manera que se puedan desarrollar las propiedades deseadas [1,9].

Todo concreto debe curarse para obtener la máxima resistencia. El concreto curado correctamente es mejor desde todo punto de vista: se contrae menos, se agrieta menos y desprende menos polvo. Es más fuerte, más durable y tiene mayor resistencia al desgaste superficial [10].

Al mezclar cemento Portland con agua, se lleva a caso la reacción química denominada hidratación. El grado hasta el cual esta reacción se llegue a completar, influye en la resistencia, la durabilidad y en la densidad del concreto [11].

Los tipos de curado que existen son [9]:

Curado adiabático. En este tipo de curado hay un mantenimiento de condiciones adiabáticas en el hormigón o mortero durante el período de curado.

Curado al vapor. Este es un tipo de curado que se da al hormigón, mortero o pasta cementicia en vapor de agua a presión atmosférica o superior y temperaturas entre alrededor de 100 y alrededor de 420ºF (40 y 215ºC).

Curado al vapor a presión atmosférica. Este tipo de curado al vapor utilizado para productos de hormigón o cemento, realizado a presión atmosférica, generalmente a una temperatura ambiente máxima comprendida entre 100 y 200 ºF (40 – 95 ºC).

Curado en aire húmedo. Este tipo de curado se lo realiza en ambientes con una humedad relativa no menor que 95 por ciento, a una presión atmosférica y normalmente a una temperatura próxima a los 73 ºF (22.8 º C).

Curado normal. Este es un tipo de curado en el cual hay exposición de probetas de ensayo a condiciones específicas de temperatura y humedad.

En el curado un término necesario de conocer es el fraguado que es el espesamiento inicial, que sucede normalmente en pocas horas, este es un fenómeno en que la pasta de cemento se rigidiza hasta que cambia de un estado plástico a sólido. Es diferente el fraguado al endurecimiento, en el endurecimiento la pasta adquiere resistencia, en el fraguado no. Las reacciones que provocan el fraguado y el endurecimiento se describen conjuntamente como reacciones de hidratación [12].

Las pastas preparadas con un cemento y agua, en ausencia de árido se llaman morteros. Las determinaciones físicas o mecánicas, tales como resistencia, se verifican normalmente en presencia de un árido porque dichas determinaciones pueden conducir a resultados engañosos trabajando con morteros [1].

El efecto de la resistencia a la compresión, se logra dependiendo del tiempo de curado de un cemento. La siguiente figura muestra la resistencia a la compresión frente al tiempo de curado para morteros preparados. En relación 1:3, con dos cementos Portland diferentes. A = 70% C3S, 10% C2S. B = 30% C3S, 50% C2S

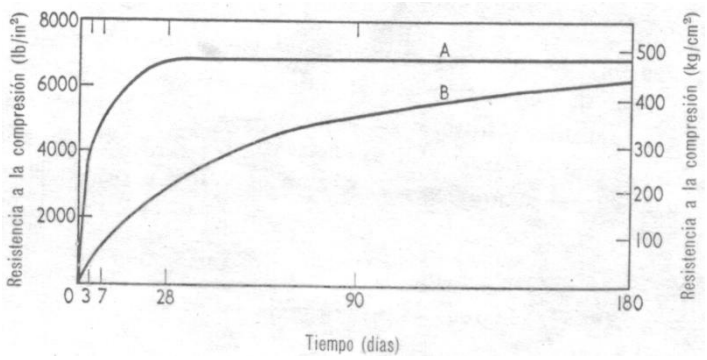


FIG 2.6 CURVAS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION FRENTE AL TIEMPO DE CURADO PARA MORTEROS PREPARADOS

Fuente: Taylor H, La química de los Cementos, 2005

Cuando se realiza el curado se debe considerar la Influencia de la relación agua/cemento. En la hidratación se requiere apenas de 0.22 a 0.25 kg de agua por kilo de cemento, se debe usar más agua para que la mezcla sea manejable, el exceso de agua añadido al evaporarse crean vacios capilares, los vacios capilares aumentan la porosidad y la permeabilidad del hormigón y reducen su resistencia.

La siguiente figura muestra la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión obtenida dependiendo de esta relación.

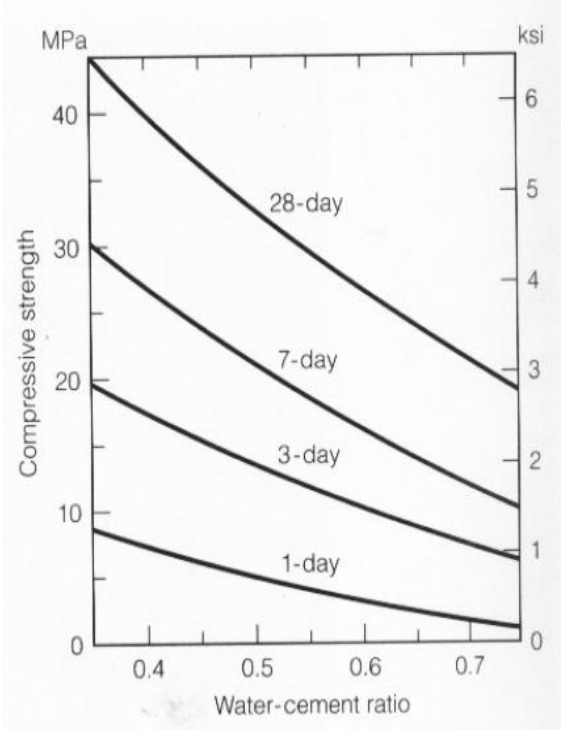


FIG 2.7 RELACIÓN AGUA – CEMENTO

Fuente: INCI 4035, Cemento Pórtland, 2008

Hay que añadir al hormigón armado un factor agua-cemento de A/C = 0.5 ÷ 0.6. El exceso de agua se evapora luego casi totalmente, dejando poros con agua, que disminuyen la resistencia**.** Muchos casos de resistencia aminorada se deben a añadidos de agua excesivos. La velocidad y el grado de endurecimiento dependen de la clase del cemento, del añadido de

agua, así como también de la humedad y la temperatura ambientes. En condiciones normales, el endurecimiento de los cementos es tanto más rápido cuanto mayor es su resistencia inicial, para morteros después de 3 días, para hormigón después de 7 días [13].

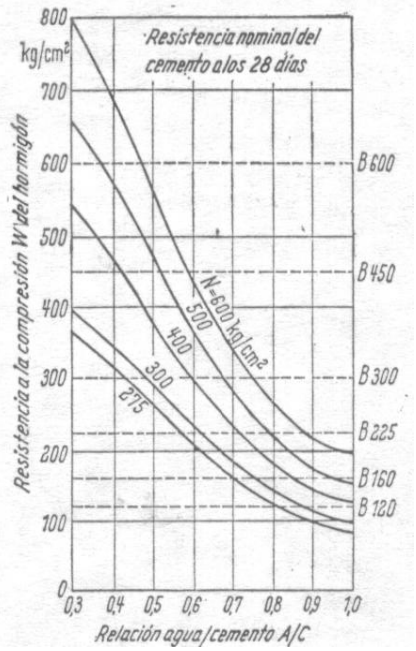


FIG 2.8 RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL HORMIGON EN FUNCIÓN DE A/C

Fuente: Dr. Ing. Gotthard Franz, Tratado del hormigón armado, 1970

2.5. Otras Investigaciones Relacionadas

Se han realizado varias investigaciones relacionadas con el presente tema, una de ellas es el uso de modelos matemáticos en la composición de un material compuesto (CM). En el presente tema se trata el uso de la modelización de una mezcla en proporción de un nuevo material

compuesto (CM) en base de utilización combinada de subproductos industriales secundarios [14].

La investigación muestra resultados de la investigación, cuantitativos influyentes del CM, sobre las propiedades mecánicas, en un año de endurecimiento. Morteros fueron preparados con cemento / agregado en proporción de 1:3 y agua / cemento en proporción de 0,50. El aditivo activo es un producto residual de la cal de los productores de la industria, con alto contenido de CaO 66%. En esta investigación las muestras fueron prismas con tamaños 4x4x16 cm, cabe recalcar que no es la norma a que se utilizará en mi investigación. Después de despojar a la edad de 24 h, los especímenes fueron curados en agua a una temperatura 20±3ºC hasta que se obtenga la correspondiente edad de los ensayos. En esta investigación se, escogieron varias variables como parámetros, por ejemplo, el porcentaje de de cemento portland (X1), porcentaje de aditivo activo (X2), y la inclusión de un árido (X3), esta tercera variable, no incluye en mi investigación. Los límites de variación de estos tres factores se determinaron sobre la base de exámenes preliminares experimentales, X1-varía de 20% a 25%, con el fin de obtener la más alta resistencia a la compresión. X2-varía entre el 5% y el 15%, teniendo en cuenta el mecanismo de funcionamiento del nuevo aditivo. X3-varía de 55% a 75%. En esta investigación, se calcularon ecuaciones para la determinación de la resistencia a la compresión Rc =(X1, X2, X3) está determinada como un segundo orden polinomial por la selección de las edades.

$$R_c = b_0 + \Sigma b_i X_i + \Sigma b_{ii} X_i^2 + \Sigma b_{ij} X_i X_j$$

Donde i = (1, 2, 3), j = (1, 2, 3), b0, bi, bii y bij son los coeficientes de regresión. Se calcula utilizando una regresión lineal múltiple usando Excel.

Los modelos polinomiales de los esfuerzos de compresión de los materiales compuestos están dados en la (Tabla 4). El análisis muestra que el valor de los coeficientes bij es insignificante y puede ser desconsiderado. Esto no afecta significativamente el error estándar y el coeficiente de determinación.

TABLA 4

MODELOS PARA LA DETERMINACION DE Rc A DIFERENTES EDADES (14)

Equation for the compressive strength R_c (MPa) for X_1 (%), X_2 (%), and X_3 (%)	Determined coefficient R^2	Standard error (MPa)
$R_c^1 = -173.9 + 11.83X_1 + 1.354X_2 + 1.237X_3 - 0.255X_1^2 - 0.0611X_2^2 - 0.00994X_3^2$	.981	0.25
$R_c^7 = -569.2 + 35.29X_1 + 3.848X_2 + 5.222X_3 - 0.761X_1^2 - 0.171X_2^2 - 0.0411X_3^2$	.972	0.91
$R_c^{28} = -753.5 + 51.38X_1 + 5.454X_2 + 5.208X_3 - 1.108\ X_1^2\ 0.243X_2^2 - 0.0409X_3^2$	.982	0.97
$R_c^{180} = -816.2 + 59.15X_1 + 6.468X_2 + 4.392X_3 - 1.275X_1^2 - 0.293X_2^2 - 0.0350X_3^2$	.984	1.05
$R_c^{365} = -846.1 + 63.64X_1 + 7.014X_2 + 3.706X_3 - 1.372X_1^2 - 0.317X_2^2 - 0.0294X_3^2$	.985	1.08

Los valores del coeficiente de la edad normativa de 28 días muestran que la máxima fuerza de la composición se obtiene con los siguientes valores de los parámetros investigados: X1 = 23,2%, X2 = 12,1% y X3 = 64,7%. La máxima resistencia a la compresión de esta composición varía de 9,3 MPa para el primer día a 47,3 MPa para la edad de 365 días.

En otra investigación, se realizaron pruebas con el cemento tipo I, añadiendo 20% de un material puzolánico al valor de la masa patrón y luego de realizar las prácticas se obtuvo, que la resistencia aumenta a medida que el tiempo aumenta, pero después del día 28 la resistencia disminuye, esto se visualiza en la tabla 5, se escogieron estos valores y se obtuvo una gráfica donde nos muestra el acercamiento del modelo mediante una regresión en Excel.

TABLA 5

RESISTENCIAS A LA COMPRESION SIMPLE (15)

Tiempo (días)	**Resistencia (MPa)**	
	Muestra	**Patrón**
1	9,26	12,66
3	21,14	23,99

7	30,87	33,6
14	35,84	36,84
28	40,06	37,61

El principal logro fue la comprobación del índice de actividad puzolánica, ya que el reemplazo del 20% de este material por cemento Portland cumple con el requerimiento que establece la especificación ASTM C618-03 a los 7 y 28 días de edad [15].

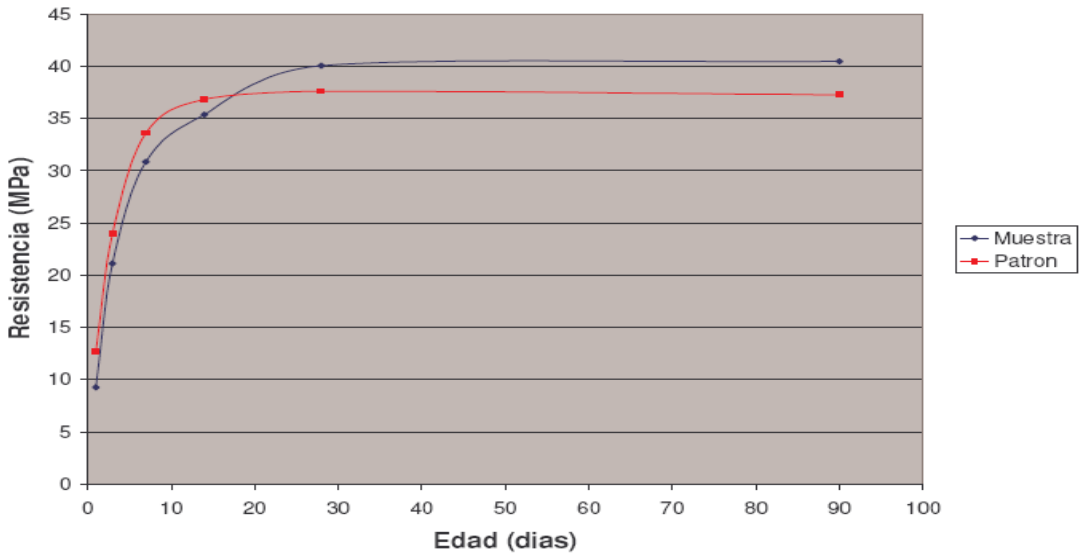


FIG 2.9 COMPARACION DE RESISTENCIAS MUESTRA/PATRON
Fuente: Robalino Paola, El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento puzolánico, 2004

De la misma manera los resultados obtenidos superan los requerimientos especificados para el uso de puzolanas en la elaboración de cementos compuestos según la especificación ASTM C 595-03. Se pudo comprobar también que el índice de actividad puzolánica se incrementa como es común en la reacción de los materiales puzolánicos, de tal forma que las muestras

de reemplazo que permanecieron curadas permanentemente mostraron un incremento del 8% a los 90 días de edad [15].

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

Diseño Factorial

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

Para tal efecto en este experimento el diseño factorial consistirá en analizar el efecto que causa el tiempo de fraguado junto con el aporte a la mezcla de cemento de un aditivo, siendo para mi efecto de estudio la limolita, durante los días en los que se van a realizar los ensayos mecánicos, midiendo la resistencia a la compresión por cada tiempo en el cual se va a realizar el fraguado. Para cumplir tales requerimientos en el próximo ítem se indicaran respectivamente y siguiendo una norma los porcentajes requeridos en la mezcla, probetas a usar, temperaturas, etc.

Para esto se recolectaran datos empíricos de acuerdo a la experimentación realizada posteriormente. Para la elaboración de una prueba se deben seguir los principios básicos planteados para el diseño de experimentos. Esto implica un número razonable de repeticiones (dependiendo de la prueba), aleatorización en las

unidades experimentales y un control para lograr una estimación válida del error experimental.

En la mayoría de las pruebas se trabaja con un diseño completamente aleatorizado, del tipo clásico, para ser analizado a través del análisis de la varianza o regresión, con unidades experimentales homogéneas y condiciones ambientales controladas. Sin embargo, en algunos casos es necesario recurrir a análisis de covarianza o ANOVA en bloques para controlar la heterogeneidad de las unidades experimentales. Para este tipo de estudio, tiene como base la experimentación y luego la obtención de datos, que luego serán analizados estadísticamente usando el método ANOVA, para así poder validar nuestra hipótesis de investigación. El programa computacional a utilizar es STATISTICA. El nivel de confianza será de un $\alpha = 0.05$, con esto observamos si existen diferencias significativas entre las medias obtenidas dependiendo de los porcentajes. Este procedimiento se lo realizará analizando las medias de los tratamientos de los datos obtenidos en 7, 14, 21 y 28 días. Con el programa se puede obtener la medición (media) de cada una de las muestras mediante diferencias significativas a una confiabilidad del 95%. El análisis de varianza se lo realiza al analizar nuestra hipótesis nula que escogimos con las muestras para ver si hay diferencias significativas entre ellas, para tal la hipótesis nula es retenida Se comparan cada tratamiento, verificando cuales son iguales (u1=u2), y se verificara el mejor tratamiento.

Para los datos obtenidos y tabulados de resistencia última a la compresión en los días que se realizaron los ensayos, tanto para 10 y 12.5% de aditivo, se analizarán por regresión lineal si es conveniente, obteniendo una ecuación, que me permita predecir los valores de resistencia a cualquier día, con una confiabilidad del 95%. También se puede predecir valores ajustando una curva, por ejemplo puede ser una polinomial de segundo grado, tercer grado, etc., para esto se puede utilizar las herramientas que proporcionan EXCEL.

Es importante también identificar las fuentes de variabilidad, las cuales pueden presentarse dentro de los ensayos y entre los ensayos. La variación dentro de los ensayos contribuye a la precisión de la estimación y puede ser causada por problemas como: errores en diluciones, imprecisiones en el pesado, errores al medir, errores en el conteo, variación del porcentaje entre las mezclas, etcétera.

La variación entre ensayos tiene que ver con la reproducibilidad de los mismos y puede ser causada por factores como: las propiedades físicas y químicas de los agentes, almacenamiento y preparación, cambios en las condiciones ambientales, cambios históricos en el protocolo, cambios en el personal del laboratorio o cambios en el material usado. La variabilidad dentro y entre ensayos contribuye a la variabilidad entre laboratorios y debe analizarse en forma separada.

Protocolo de Experimentación

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

- ASTM C 109/C 109M – 02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), en traducción sería, Método de prueba estándar para la Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (Utilizando especímenes cúbicos de 2 pulg. O 50 mm)
- ASTM C 595 – 03, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, la cual se refiere a Especificación estándar para las mezclas hidráulicas de Cementos. Esta norma, servirá como referencia para conocer que cemento se obtendrá al introducir, el aditivo, en este caso la limolita.

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

- Preparación de la pasta.
- Realizar el respectivo curado en el tiempo destinado.
- Determinación de la Resistencia a la compresión o ensayo.
- Recolección de datos.
- Análisis de los resultados.
- Conclusiones.

Antes de conocer más a fondo del protocolo a seguir, se deben detallar los materiales y herramientas o equipos a utilizar para nuestro propósito. Como un paso previo, a nuestro protocolo, se realizará la molienda de la limolita, proveniente como rocas, para obtener una granulometría igual a la del cemento

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

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

FIG 3.1 PESAJE Y TRITURADORA DE MANDÍBULAS

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

FIG 3.2 TRITURADORA DE RODILLOS Y SEPARADOR

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

FIG 3.3 TAMICES Y TAMIZADOR ELECTRICO

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

FIG 3.4 MOLINO DE DISCOS

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

FIG 3.5 MOLINO DE BOLAS Y TAMICES

Se deberá obtener el 80 por ciento de la muestra en el fondo para concluir, y aceptar el procedimiento de molienda detallado. A continuación se presenta tablas de los porcentajes obtenidos en el tamizado en cada uno de los molinos.

TABLA 6

PORCENTAJES OBTENIDOS EN LOS DISTINTOS TAMIZADOS

	Numero de malla	**Equivalencia en micras**	**Peso obtenido (g)**
Trituradora de Rodillos	14	0.014	55
	18	0.01	14
	40	0.425	18
	50	0.3	3
	fondo	-	10
		suma	**100**
Molino de Discos	14	0.014	25
	18	0.01	13,5
	40	0.425	24
	50	0.3	7
	fondo	-	29,5
		suma	**99**
Molino de Bolas	50	300	8
	100	150	6
	200	75	7
	325	45	3
	fondo	-	76

		suma	**100**

Una vez concluida la molienda se tiene el aditivo para la mezcla, ahora se conocerá las herramientas y equipos, previos al protocolo a seguir para la experimentación.

Materiales y Equipos.

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

- Cemento Portland Tipo I
- Limolita
- Agua

Los equipos a usar se detallan a continuación.

Instrumento de medición de peso. Este se ajustara a los requerimientos de las especificaciones C 1005. El dispositivo de pesaje será evaluado por la precisión y el sesgo en una carga total de 2000 g. Con este instrumento podemos pesar los porcentajes correspondientes de materiales, para realizar mi pasta [16].

FIG 3.6 INSTRUMENTO DE MEDICION DE PESO

Moldes. Los moldes serán para cubos de 2 in o 50 mm. Los moldes no tendrán más de tres compartimentos cúbicos y podrán estar separados en no más de dos partes. Las partes de los moldes cuando se ensamblan se mantienen unidos. Los moldes se realizarán de metal duro para que no sean atacados por el mortero de cemento. Para moldes nuevos la dureza Rockwell medida en los mismos no será inferior a 55 HRB. Las partes de los moldes deberá ser lo suficientemente rígida para evitar la difusión o deformaciones. Las caras en el interior de los moldes serán de superficies planas y se ajustarán a las tolerancias de la Tabla 7.

TABLA 7

VARIACIONES PERMISIBLES PARA LOS MOLDES [16]

	2 in. Cube Molds		[50 mm] Cube Molds	
Parameter	New	In use	New	In use
Planeness of sides	<0.001 in	<0.002 in	[<0.025 mm]	[<0.05 mm]
Distance between opposite sides	2 in ± 0.005	2 in ± 0.02	[50 mm ± 0.13mm]	[50 mm ± 0.50mm]
Height of each compartment	2 in + 0,01 in to - 0.005 in	2 in + 0.01 in to - 0.015 in	[50 mm + 0.25mm to - 0.13 mm]	[50 mm + 0.25mm to - 0.38 mm]
Angle between adjancent faces A	90 ± 0.5º	90 ± 0.5º	90 ± 0.5º	90 ± 0.5º

A Measured ant points slightly removed from the intersection. Measured separately for each compartment between all the interior faces and the adjacent face and between interior faces and top and bottom planes of the mold.

FIG 3.7 MOLDES

Paleta. Tiene una cuchilla de acero de 4 a 6 pulgadas (100 a 150 mm) de longitud, con bordes rectos.

Máquina para el ensayo. Esta puede ser de funcionamiento hidráulico o del tipo de tornillo, con suficiente apertura entre la superficie del soporte superior e inferior de la máquina para permitir el uso de aparatos de verificación. La carga aplicada a la muestra de análisis se indicará con una precisión del ±1.0%. Si la carga aplicada por la máquina de ensayo de compresión es registrada sobre un dial, este deberá estar provisto con una escala graduada que se pueda leer con una precisión cercana al 0.1 % de la escala máxima de carga. El puntero del dial será de una longitud suficiente para alcanzar la graduación de las marcas; el ancho al final del puntero no será superior a la distancia entre las graduaciones pequeñas. Cada dial deberá estar equipado con un cero de ajuste que es fácilmente accesible desde la parte externa del dial. Si la máquina de ensayo de carga se indica en forma digital, la visualización numérica debe ser lo suficientemente grande que pueda leerse fácilmente.

FIG 3.8 MAQUINAS PARA EL ENSAYO

Temperatura y Humedad.

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

Preparación de la Pasta.

Una vez identificado todos los materiales, equipos, herramientas, y conociendo también la temperatura y humedad para el experimento, se detallara el procedimiento para realizar la mezcla (pasta) y las pruebas (ensayo de compresión).

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

A continuación se detalla una tabla con los porcentajes en peso tanto de Limolita y cemento tipo I, para distintos porcentajes de puzolana.

TABLA 8

TABLA DE MEZCLA TOTAL

Fracción de Limolita (%)	Porcentaje de Limolita (g)	Porcentaje de cemento (g)	Porcentaje total (g)
5	150	2850	3000
7.5	225	2775	3000
10	300	2700	3000
12.5	375	2625	3000
15	450	2550	3000
17.5	525	2475	3000
20	600	2400	3000
22.5	675	2325	3000
25	750	2250	3000
27.5	825	2175	3000

Para efectos de mi experimentación me corresponden los porcentajes de 10 y 12.5 respectivamente de Limolita.

La relación de agua/ mezcla, que vamos a utilizar es de 0.3, por tanto tenemos lo siguiente.

$$A/C = \frac{\%H2O}{\%cemI} = 0.3$$

$$0.3 = \frac{\%H2O}{3000g}$$

$$\%H2O = 0.3 * 3000g = 900g$$

Por lo tanto tendremos un porcentaje de 900 g de agua que se añadirá a la mezcla total ya especificada anteriormente. Utilizaremos agua potable para hacer más realístico el experimento.

Ya al empezar a preparar los especímenes se tiene que seguir los pasos siguientes, teniendo en cuenta todas las observaciones planteadas según la norma usada.

Para preparar los moldes, primero se debe aplicar una capa delgada de aceite al interior de las caras del molde y placas base. Limpiar las caras lateras del molde y la placa base con un paño para eliminar cualquier exceso del aceite y para conseguir una finura [16].

Luego de la limpieza de los moldes se debe realizar la mezcla adecuada y preparar la pasta de cemento en los moldes respectivos. Una vez ya pesados todos los elementos que formarán la pasta a obtener, se coloca en un recipiente tanto la Limolita y el cemento tipo I, y se coloca en un mezclador por alrededor de 5 minutos, una vez concluido este tiempo, se agrega el porcentaje de agua ya pesado, para conseguir una pasta homogénea que pueda adquirir fácilmente la forma del molde para producir las probetas. Se pone en los moldes la mezcla, se debe llenar en dos capas para el moldeo y provocar el asentamiento, mediante una varita disponible en el laboratorio, finalmente colocar la segunda capa y nuevamente taquear, para finalizar se debe golpear suavemente para hacer que las burbujas salgan.

FIG 3.9 PREPARACIÓN DE LA PASTA

Curado y almacenamiento.

Inmediatamente después de terminar de moldear, colocar los moldes con un material plástico el cuál actuará como una cámara. Según la norma se debe mantener los moldes en una cámara de curado de 20 a 72 h, con sus superficies superiores expuestos a aire húmedo, pero protegidas del agua que gotea. Si las muestras se retiran de los moldes antes de las 24 h, mantenerlos en los estantes del armario húmedo o sala hasta que sean las 24 h de edad [16]. Al siguiente día se lo desmoldara y se procederá al lavado de los moldes. Las probetas se dejaran en una tina a temperatura ambiente para que adquieran el endurecimiento adecuado que requerimos, a esto lo llamamos curado al aire.

FIG 3.10 CURADO Y ALMACENAMIENTO

Determinación de la Resistencia a la compresión.

El ensayo de las muestras se realizarán dependiendo del tiempo de curado ya establecido para realizar las pruebas, todas las pruebas dependiendo del tiempo de curado deben ser realizadas con una tolerancia permisible prescrita como sigue.

TABLA 9

TOLERANCIAS PERMISIBLES EN EL TIEMPO DE LA PRUEBA [16]

Test age	Permissible Tolerance
24 h	± 1/2 h
3 days	± 1 h
7 days	± 3
28 days	± 12 h

Limpiar cada muestra, eliminando las aristas vivas o incrustaciones de las caras que se pondrá en contacto con el rodamiento de bloques de la máquina de ensayo. Compruebe estas caras antes de prueba o ensayo. Si hay una curvatura apreciable,

moler la cara/caras o desechar la muestra. Un control periódico de la sección de las muestras debe hacerse [16].

Con cuidado, colocar la muestra en la máquina de ensayo por debajo del centro del bloque del soporte superior. Antes de la prueba de cada cubo, se determinó que el bloque es libre de inclinación. No use relleno de materiales. Asentar el bloque de manera uniforme hasta el contacto con la superficie de la muestra [16]. Cargamos hasta llegar a cero en el medidor de compresión y enceramos el reloj comparador que nos da los datos de lo que se irá comprimiendo cada probeta hasta que llegue a su máximo punto de ruptura. Luego encendemos la máquina con lo que empieza a comprimirse la probeta y al mismo tiempo se va marcando la fuerza que se requiere para cada 0.005 pulgadas de compresión hasta que llegue a la máxima fuerza de compresión que es la fuerza de ruptura. Este procedimiento lo realizamos con tres probetas para cada día de curado asignado para las pruebas de compresión. Los datos obtenidos de estos ensayos serán detallados en el siguiente capítulo, como información complementaria la Marca de la máquina es Soiltest, y el modelo es Versa Tester.

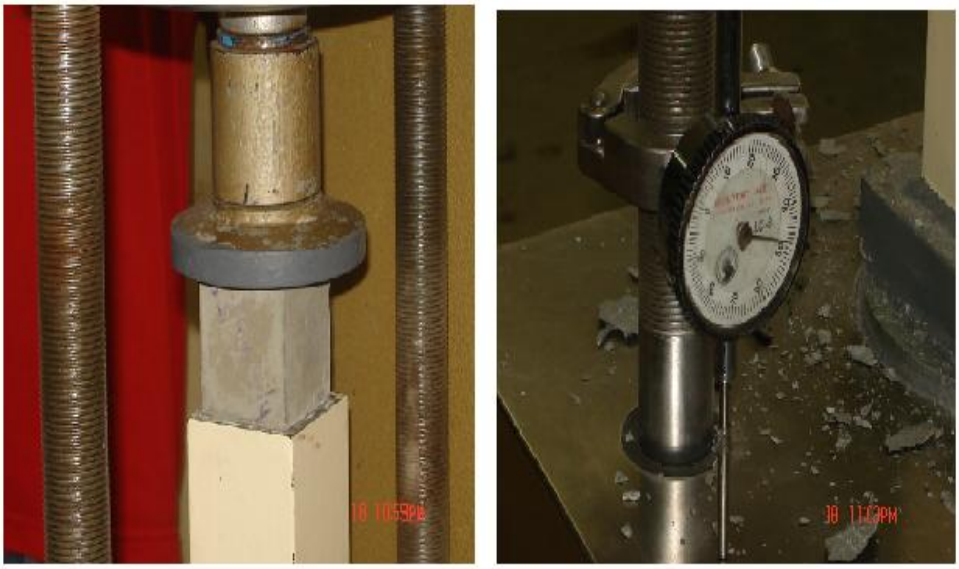


FIG 3.11 ENSAYO DE COMPRESIÓN

Recolección de Datos.

Ya al culminar cada ensayo se recolectarán los datos obtenidos durante el procedimiento de ruptura. Esto se hará para cada muestra sometida al ensayo, es decir se tendrán para cada tiempo de curado 3 tablas de valores recolectados, ya que son tres muestras para cada tiempo. Luego de recolectar todos los datos, para cada tiempo de curado, se procederán al análisis de tales resultados obtenidos y por ende se obtendrán las conclusiones respectivas, ambas partes se analizarán en los capítulos posteriores.

3.3 Implementación del Modelo Matemático.

En el presente tema se pretende modelar por medio de un modelo matemático, el comportamiento del cemento Tipo I con la adición de la limolita y el tiempo específico de curado para cada espécimen teniendo en cuenta todas las restricciones, métodos matemáticos efectivos, que describan el verdadero comportamiento del cemento frente al ensayo de compresión.

