

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA 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 una Adición de 15% de Limolita y tras un
Curado al Aire”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Freddy Fabianny Figueroa Alvarado

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a los miembros del Tópico de Graduación porque hicieron posible este trabajo y al Laboratorio de la FICT por sus servicios.

DEDICATORIA

A Dios.

A Carmelita, Germania,

Miguel y mi familia, por

brindarme total apoyo y

confianza en mis proyectos.

A todos aquellos que hicieron

posible este trabajo.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



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



Ing. Mauricio Cornejo M.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Rodrigo Perugachi B.
VOCAL



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



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

DECLARACIÓN 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"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Freddy Fabianny Figueroa Alvarado

RESUMEN

El presente trabajo estudió el efecto en la adición de una puzolana al Cemento Portland Tipo I sobre la resistencia a la compresión a diferentes días de curado. El agregado fue limolita y los ensayos de compresión se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

La resistencia a la compresión a edades tempranas, puede ser mejorada con la adición de puzolanas cuya composición química sea semejante a la del cemento en la etapa de endurecimiento y con un curado apropiado, manteniendo una buena humedad relativa para que el desarrollo de la resistencia sea favorable. Para comprobar este efecto, se propuso un estudio inicial sobre el cambio en la resistencia a la compresión a edades tempranas adicionando limolita al cemento Portland Tipo I y curado en aire manteniendo la humedad relativa y temperatura constantes.

El objetivo principal de este proyecto fue Identificar el efecto que tiene la introducción de un 15% de Limolita con curado al aire en la resistencia a la compresión del cemento Portland Tipo I. Para ello se estudió primero la

relación entre la condición de curado para cementos Portland Tipo I y IV con la resistencia a la compresión a edades tempranas de 7, 14, 21 y 28 días respectivamente para después comparar con el cemento hidráulico mezclado.

Se realizaron ensayos de compresión a los 7, 14, 21 y 28 días respectivamente tomando los valores máximos de resistencia para analizarlos en un programa estadístico y ver las diferencias significativas entre los días de curado o tratamientos. También se analizó con otros porcentajes de limolita para ver como se comportaba el cemento mezclado al aumentar la adición de la limolita desde un 5% hasta 25%.

Se espera identificar los mejores tratamientos para compararlos con el cemento Portland Tipo I sin adición y el Tipo IV. Una vez realizado el análisis estadístico se modelará y simulará mediante MATLAB el comportamiento de la curva esfuerzo versus deformación y se verificará si el modelo se ajusta al experimento.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	IV
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES	4
1.1. Planteamiento del Problema	4
1.2. Objetivos	5
1.3. Metodología	6
1.4. Estructura de la tesis.....	9
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEORICO.....	11
2.1. Generalidades del Cemento tipo I.....	11

2.2. Métodos de Curado de Cemento	24
2.3. La Limolita.....	31
2.4. Diseño Experimental	32

CAPÍTULO 3

3. MATERIALES Y EXPERIMENTACION.....	46
3.1. Materiales y Equipos.....	46
3.2. Ensayos a realizarse.....	56
3.3. Modelación Matemática	60

CAPÍTULO 4

4. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	65
4.1. Tabulación de datos y resultados.....	65
4.2. Análisis Estadístico	82
4.3. Modelo matemático y simulación	113
4.4. Ajuste y verificación del modelo.....	119

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	124
5.1. Conclusiones.....	124
5.2. Recomendaciones	126

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

SIMBOLOGÍA

A_p	Area de la Probeta en mm ²
E	Módulo de Elasticidad en MPa
ϵ	Deformación unitaria
f_c	Esfuerzo de compresión de la pasta en MPa
F_n	Función residual
gr	Unidad de masa o peso
H_n'	Módulo plástico
HR	Porcentaje de humedad relativa del curado
λ	Multiplicador de plasticidad
HRB	Unidad de dureza
mL	Unidad de volumen
mm	Unidad de longitud
MPa	Unidad de esfuerzo
σ	Esfuerzo de compresión
σ_{yo}	Esfuerzo de fluencia en MPa
σ_n^{tr}	Esfuerzo elástico de predicción
t	Unidad de tiempo de ensayo de compresión