Existen modelos matemáticos para la predicción de la hidratación y resistencia a la Compresión en mezclas de cemento, donde cada variable es fundamental para el modelo, una de ellas son el tiempo y el porcentaje de aditivo. El Modelo de dispersión de Knudsen es lineal o Parabólico, y muchas veces encaja para la determinación de la resistencia del cemento. Una muestra de ello es cuando se determina la resistencia del cemento al agregar humos de sílice [15].

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

A continuación se presentan una figura, en la que se puede observar en la gráfica de esfuerzo – deformación, curvas obtenidas al realizar un ensayo, hasta llegar a la ruptura y el comportamiento de cada material.

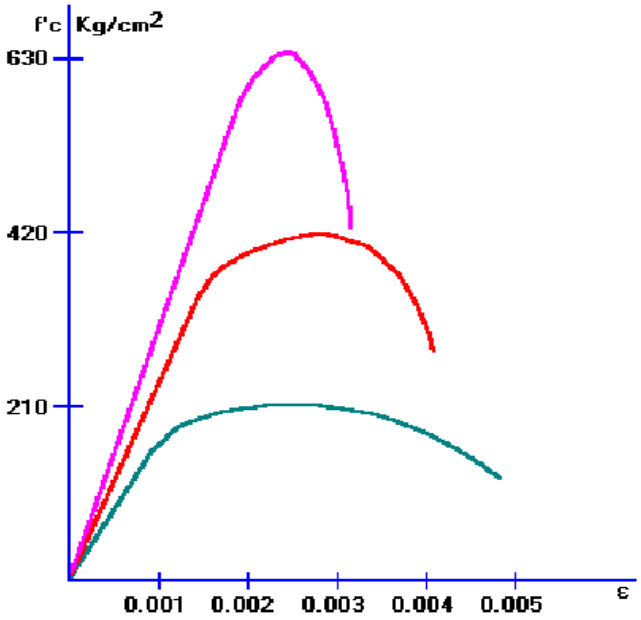


FIG.3.12 DISTRIBUCION DE LAS RESISTENCIAS

Fuente: Anónimo, Diseño y Fabricación de Hormigones, 2008

Para realizar el modelo matemático a usar en este análisis de la pasta de cemento, se ocupara formulas para inelasticidad unidimensional. En la que se detalla el algoritmo a ocupar en base a fórmulas establecidas en la plasticidad del cemento, basada en métodos iterativos para aproximarse al comportamiento del material cuando se aplica una carga de compresión, la grafica a obtener mostrará el comportamiento en base al esfuerzo y la deformación.

Contrariamente a lo que sucede en elasticidad, en plasticidad no existe una relación biunívoca entre tensiones y deformaciones. Así, a una misma tensión le pueden corresponder dos deformaciones diferentes obtenidas en un ciclo de carga y descarga. Formalmente podemos decir que la ecuación constitutiva para materiales elastoplásticos no se puede expresar mediante una función ordinaria, sino por medio de un funcional cuyo argumento es la historia del proceso de deformación.

Ahora se detalla el algoritmo a usar, el cuál es para un endurecimiento no lineal, con el cual programaremos paso a paso hasta hallar la solución gráfica. El algoritmo es el siguiente.

RETURN MAPING: NONLINEAR – HARDENING

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

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

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

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

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

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

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

Para los valores ya encontrados con N-R, ingresamos las ecuaciones para el paso 4.

STEP 4. Set $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\gamma\, sgn(\sigma_{n+1}^{tr})$ and

$$\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n} + H_{n+1}\Delta\gamma$$ and exit.

3.3.1. Modelación en Computadora.

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

Puesto que se definirá un algoritmo para poder modelar el comportamiento del material, se realizará un programa en Matlab, que realice de manera iterativa, y prediga el comportamiento del material, presentando una gráfica de esfuerzo vs. Deformación, la curva obtenida para este material, la cual será analizada posteriormente con los valores obtenidos experimentales, la cual me servirá para validar el modelo.

Ya con el algoritmo identificado, primero configuraremos, en un subprograma, el cual se identificara con una función, el método iterativo de Newton-Raphson, el cual queda programado de la manera siguiente.

```
Function  [deltalampdaf,Hn1]=MetodoN_R(Ftr,a,m,E,Gy,ln)

TOL=1e-10;

deltalampda(1)=TOL;

for k=1:50,

   H(k)=a*Gy*sqrt(m/(deltalampda(k)+ln))*(m-deltalampda(k)-
ln)/((m+deltalampda(k)+ln)^2);

   r(k)=Ftr-deltalampda(k)*(E+H(k));

derivada_r(k)=-E-H(k)+(deltalampda(k)*Gy*a*sqrt(m)*((2*(m-
deltalampda(k)-
ln)/(m+deltalampda(k)+ln)^2))+(1/(2*(deltalampda(k)+ln))))/(m+delt
alampda(k)+ln);

      deltalampda(k+1)=deltalampda(k)-r(k)/derivada_r(k);
```

```
    if norm(r(k))<TOL*norm(r(1))
        deltalampdaf=deltalampda(k+1);
        Hn1=a*Gy*sqrt(m/(deltalampda(k+1)+ln))*(m-
deltalampda(k+1)-ln)/(m+deltalampda(k+1)+ln)^2;
        break
    end
end
```

Para corre el programa, primero se introduce los valores para el modelamiento de endurecimiento no lineal, los datos a introducir son del módulo de elasticidad E, m y a que son propiedades del material. Las cuales se obtienen de la siguiente manera.

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

En el cual σ_{yo} es el esfuerzo de fluencia, que para nuestro experimento será equivalente al 0.7* σ_u. al reemplazar en la ecuación anterior obtenemos.

$$\sigma_u = 0.8\sigma_u(1 + a) = 0.7\sigma_u + (0.7 * a * \sigma_u)$$

$$\sigma_u - 0.7\sigma_u = (0.7 * a * \sigma_u)$$

$$0.3\sigma_u = (0.7 * a * \sigma_u)$$

Lo que se obtiene el valor de a, que es equivalente a:

$$a = 0.43$$

El valor de m se saca de la manera siguiente, ya teniendo el valor del módulo de elasticidad de la curva, se traza una paralela, hasta el valor máximo de esfuerzo, en este caso sería el valor de esfuerzo máximo de compresión. La distancia entre, ambas paralelas en el eje de la deformación es el valor m, a continuación se muestra de manera gráfica como obtener la constante m.

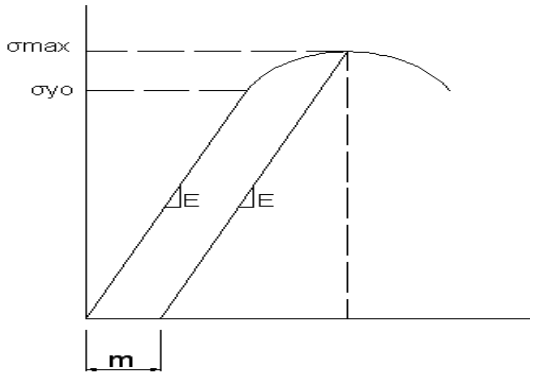


FIG.3.13 PROPIEDAD (m) DEL MATERIAL

También se encuentra m, como sigue.

$\varepsilon_{máx=}$ $\Rightarrow$ $\Rightarrow$ $\varepsilon_{máx=}$

m=

=

= $\sigma máx\left(\frac{1}{E}\right.$

Con las constantes ya ingresadas, corremos el programa, en el cual se almacenarán valores para cada uno de los valores de variación del esfuerzo ingresado, generando la curva para tal modelo. A continuación se muestra el programa, concluido, ingresando como ejemplo los valores de E, m y a, además se ingresa del delta de deformación, obteniendo la gráfica de esfuerzo vs. Deformación.

```
E=20000e6;
m=0.003;

a=1;

de=0.00005;

def=0.1;

e=[0:de:def]';
```

```
k=size(e);
iteracion=k(1,1);
G(1)=0;
Gy(1)=10e6;
lampda(1)=0;
for i=1:iteracion
  Gtr(i+1)=G(i)+E*de;
  Ftr(i+1)=abs(Gtr(i+1))-Gy(i);
  if Ftr(i+1) > 0
 [deltalampdaf(i+1),H(i+1)]=MetodoN_R(Ftr(i+1),a,m,E,Gy(1),lampda
(i));
     lampda(i+1)=deltalampdaf(i+1)+lampda(i);
     G(i+1)=Gtr(i+1)-E*deltalampdaf(i+1)*sign(Gtr(i+1));
     Gy(i+1)=Gy(i)+H(i+1)*deltalampdaf(i+1);
  else
      lampda(i+1)=0;
      G(i+1)=Gtr(i+1);
      Gy(i+1)=Gy(i);
  end
end
esfuerzo=G(1:iteracion);
plot(e,esfuerzo);
grid;
```

```
title ('Grafica')

xlabel('Deformacion');

ylabel('Esfuerzo');
```

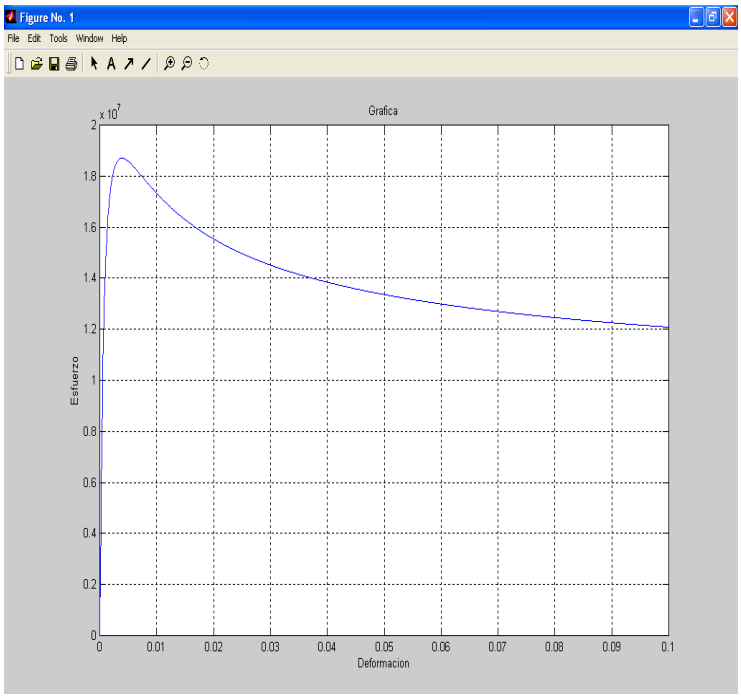


FIG.3.14 GRAFICA ESFUERZO Vs. DEFORMACIÓN (MODELO MATEMATICO)

CAPITULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Tabulación de Datos y Resultados

En las tablas siguientes se tabularán los resultados obtenidos en la experimentación, las cuales solamente mostrarán los resultados de manera resumida de los datos analizados. Las tablas completas con gráficas y resultados completos, se encuentran tabuladas en los apéndices. En cada tabla se muestra los valores de las resistencias calculadas para las distintas probetas, en los respectivos días de curado y porcentaje de aditivo.

Los cálculos analizados a partir de los datos obtenidos, se muestran a continuación.

Deformación. Para la deformación se utilizo la siguiente fórmula.

$$\varepsilon = \left|\frac{L_f - L_o}{L_0}\right| = \left|\frac{\Delta L}{L_0}\right|$$

Siendo:

ε la deformación

L_f la longitud final expresada en mm

L_o la longitud inicial expresada en mm

Como la longitud de la probeta es 50 mm, y se mantiene constante para todas, entonces la fórmula, queda expresada de la manera siguiente:

$$\varepsilon = \left|\frac{(50 - M_0) - 50}{50}\right|$$

Donde M_0, es la marca, cada 5 *10^{-3} pulgadas, las cuales muestra el reloj comparador, pero para el análisis esta queda expresada en mm, para que coincidan las unidades. El valor absoluta se lo incluye, para que la deformación de un valor positivo, el valor negativo lo único que me indica, es que la probeta es expuesta a compresión.

Fuerza. Los valores obtenidos en el experimento, dependiendo de la máquina que se utiliza, están expresados en kgf y lbf. Para hallar la fuerza, expresa en Newton, las fórmulas a ocupar son las siguientes. Cuando, el valor de la fuerza F_0, está en kgf, queda de la siguiente manera.

$$F = F_0 * 9.8$$

Cuando la F_0, esta expresada en lbf, ocupo la siguiente fórmula.

$$F = F_0 * 4.4545$$

Esfuerzo. Para hallar el esfuerzo, aplico la fórmula siguiente.

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

Donde σ, es el esfuerzo, expresado en MPa.

F, es la fuerza en Newtons.

A, es el área en mm^2.

El área en las probetas es de 2500 mm^2

Ya, conociendo las transformaciones, y fórmulas a utilizar, se procederá a ingresar los datos y armar las tablas correspondientes, el cual muestran los resultados obtenidos. A continuación se muestra una tabla con las condiciones de temperatura y humedad relativa, que se obtuvo, para los distintos días de ensayo, para las probetas con el 10% de limolita, se muestra la siguiente tabla con promedios de las temperaturas y humedad relativa, las cuales cumplen con las condiciones, especificadas expuestas en la norma, la cual se cito en el capitulo anterior, los valores permisibles de temperatura en la norma es de 23.0 ± 3.0 °C, y el porcentaje de humedad relativa no menor al 50%.

TABLA 10

TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA -10% LIMOLITA

10%	DIAS	

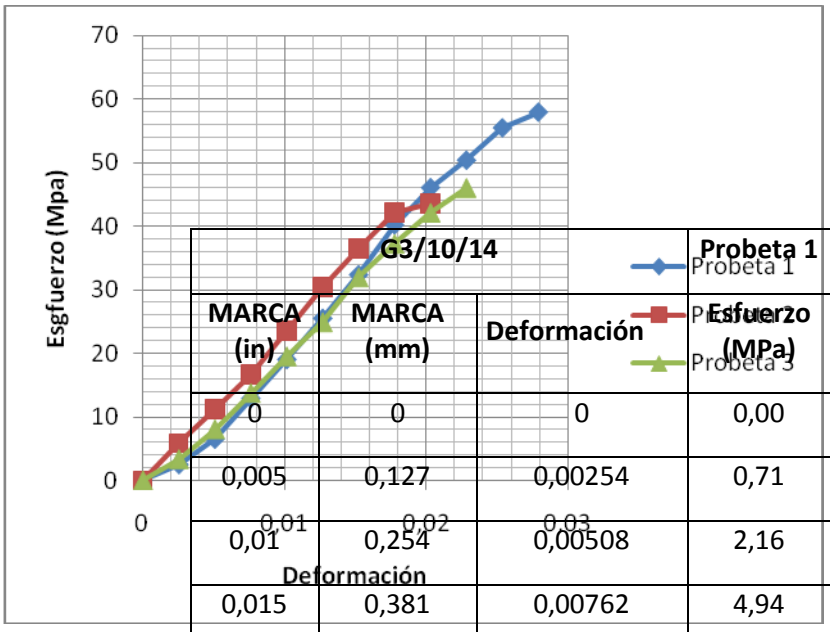
	7	14	21	28	Promedio
Temperatura (º C)	25,3	25,3	25,2	26,7	**25,625**
Humedad Relativa	77,3	74,5	75,7	66,9	**73,6**

Ya conociendo las condiciones de temperatura y Humedad relativa para cada día en que se realizo el ensayo de compresión. Se procede a mostrar los resultados obtenidos de esfuerzo de compresión obtenido para cada probeta, dependiendo del día en que se realiza la ruptura. También se muestran las gráficas obtenidas de Esfuerzo vs. Deformación. Las tablas mostradas son resumidas, las tablas completas para este porcentaje de aditivo, se encuentran tabuladas en el apéndice A.

TABLA 11

RESISTENCIAS A LOS 7 DÍAS – 10% LIMOLITA

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



G3/10/14			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
MARCA (in)	MARCA (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	0,71	0,51	0,67
0,01	0,254	0,00508	2,16	1,69	1,96
0,015	0,381	0,00762	4,94	4,12	4,51
0,02	0,508	0,01016	8,51	8,23	8,35

FIGURA 4.1 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/10/7)

TABLA 12

RESISTENCIAS A LOS 14 DÍAS – 10% LIMOLITA

0,025	0,635	0,0127	13,45	12,43	12,74
0,03	0,762	0,01524	17,84	17,95	17,76
0,035	0,889	0,01778	23,52	23,52	22,66
0,04	1,016	0,02032	28,81	30,38	28,62
0,045	1,143	0,02286	34,30	35,28	36,26
0,05	1,27	0,0254	39,20	41,94	43,12
0,055	1,397	0,02794	45,08	48,80	49,20
0,06	1,524	0,03048		56,84	52,92
0,065	1,651	0,03302		62,72	
0,065	1,651	0,03302		66,64	

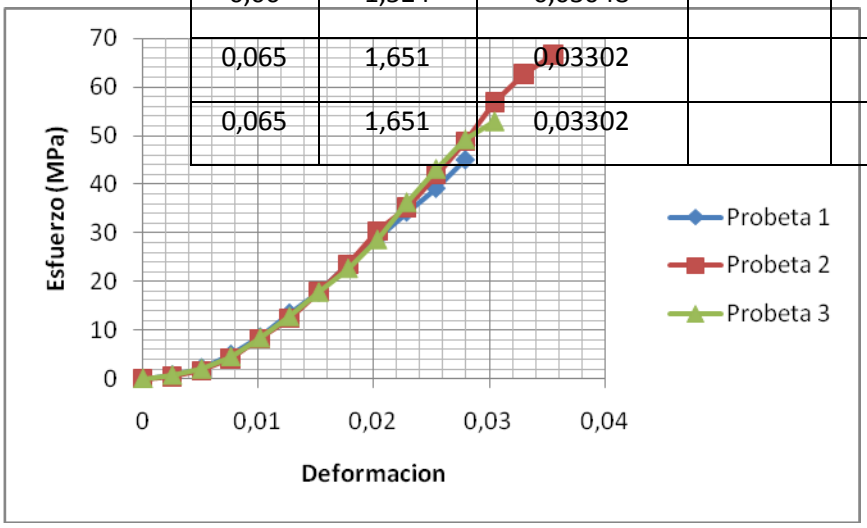


FIGURA 4.2 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/10/14)

TABLA 13

RESISTENCIAS A LOS 21 DÍAS – 10% LIMOLITA

G3/10/21			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Esfuerzo (MPa)**	**Esfuerzo (MPa)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	5,88	7,84	3,92
0,01	0,254	0,00508	15,50	26,73	24,59
0,015	0,381	0,00762	31,72	43,65	42,41

0,02	0,508	0,01016	44,55	59,69	62,36
0,025	0,635	0,0127	58,80	68,60	81,07
0,03	0,762	0,01524	70,38	81,96	92,85
0,035	0,889	0,01778	78,40	83,75	
0,04	1,016	0,02032	83,75		
0,045	1,143	0,02286	85,53		

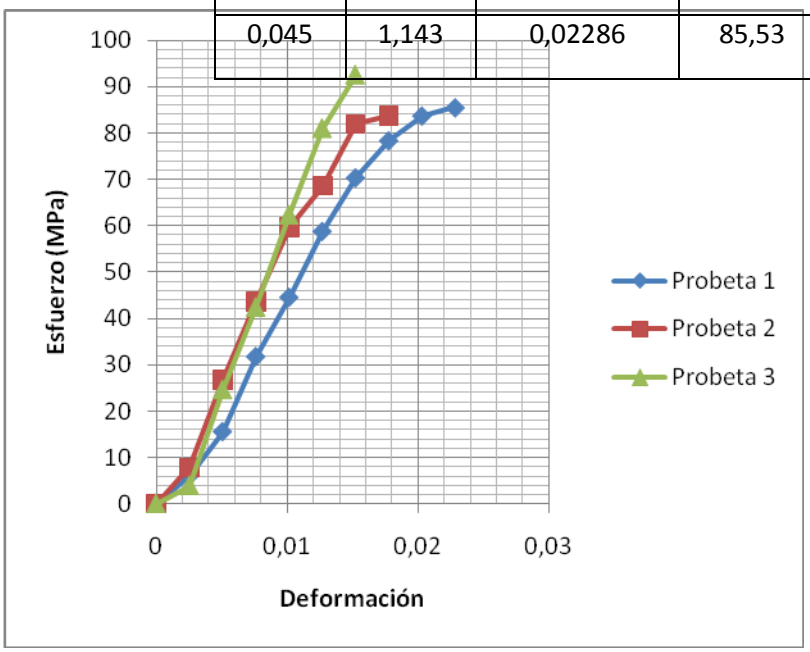


FIGURA 4.3 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/10/21)

TABLA 14

RESISTENCIAS A LOS 28 DÍAS – 10% LIMOLITA

G3/10/28			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
MARCA (in)	MARCA (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	3,56	3,39	2,14
0,01	0,254	0,00508	13,01	11,94	5,35

0,015	0,381	0,00762	27,44	26,91	13,72
0,02	0,508	0,01016	41,34	45,08	29,04
0,025	0,635	0,0127	56,13	57,02	41,34
0,03	0,762	0,01524	65,93	71,27	57,91
0,035	0,889	0,01778	70,38	75,73	68,60
0,04	1,016	0,02032			71,27

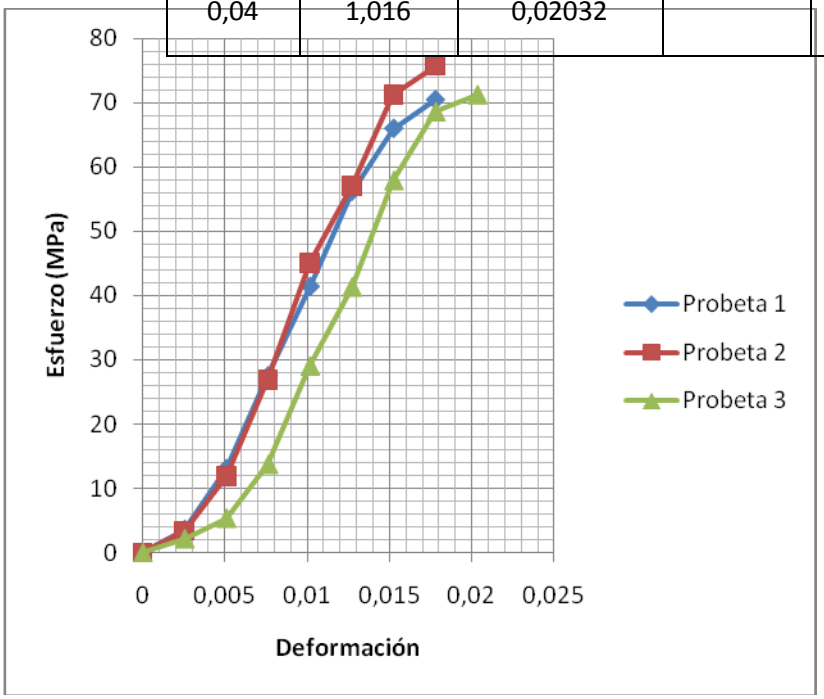


FIGURA 4.4 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/10/28)

A continuación se muestra, los datos de temperatura y humedad relativa, tomadas en el laboratorio, al momento de realizar el ensayo de compresión, para las probetas al 12.5 de limolita.

TABLA 15

TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA -12.5% LIMOLITA

12.5%	**DIAS**				
	4	**11**	**18**	**25**	**Promedio**

Temperatura (º C)	25,3	25,3	24,8	24,8	**25,05**
Humedad Relativa	74,5	74,5	73,5	73,5	**74**

Se puede observar, que los valores obtenidos de temperatura y Humedad relativa, cumplen con la norma.

A continuación se tabulan los resultados de Esfuerzo, para las probetas destinadas para la validación. Las tablas completas se encuentran en el apéndice B.

TABLA 16

RESISTENCIAS A LOS 4 DÍAS – 12.5% LIMOLITA

G3/12,5/4			**Probeta 1**	**Probeta 2**	**Probeta 3**
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Esfuerzo (MPa)**	**Esfuerzo (MPa)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	2,74	1,18	8,04
0,01	0,254	0,00508	6,66	5,88	14,11
0,015	0,381	0,00762	12,31	10,43	19,80
0,02	0,508	0,01016	18,82	15,88	26,46
0,025	0,635	0,0127	25,48	21,56	34,30
0,03	0,762	0,01524	31,56	39,40	42,34
0,035	0,889	0,01778	38,22	35,28	49,98
0,04	1,016	0,02032	45,28	40,38	57,04
0,045	1,143	0,02286	51,94	47,04	62,72
0,05	1,27	0,0254	56,84	52,33	68,40

0,055	1,397	0,02794	62,72	57,82	71,93
0,06	1,524	0,03048	64,68	61,94	

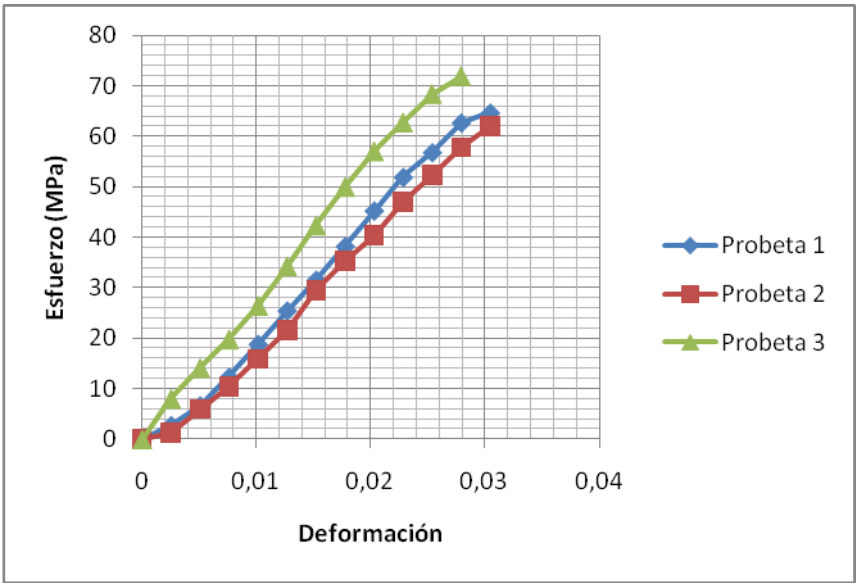


FIGURA 4.5 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/12.5/4)

TABLA 17

RESISTENCIAS A LOS 11 DÍAS – 12.5% LIMOLITA

G3/12,5/11			Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
MARCA (in)	MARCA (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	1,57	1,65	0,78
0,01	0,254	0,00508	4,31	3,61	1,18
0,015	0,381	0,00762	8,04	7,45	2,16

0,02	0,508	0,01016	13,13	12,00	6,08
0,025	0,635	0,0127	18,23	17,33	10,19
0,03	0,762	0,01524	25,48	23,52	15,09
0,035	0,889	0,01778	32,34	29,40	20,58
0,04	1,016	0,02032	38,22	35,87	26,46
0,045	1,143	0,02286	44,10	42,14	32,34
0,05	1,27	0,0254	50,96	47,63	39,79
0,055	1,397	0,02794		52,92	47,63
0,06	1,524	0,03048		57,82	52,92
0,065	1,651	0,03302		62,72	
0,07	1,778	0,03556		65,66	

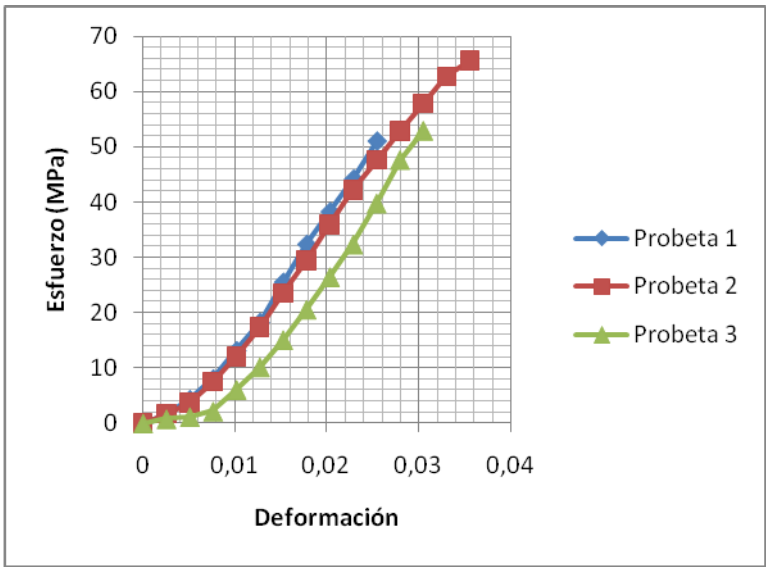


FIGURA 4.6 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/12.5/11)

TABLA 18

RESISTENCIAS A LOS 18 DÍAS – 12.5% LIMOLITA

G3/12,5/18	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3

MARCA (in)	MARCA (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	11,23	12,12	1,07
0,01	0,254	0,00508	30,47	29,76	4,81
0,015	0,381	0,00762	49,89	50,78	15,68
0,02	0,508	0,01016	62,36	67,71	30,65
0,025	0,635	0,0127	81,07	83,75	51,67
0,03	0,762	0,01524		91,76	71,27
0,035	0,889	0,01778			84,64

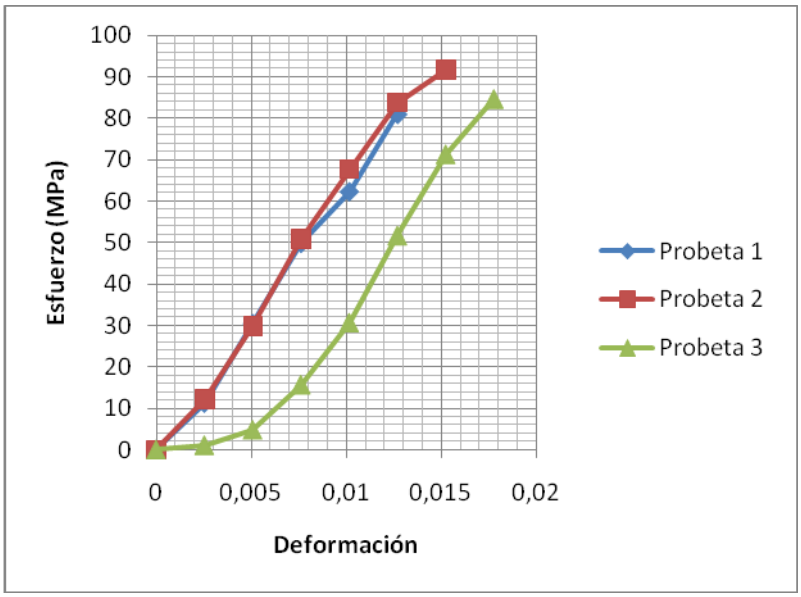


FIGURA 4.7 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/12.5/18)

TABLA 19

RESISTENCIAS A LOS 25 DÍAS – 12.5% LIMOLITA

G3/12,5/25	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3

MARCA (in)	MARCA (mm)	Deformación	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0	0	0	0,00	0,00	0,00
0,005	0,127	0,00254	2,67	6,41	3,21
0,01	0,254	0,00508	10,16	21,38	16,04
0,015	0,381	0,00762	21,38	35,64	35,99
0,02	0,508	0,01016	43,12	53,45	57,02
0,025	0,635	0,0127	57,91	64,15	78,40
0,03	0,762	0,01524	71,27	77,51	85,53
0,035	0,889	0,01778	75,73		

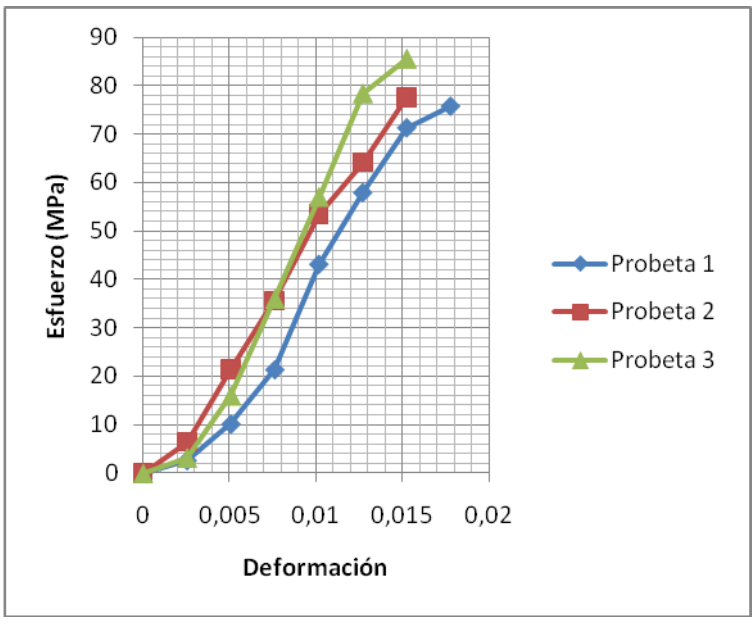


FIGURA 4.8 GRAFICA ESFUERZO – DEFORMACIÓN (G3/12.5/25)

A continuación se muestra una tabla resumen de la resistencia última, para cada probeta y en los días respectivos de ensayo, según el porcentaje de aditivo. Para la obtención del módulo de elasticidad E, se linealizo una recta que abarque la mayoría de los puntos en mi curva de esfuerzo vs. Deformación, pero solo para la zona elástica, las gráficas obtenidas para

hallar el módulo de elasticidad se encuentra en los apéndices A y B, según el porcentaje de aditivo (10 y 12.5 % de limolita). También se muestra una gráfica con la dispersión de los datos, para el ensayo.

TABLA 20

RESISTENCIAS ÚLTIMA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO E - 10% LIMOLITA

10 % de Limolita								
	7		**14**		**21**		**28**	
	σ_u (MPa)	E (MPa)	σ_u (MPa)	E (MPa)	σ_u (MPa)	E (MPa)	σ_u (MPa)	E (MPa)
probeta 1	57,94	2373	45,08	1466	85,53	4865	70,38	4593
probeta 2	43,51	2365	66,64	1827	83,75	6110	75,73	4476
probeta 3	46,06	2115	52,92	1597	92,65	6425	71,27	3327
Promedio	**49,17**	**2284,33**	**54,88**	**1630,00**	**87,31**	**5800,00**	**72,46**	**4132.33**

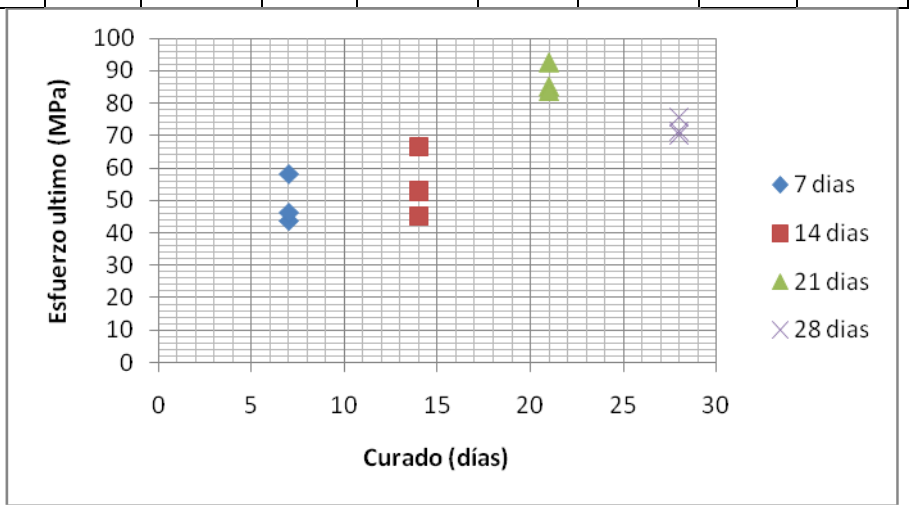
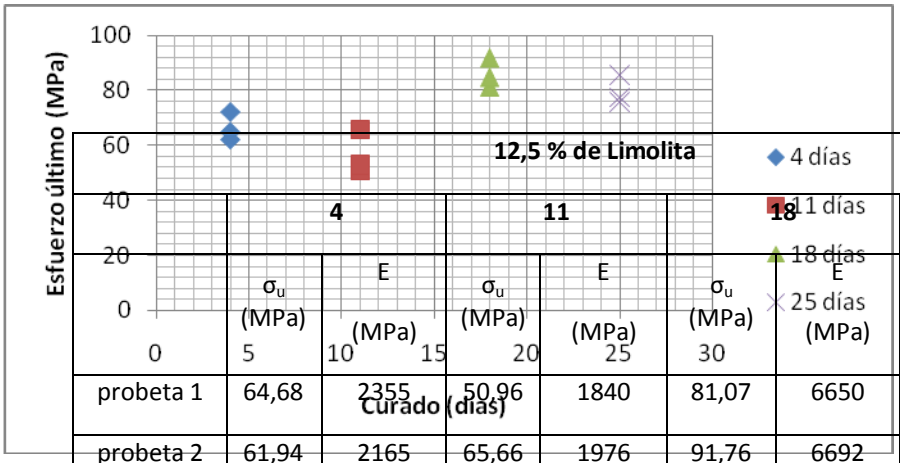


FIGURA 4.9 GRÁFICA ESFUERZO ÚLTIMO VS. CURADO – 10% DE LIMOLITA

TABLA 21

RESISTENCIAS ÚLTIMA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO E – 12.5% LIMOLITA



	4		11		18		25	
	σ_u (MPa)	E (MPa)	σ_u (MPa)	E (MPa)	σ_u (MPa)	E (MPa)	σ_u (MPa)	E (MPa)
probeta 1	64,68	2355	50,96	1840	81,07	6650	75,73	4132
probeta 2	61,94	2165	65,66	1976	91,76	6692	77,51	5360
probeta 3	71,93	2788	52,92	1599	84,64	4026	85,53	6450
Promedio	**66,18**	**2400,36**	**56,51**	**1805,00**	**85,82**	**5789,33**	**79,59**	**5313,67**

FIGURA 4.10

GRÁFICA ESFUERZO ÚLTIMO VS. CURADO – 12.5% DE LIMOLITA

4.2. Análisis de Resultados

Para el análisis de mis datos, estará basado en el análisis experimental, el cuál es el arreglo de unidades experimentales, el cual se le asigna los tratamientos. Para tal, se considera el efecto, que tiene el curado en la resistencia última a la compresión. Las probetas, se usan como unidades experimentales, en el que se cuenta para cada día de la experimentación con tres probetas, los números de días en que se experimenta son cuatro, los cuatro tratamientos se asignan al azar a las 12 probetas, es decir se escogen tres probetas de la población y se designan para cada día específico, en los que se realizaron los ensayos. Se escoge una Hipótesis de investigación, el cual es el efecto que causa el curado, en la mezcla de un compuesto. Tal objetivo se verifica sometiendo a las muestras al ensayo de compresión.

Análisis de los datos al 10% de Limolita

Se necesita de un método para estimar los parámetros de los modelos y determinar que hipótesis o modelos estadísticos se ajustan mejor a los datos del experimento. El método de mínimos cuadrados es el que se usa con más frecuencia para estimar los parámetros. Las estimaciones con mínimos cuadrados son sin sesgo y con varianza mínima.

Mis supuestos, serán:

- La variable de respuesta tiene una media μ y una varianza σ^2
- La varianza σ^2 es homogénea (se asume que es la misma y no afecta el tratamiento).

Las hipótesis serán:

- Hipótesis nula: $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \ldots\ldots = \mu_t$
- Hipótesis alterna: $H_a = \mu_i \neq \mu_k$, donde $i \neq k$.

Los datos a analizar son los siguientes.

días	Esfuerzo ultimo
7	57,94
7	43,51
7	46,06
14	45,08
14	66,64
14	52,92
21	85,53
21	83,75
21	92,65
28	70,38
28	75,72
28	71,27

Antes de realizar, el análisis se tiene que comprobar que los datos, se encuentren en una distribución normal, para esto hago uso del programa Statistica, Para comprobar la normalidad de los datos se puede usar los

siguientes métodos. La distribución del estadístico de Kolmogorov-Smirnov - Lilliefors, para contraste de normalidad ó también se puede aplicar el método de Shapiro Wilk`s. Para comprobar la normalidad de los datos, se tienen las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula (Ho): Los datos siguen una distribución normal.

Hipótesis alterna (Ha): Los datos no siguen una distribución normal.

Para esto ingreso, los datos al programa, ingreso en la estadística descriptiva, y entró al histograma de normalidad, obteniendo el siguiente gráfico.

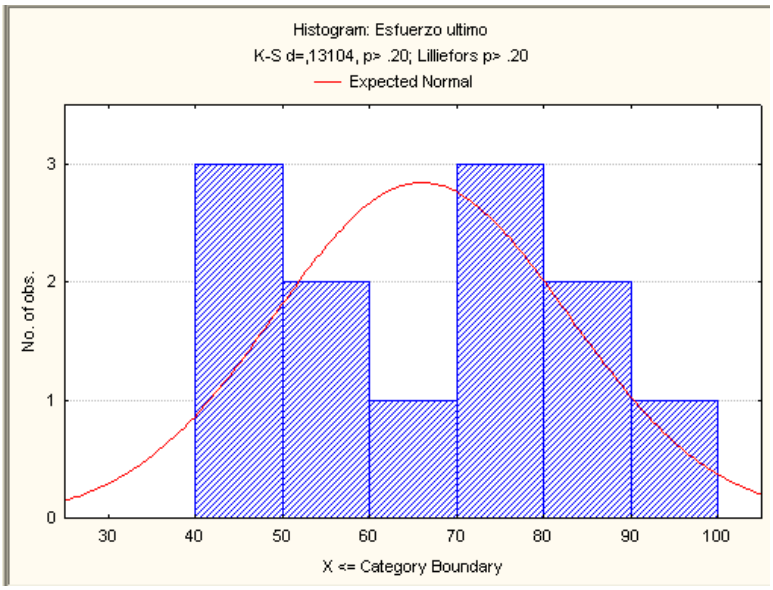


FIGURA 4.11 HISTOGRAMA – NORMALIDAD DE LOS DATOS AL 10% LIMOLITA

Se observa que el programa me da el valor de d = 0.13104 cuando utilizo el método K-S, cuando se utiliza el método se Shapiro Wilk, el programa me da un valor de W=0.9385.

Se tabula d tal que P(Dn > d) = α. para el método K-S

Para analizar la distribución normal de los datos utilizó el método K-S, el cual me dice si el valor d, dado por el programa es mayor al valor crítico dado por la tabla, se rechaza la hipótesis nula, por la hipótesis alterna.

Los valores de d crítico y ωα se encuentran en las tablas de los apéndices C y D, para este caso solo se compruebo con el estadístico K-S con un α = 0.05 y con n = 12, se tiene el valor d = 0.242. Se tiene que el valor, obtenido en el programa, es menor al valor obtenido en la tabla por lo que, se acepta la hipótesis nula. Entonces se concluye que los datos siguen una distribución normal.

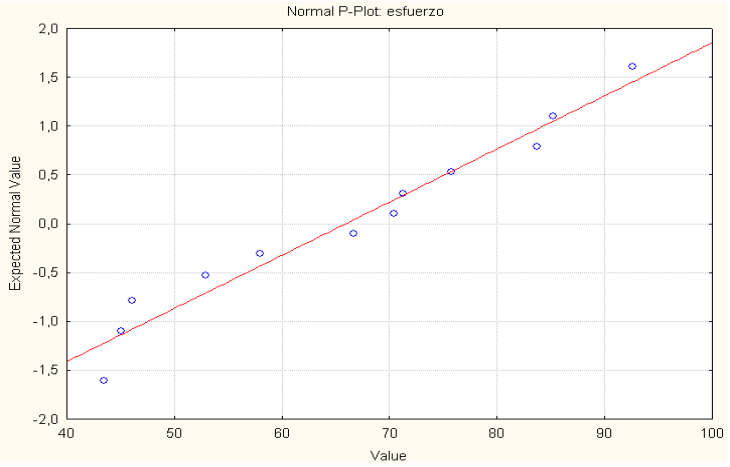


FIGURA 4.12 GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LOS DATOS AL 10 %

Ya habiendo, verificado la normalidad de los datos, y con los supuestos antes mencionados, aplico el método, para el análisis, utilizo la herramienta computacional de Excel. En el que ingreso y calculo las fuentes de variación, obteniendo la siguiente tabla.

TABLA 22

SUMA DE CUADRADOS PARA IDENTIFICAR FUENTES DE VARIACION

		modelo reducido		**modelo completo**	
días	**Resist.**	û	yij-û	ûi	yij-ûi
7	57,94	65,9291667	-7,98916667	49,17	8,77
7	43,51	65,9291667	-22,4191667	49,17	-5,66
7	46,06	65,9291667	-19,8691667	49,17	-3,11
14	45,08	65,9291667	-20,8491667	54,88	-9,8

14	66,64	65,9291667	0,71083333	54,88	11,76
14	52,92	65,9291667	-13,0091667	54,88	-1,96
21	85,23	65,9291667	19,3008333	87,21	-1,98
21	83,75	65,9291667	17,8208333	87,21	-3,46
21	92,65	65,9291667	26,7208333	87,21	5,44
28	70,38	65,9291667	4,45083333	72,4566667	-2,07666667
28	75,73	65,9291667	9,80083333	72,4566667	3,27333333
28	71,26	65,9291667	5,33083333	72,4566667	-1,19666667
		SCEr	3114,05229	SCEf	418,744667
Diferencia = SCEr – SCEf = 2695,30763					

Con estos datos realizó, la tabla de análisis de la varianza, obteniendo lo siguiente.

Con la tabla 23 obtenida, se calcula es estadístico F_0 = CMT/CME, F_0 = 17.1643. Ahora se analiza, el criterio, $F_0 > F_{\alpha,(t-1),(N-t),}$ el estadístico F para la comparación, se obtiene de la tabla para valores críticos de F, que se encuentra en el apéndice E.

TABLA 23

ANALISIS DE VARIANZA - 10%

Fuentes de variación	**Grados de libertad**	**Suma de cuadrados**	**Cuadrados medios**	
Tratamientos	3	2695,307625	898,435875	
Error	8	418,7446667	52,34308333	
Total	11	3114,052292		

El valor de $F_{0.05,(3),(8),}$ = 4.07**.** Los valores grandes F_0 de sugieren un rechazo de la hipótesis nula. Por lo cual, se tiene un rechazo de la hipótesis nula, por la hipótesis alterna, la cual me dice que las medias entre los tratamientos no son iguales. Ingresando los datos a Excel, se obtiene el mismo análisis, que se encuentra en la tabla 24.

Para obtener un estimado, ó un intervalo de confianza, en los que se encuentran mis datos, se utiliza el estadístico t-de Student.

$$\bar{y}_{i.} \pm t_{\alpha/2,(N-t)}\left(s_{\bar{y}}\right)$$

Los límites están dados por $t_{0.025,\ 8} = 2.306$, apéndice F. La tabla que se obtiene es la siguiente. El error estándar es igual a 4.18. En la tabla 25 se encuentran los intervalos de confianza y errores estándar.

TABLA 24

ANALISIS DE VARIANZA CON EXCEL - 10%

RESUMEN

Grupos	*Cuenta*	*Suma*	*Promedio*	*Varianza*
7	3	147,51	49,17	59,3103
14	3	164,64	54,88	119,0896
21	3	261,63	87,21	22,7428
28	3	217,37	72,45666667	8,22963333

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	*Suma de cuadrados*	*Grados de libertad*	*Promedio de los cuadrados*	*F*	*Probabilidad*	*Valor crítico para F*
Entre grupos	2695,31	3,00	898,44	17,16	0,00	4,07
Dentro de los grupos	418,74	8,00	52,34			
Total	3114,05	11,00				

TABLA 25

ERRORES ESTANDAR E INTERVALOS DE CONFIANZA-10%

Tratamiento	Media	error estándar	IC del 95%	(Superior , Inferior)	
7 días	49,17	4,18	52,12+/- 9,632	58,80	39,54
14 días	54,88	4,18	49,64+/-9,632	64,51	45,25
21 días	87,21	4,18	57,09+/-9,632	96,84	77,58
28 días	72,46	4,18	50,03+/-9,632	82,09	62,82

Ahora, se tiene que analizar por factores cuantitativos, para tal se requiere un estudio en función de la tendencia. Es decir un modelo polinomial. El cual tiene como objetivo, el determinar la ecuación polinomial de menor orden posible, que describa la relación en forma adecuada. Para tal objetivo, me ayuda de las herramientas de Excel, el cual me predicen la tendencia de los datos, ajustando los datos a un modelo polinomial de tercer orden, dando una correlación aceptable para los datos, según la dispersión obtenida. Además se obtiene la ecuación, la cual me servirá para predecir, el esfuerzo a cualquier día, dentro del rango de la prueba.

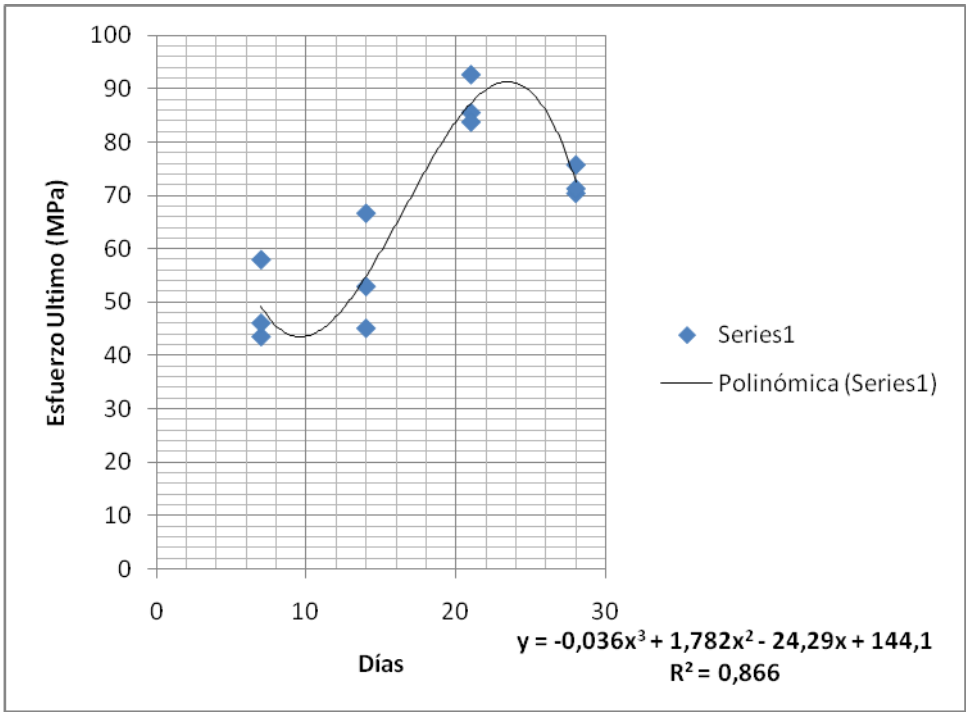


FIGURA 4.13 DATOS AJUSTADOS A UN MODELO POLINOMIAL DE TERCER GRADO - 10%

Análisis de los datos al 12.5% de Limolita

Al analizar estos datos, se tienen las mismas consideraciones, hipótesis, análisis, etc. Igual a los datos con el 10% de limolita. Se analiza primero la normalidad de los datos, con el programa Statistica. Ingreso en la estadística descriptiva, y entró al histograma de normalidad, obteniendo el siguiente gráfico.

Los datos a analizar son los siguientes.

Días	Esfuerzo último
4	64,68
4	61,94
4	71,93
11	50,96
11	65,66
11	52,92
18	81,07
18	91,76
18	84,64
25	75,73
25	77,51
25	85,53

En la Fig. 4.14 se observa que el programa me da el valor de d = 0.11203. Se obtiene el valor crítico de d, del apéndice C, que es el estadístico K-S con un $\alpha = 0.05$ y con n = 12, se tiene el valor d = 0.242. Se tiene que el valor, obtenido en el programa, es menor al valor obtenido en la tabla por lo que se acepta la hipótesis nula. Entonces se concluye que los datos siguen una distribución normal.

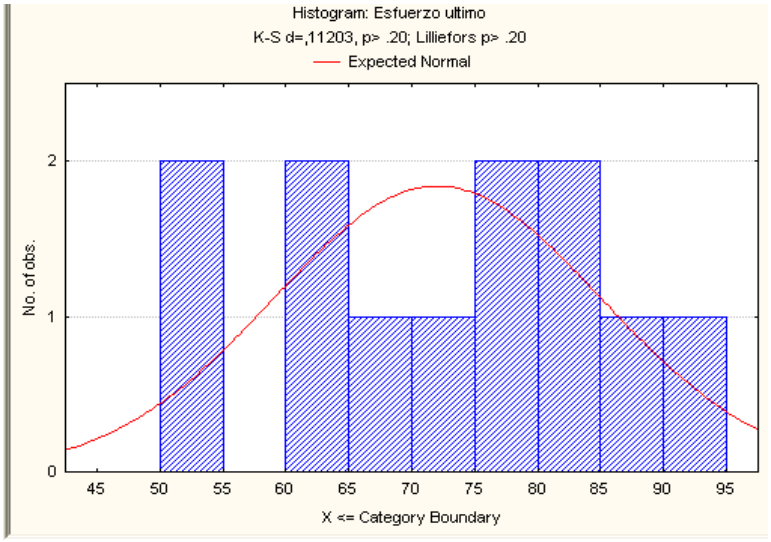


FIGURA 4.14 HISTOGRAMA – NORMALIDAD DE LOS DATOS AL 12.5 % LIMOLITA

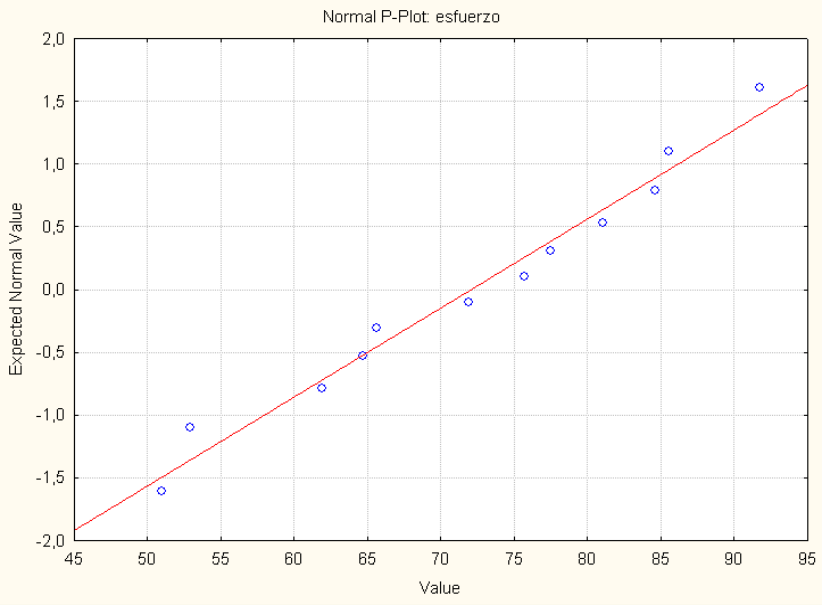


FIGURA 4.15 GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LOS DATOS AL 12.5 %

El procedimiento es el mismo mostrado, para los datos en el 10% de limolta, por el que solamente se mostraran las tablas obtenidas con la herramienta de Excel.

TABLA 26

ANALISIS DE VARIANZA CON EXCEL – 12.5%

RESUMEN

Grupos	*Cuenta*	*Suma*	*Promedio*	*Varianza*
4	3	198,55	66,18333333	26,6450333
11	3	169,54	56,51333333	63,7065333
18	3	257,47	85,82333333	29,6192333
25	3	238,77	79,59	27,2548

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	*Suma de cuadrados*	*Grados de libertad*	*Promedio de los cuadrados*	*F*	*Probabilidad*	*Valor crítico para F*
Entre grupos	1567,08	3,00	522,36	14,19	0,00	4,07
Dentro de los grupos	294,45	8,00	36,81			
Total	1861,53	11,00				

Se observa, que el valor F, es mayor que el valor crítico para F, por lo cual se rechaza la hipótesis nula, por la hipótesis alterna, la cual me dice que las medias entre los tratamientos no son iguales.

La tabla con los intervalos de confianza y el error estándar se muestra a continuación.

TABLA 27

ERRORES ESTANDAR E INTERVALOS DE CONFIANZA-12.5%

Tratamiento	**Media**	**error estándar**	**IC del 95%**	**(Superior , Inferior)**	
7 días	66,18	3,50	52,12+/-8.077	74,26	58,11
14 días	56,51	3,50	49,64+/-8.077	64,59	48,44

21 días	85,82	3,50	57,09+/-8.077	93,90	77,75
28 días	79,59	3,50	50,03+/-8.077	87,67	71,51

Finalmente, se realiza el gráfico con la tendencia, obteniendo un modelo polinomial de tercer orden, con su respectiva ecuación.

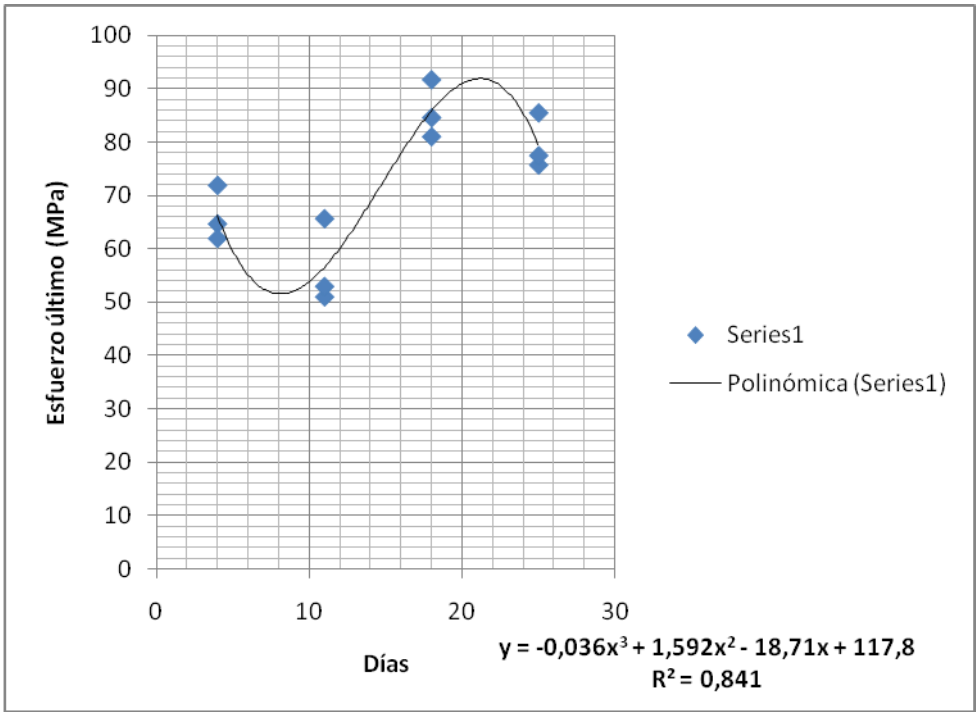


FIGURA 4.16 DATOS AJUSTADOS A UN MODELO POLINOMIAL DE TERCER GRADO – 12.5%

4.3. Identificación de Cambio de Propiedades.

En la siguiente tabla, se muestran los datos obtenidos de esfuerzo último a la compresión (Esfuerzo de ruptura) a diferentes porcentajes de Limolita, el cual se analizarán estadísticamente, para conocer si existen diferencias significativas entre los diferentes porcentajes o tratamientos. Para tal efecto se utilizara ANOVA, el cual también me permitirá predecir el mejor tratamiento.

TABLA 28

DATOS GRUPALES PARA ANÁLISIS ESTADÍSTICO

	Esfuerzos Ultimo a la compresión (MPa)

	5%	10%	15%	20%	25%
7 días	35,55	57,94	49,05	48,02	46,06
	42,58	43,51	52,19	40,57	45,67
	34,34	46,06	55,13	40,18	56,84
14 días	83,62	45,08	50,42	43,51	48,61
	65,83	66,64	49,05	60,17	48,02
	73,83	52,92	49,44	47,04	47,82
21 días	68,49	85,23	66,70	64,90	70,23
	74,72	83,75	51,01	68,45	71,12
	66,72	92,65	48,07	68,45	71,12
28 días	68,49	70,38	54,94	60,45	64,01
	77,39	75,73	44,15	66,67	47,04
	78,28	71,26	51,01	60,45	54,88

Para el análisis con ANOVA, se tienen que asumir ciertas presunciones, ejemplo que tratan de datos por se obtenidos aleatoriamente, en este caso los porcentajes. Para cada tratamiento, se tiene el mismo número de unidades experimentales.

Hipótesis de Investigación. Algún porcentaje de aditivo (Limolita), producirá el mayor valor de resistencia a la compresión.

***Diseño del tratamiento*.** 1) 5%; 2) 10%; 3) 15%; 4) 20%; 5) 25%.

Diseño de Experimento: Asumimos que nuestro diseño es aleatorizado .A cada día de curado se le asigno al azar tres probetas del mismo tamaño y realizadas con el mismo porcentaje de aditivo.

Nosotros tenemos que usar un modelo estadístico para los estudios comparativos en el que supone que existe población de referencia de las unidades experimentales (probetas) y se asume una población de referencia para cada condición de tratamiento en el estudio además de que las unidades experimentales son sus representantes seleccionados al azar como resultado de una aleatorización.

Cada unidad individual en nuestra población tiene un valor para la variable de respuesta, que es la resistencia a la compresión y esta variable tiene una media μ para cada condición de tratamiento y una varianza σ2.

Mis supuestos, serán:

- La variable de respuesta tiene una media μ y una varianza σ^2

- La varianza σ^2 es homogénea (se asume que es la misma y no afecta el tratamiento).

Las hipótesis serán:

- Hipótesis nula: $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \ldots\ldots = \mu_t$
- Hipótesis alterna: $H_a = \mu_i \neq \mu_k$, donde $i \neq k$.

Igual que en el análisis individual, se tiene que considerar que cada tratamiento posee una distribución normal, entonces a cada tratamiento, se tiene que identificar que posea una distribución normal, esto lo verificamos, introduciendo los datos, para cada tratamiento en Statistica, observando su distribución en el histograma y comparando el valor d con el de la tabla de la Distribución del estadístico de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors (Dn), para el contraste de normalidad, se tiene de la tabla, del apéndice C, con un $\alpha = 0.05$ y con $n = 12$, se tiene el valor $d = 0.242$.

La siguiente tabla muestra los tratamientos, que obedecen una distribución normal.

TABLA 29

DISTRIBUCION NORMAL DE LOS DATOS

	Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors		
	Calculado	**Tabla**	**Normalidad**
5%	0,2893	0,242	NO
10%	0,1312	0,242	SI
15%	0,2204	0,242	SI
20%	0,2389	0,242	SI
25%	0,2004	0,242	SI

Si los tratamientos no se comportan con una distribución normal, se puede realizar algún artífico que los normalice. En este caso solo los datos del 5% no cumplen por lo que aceptamos los datos e ingresamos los valores al programa. Se analizará por el método de Anova Factorial, como variable

dependiente, el esfuerzo último y como independientes, el porcentaje de aditivo y los días.

	1 Porcentaje	2 Días	3 Esfuerzo ultimo
13	10	7	57,94
14	10	7	43,51
15	10	7	46,06
16	10	14	45,08
17	10	14	66,64
18	10	14	52,92
19	10	21	85,23
20	10	21	83,75
21	10	21	92,65
22	10	28	70,38
23	10	28	75,73
24	10	28	71,26
25	15	7	49,05
26	15	7	52,189
27	15	7	55,132
28	15	14	50,4234
29	15	14	49,05
30	15	14	49,44
31	15	21	66,7
32	15	21	51,01
33	15	21	48,069
34	15	28	54,936
35	15	28	44,145
36	15	28	51,012

FIGURA 4.17 INGRESO DE DATOS AL PROGRAMA

Se obtiene la tabla con las medias, y la desviación estándar, con sus respectivos intervalos de confianza para cada día y porcentaje correspondiente.

TABLA 30

MEDIAS NO PONDERADAS

Porcentajes*Días; Unweighted Means (Sheet1 in Imported from C:
Current effect: F(12, 40)=7,9652, p=,00000
Effective hypothesis decomposition

Porcentajes	Días	Esfuerzo ultimo Mean	Esfuerzo ultimo Std.Err.	Esfuerzo ultimo -95,00%	Esfuerzo ultimo +95,00%	N
5	7	37,48667	3,479667	30,45400	44,51934	3
5	14	74,42667	3,479667	67,39400	81,45934	3
5	21	69,97667	3,479667	62,94400	77,00934	3
5	28	74,72000	3,479667	67,68733	81,75267	3
10	7	49,17000	3,479667	42,13733	56,20267	3
10	14	54,88000	3,479667	47,84733	61,91267	3
10	21	87,21000	3,479667	80,17733	94,24267	3
10	28	72,45667	3,479667	65,42400	79,48934	3
15	7	52,12367	3,479667	45,09100	59,15634	3
15	14	49,63780	3,479667	42,60513	56,67047	3
15	21	55,25967	3,479667	48,22700	62,29234	3
15	28	50,03100	3,479667	42,99833	57,06367	3
20	7	42,92400	3,479667	35,89133	49,95667	3
20	14	50,24133	3,479667	43,20866	57,27400	3
20	21	67,26667	3,479667	60,23400	74,29934	3
20	28	62,52333	3,479667	55,49066	69,55600	3
25	7	50,50267	3,479667	43,47000	57,53534	3
25	14	50,24133	3,479667	43,20866	57,27400	3
25	21	73,51133	3,479667	66,47866	80,54400	3
25	28	47,30133	3,479667	40,26866	54,33400	3

Al analizar la tabla 31 de análisis de varianza (ANOVA), se obtiene, lo siguiente. Al analizar, los valores obtenidos en la tabla, por el dato de probabilidad p, podemos observar que es menor, al valor del error alfa, igual a 0,05 tanto en el porcentaje como en los días, y en la multiplicación de ambos. Por lo que se rechaza la hipótesis nula, por la alterna, concluyendo que existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos.

TABLA 31

TABLA ANOVA PARA DATOS GRUPALES

Effect	Univariate Tests of Significance for Esfuerzo ultimo (S Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	205999,2	1	205999,2	5671,121	0,000000
Porcentajes	1797,4	4	449,4	12,371	0,000001
Días	4622,3	3	1540,8	42,417	0,000000
Porcentajes*Días	3472,0	12	289,3	7,965	0,000000
Error	1453,0	40	36,3		

Una vez que se ha rechazado la hipótesis nula, es deseable saber donde se encuentra la diferencia entre los grupos. Una primera aproximación, consiste en comparar al primer grupo, contra los otros restantes (suponemos que el primer grupo es el control), mediante la prueba de Tukey se pueden obtener las diferencias entre las medias por pares de grupo, con respecto al control, con sus respectivos intervalos de confianza. Los resultados obtenidos, proporcionan el valor de p para cada comparación. Al analizar los datos y mostrar las diferencias significativas entre los tratamientos, por medio del análisis de Tukey, el cual es más estricto, se obtienen la siguiente tabla.

TABLA 32

PRUEBA DE TUKEY PARA COMPARAR ENTRE TRATAMIENTOS

Tukey HSD test; variable esfuerzo (N) (Sheet2 in Imported from C:\Documents and Settings\Christian\Escritorio\DATOS PARA ANOVA grupal.xls)
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests
Error: Between MS = 396E11, df = 40,000

Cell No.	porcentaje	días	{1} 2091E3	{2} 3246E4	{3} 2433E4	{4} 3181E4	{5} 6452E3	{6} 1056E4	{7} 5855E4	{8} 2774E4	{9} 7482E3	{10} 6076E3	{11} 1063E4	{12} 6559E3	{13} 3544E3	{14} 7197E3	{15} 2055E4	
1	5	7		0,000268	0,012074	0,000313	0,999996	0,977215	0,000179	0,001871	0,999909	0,999999	0,975360	0,999995	1,000000	0,999959	0,081082	0
2	5	14	0,000268		0,984892	1,000000	0,001539	0,014511	0,001476	0,999987	0,002685	0,001266	0,015057	0,001629	0,000401	0,002298	0,712730	0
3	5	21	0,012074	0,984892		0,993831	0,105293	0,470349	0,000185	1,000000	0,163044	0,088962	0,479434	0,110392	0,026001	0,144982	1,000000	0
4	5	28	0,000313	1,000000	0,993831		0,002186	0,020510	0,001058	0,999999	0,003848	0,001787	0,021264	0,002318	0,000523	0,003289	0,789788	0
5	10	7	0,999996	0,001539	0,105293	0,002186		0,999999	0,000179	0,020059	1,000000	1,000000	0,999998	1,000000	1,000000	1,000000	0,428485	0
6	10	14	0,977215	0,014511	0,470349	0,020510	0,999999		0,000179	0,142651	1,000000	0,999994	1,000000	0,999999	0,997024	1,000000	0,906343	0
7	10	21	0,000179	0,001476	0,000185	0,001058	0,000179	0,000179		0,000241	0,000179	0,000179	0,000179	0,000179	0,000179	0,000179	0,000179	0
8	10	28	0,001871	0,999987	1,000000	0,999999	0,020059	0,142651	0,000241		0,034082	0,016443	0,146830	0,021218	0,004141	0,029504	0,996074	0
9	15	7	0,999909	0,002685	0,163044	0,003848	1,000000	1,000000	0,000179	0,034082		1,000000	1,000000	1,000000	0,999999	1,000000	0,562067	0
10	15	14	0,999999	0,001266	0,088962	0,001787	1,000000	0,999994	0,000179	0,016443	1,000000		0,999993	1,000000	1,000000	1,000000	0,383065	0
11	15	21	0,975360	0,015057	0,479434	0,021264	0,999998	1,000000	0,000179	0,146830	1,000000	0,999993		0,999999	0,996659	1,000000	0,911165	0
12	15	28	0,999995	0,001629	0,110392	0,002318	1,000000	0,999999	0,000179	0,021218	1,000000	1,000000	0,999999		1,000000	1,000000	0,441908	0
13	20	7	1,000000	0,000401	0,026001	0,000523	1,000000	0,997024	0,000179	0,004141	0,999999	1,000000	0,996659	1,000000		1,000000	0,152957	0
14	20	14	0,999959	0,002298	0,144982	0,003289	1,000000	1,000000	0,000179	0,029504	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000		0,524308	0
15	20	21	0,081082	0,712730	1,000000	0,789788	0,428485	0,906343	0,000179	0,996074	0,562067	0,383065	0,911165	0,441908	0,152957	0,524308		0
16	20	28	0,518435	0,154920	0,965983	0,201182	0,958664	0,999976	0,000179	0,669921	0,987114	0,941354	0,999981	0,962864	0,708869	0,981607	0,999964	
17	25	7	0,999997	0,001521	0,104286	0,002161	1,000000	0,999998	0,000179	0,019832	1,000000	1,000000	0,999998	1,000000	1,000000	1,000000	0,425791	0
18	25	14	1,000000	0,000889	0,064368	0,001237	1,000000	0,999948	0,000179	0,011312	1,000000	1,000000	0,999937	1,000000	1,000000	1,000000	0,305417	0
19	25	21	0,007682	0,995338	1,000000	0,998488	0,072053	0,368263	0,000189	1,000000	0,114726	0,060362	0,376299	0,075747	0,016804	0,101215	0,999991	0
20	25	28	0,984316	0,012270	0,430803	0,017383	1,000000	1,000000	0,000179	0,124938	1,000000	0,999998	1,000000	1,000000	0,998298	1,000000	0,882553	0

Se observa diferencias entre los tratamientos, en los diferentes días y entre los porcentajes, también entre probetas, por medio de las probabilidades. Los valores en rojo muestran las diferencias en pares.

En el análisis ANOVA, el programa me da un gráfico global, en que se encuentran las medias de cada valor con sus intervalos globales de confianza, para la resistencia, con respecto a los porcentajes. Obteniendo el siguiente gráfico.

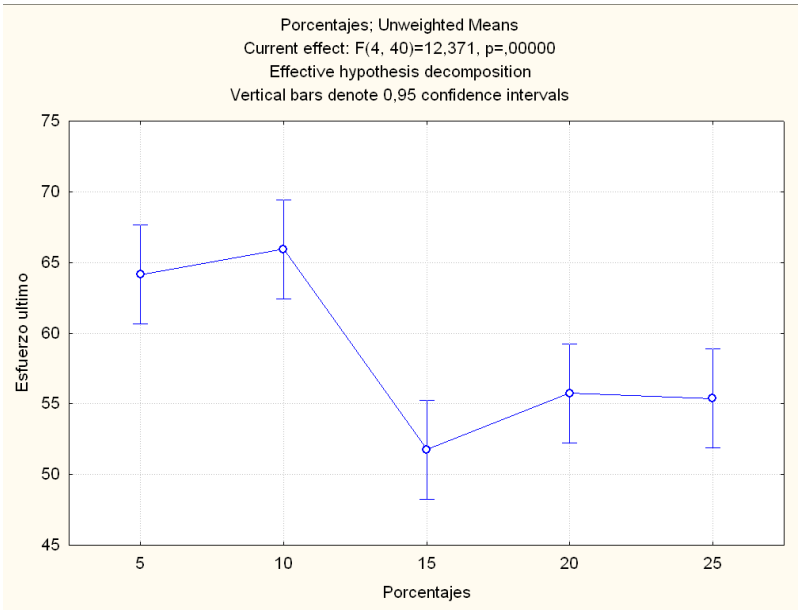


FIGURA 4.18 ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE

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

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

TABLA 33

INTERVALOS DE CONFIANZA DE ESFUERZO DE RUPTURA A DISTINTOS DÍAS.

Cell No.	Días; Unweighted Means (Sheet1 in Imported from C Current effect: F(3, 40)=42,417, p=,00000 Effective hypothesis decomposition Días	Esfuerzo ultimo Mean	Esfuerzo ultimo Std.Err.	Esfuerzo ultimo -95,00%	Esfuerzo ultimo +95,00%	N
1	7	46,44140	1,556154	43,29629	49,58651	15
2	14	55,88543	1,556154	52,74032	59,03053	15
3	21	70,64487	1,556154	67,49976	73,78997	15
4	28	61,40647	1,556154	58,26136	64,55157	15

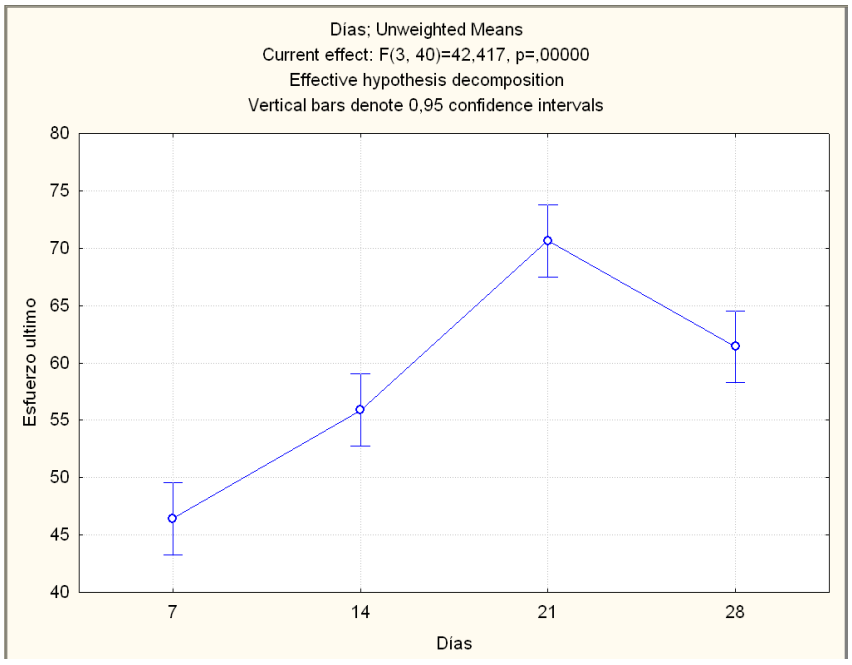
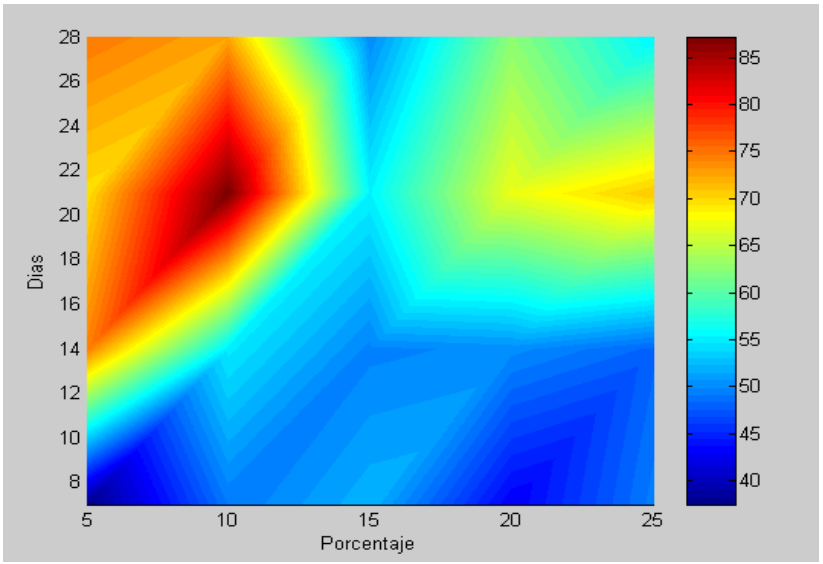


FIGURA 4.19 ESFUERZO DE RUPTURA VS. DÍAS

A continuación se muestra una gráfica en tercera dimensión con, los valores de las medias obtenidas para cada experimento, dependiendo del porcentaje y días de curado.



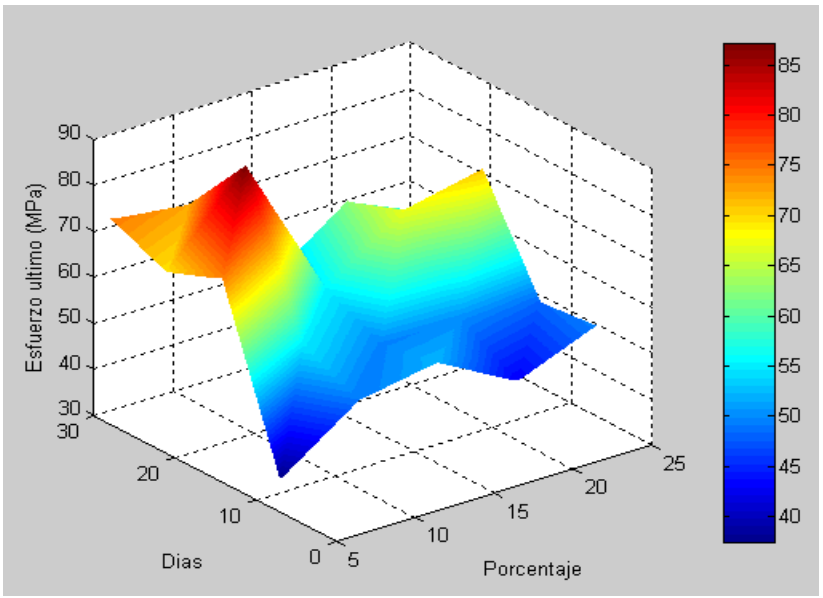


FIGURA 4.20 GRÁFICA DE ESFUERZOS ÚLTIMOS, DÍAS Y PORCENTAJES DE ADITIVOS

Análisis para los datos de validación.

Se realiza, el mismo procedimiento que en los datos anteriores, teniendo en cuenta los supuestos correspondientes y las hipótesis. Además se tienen que analizar si los datos siguen una distribución normal.

TABLA 34

DATOS GRUPALES PARA ANÁLISIS ESTADÍSTICO (VALIDACIÓN)

	Esfuerzos Ultimo a la compresión (MPa)				
	7,5%	**12,5%**	**17,5%**	**22,5%**	**27,5%**
4 días	47,68	64,68	44,15	44,30	51,16
	68,67	61,94	41,59	44,10	45,08
	59,84	71,93	48,07	51,94	56,84
11 días	66,71	50,96	53,37	61,74	50,96
	75,54	65,66	52,39	49,98	54,88
	63,18	52,92	45,32	52,92	50,96
18 días	79,17	81,07	54,15	70,23	29,01
	90,74	91,76	53,96	66,67	29,40
	69,39	84,64	53,96	75,57	43,12
25 días	78,28	75,73	48,07	64,90	51,56
	82,73	77,51	47,09	59,56	65,79
	77,40	85,53	59,84	47,12	53,34

La tabla siguiente muestra si los datos, para cada tratamiento cumplen una distribución normal.

TABLA 35

DISTRIBUCION NORMAL DE LOS DATOS (VALIDACIÓN)

	Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors		
	Calculado	Tabla	Normalidad
7,5%	0,1334	0,242	SI

12,5%	0,11203	0,242	SI
17,5%	0,16382	0,242	SI
22,5%	0,1654	0,242	SI
27,5%	0,25773	0,242	NO

Ya habiendo, comprobado la normalidad de los datos, se ingresan todos los valores al programa, y escogemos el método de Anova Factorial.

TABLA 36

MEDIAS NO PONDERADAS (VALIDACIÓN)

porcentaje*días; Unweighted Means (Sheet2 in Imported from F:\GRUPAL\DATOS PAF
Current effect: F(12, 40)=5,8303, p=,00001
Effective hypothesis decomposition

porcentaje	días	esfuerzo (N) Mean	esfuerzo (N) Std.Err.	esfuerzo (N) -95,00%	esfuerzo (N) +95,00%	N
siete cinco	4	58,72920	3,711877	51,22722	66,23118	3
siete cinco	11	68,47380	3,711877	60,97182	75,97578	3
siete cinco	18	79,76747	3,711877	72,26548	87,26945	3
siete cinco	25	79,47093	3,711877	71,96895	86,97292	3
doce cinco	4	66,18333	3,711877	58,68135	73,68532	3
doce cinco	11	56,51333	3,711877	49,01135	64,01532	3
doce cinco	18	85,82333	3,711877	78,32135	93,32532	3
doce cinco	25	79,59000	3,711877	72,08802	87,09198	3
diez y siete-cinco	4	44,60333	3,711877	37,10135	52,10532	3
diez y siete-cinco	11	50,36000	3,711877	42,85802	57,86198	3
diez y siete-cinco	18	54,02333	3,711877	46,52135	61,52532	3
diez y siete-cinco	25	51,66667	3,711877	44,16468	59,16865	3
veintidos cinco	4	46,77867	3,711877	39,27668	54,28065	3
veintidos cinco	11	54,88000	3,711877	47,37802	62,38198	3
veintidos cinco	18	70,82333	3,711877	63,32135	78,32532	3
veintidos cinco	25	57,19333	3,711877	49,69135	64,69532	3
veintisiete cinco	4	51,02533	3,711877	43,52335	58,52732	3
veintisiete cinco	11	52,26667	3,711877	44,76468	59,76865	3
veintisiete cinco	18	33,84267	3,711877	26,34068	41,34465	3
veintisiete cinco	25	56,89921	3,711877	49,39722	64,40119	3

Al analizar la tabla de análisis de varianza (ANOVA), se obtiene, lo siguiente.

TABLA 37

TABLA ANOVA PARA DATOS GRUPALES (VALIDACIÓN)

Univariate Tests of Significance for esfuerzo (N) (Shee
Sigma-restricted parameterization
Effective hypothesis decomposition

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	215609,2	1	215609,2	5216,255	0,000000
porcentaje	6179,1	4	1544,8	37,373	0,000000
días	1547,8	3	515,9	12,482	0,000007
porcentaje*días	2891,9	12	241,0	5,830	0,000010
Error	1653,4	40	41,3		

Al analizar, los valores obtenidos en la tabla, por el dato de probabilidad p, podemos observar que es menor, al valor del error alfa, igual a 0,05 tanto en el porcentaje como en los días, y en la multiplicación de ambos. Por lo que se rechaza la hipótesis nula, por la alterna, concluyendo que existen diferencias significativas entre las medias de los tratamientos.

Al analizar los datos y mostrar las diferencias significativas entre los tratamientos, por medio del análisis de Tukey, el cual es más estricto, se obtienen la siguiente tabla.

TABLA 38

PRUEBA DE TUKEY PARA COMPARAR ENTRE TRATAMIENTOS (VALIDACIÓN)

Tukey HSD test; variable esfuerzo (N) (Sheet2 in Imported from F:\GRUPAL\DATOS PARA ANOVA grupal (validacion).xls)
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests
Error: Between MS = 41,334, df = 40,000

Cell No.	porcentaje	días	{1} 58,729	{2} 68,474	{3} 79,767	{4} 79,471	{5} 66,183	{6} 56,513	{7} 85,823	{8} 79,590	{9} 44,603	{10} 50,360	{11} 54,023
1	siete cinco	4		0,934237	0,028529	0,033082	0,995307	1,000000	0,001173	0,031189	0,461495	0,983602	0,999991
2	siete cinco	11	0,934237		0,811137	0,840438	1,000000	0,737057	0,153736	0,828973	0,006497	0,111877	0,421646
3	siete cinco	18	0,028529	0,811137		1,000000	0,530623	0,009038	0,999656	1,000000	0,000184	0,000417	0,002362
4	siete cinco	25	0,033082	0,840438	1,000000		0,569131	0,010579	0,999350	1,000000	0,000185	0,000475	0,002768
5	doce cinco	4	0,995307	1,000000	0,530623	0,569131		0,938247	0,056284	0,553638	0,021695	0,272872	0,713082
6	doce cinco	11	1,000000	0,737057	0,009038	0,010579	0,938247		0,000432	0,009932	0,743006	0,999574	1,000000
7	doce cinco	18	0,001173	0,153736	0,999656	0,999350	0,056284	0,000432		0,999493	0,000179	0,000183	0,000228
8	doce cinco	25	0,031189	0,828973	1,000000	1,000000	0,553638	0,009932	0,999493		0,000184	0,000445	0,002597
9	diez y siete-cinco	4	0,461495	0,006497	0,000184	0,000185	0,021695	0,743006	0,000179	0,000184		0,999829	0,950455
10	diez y siete-cinco	11	0,983602	0,111877	0,000417	0,000475	0,272872	0,999574	0,000183	0,000445	0,999829		1,000000
11	diez y siete-cinco	18	0,999991	0,421646	0,002362	0,002768	0,713082	1,000000	0,000228	0,002597	0,950455	1,000000	
12	diez y siete-cinco	25	0,997517	0,190458	0,000725	0,000829	0,413701	0,999986	0,000189	0,000785	0,997514	1,000000	1,000000
13	veintidos cinco	4	0,738232	0,020456	0,000201	0,000206	0,062823	0,934781	0,000179	0,000204	1,000000	1,000000	0,996626
14	veintidos cinco	11	1,000000	0,529374	0,003746	0,004397	0,810141	1,000000	0,000272	0,004123	0,900521	0,999995	1,000000
15	veintidos cinco	18	0,721074	1,000000	0,968813	0,977329	0,999993	0,438720	0,357861	0,974153	0,001837	0,037929	0,190980
16	veintidos cinco	25	1,000000	0,812493	0,012950	0,015125	0,967301	1,000000	0,000573	0,014214	0,659398	0,998343	1,000000
17	veintisiete cinco	4	0,993177	0,147698	0,000548	0,000625	0,340525	0,999913	0,000185	0,000589	0,999251	1,000000	1,000000
18	veintisiete cinco	11	0,999187	0,238208	0,000963	0,001111	0,488005	0,999998	0,000194	0,001048	0,993564	1,000000	1,000000
19	veintisiete cinco	18	0,003748	0,000186	0,000179	0,000179	0,000213	0,012309	0,000179	0,000179	0,861954	0,212548	0,043508
20	veintisiete cinco	25	1,000000	0,781195	0,011091	0,012966	0,956325	1,000000	0,000510	0,012179	0,696381	0,999054	1,000000

Se observa diferencias entre los tratamientos, en los diferentes días y entre los porcentajes, también entre probetas, por medio de las probabilidades. Los valores en rojo muestran las diferencias en pares.

En el análisis ANOVA, el programa me da un gráfico global, en que se encuentran las medias de cada valor con sus intervalos globales de confianza, para la resistencia, con respecto a los porcentajes. Obteniendo el siguiente gráfico.

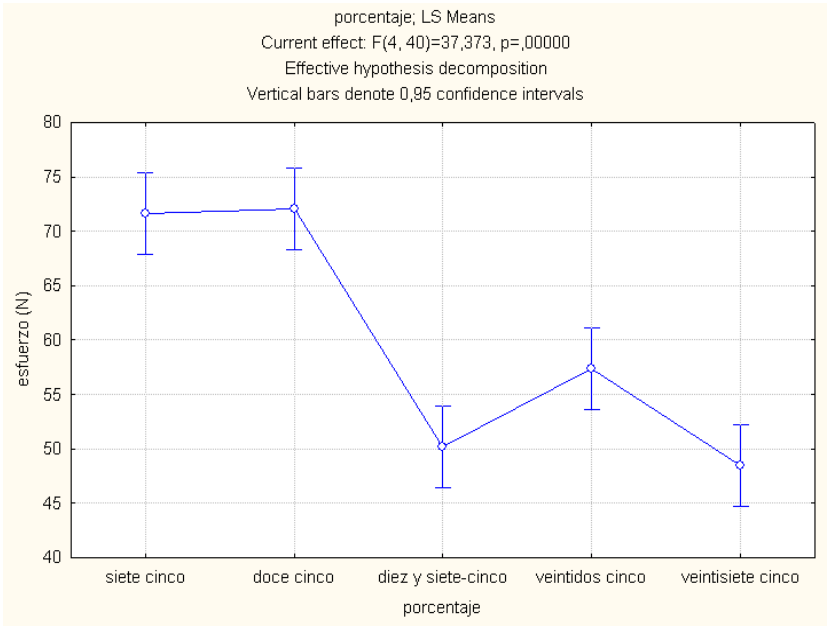


FIGURA 4.21 ESFUERZO DE RUPTURA VS. PORCENTAJE (VALIDACIÓN)

Al interpretar el gráfico obtenido, se observan que las medias entre el porcentaje de 7.5 y 12.5% son parecidas, mientras en los otros tratamientos son distintas. Se puede decir que las medias entre los tratamientos de 7.5 y 12.5 % son donde se encuentran los más altos valores de resistencia a la compresión.

También se puede interpretar de manera global, con respecto a los datos ingresados, el valor máximo de resistencia a la compresión, dependiendo de los días de curado. Obteniendo la más alta resistencia a la compresión entre los 18 y 25.

TABLA 39

INTERVALOS DE CONFIANZA DE ESFUERZO DE RUPTURA A DISTINTOS DÍAS (VALIDACIÓN).

días; Unweighted Means (Sheet2 in Imported from C:\Documents ar
Current effect: F(3, 40)=12,482, p=,00001
Effective hypothesis decomposition

días	esfuerzo (N) Mean	esfuerzo (N) Std.Err.	esfuerzo (N) -95,00%	esfuerzo (N) +95,00%	N
4	53,46397	1,660002	50,10898	56,81896	15
11	56,49876	1,660002	53,14377	59,85375	15
18	64,85603	1,660002	61,50104	68,21102	15
25	64,96403	1,660002	61,60904	68,31902	15

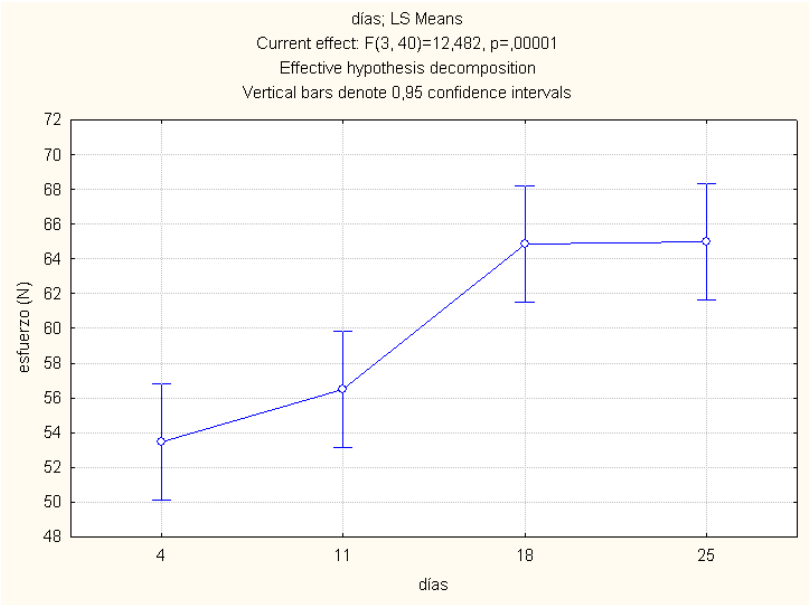


FIGURA 4.22 ESFUERZO DE RUPTURA VS. DÍAS (VALIDACIÓN)

A continuación se muestra una gráfica en tercera dimensión con, los valores de las medias obtenidas para cada experimento, dependiendo del porcentaje y días de curado (Validación).

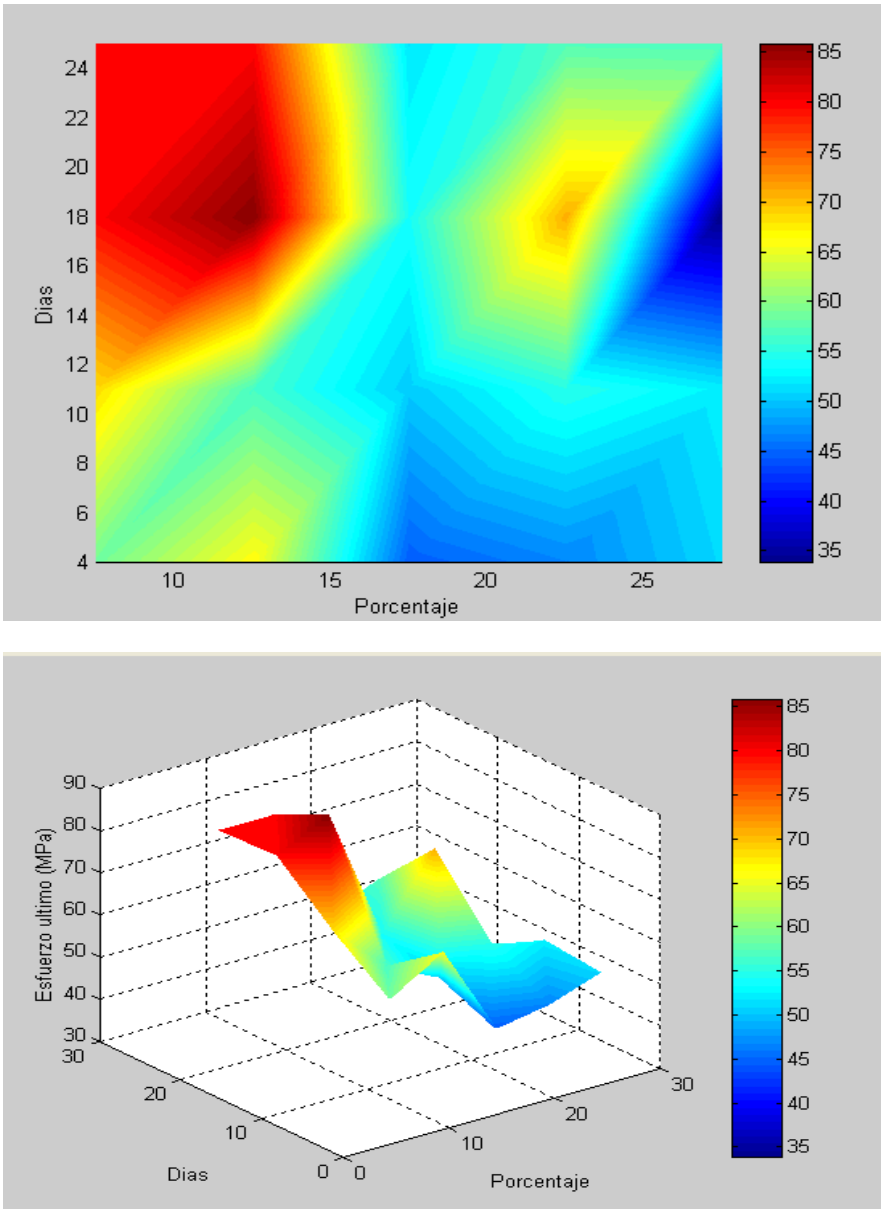


FIGURA 4.23 GRÁFICA DE ESFUERZOS ÚLTIMOS, DÍAS Y PORCENTAJES DE ADITIVOS (VALIDACIÓN)

La gráfica total de los porcentajes globales se analizo en Statistica, obteniendo lo siguiente.

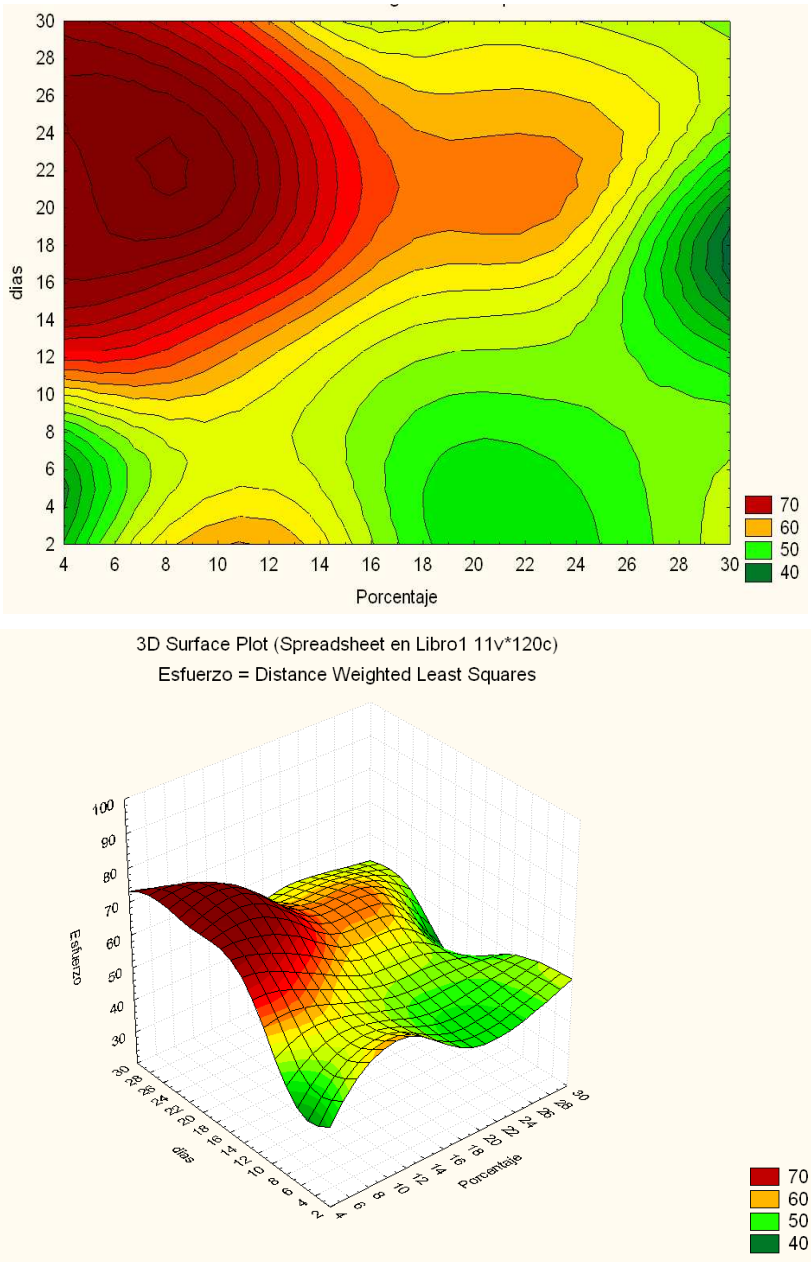


FIGURA 4.24 GRÁFICA GLOBAL DE ESFUERZOS ÚLTIMOS, DÍAS Y PORCENTAJES

4.4. Verificación del Modelo.

En el anterior capítulo, se realizo el programa que modelo el comportamiento del material, en la curva esfuerzo – deformación. En este punto se ingresarán los valores de algunos experimentos, y se ingresaran las constantes a y m del material, tratando de hallar la

constante que se ajuste mejor al material. En el capítulo anterior se designo la manera de hallar las constantes del material a y m.

Cabe destacar que se escogerá el valor del esfuerzo de fluencia igual a 0.7 el esfuerzo último a la compresión, de acuerdo al análisis de los datos experimentales.

Validación del modelo – 10% de limolita

A continuación solo se mostrará los datos ingresados y la gráfica obtenida para una de las probetas, para cada día correspondiente. Se mostrarán los datos de ingreso del programa. Los cuales variarán dependiendo de la probeta. Además se mostrará el valor del esfuerzo máximo de ruptura obtenido en el programa.

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

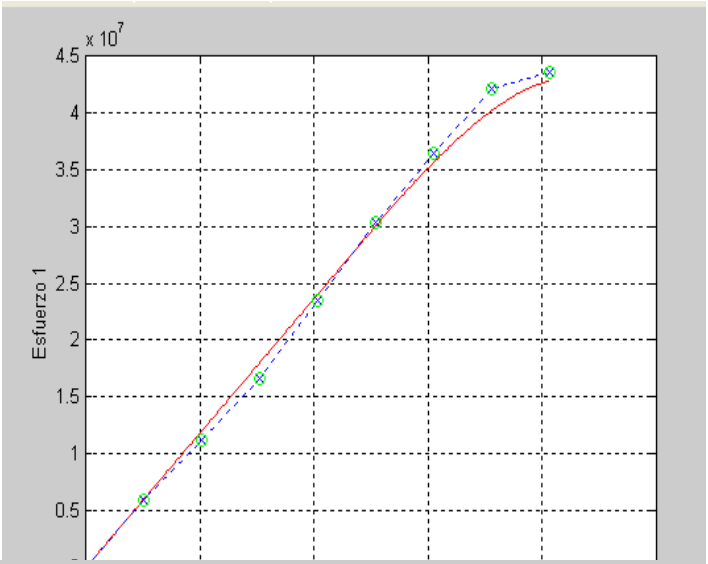


FIGURA 4.25 VALIDACIÓN DEL MODELO A LOS 7 DÍAS

E=1827e6;
m=0.0073;
a=0.43;
de=0.00005;
def=0.03556;
Gy(1)=46.65e6;
Max=6.1926e+007

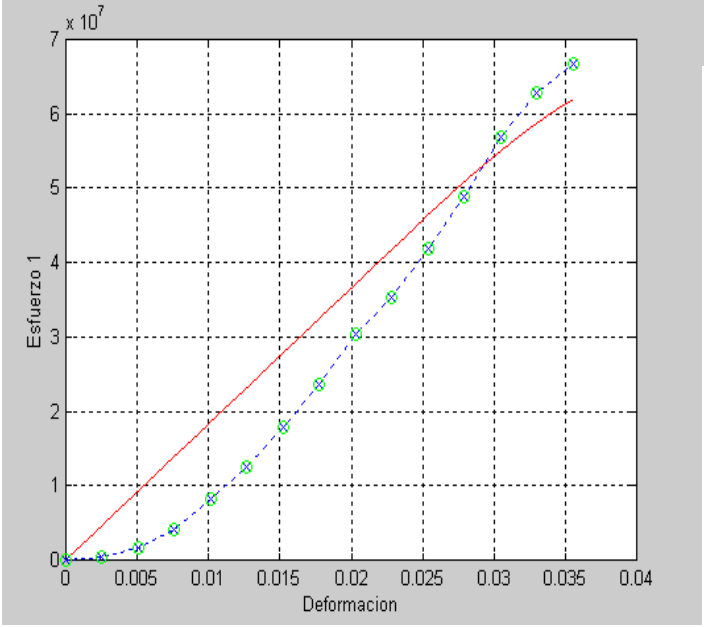


FIGURA 4.26 VALIDACIÓN DEL MODELO A LOS 14 DÍAS

E=4865e6;

m=0.0035;

a=0.43;

de=0.00005;

def=0.02286;

Gy(1)=59.87e6;

Max=8.4770e+007

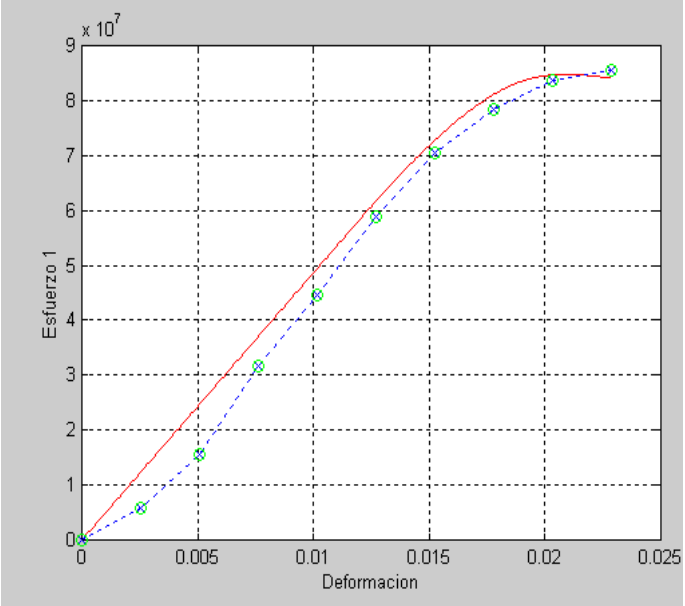


FIGURA 4.27
VALIDACIÓN DEL
MODELO A LOS 21 DÍAS

E=4594e6;

m=0.0031;

a=0.43;

de=0.00005;

def=0.01778;

Gy(1)=49.27e6;

Max=6.9628e+007

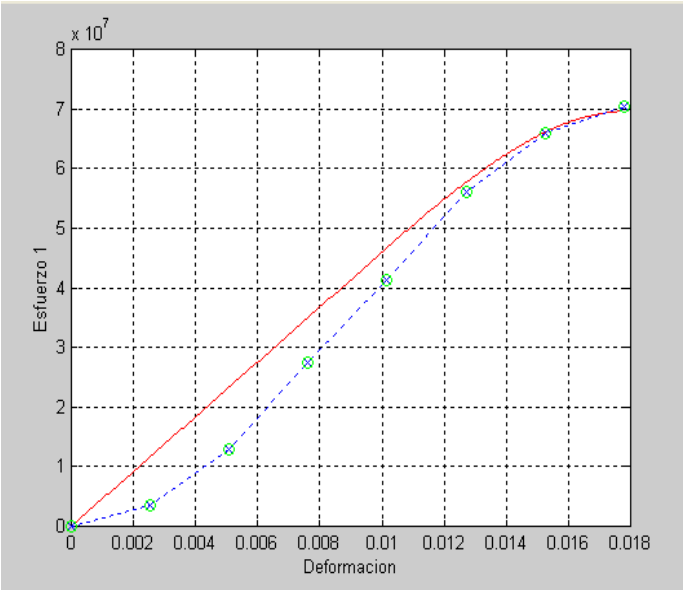


FIGURA 4.28
VALIDACIÓN DEL
MODELO A LOS 28 DÍAS

A continuación se muestra una tabla con los valores de a y m, los cuales se ajustaron a las curvas experimentales. Además se incluye los valores máximos obtenidos en el modelo, y en la experimentación.

TABLA 40

DATOS DE a Y m PARA AJUSTE DEL MODELO – 10% LIMOLITA

	10 % limolita				
días	**probeta**	**a**	**m**	**σmáx programa**	**σmáx experim**
7	primera probeta	0,43	0,0048	57,42	57,93
7	segunda probeta	0,43	0,0036	42,77	43,51
7	tercera probeta	0,43	0,0044	44,49	46,06
14	primera probeta	0,43	0,0062	42,58	45,08
14	segunda probeta	0,43	0,0073	61,92	66,64
14	tercera probeta	0,43	0,0066	47,87	52,92
21	primera probeta	0,43	0,0035	84,77	85,53
21	segunda probeta	0,43	0,0027	82,85	83,75
21	tercera probeta	0,43	0,0029	89,52	92,65
28	primera probeta	0,43	0,0031	69,62	70,38
28	segunda probeta	0,43	0,0034	73,09	75,73
28	tercera probeta	0,43	0,0043	65,3	71,27

Validación del modelo – 12.5% de limolita

Se proceden a validar el modelo con el 12.5% de limolita, igual que con los datos anteriores, se graficara una sola probeta, para cada día de prueba.

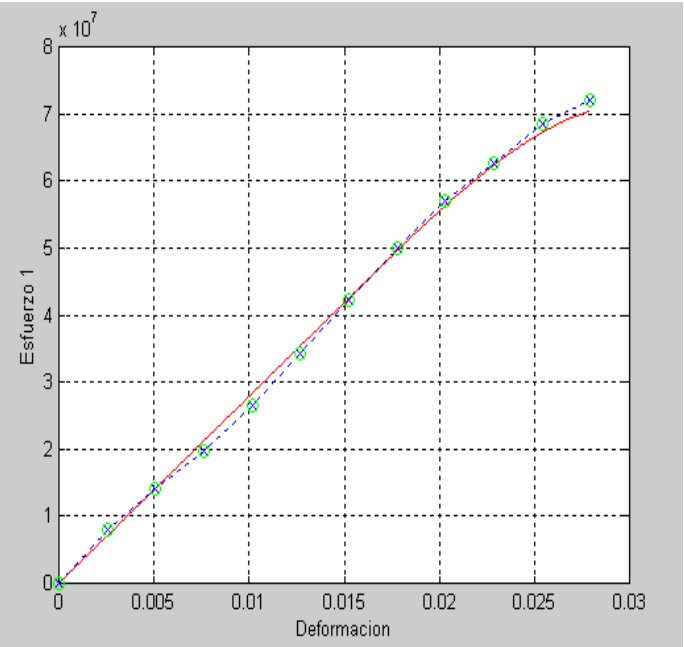
E=2788e6;

m=0.0052;

a=0.43;

de=0.00005;

def=0.02794;



Gy(1)=50.35e6;

Max=7.0362e+007

FIGURA 4.29 VALIDACIÓN DEL MODELO A LOS 4 DÍAS

E=1976e6;
m=0.0055;
a=0.43;
de=0.00005;
def=0.03556;
Gy(1)=45.96e6;
Max=6.4433e+007

FIGURA 4.30
VALIDACIÓN DEL
MODELO A LOS 11 DÍAS

E=6692e6;

m=0.0027;

a=0.43;

de=0.00005;

def=0.01524;

Gy(1)=64.23e6;

Max=9.0098e+007

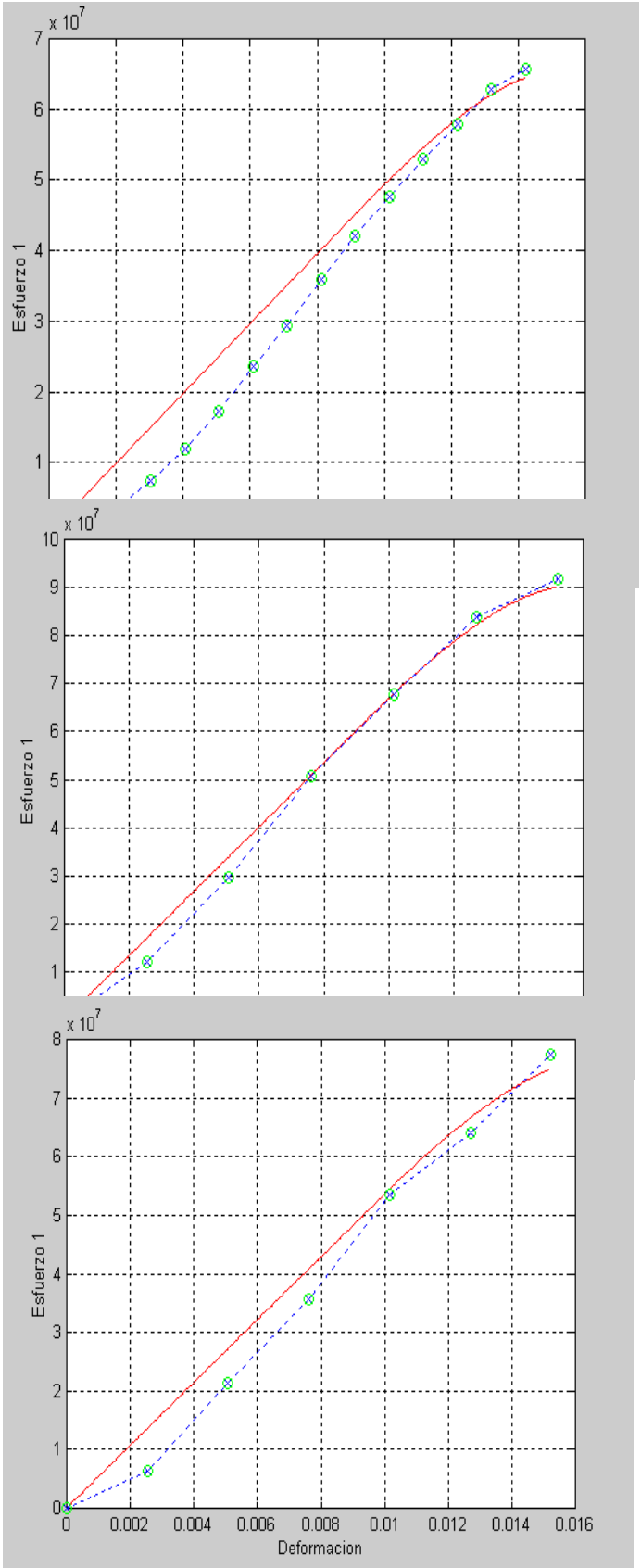
FIGURA 4.31
VALIDACIÓN DEL
MODELO A LOS 18 DÍAS

E=5360e6;

m=0.0029;

a=0.43;

de=0.00005;



def=0.01524;

Gy(1)=54.26e6;

Max=7.4826e+007

FIGURA 4.32 VALIDACIÓN DEL MODELO A LOS 25 DÍAS

A continuación se muestra una tabla con los valores de a y m, los cuales se ajustaron a las curvas experimentales. Además se incluye los valores máximos obtenidos en el modelo, y en la experimentación.

TABLA 41

DATOS DE a Y m PARA AJUSTE DEL MODELO – 12.5% LIMOLITA

	12.5 % limolita				
días	**probeta**	**a**	**m**	**σmáx programa**	**σmáx experim**
4	primera probeta	0,43	0,0055	63,76	64,68
4	segunda probeta	0,43	0,0057	60,28	61,94
4	tercera probeta	0,43	0,0052	70,36	71,93
11	primera probeta	0,43	0,0055	45,35	50,96
11	segunda probeta	0,43	0,0066	64,43	65,66
11	tercera probeta	0,43	0,0066	47,22	52,92
18	primera probeta	0,43	0,0025	76,64	81,07
18	segunda probeta	0,43	0,0027	90,09	91,76
18	tercera probeta	0,43	0,0042	70,45	84,64
25	primera probeta	0,43	0,0037	69,44	75,73
25	segunda probeta	0,43	0,0029	74,82	77,51
25	tercera probeta	0,43	0,0027	84,4	85,53

CAPITULO 5

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. Con la introducción de un material puzolánico (limolita) en el cemento Tipo I, se obtiene un declive o disminución en el esfuerzo último a la compresión, esto comparando, los valores obtenidos experimentalmente, con la referencia de tablas obtenidas en la bibliografía.

2. El adherir un aditivo al cemento, en este caso la limolita, hace que cambie el valor del esfuerzo último de compresión, pero existe un rango de porcentaje en el que se obtiene los más altos valores de resistencia.

3. Al comparar los datos obtenidos experimentalmente, dependiendo de la máquina en la que se realizó el ensayo, se observa que variaron en la forma de respuesta, esto se comprobó analizando las gráficas de la curva esfuerzo vs. Deformación, esto se debe a que en una se mantenía la velocidad de compresión constante, mientras que en la otra no.

4. En los ensayos de compresión, los esfuerzos últimos obtenidos, variaron o estuvieron muy dispersos, para ciertos días y probetas en los que se realizaron los ensayos, al analizar las probetas al momento de la ruptura, se veían porosidades, por lo que se concluía que la inclusión de burbujas en la probeta hace que disminuya su resistencia a la ruptura.

5. En el análisis de los resultados, en los ensayos en los primeros días se obtuvo una resistencia inicial, a medida que aumentaban los días de curado, llego un punto en donde obtuvieron su máxima resistencia, y luego comenzó a bajar, esto se debe a la hidratación de las probetas, como el curado fue al aire, las probetas no estuvieron suficientemente hidratadas, obteniendo su mayor resistencia a los 21 días, luego disminuyo la resistencia. Probablemente el valor luego se mantiene constante luego de los

28 días. Lo mismo se observo en el porcentaje utilizado para la validación, obteniendo la más alta resistencia a los 18 días y al pasar los días disminuye. Con esto se concluye que esto es por falta de hidratación de las muestras.

6. Por medio del análisis estadístico, se obtuvo, los porcentajes en los que se obtenía de manera global el mayor esfuerzo a la compresión, en la ruptura. Uniendo los datos de la validación y los porcentajes normales, se tiene un rango en el porcentaje de limolita, que está entre 7.5 y 12.5%, en este rango es donde se obtuvieron los mejores resultados.

7. El mantener suficientemente hidratas las probetas, hace que el valor de esfuerzo aumente, conforme pasan los días de curado, esto no sucede con el curado al aire, esto hace que los valores de respuesta de esfuerzo de ruptura conforme pasan los días de curado, varíen de manera polinomial, para el 10% y 12.5% que es la validación se ajusto mejor una curva polinómica de tercer grado, obteniendo una correlación aceptable para los datos.

8. Al momento de validar el modelo matemático, las curvas obtenidas se ajusta con una muy buena aproximación a los datos obtenidos

experimentalmente. Al comparar los gráficos dependiendo de la máquina utilizada para el ensayo, se observa que las gráficas obtenidas en la máquina a compresión constante se ajustan y se aproximan mejor a los datos obtenidos experimentalmente.

9. Los valores de a y m, obtenidos y el suponer que el esfuerzo de fluencia es igual a 0.7 el esfuerzo último, se obtiene una aproximación muy buena para los datos obtenidos en el experimento, por lo cual el modelo si aplica para mi experimento. Además que el esfuerzo máximo último obtenido en el experimento, se aproxima al obtenido experimentalmente en cada probeta.

5.2 RECOMENDACIONES

1 En la experimentación, es de gran importancia, obtener una granulometría de la limolita, igual a la del cemento, para obtener mejor resistencia a la compresión en la mezcla.

2 Se obtuvo que los datos obtenidos experimentalmente se ajustan mejor al modelo, en los obtenidos en la máquina con una compresión constante, lo que sugiere que para futuros ensayos se realice en máquinas con las mismas condiciones de operación o más avanzadas, lo que haga reducir el error experimental.

3 Antes del ensayo, es de gran importancia limpiar cada muestra, eliminando las incrustaciones o filos, los cuales se pondrán en contacto con las caras del bloque de la máquina. Resultados mucho más bajo que la verdadera fuerza se obtendrá debido a que las caras del cubo muestran que no son realmente de superficies planas. Por lo tanto, es esencial que los moldes se mantengan escrupulosamente limpios, pues de otro modo, las grandes irregularidades en las superficies se van a producir.

4 Para el análisis estadístico es de gran importancia, tener un modelo definido, para ser evaluado, considerar que todos los supuestos en el análisis se cumplan, esto hará que los resultados obtenidos, tengan una confiablidad elevada.

5 Para la comprobación del modelo existe un rango de valores en el ingreso de a y m dependiendo de los datos de entrada, los cuales hace que el programa no obtenga la gráfica adecuada, por lo que se sugiere variar estas constantes hasta encontrar, la mejor relación que se ajuste a los datos obtenidos en el experimento.

3.

4. 128

APÉNDICE A

TABLAS DE RESULTADOS OBTENIDOS AL 10% DE LIMOLITA, PARA LOS RESPECTIVOS DÍAS DE CURADO Y ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Día **Pág.**

Probetas a los 7 días…… 135

Probetas a los 14 días…….. 138

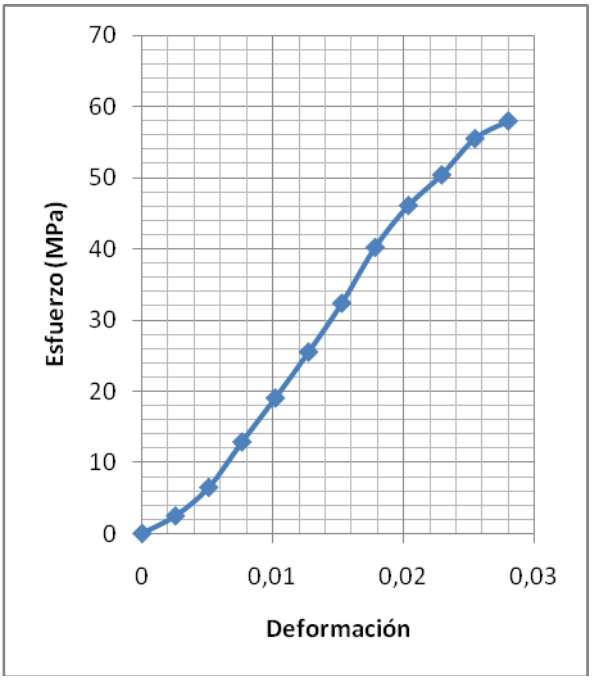
Probetas a los 21 días…….. 141

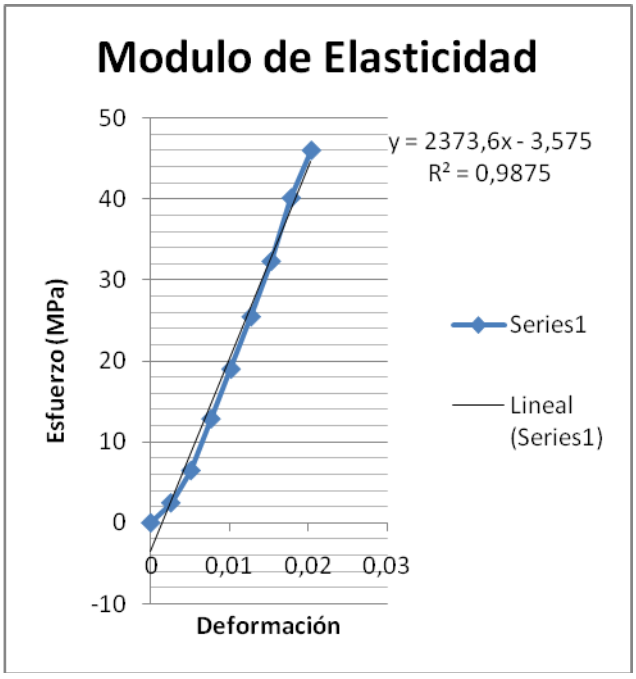
Probetas a los 28 días…….. 144

3.

4. 129

Primera probeta - G3/10/7						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza(Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	630	6174	2500	2,4696
0,01	0,254	0,00508	1650	16170	2500	6,468
0,015	0,381	0,00762	3280	32144	2500	12,8576
0,02	0,508	0,01016	4850	47530	2500	19,012
0,025	0,635	0,0127	6500	63700	2500	25,48
0,03	0,762	0,01524	8250	80850	2500	32,34
0,035	0,889	0,01778	10250	100450	2500	40,18
0,04	1,016	0,02032	11750	115150	2500	46,06
0,045	1,143	0,02286	12850	125930	2500	50,372
0,05	1,27	0,0254	14150	138670	2500	55,468
0,055	1,397	0,02794	14780	144844	2500	57,9376

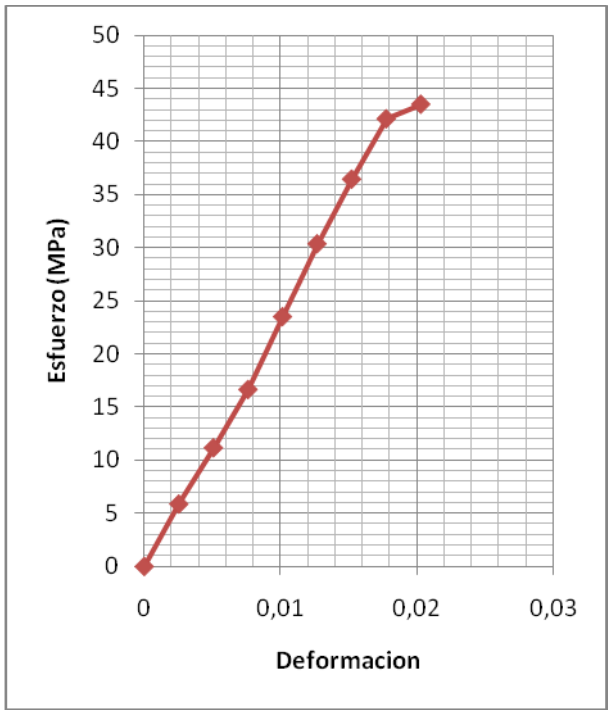


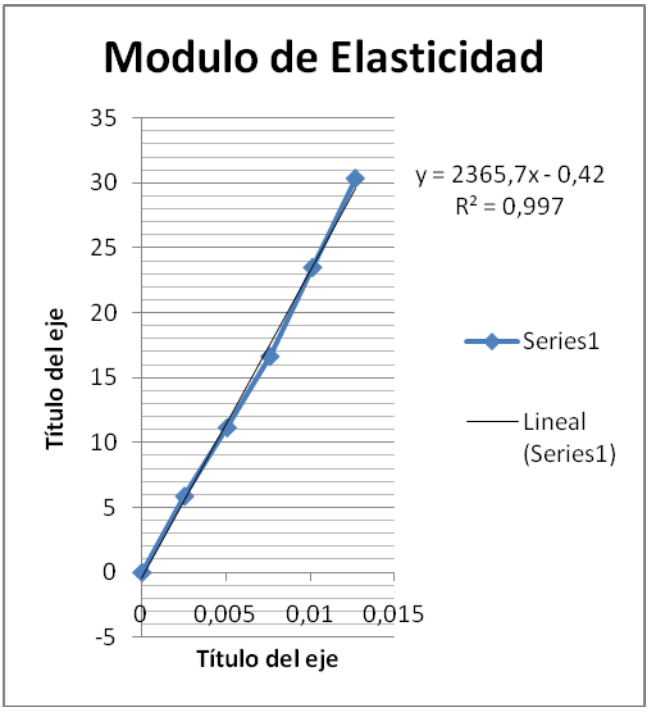


3.

4. 130

Segunda Probeta - G3/10/7						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza(Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	1500	14700	2500	5,88
0,01	0,254	0,00508	2850	27930	2500	11,172
0,015	0,381	0,00762	4250	41650	2500	16,66
0,02	0,508	0,01016	6000	58800	2500	23,52
0,025	0,635	0,0127	7750	75950	2500	30,38
0,03	0,762	0,01524	9300	91140	2500	36,456
0,035	0,889	0,01778	10750	105350	2500	42,14
0,04	1,016	0,02032	11100	108780	2500	43,512

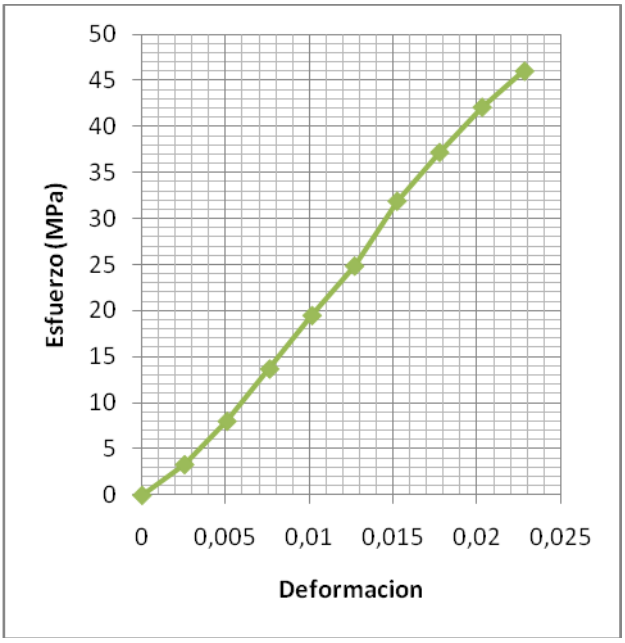


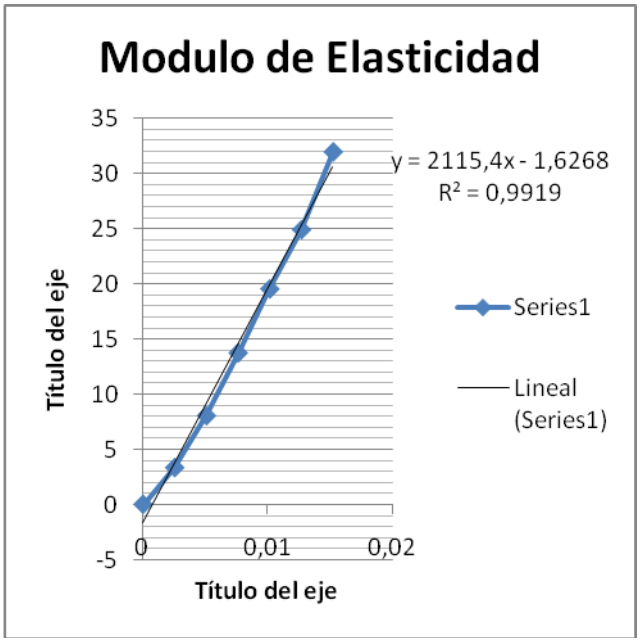


3.

4. 131

Tercera Probeta - G3/10/7						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza(Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	850	8330	2500	3,332
0,01	0,254	0,00508	2050	20090	2500	8,036
0,015	0,381	0,00762	3500	34300	2500	13,72
0,02	0,508	0,01016	4980	48804	2500	19,5216
0,025	0,635	0,0127	6350	62230	2500	24,892
0,03	0,762	0,01524	8150	79870	2500	31,948
0,035	0,889	0,01778	9500	93100	2500	37,24
0,04	1,016	0,02032	10750	105350	2500	42,14
0,045	1,143	0,02286	11750	115150	2500	46,06

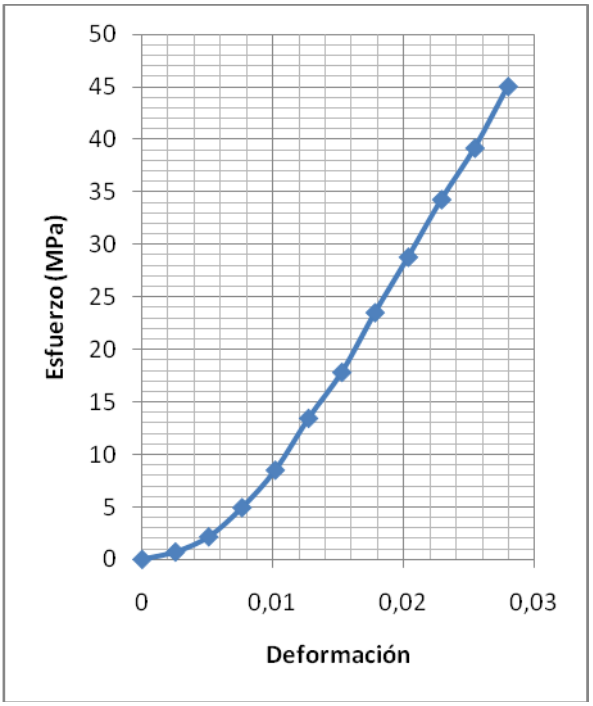


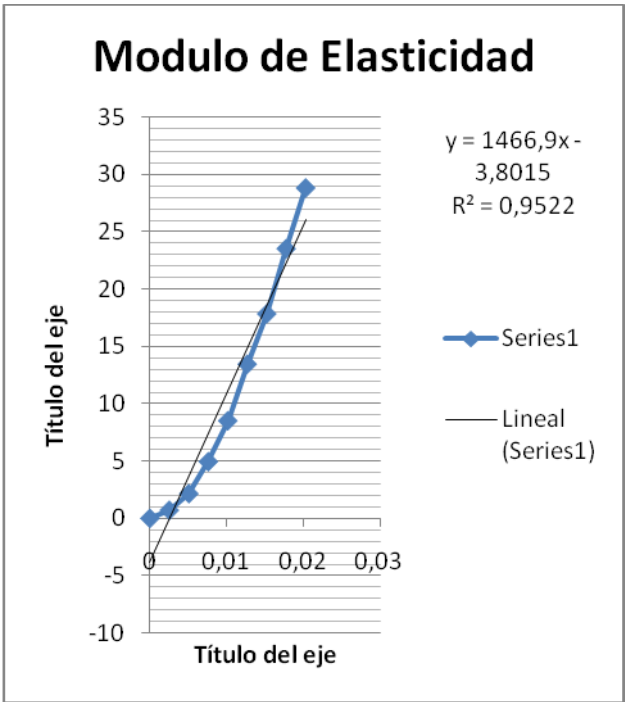


3.

4. 132

Primera Probeta - G3/10/14						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	180	1764	2500	0,7056
0,01	0,254	0,00508	550	5390	2500	2,156
0,015	0,381	0,00762	1260	12348	2500	4,9392
0,02	0,508	0,01016	2170	21266	2500	8,5064
0,025	0,635	0,0127	3430	33614	2500	13,4456
0,03	0,762	0,01524	4550	44590	2500	17,836
0,035	0,889	0,01778	6000	58800	2500	23,52
0,04	1,016	0,02032	7350	72030	2500	28,812
0,045	1,143	0,02286	8750	85750	2500	34,3
0,05	1,27	0,0254	10000	98000	2500	39,2
0,055	1,397	0,02794	11500	112700	2500	45,08

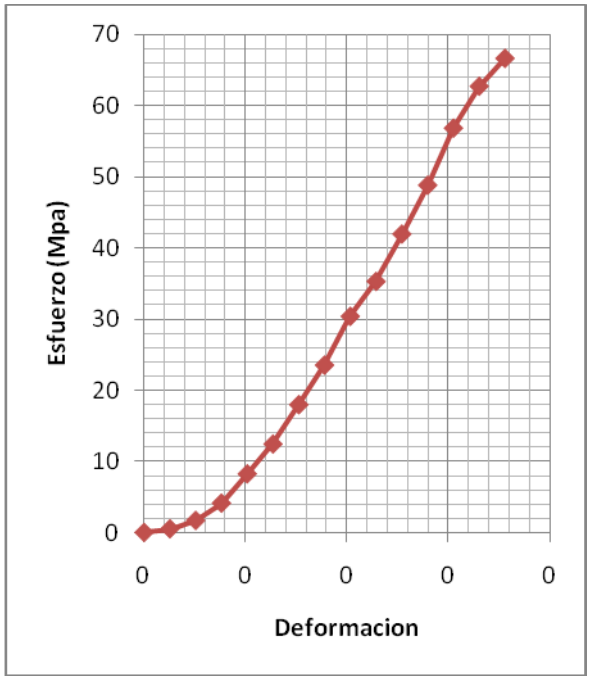


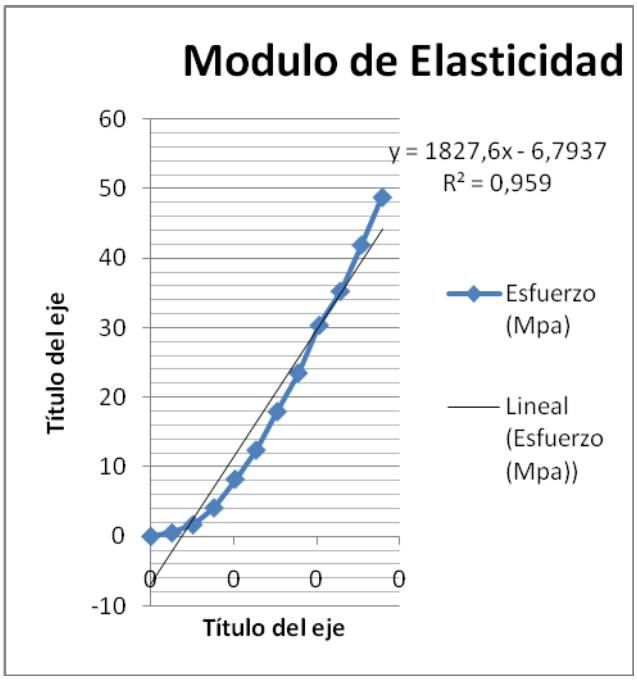


Segunda Probeta - G3/10/14						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0,00	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	130	1274	2500	0,5096
0,01	0,254	0,00508	430	4214	2500	1,6856
0,015	0,381	0,00762	1050	10290	2500	4,116
0,02	0,508	0,01016	2100	20580	2500	8,232
0,025	0,635	0,0127	3170	31066	2500	12,4264
0,03	0,762	0,01524	4580	44884	2500	17,9536
0,035	0,889	0,01778	6000	58800	2500	23,52
0,04	1,016	0,02032	7750	75950	2500	30,38
0,045	1,143	0,02286	9000	88200	2500	35,28
0,05	1,27	0,0254	10700	104860	2500	41,944
0,055	1,397	0,02794	12450	122010	2500	48,804
0,06	1,524	0,03048	14500	142100	2500	56,84
0,065	1,651	0,03302	16000	156800	2500	62,72
0,07	1,778	0,03556	17000	166600	2500	66,64

3.

4. 134

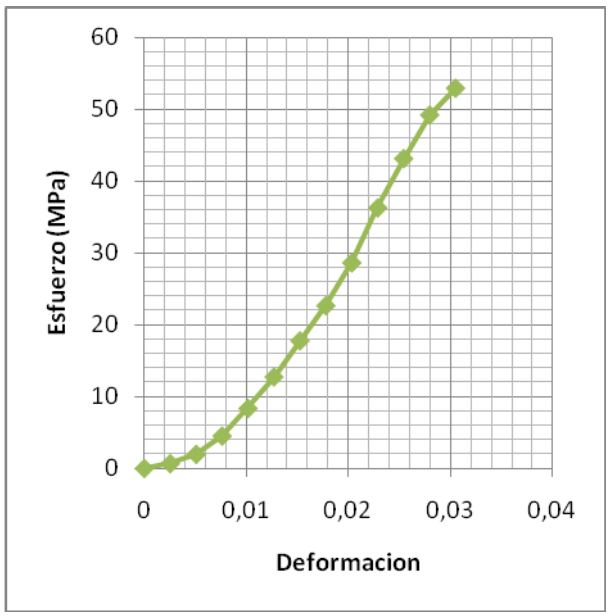


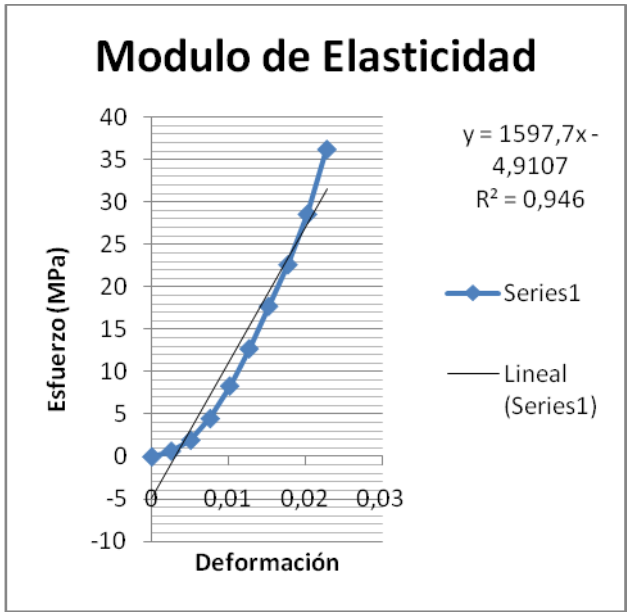


Tercera Probeta - G3/10/14						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	170	1666	2500	0,6664
0,01	0,254	0,00508	500	4900	2500	1,96
0,015	0,381	0,00762	1150	11270	2500	4,508
0,02	0,508	0,01016	2130	20874	2500	8,3496
0,025	0,635	0,0127	3250	31850	2500	12,74
0,03	0,762	0,01524	4530	44394	2500	17,7576
0,035	0,889	0,01778	5780	56644	2500	22,6576
0,04	1,016	0,02032	7300	71540	2500	28,616
0,045	1,143	0,02286	9250	90650	2500	36,26
0,05	1,27	0,0254	11000	107800	2500	43,12
0,055	1,397	0,02794	12550	122990	2500	49,196
0,06	1,524	0,03048	13500	132300	2500	52,92

3.

4. 135

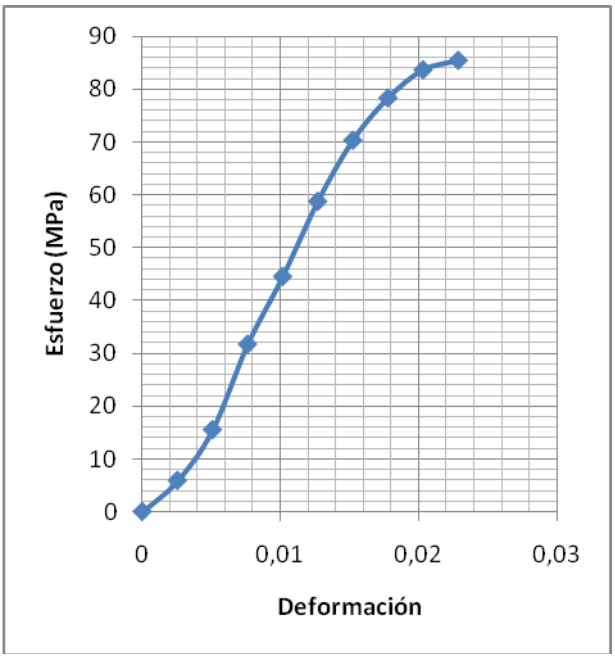


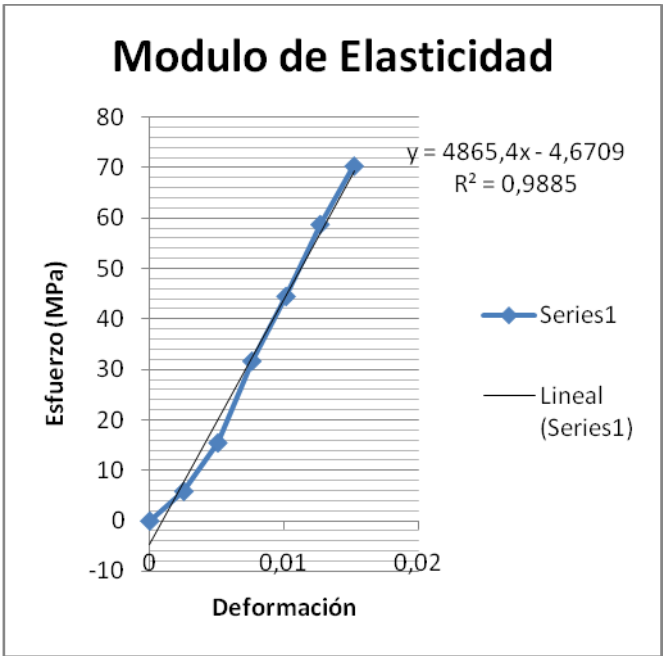


Primera Probeta - G3/10/21							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	Fuerza (lbf)	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Aérea (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	3300	1500	14700	2500	5,88
0,01	0,254	0,00508	8700	3954,54545	38754,5455	2500	15,50181818
0,015	0,381	0,00762	17800	8090,90909	79290,9091	2500	31,71636364
0,02	0,508	0,01016	25000	11363,6364	111363,636	2500	44,54545455
0,025	0,635	0,0127	33000	15000	147000	2500	58,8
0,03	0,762	0,01524	39500	17954,5455	175954,545	2500	70,38181818
0,035	0,889	0,01778	44000	20000	196000	2500	78,4
0,04	1,016	0,02032	47000	21363,6364	209363,636	2500	83,74545455
0,045	1,143	0,02286	48000	21818,1818	213818,182	2500	85,52727273

3.

4. 136

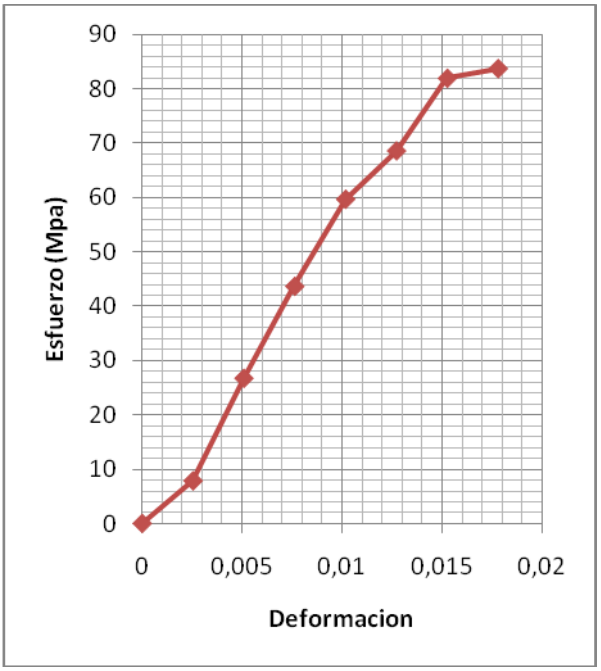


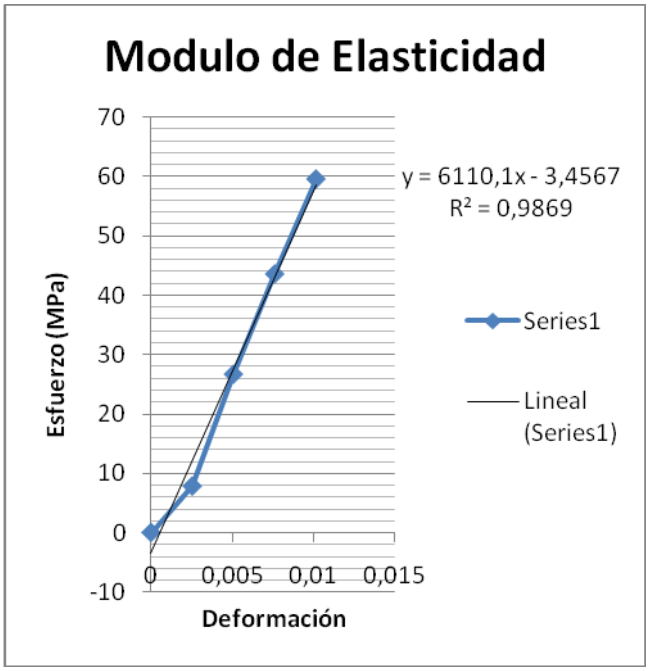


Segunda Probeta - G3/10/21							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	4400	2000	19600	2500	7,84
0,01	0,254	0,00508	15000	6818,18182	66818,18182	2500	26,72727273
0,015	0,381	0,00762	24500	11136,3636	109136,3636	2500	43,65454545
0,02	0,508	0,01016	33500	15227,2727	149227,2727	2500	59,69090909
0,025	0,635	0,0127	38500	17500	171500	2500	68,6
0,03	0,762	0,01524	46000	20909,0909	204909,0909	2500	81,96363636
0,035	0,889	0,01778	47000	21363,6364	209363,6364	2500	83,74545455

3.

4. 137

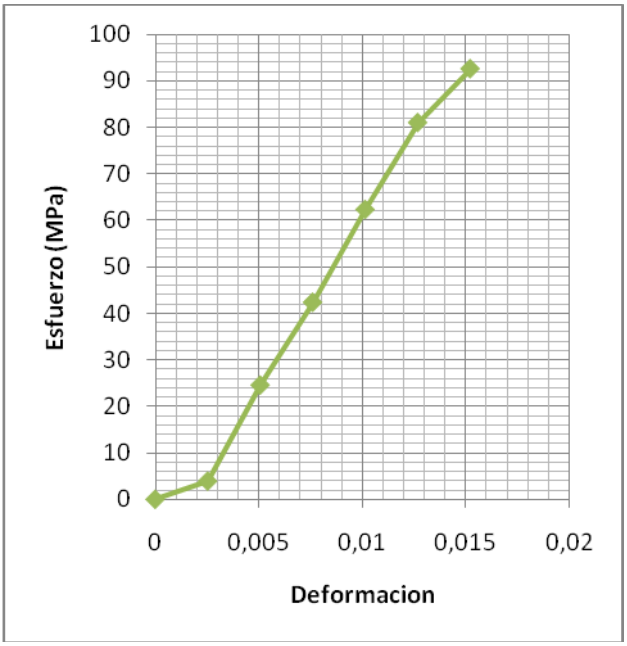


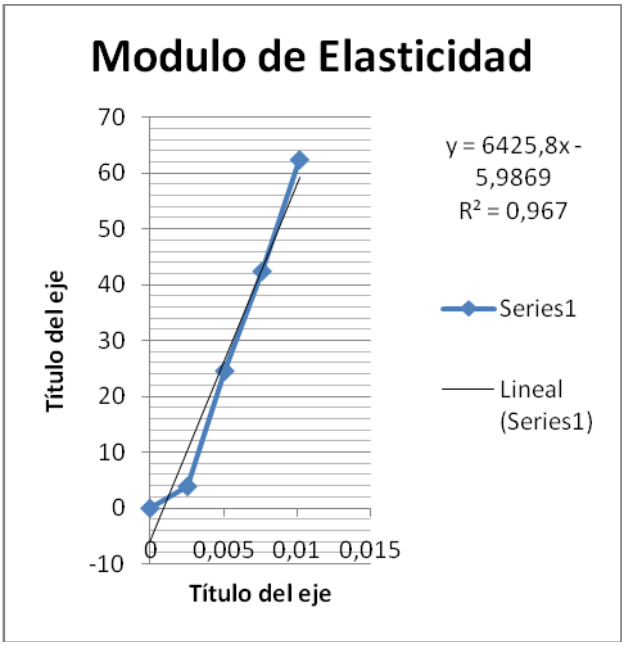


Tercera Probeta - G3/10/21							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	2200	1000	9800	2500	3,92
0,01	0,254	0,00508	13800	6272,72727	61472,72727	2500	24,58909091
0,015	0,381	0,00762	23800	10818,1818	106018,1818	2500	42,40727273
0,02	0,508	0,01016	35000	15909,0909	155909,0909	2500	62,36363636
0,025	0,635	0,0127	45500	20681,8182	202681,8182	2500	81,07272727
0,03	0,762	0,01524	52000	23636,3636	231636,3636	2500	92,65454545

3.

4. 138

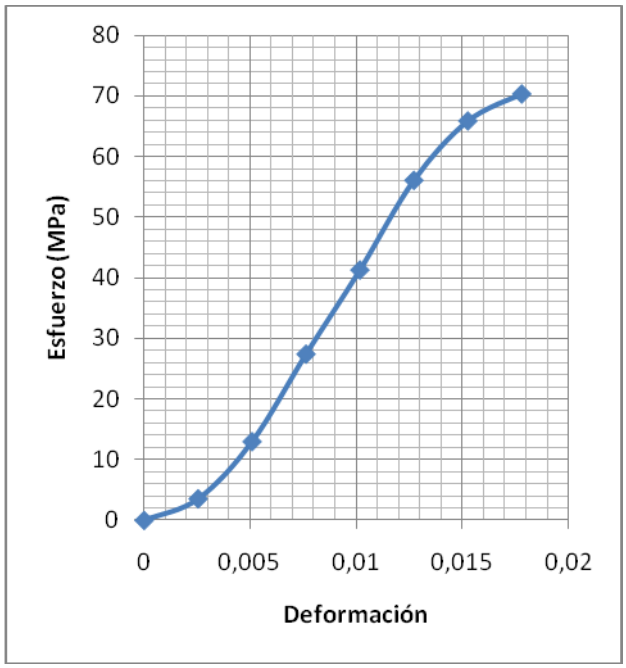


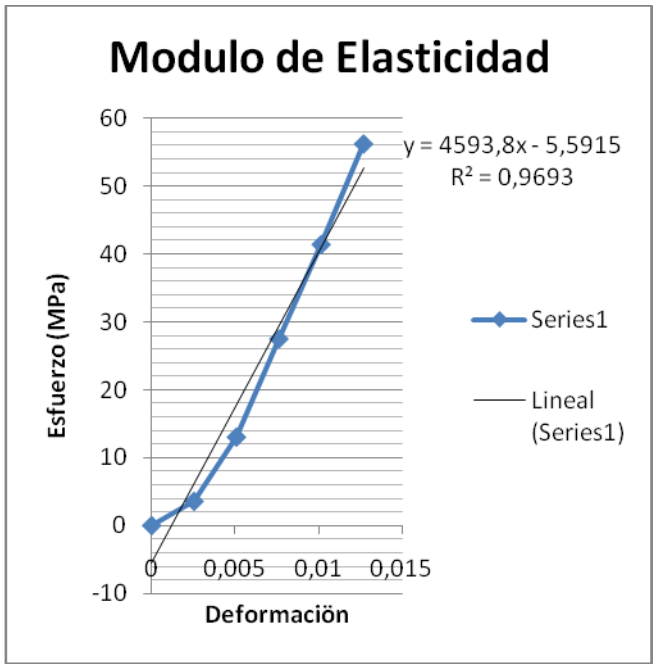


Primera Probeta - G3/10/28							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	Fuerza (lbf)	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	2000	909,090909	8909,09091	2500	3,563636364
0,01	0,254	0,00508	7300	3318,18182	32518,1818	2500	13,00727273
0,015	0,381	0,00762	15400	7000	68600	2500	27,44
0,02	0,508	0,01016	23200	10545,4545	103345,455	2500	41,33818182
0,025	0,635	0,0127	31500	14318,1818	140318,182	2500	56,12727273
0,03	0,762	0,01524	37000	16818,1818	164818,182	2500	65,92727273
0,035	0,889	0,01778	39500	17954,5455	175954,545	2500	70,38181818

3.

4. 139

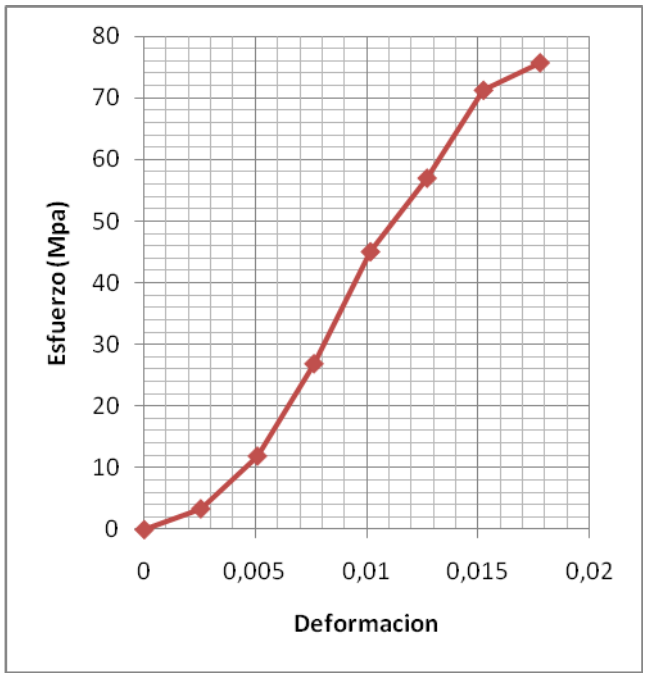


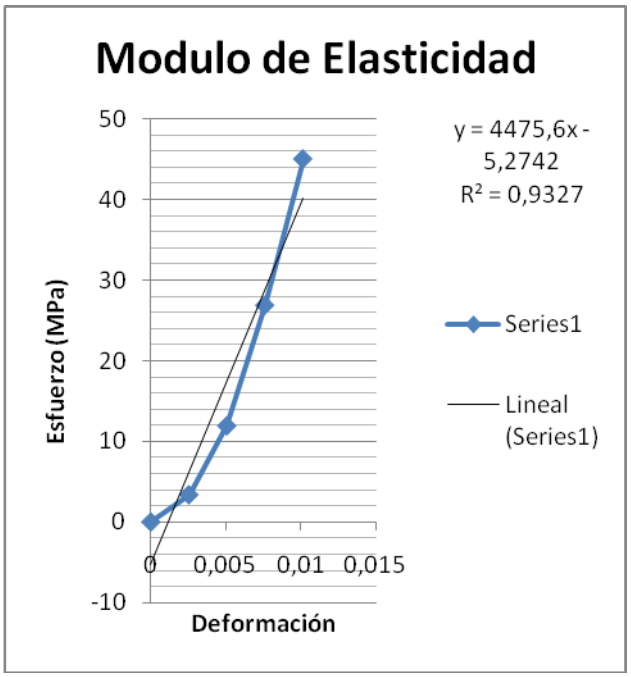


Segunda Probeta - G3/10/28							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	1900	863,636364	8463,636364	2500	3,385454545
0,01	0,254	0,00508	6700	3045,45455	29845,45455	2500	11,93818182
0,015	0,381	0,00762	15100	6863,63636	67263,63636	2500	26,90545455
0,02	0,508	0,01016	25300	11500	112700	2500	45,08
0,025	0,635	0,0127	32000	14545,4545	142545,4545	2500	57,01818182
0,03	0,762	0,01524	40000	18181,8182	178181,8182	2500	71,27272727
0,035	0,889	0,01778	42500	19318,1818	189318,1818	2500	75,72727273

3.

4. 140

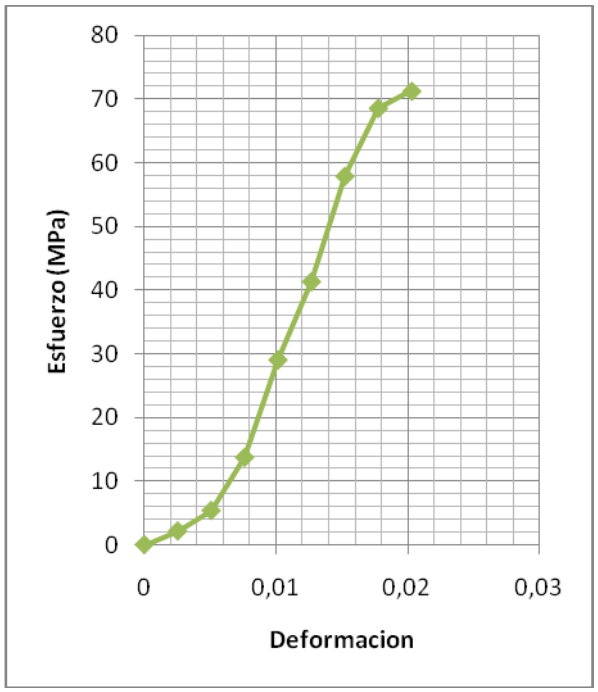


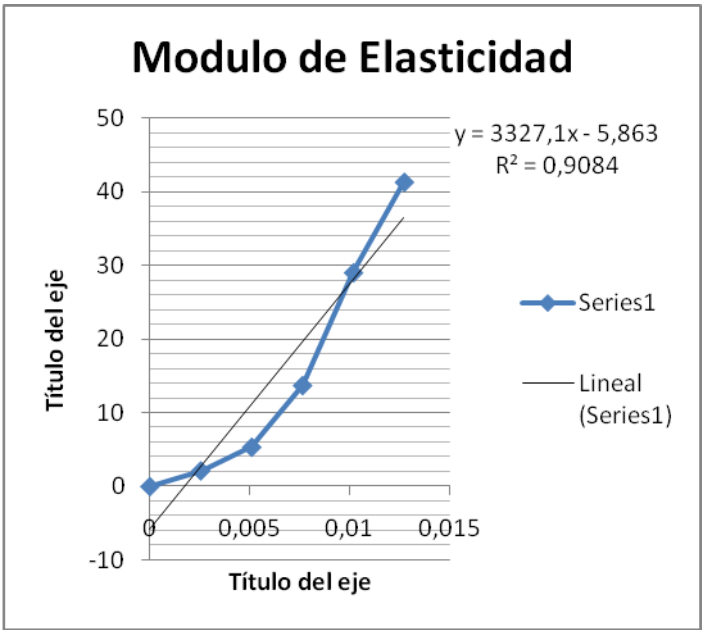


Tercera Probeta - G3/10/28							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Area (mm^2)**	**Esfuerzo (Mpa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	1200	545,454545	5345,454545	2500	2,138181818
0,01	0,254	0,00508	3000	1363,63636	13363,63636	2500	5,345454545
0,015	0,381	0,00762	7700	3500	34300	2500	13,72
0,02	0,508	0,01016	16300	7409,09091	72609,09091	2500	29,04363636
0,025	0,635	0,0127	23200	10545,4545	103345,4545	2500	41,33818182
0,03	0,762	0,01524	32500	14772,7273	144772,7273	2500	57,90909091
0,035	0,889	0,01778	38500	17500	171500	2500	68,6
0,04	1,016	0,02032	40000	18181,8182	178181,8182	2500	71,27272727

3.

4. 141


80
70
60
50
40
30
20
10
0
Esfuerzo (MPa)
0
0,01
0,02
0,03
Deformacion


Modulo de Elasticidad
50
40
30
20
10
0
-10
Título del eje
0
0,005
0,01
0,015
Título del eje
y = 3327,1x - 5,863
R² = 0,9084
Series1
Lineal (Series1)

3.

4. 142

APÉNDICE B

TABLAS DE RESULTADOS OBTENIDOS AL 12.5% DE LIMOLITA, PARA LOS RESPECTIVOS DÍAS DE CURADO Y ENSAYO DE COMPRESIÓN.

Día **Pág.**

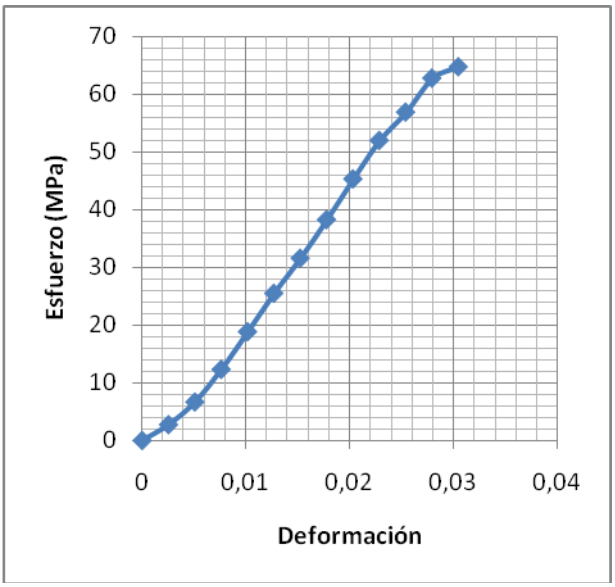
Probetas a los 4 días…… 148

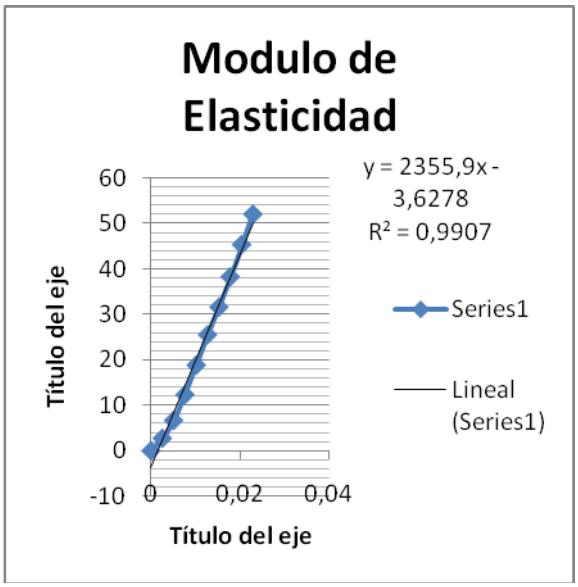
Probetas a los 11 días…….. 151

Probetas a los 18 días…….. 154

Probetas a los 25 días…….. 157

Primera Probeta G3/12,5/4						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	700	6860	2500	2,744
0,01	0,254	0,00508	1700	16660	2500	6,664
0,015	0,381	0,00762	3140	30772	2500	12,3088
0,02	0,508	0,01016	4800	47040	2500	18,816
0,025	0,635	0,0127	6500	63700	2500	25,48
0,03	0,762	0,01524	8050	78890	2500	31,556
0,035	0,889	0,01778	9750	95550	2500	38,22
0,04	1,016	0,02032	11550	113190	2500	45,276
0,045	1,143	0,02286	13250	129850	2500	51,94
0,05	1,27	0,0254	14500	142100	2500	56,84
0,055	1,397	0,02794	16000	156800	2500	62,72
0,06	1,524	0,03048	16500	161700	2500	64,68

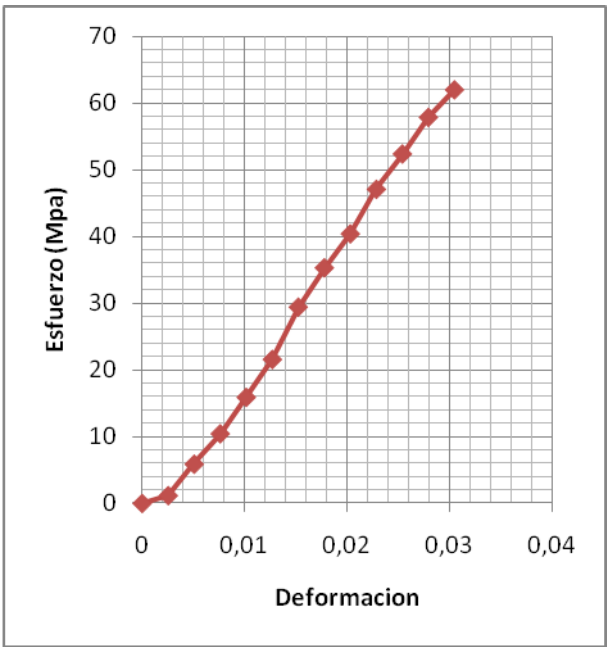


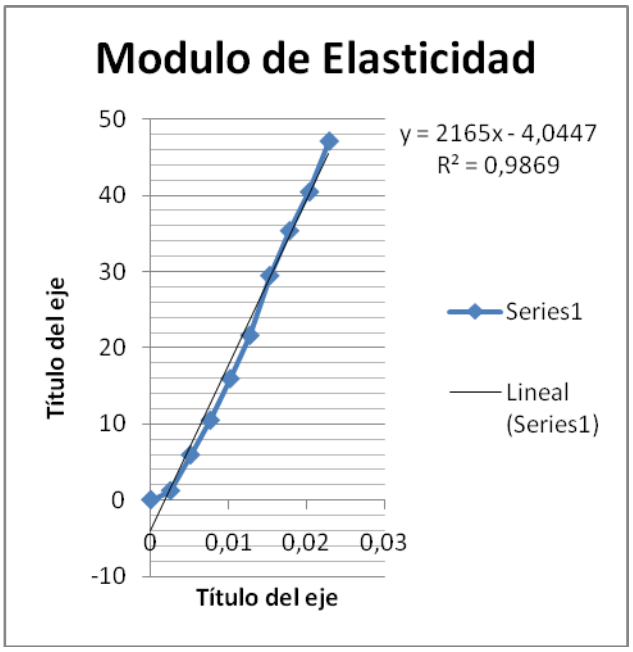


3.

4. 144

Segunda Probeta G3/12,5/4						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	300	2940	2500	1,176
0,01	0,254	0,00508	1500	14700	2500	5,88
0,015	0,381	0,00762	2660	26068	2500	10,4272
0,02	0,508	0,01016	4050	39690	2500	15,876
0,025	0,635	0,0127	5500	53900	2500	21,56
0,03	0,762	0,01524	7500	73500	2500	29,4
0,035	0,889	0,01778	9000	88200	2500	35,28
0,04	1,016	0,02032	10300	100940	2500	40,376
0,045	1,143	0,02286	12000	117600	2500	47,04
0,05	1,27	0,0254	13350	130830	2500	52,332
0,055	1,397	0,02794	14750	144550	2500	57,82
0,06	1,524	0,03048	15800	154840	2500	61,936

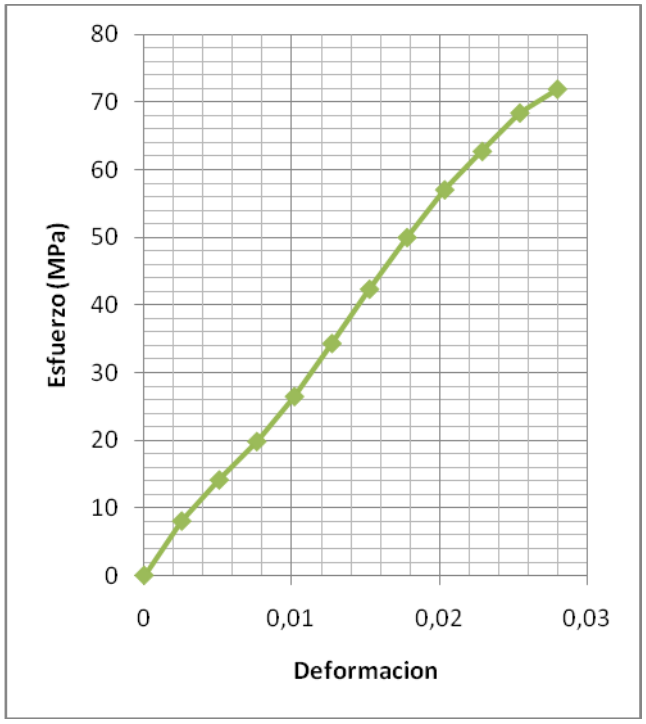


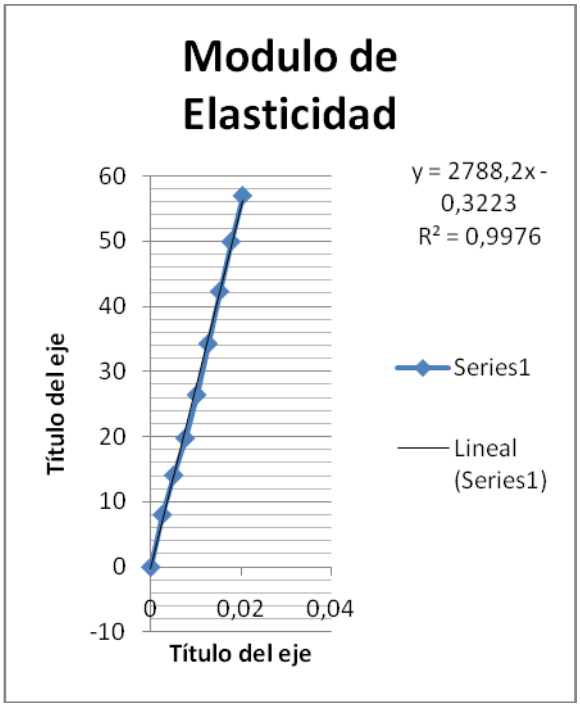


Tercera Probeta G3/12,5/4						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Area (mm^2)**	**Esfuerzo (Mpa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	2050	20090	2500	8,036
0,01	0,254	0,00508	3600	35280	2500	14,112
0,015	0,381	0,00762	5050	49490	2500	19,796
0,02	0,508	0,01016	6750	66150	2500	26,46
0,025	0,635	0,0127	8750	85750	2500	34,3
0,03	0,762	0,01524	10800	105840	2500	42,336
0,035	0,889	0,01778	12750	124950	2500	49,98
0,04	1,016	0,02032	14550	142590	2500	57,036
0,045	1,143	0,02286	16000	156800	2500	62,72
0,05	1,27	0,0254	17450	171010	2500	68,404
0,055	1,397	0,02794	18350	179830	2500	71,932

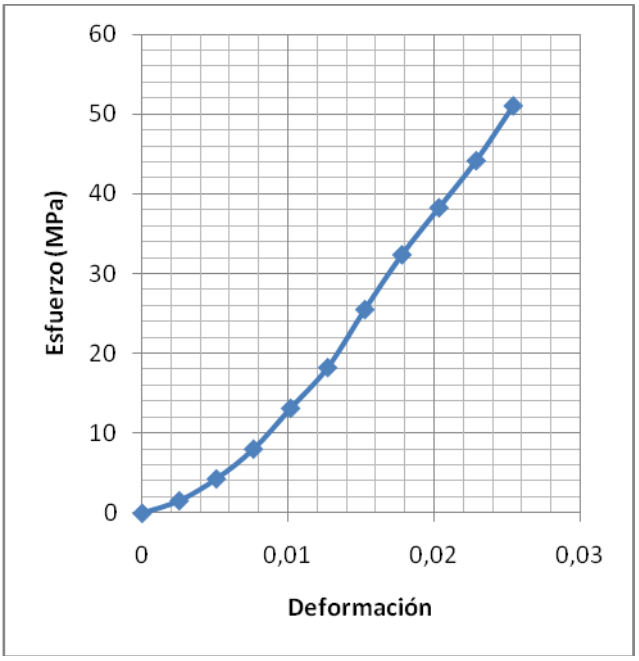
3.

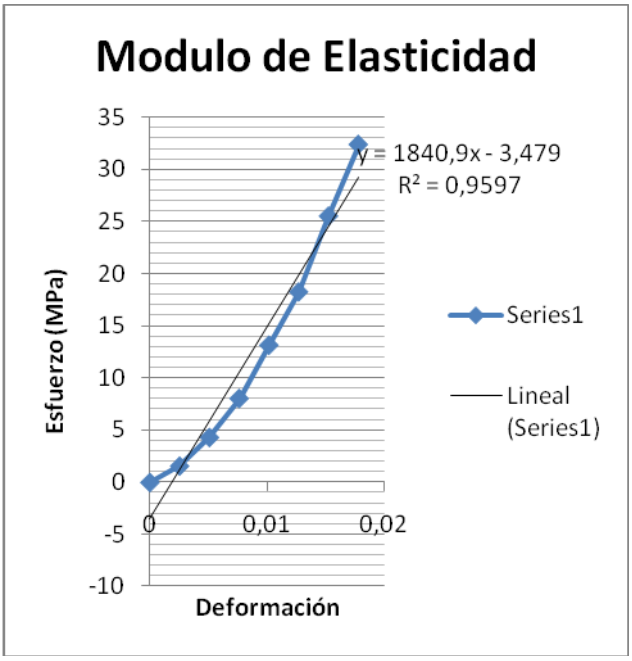
4. 146





Primera Probeta G3/12,5/11						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	400	3920	2500	1,568
0,01	0,254	0,00508	1100	10780	2500	4,312
0,015	0,381	0,00762	2050	20090	2500	8,036
0,02	0,508	0,01016	3350	32830	2500	13,132
0,025	0,635	0,0127	4650	45570	2500	18,228
0,03	0,762	0,01524	6500	63700	2500	25,48
0,035	0,889	0,01778	8250	80850	2500	32,34
0,04	1,016	0,02032	9750	95550	2500	38,22
0,045	1,143	0,02286	11250	110250	2500	44,1
0,05	1,27	0,0254	13000	127400	2500	50,96

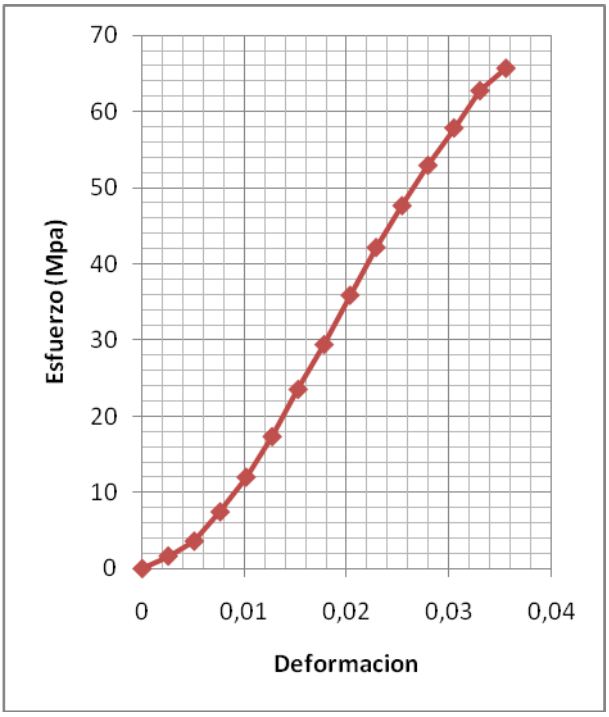


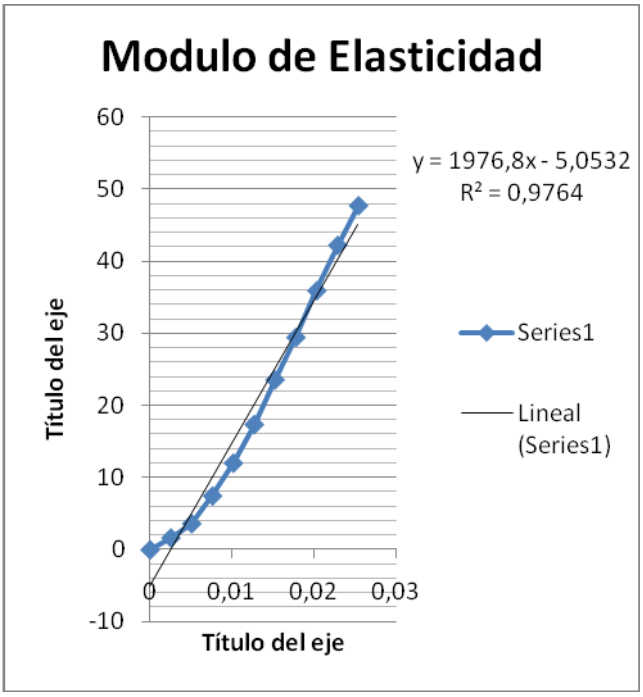


Segunda Probeta G3/12,5/11						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	420	4116	2500	1,6464
0,01	0,254	0,00508	920	9016	2500	3,6064
0,015	0,381	0,00762	1900	18620	2500	7,448
0,02	0,508	0,01016	3060	29988	2500	11,9952
0,025	0,635	0,0127	4420	43316	2500	17,3264
0,03	0,762	0,01524	6000	58800	2500	23,52
0,035	0,889	0,01778	7500	73500	2500	29,4
0,04	1,016	0,02032	9150	89670	2500	35,868
0,045	1,143	0,02286	10750	105350	2500	42,14
0,05	1,27	0,0254	12150	119070	2500	47,628
0,055	1,397	0,02794	13500	132300	2500	52,92
0,06	1,524	0,03048	14750	144550	2500	57,82
0,065	1,651	0,03302	16000	156800	2500	62,72
0,07	1,778	0,03556	16750	164150	2500	65,66

3.

4. 148

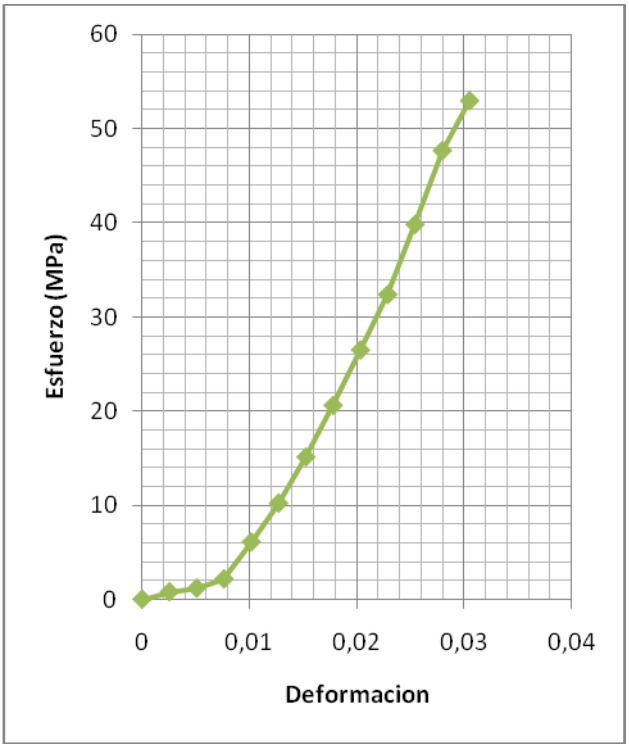


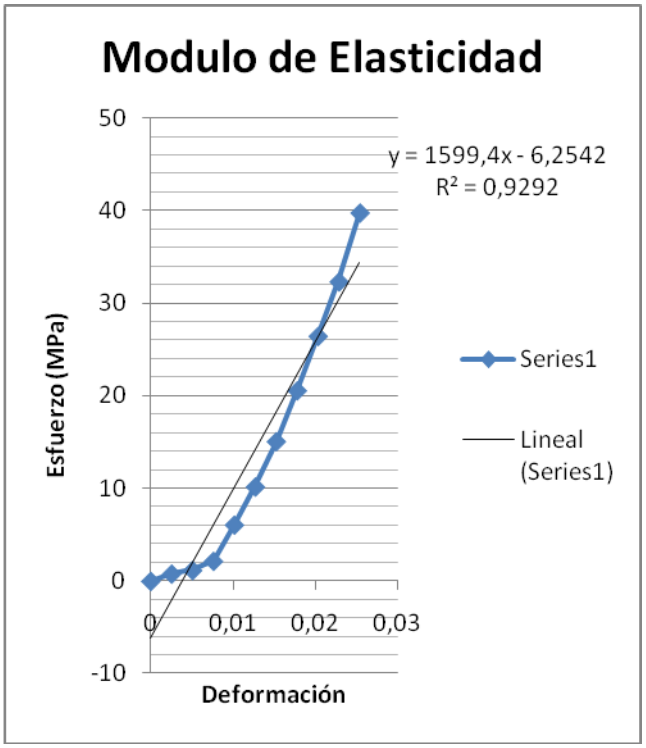


Tercera Probeta G3/12,5/11						
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	200	1960	2500	0,784
0,01	0,254	0,00508	300	2940	2500	1,176
0,015	0,381	0,00762	550	5390	2500	2,156
0,02	0,508	0,01016	1550	15190	2500	6,076
0,025	0,635	0,0127	2600	25480	2500	10,192
0,03	0,762	0,01524	3850	37730	2500	15,092
0,035	0,889	0,01778	5250	51450	2500	20,58
0,04	1,016	0,02032	6750	66150	2500	26,46
0,045	1,143	0,02286	8250	80850	2500	32,34
0,05	1,27	0,0254	10150	99470	2500	39,788
0,055	1,397	0,02794	12150	119070	2500	47,628
0,06	1,524	0,03048	13500	132300	2500	52,92

3.

4. 149

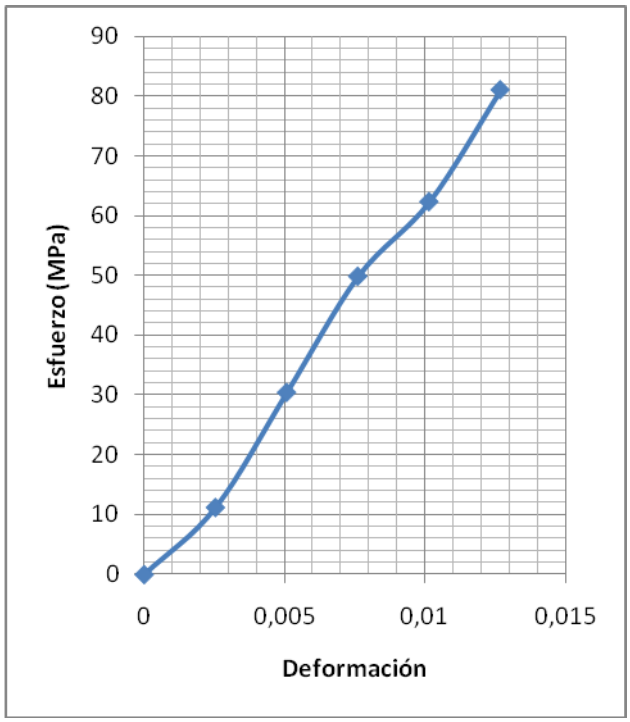


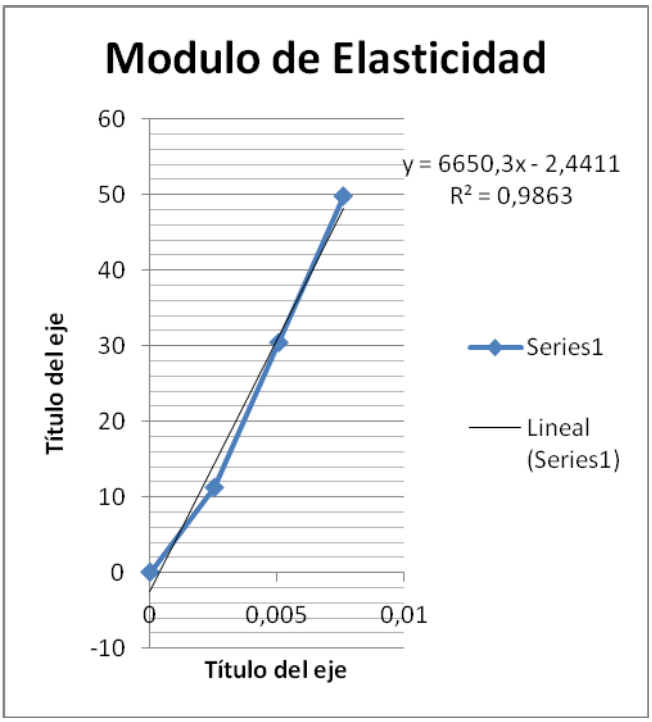


Primera Probeta - G3/12,5/18							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	6300	2863,63636	28063,6364	2500	11,22545455
0,01	0,254	0,00508	17100	7772,72727	76172,7273	2500	30,46909091
0,015	0,381	0,00762	28000	12727,2727	124727,273	2500	49,89090909
0,02	0,508	0,01016	35000	15909,0909	155909,091	2500	62,36363636
0,025	0,635	0,0127	45500	20681,8182	202681,818	2500	81,07272727

3.

4. 150

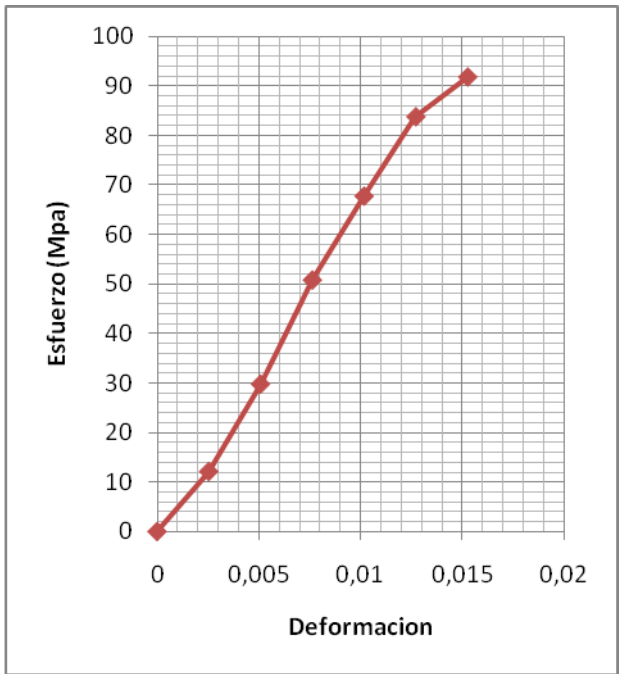


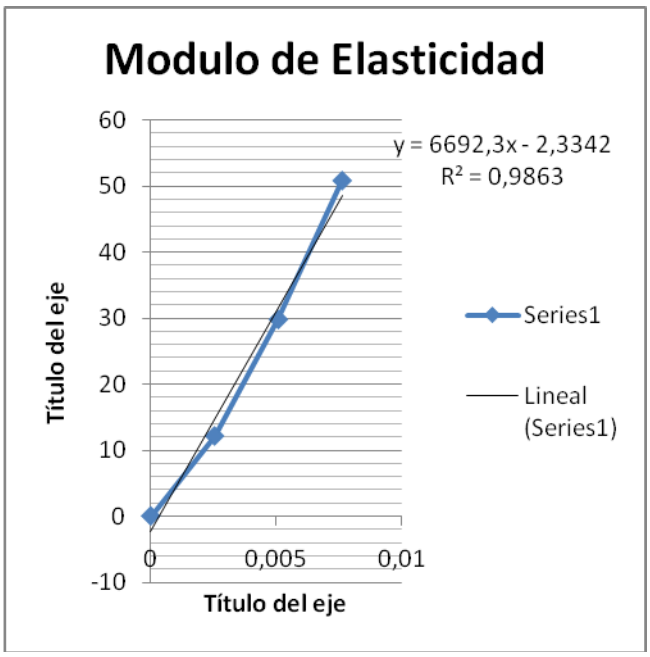


Segunda Probeta - G3/12,5/18							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0
0,005	0,127	0,00254	6800	3090,9091	30290,90909	2500	12,116
0,01	0,254	0,00508	16700	7590,90909	74390,90909	2500	29,756
0,015	0,381	0,00762	28500	12954,5455	126954,5455	2500	50,782
0,02	0,508	0,01016	38000	17272,7273	169272,7273	2500	67,709
0,025	0,635	0,0127	47000	21363,6364	209363,6364	2500	83,745
0,03	0,762	0,01524	51500	23409,0909	229409,0909	2500	91,764

3.

4. 151

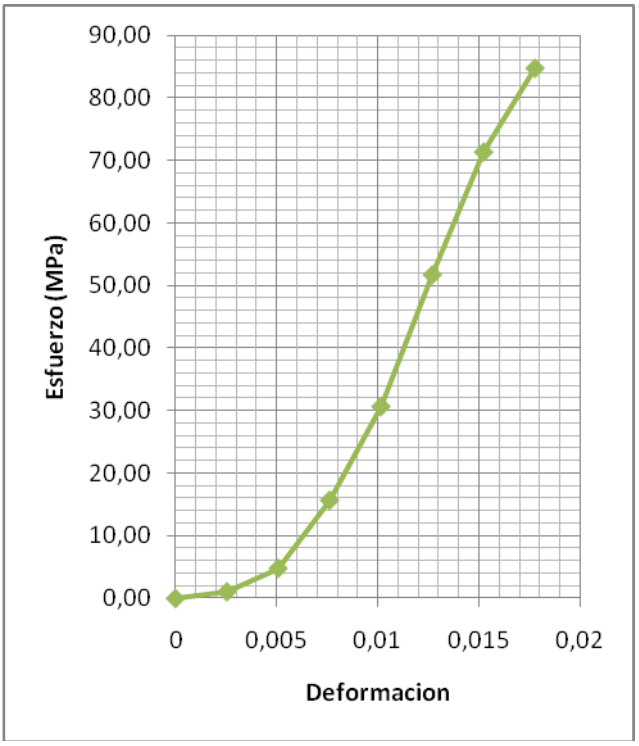


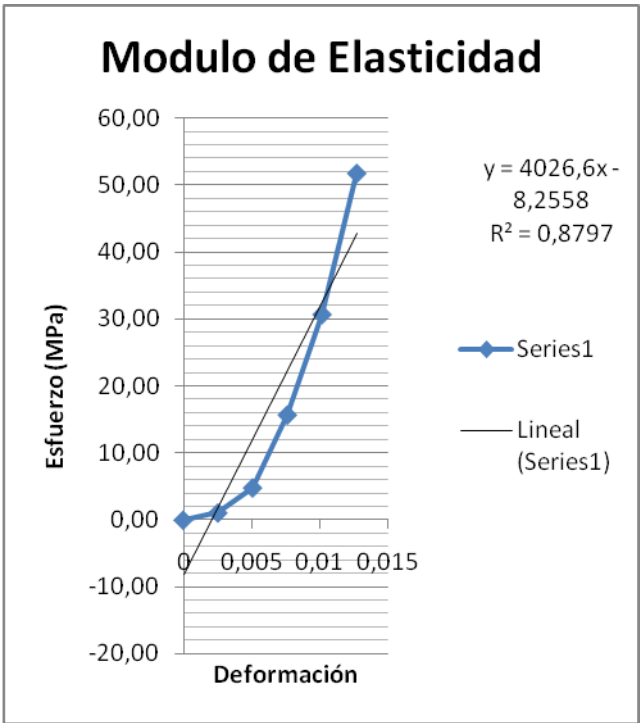


Tercera Probeta - G3/12,5/18							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0,00
0,005	0,127	0,00254	600	272,727273	2672,727273	2500	1,07
0,01	0,254	0,00508	2700	1227,27273	12027,27273	2500	4,81
0,015	0,381	0,00762	8800	4000	39200	2500	15,68
0,02	0,508	0,01016	17200	7818,18182	76618,18182	2500	30,65
0,025	0,635	0,0127	29000	13181,8182	129181,8182	2500	51,67
0,03	0,762	0,01524	40000	18181,8182	178181,8182	2500	71,27
0,035	0,889	0,01778	47500	21590,9091	211590,9091	2500	84,64

3.

4. 152

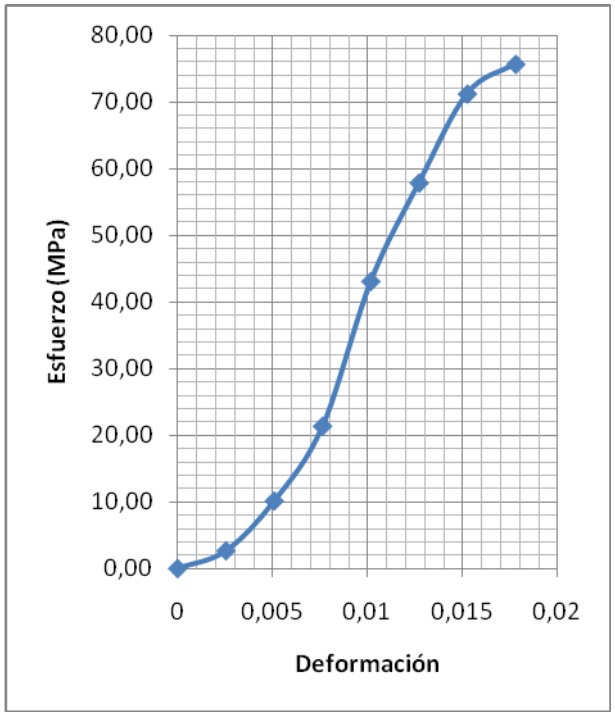


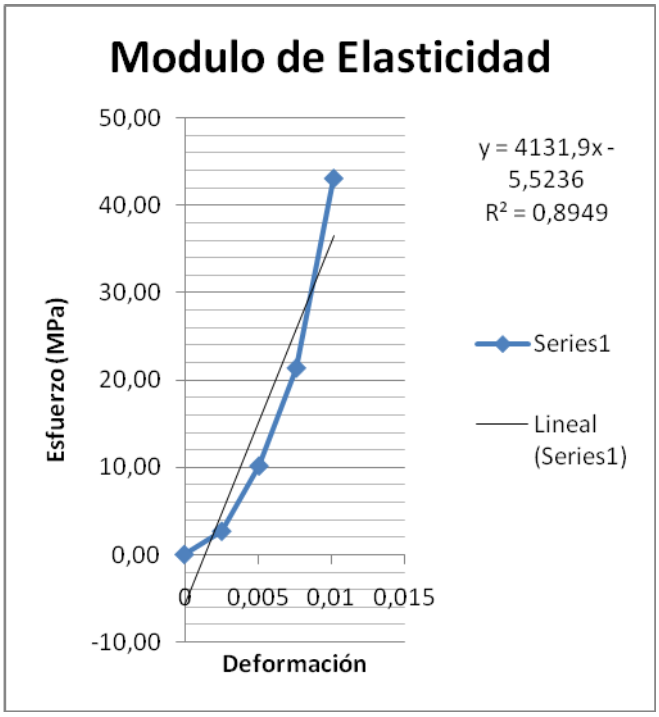


Primera Probeta - G3/12,5/25							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0,00
0,005	0,127	0,00254	1500	681,818182	6681,81818	2500	2,67
0,01	0,254	0,00508	5700	2590,90909	25390,9091	2500	10,16
0,015	0,381	0,00762	12000	5454,54545	53454,5455	2500	21,38
0,02	0,508	0,01016	24200	11000	107800	2500	43,12
0,025	0,635	0,0127	32500	14772,7273	144772,727	2500	57,91
0,03	0,762	0,01524	40000	18181,8182	178181,818	2500	71,27
0,035	0,889	0,01778	42500	19318,1818	189318,182	2500	75,73

3.

4. 153

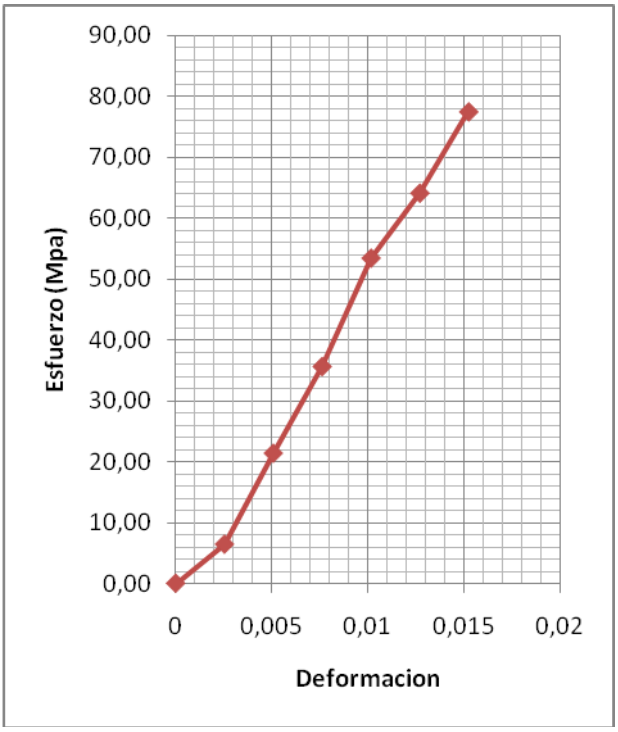


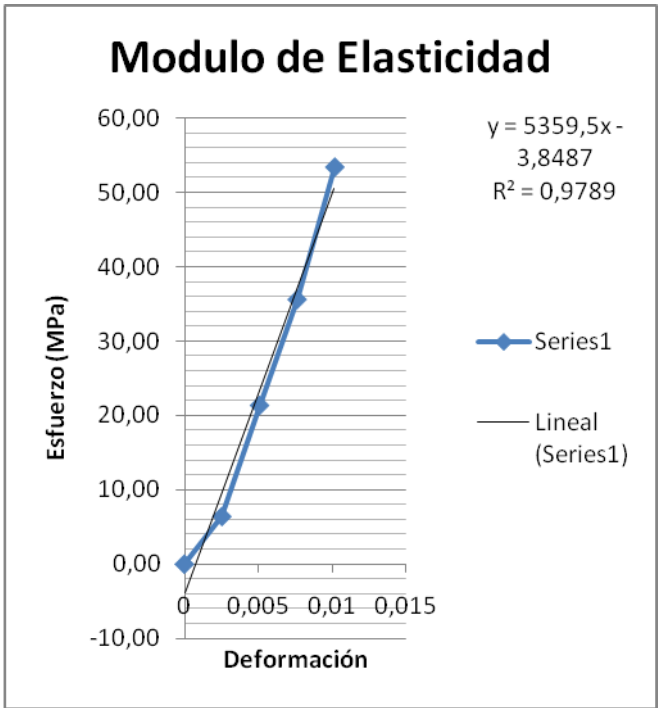


Segundo Probeta - G3/12,5/25							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0,00
0,005	0,127	0,00254	3600	1636,36364	16036,36364	2500	6,41
0,01	0,254	0,00508	12000	5454,54545	53454,54545	2500	21,38
0,015	0,381	0,00762	20000	9090,90909	89090,90909	2500	35,64
0,02	0,508	0,01016	30000	13636,3636	133636,3636	2500	53,45
0,025	0,635	0,0127	36000	16363,6364	160363,6364	2500	64,15
0,03	0,762	0,01524	43500	19772,7273	193772,7273	2500	77,51

3.

4. 154

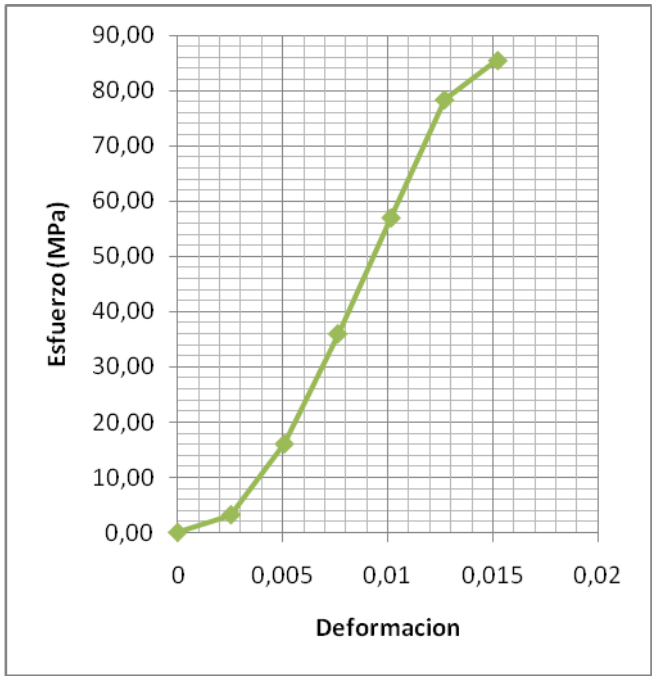


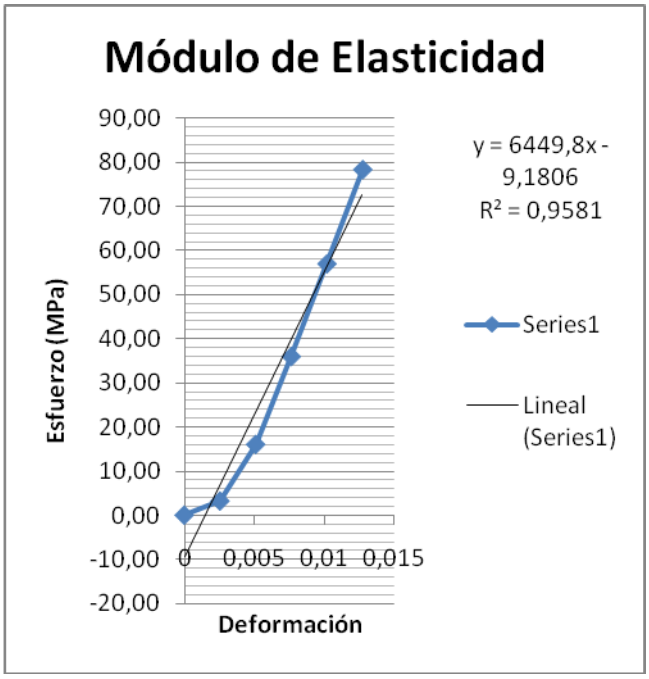


Tercera Probeta - G3/12,5/25							
MARCA (in)	**MARCA (mm)**	**Deformación**	**Fuerza (lbf)**	**Fuerza (Kgf)**	**Fuerza (N)**	**Área (mm^2)**	**Esfuerzo (MPa)**
0	0	0	0	0	0	2500	0,00
0,005	0,127	0,00254	1800	818,181818	8018,181818	2500	3,21
0,01	0,254	0,00508	9000	4090,90909	40090,90909	2500	16,04
0,015	0,381	0,00762	20200	9181,81818	89981,81818	2500	35,99
0,02	0,508	0,01016	32000	14545,4545	142545,4545	2500	57,02
0,025	0,635	0,0127	44000	20000	196000	2500	78,40
0,03	0,762	0,01524	48000	21818,1818	213818,1818	2500	85,53

3.

4. 155


90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
Esfuerzo (MPa)
0
0,005
0,01
0,015
0,02
Deformacion


Módulo de Elasticidad
90,00
80,00
70,00
60,00
50,00
40,00
30,00
20,00
10,00
0,00
-10,00
-20,00
Esfuerzo (MPa)
0
0,005
0,01
0,015
Deformación
y = 6449,8x - 9,1806
R² = 0,9581
Series1
Lineal (Series1)

APENDICE C

DISTRIBUCIÓN DEL ESTADÍSTICO DE KOLMOGOROV-SMIRNOV-LILLIEFORS

Distribución del estadístico de Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors (D_n) para el contraste de normalidad.
Se tabula d tal que $P(D_n > d) = \alpha$.

	α					
n	0'2	0'15	0'1	0'05	0'01	0'001
4	0'303	0'321	0'346	0'376	0'413	0'433
5	0'289	0'303	0'319	0'343	0'997	0'439
6	0'269	0'281	0'297	0'323	0'371	0'424
7	0'252	0'264	0'280	0'304	0'351	0'402
8	0'239	0'250	0'265	0'288	0'333	0'384
9	0'227	0'238	0'252	0'274	0'317	0'365
10	0'217	0'228	0'241	0'262	0'304	0'352
11	0'208	0'218	0'231	0'251	0'291	0'338
12	0'200	0'210	0'222	0'242	0'281	0'325
13	0'193	0'202	0'215	0'234	0'271	0'314
14	0'187	0'196	0'208	0'226	0'262	0'305
15	0'181	0'190	0'201	0'219	0'254	0'296
16	0'176	0'184	0'195	0'213	0'247	0'287
17	0'171	0'179	0'190	0'207	0'240	0'279
18	0'167	0'175	0'185	0'202	0'234	0'273
19	0'163	0'170	0'181	0'197	0'228	0'266
20	0'159	0'166	0'176	0'192	0'223	0;260
25	0'143	0'150	0'159	0'173	0'201	0'236
30	0'131	0'138	0'146	0'159	0'185	0'217
> 30	$\frac{0'740}{\sqrt{n}}$	$\frac{0'770}{\sqrt{n}}$	$\frac{0'820}{\sqrt{n}}$	$\frac{0'890}{\sqrt{n}}$	$\frac{1'040}{\sqrt{n}}$	$\frac{1'220}{\sqrt{n}}$

APENDICE D

DISTRIBUCIÓN DEL ESTADÍSTICO DE SHAPIRO-WILK

Distribución del estadístico de Shapiro-Wilk (w) para el contraste de normalidad.
Se tabulan los valores w_α tales que $P(w > w_\alpha) = \alpha$.

	α								
n	0'01	0'02	0'05	0'1	0'5	0'9	0'95	0'98	0'99
3	0'753	0'756	0'767	0'789	0'959	0'998	0'999	1'000	1'000
4	0'687	0'707	0'748	0'792	0'935	0'987	0'992	0'996	0'997
5	0'686	0'715	0'762	0'806	0'927	0'979	0'986	0'991	0'993
6	0'713	0'743	0'788	0'826	0'927	0'974	0'981	0'986	0'989
7	0'730	0'760	0'803	0'838	0'928	0'972	0'979	0'985	0'988
8	0'749	0'778	0'818	0'851	0'932	0'972	0'978	0'984	0'987
9	0'764	0'791	0'829	0'859	0'935	0'972	0'978	0'984	0'986
10	0'781	0'806	0'842	0'869	0'938	0'972	0'978	0'983	0'986
11	0'792	0'817	0'850	0'876	0'940	0'973	0'979	0'984	0'986
12	0'805	0'828	0'859	0'883	0'943	0'973	0'979	0'984	0'986
13	0'814	0'837	0'866	0'889	0'945	0'974	0'979	0'984	0'986
14	0'825	0'846	0'874	0'895	0'947	0'975	0'980	0'984	0'986
15	0'835	0'855	0'881	0'901	0'950	0'975	0'980	0'984	0'987
16	0'844	0'863	0'887	0'906	0'952	0'976	0'981	0'985	0'987
17	0'851	0'869	0'892	0'910	0'954	0'977	0'981	0'985	0'987
18	0'858	0'874	0'897	0'914	0'956	0'978	0'982	0'986	0'988
19	0'863	0'879	0'901	0'917	0'957	0'978	0'982	0'986	0'988
20	0'868	0'884	0'905	0'920	0'959	0'979	0'983	0'986	0'988
21	0'873	0'888	0'908	0'923	0'960	0'980	0'983	0'987	0'989
22	0'878	0'892	0'911	0'926	0'961	0'980	0'984	0'987	0'989
23	0'881	0'895	0'914	0'928	0'962	0'981	0'984	0'987	0'989
24	0'884	0'898	0'916	0'930	0'963	0'981	0'984	0'987	0'989
25	0'888	0'901	0'918	0'931	0'964	0'981	0'985	0'988	0'989

Distribución del estadístico de Shapiro-Wilk (w) para el contraste de normalidad (continuación).

	α								
n	0'01	0'02	0'05	0'1	0'5	0'9	0'95	0'98	0'99
26	0'891	0'904	0'920	0'933	0'965	0'982	0'985	0'988	0'989
27	0'894	0'906	0'923	0'935	0'965	0'982	0'985	0'988	0'990
28	0'896	0'908	0'924	0'936	0'966	0'982	0'985	0'988	0'990
29	0'898	0'910	0'926	0'937	0'966	0'982	0'985	0'988	0'990
30	0'900	0'912	0'927	0'939	0'967	0'983	0'985	0'988	0'990
31	0'902	0'914	0'929	0'940	0'967	0'983	0'986	0'988	0'990
32	0'904	0'915	0'930	0'941	0'968	0'983	0'986	0'988	0'990
33	0'906	0'917	0'931	0'942	0'968	0'983	0'986	0'989	0'990
34	0'908	0'919	0'933	0'943	0'969	0'983	0'986	0'989	0'990
35	0'910	0'920	0'934	0'944	0'969	0'984	0'986	0'989	0'990
36	0'912	0'922	0'935	0'945	0'970	0'984	0'986	0'989	0'990
37	0'914	0'924	0'936	0'946	0'970	0'984	0'987	0'989	0'990
38	0'916	0'925	0'938	0'947	0'971	0'984	0'987	0'989	0'990
39	0'917	0'927	0'939	0'948	0'971	0'984	0'987	0'989	0'991
40	0'919	0'928	0'940	0'949	0'972	0'985	0'987	0'989	0'991
41	0'920	0'929	0'941	0'950	0'972	0'985	0'987	0'989	0'991
42	0'922	0'930	0'942	0'951	0'972	0'985	0'987	0'989	0'991
43	0'923	0'932	0'943	0'951	0'973	0'985	0'987	0'990	0'991
44	0'924	0'933	0'944	0'952	0'973	0'985	0'987	0'990	0'991
45	0'926	0'934	0'945	0'953	0'973	0'985	0'988	0'990	0'991
46	0'927	0'935	0'945	0'953	0'974	0'985	0'988	0'990	0'991
47	0'928	0'936	0'946	0'954	0'974	0'985	0'988	0'990	0'991
48	0'929	0'937	0'941	0'954	0'974	0'985	0'988	0'990	0'991
49	0'929	0'937	0'947	0'955	0'974	0'985	0'988	0'990	0'991
50	0'930	0'938	0'947	0'955	0'974	0'985	0'988	0'990	0'991

APENDICE E

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F

$f_{0.05}(v1,v2)$

v2	v1								
		2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	-240.5
2	18.51	19.00	19.1	19.2	19.3	19.33	19.3	19.37	19.38
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.5	2.45	2.36	2.29	2.24
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.4	2.34	2.25	2.18	2.12
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
12	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96
00	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88

(Continuación) VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F

v2	v1									
		12	15	20	24	30	40	60	120	α
1	241	243.	245.	248.	249.	250.	251.	252.	253.	254.
2	19.	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5
3	8.7	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	5.9	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	4.7	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	4.0	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	3.6	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	3.3	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	3.1	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	2.9	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	2.8	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	2.7	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	2.6	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	2.6	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	2.5	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	2.4	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	2.4	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	2.4	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	2.3	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	2.3	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	2.3	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	2.3	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	2.2	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	2.2	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	2.2	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	2.2	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	ihs	1.69
27	2.2	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	2.1	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	2.1	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	2.1	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	2.0	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	1.9	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
12	1.9	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
00	1.8	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

APENDICE F

DISTRIBUCIÓN t DE STUDENT CON N GRADOS DE LIBERTAD

Distribución t de Student con n grados de libertad.
Se tabula $t_{n,\alpha}$, tal que $P(X \geq t_{n,\alpha}) = \alpha$, con $X \in t_n$.

	α					
n	0'250	0'1	0'05	0'025	0'01	0'005
1	1'0000	3'0777	6'3137	12'706	31'821	63'656
2	0'8165	1'8856	2'9200	4'3027	6'9645	9'9250
3	0'7649	1'6377	2'3534	3'1824	4'5407	5'8408
4	0'7407	1'5332	2'1318	2'7765	3'7469	4'6041
5	0'7267	1'4759	2'0150	2'5706	3'3649	4'0321
6	0'7176	1'4398	1'9432	2'4469	3'1427	3'7074
7	0'7111	1'4149	1'8946	2'3646	2'9979	3'4995
8	0'7064	1'3968	1'8595	2'3060	2'8965	3'3554
9	0'7027	1'3830	1'8331	2'2622	2'8214	3'2498
10	0'6998	1'3722	1'8125	2'2281	2'7638	3'1693
11	0'6974	1'3634	1'7959	2'2010	2'7181	3'1058
12	0'6955	1'3562	1'7823	2'1788	2'6810	3'0545
13	0'6938	1'3502	1'7709	2'1604	2'6503	3'0123
14	0'6924	1'3450	1'7613	2'1448	2'6245	2'9768
15	0'6912	1'3406	1'7531	2'1315	2'6025	2'9467
16	0'6901	1'3368	1'7459	2'1199	2'5835	2'9208
17	0'6892	1'3334	1'7396	2'1098	2'5669	2'8982
18	0'6884	1'3304	1'7341	2'1009	2'5524	2'8784
19	0'6876	1'3277	1'7291	2'0930	2'5395	2'8609
20	0'6870	1'3253	1'7247	2'0860	2'5280	2'8453
21	0'6864	1'3232	1'7207	2'0796	2'5176	2'8314
22	0'6858	1'3212	1'7171	2'0739	2'5083	2'8188
23	0'6853	1'3195	1'7139	2'0687	2'4999	2'8073
24	0'6848	1'3178	1'7109	2'0639	2'4922	2'7970
25	0'6844	1'3163	1'7081	2'0595	2'4851	2'7874
26	0'6840	1'3150	1'7056	2'0555	2'4786	2'7787
27	0'6837	1'3137	1'7033	2'0518	2'4727	2'7707
28	0'6834	1'3125	1'7011	2'0484	2'4671	2'7633
29	0'6830	1'3114	1'6991	2'0452	2'4620	2'7564
30	0'6828	1'3104	1'6973	2'0423	2'4573	2'7500
∞	0'6745	1'2816	1'6449	1'9600	2'3264	2'5758

BIBLIOGRAFÍA

[1] TAYLOR H, *La Química de los cementos,* vol. 1, Ediciones URMO, Impreso en España.

[2] REYES SARA, "Manufactura del cemento Portland", Universidad Veracruzana, México, www.monografias.com, Marzo, 2008.

[3] ICCYC, Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto, www.iccyc.com, Marzo, 2008

[4] CARRASCO M., "Materiales Cementicios", Universidad Tecnológica Nacional, www.monografias.com, Marzo, 2008.

[5] _____, "Cemento Portland", www.comaceimport.com, Febrero, 2008.

[6] _____, "Cemento", www.cement.org, Marzo, 2008.

[7] FOLK R.L., "Petrology of sedimentary rocks", 1965, 2008

[8] SUAREZ J., "Ensayo de compresión para concreto", www.tullave.com, Marzo, 2008

[9] MATHER B., COMITÉ, "Terminología del cemento y el hormigón", www.ciccp.com, Febrero, 2008

[10] Kosmatka S., Kerkhoff B., Panarese W., MacLead N. and McGrath R, *Design and Control of Concrete Mixtures*, Seventh Canadian Edition 2002, Chapter 9.

[11] _____ .´´Curado del Concreto´´, www.google.com, Marzo, 2008.

[12] INCI 4035, "Cemento Portland - Materiales de Ingeniería Civil", publicación primavera del 2008, pp. 4 - 17

[13] GOTTHARD F., *Tratado del Hormigón Armado*, Editorial Gustavo GILI S.A., Barcelona 1970, impreso en España.

[14] PETKOVA V., "The Use of mathematical modelling in the composition of a composite material, Cement and Concrete Research 6 June 2002, pp 927 - 930

[15] ROBALINO E., "El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánico", TESIS – Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT), ESPOL, 2004, pp. 18 - 22.

[16] ASTM C109/C109M, Standard Test Method for Compressive Strenght of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)

[17] WALPOLE R.E., *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, Editorial Prentice Hall, 1998, 6ª edición, Impreso en México

[18] PEREZ C., *Estadística Aplicada a través de Excel,* Editorial Prentice Hall, 2005, Madrid – España.