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Metodología de la Investigación	7
Figura 2.1: Porcentajes de agregados para elaboración del cemento.....	13
Figura 2.2: Sección transversal del concreto.....	14
Figura 2.3: Efecto del curado sobre la resistencia a la compresión	25
Figura 2.4: Aspecto de la limolita	32
Figura 2.5: Análisis de la homogeneidad de la varianza y la normalidad ..	41
Figura 2.6: Análisis de la varianza del ejemplo de los tiempos de coquificación en ANOVA.....	41
Figura 2.7: Resultados del ejemplo de coquificación en ANOVA	44
Figura 3.1: Molienda de la limolita	48
Figura 3.2: Dispositivo de pesaje y tazones para medir la cantidad de cemento en gramos.....	50
Figura 3.3: Moldes para cubos de 50mm marca JDBLAB	52
Figura 3.4: Mezclador mecánico con paleta y tazón.....	52
Figura 3.5: Máquina para ensayo de compresión.....	55
Figura 4.1: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 7 días de curado	67
Figura 4.2: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 14 días de curado	69
Figura 4.3: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 21 días de curado	71
Figura 4.4: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 28 días de curado	73
Figura 4.5: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 4 días de curado	75
Figura 4.6: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 11 días de curado	77
Figura 4.1: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 18 días de curado	79
Figura 4.8: Esfuerzo de comprsión vs deformación unitaria para las muestras a los 25 días de curado	81
Figura 4.9: Prueba de Levene para verificar la homogeneidad de la varianza para 15% de adición de limolita.....	86

Figura 4.10: Prueba de Levene para verificar la homogeneidad de la varianza en la validación.....	87
Figura 4.11: Análisis de varianza de las resistencias con respecto a los días de curado para 15% de adición de limolita	88
Figura 4.12: Análisis de varianza de las resistencias con respecto a los días de curado para la validación.....	90
Figura 4.13: Curva de regresión no lineal para la adición de 15% de limolita.....	91
Figura 4.14 Curva de regresión no lineal para la validación	92
Figura 4.15: Análisis residual para evaluar la homogeneidad de la varianza y la normalidad usando diseño factorial	97
Figura 4.16: Variación de error experimental entre factores.....	98
Figura 4.17: Resultados de la prueba de Tukey usando diseño factorial	99
Figura 4.18: Análisis residual para evaluar la homogeneidad de la varianza y la normalidad en la validación usando diseño factorial	101
Figura 4.19: Variación del error experimental entre los factores para la validación usando diseño factorial	101
Figura 4.20: Resultados de la prueba de Tukey para la validación usando diseño factorial	102
Figura 4.21: Gráfico esfuerzo vs porcentaje y días de curado	103
Figura 4.22: Gráfico de niveles de esfuerzo vs días y porcentajes	104
Figura 4.23: Histograma de los residuos para ver la normalidad de los datos.....	107
Figura 4.24: Gráfico de las medias estimadas vs los residuos de Student	108
Figura 4.25: Pruebas estadísticas para la homogeneidad de la varianza del recíproco de la variable dependiente.....	108
Figura 4.26: Análisis de varianza usando ANOVA para hallar diferencias significativas entre el cemento tipo I y IV	109
Figura 4.27: Método de Tukey para la comparación entre pares del cemento tipo I y IV	109
Figura 4.28: Histograma de los residuos para ver la normalidad de los datos para la validación	111
Figura 4.29: Gráfico de las medias estimadas vs los residuos de student para la validación	111
Figura 4.30: Pruebas estadísticas para la homogeneidad de la varianza en la validación.....	112
Figura 4.31: Análisis de varianza usando ANOVA para hallar diferencias significativas entre el cemento tipo I y IV en la validación	112
Figura 4.32: Método de tukey para comparar el cemento tipo I y IV en la validación	112

Figura 4.33: Modelo isotrópico de la curva esfuerzo vs deformación unitaria	117
Figura 4.34: Modelo de la curva esfuerzo vs deformación unitaria para la muestra 1 con 15% de adición a los 7 días de curado.....	121
Figura 4.35: Modelo de la curva esfuerzo vs deformación unitaria para la muestra 1 con 17.5% de adición a los 4 días de curado	122

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Ejemplo de aplicación del diseño factorial con dos factores y tres réplicas	39
Tabla 2: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 15% de limolita a los 7 días de curado.....	66
Tabla 3: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 15% de limolita a los 14 días de curado.....	68
Tabla 4: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 15% de limolita a los 21 días de curado.....	70
Tabla 5: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 15% de limolita a los 28 días de curado.....	72
Tabla 6: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 17.5% de limolita a los 4 días de curado.....	74
Tabla 7: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 17.5% de limolita a los 11 días de curado.....	76
Tabla 8: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 17.5% de limolita a los 18 días de curado.....	78
Tabla 9: Ensayos de compresión de las muestras con adición de 17.5% de limolita a los 25 días de curado.....	80
Tabla 10: Permutación aleatoria de las muestras con adición de 15% de limolita a los tratamientos.....	84
Tabla 11: Permutación aleatoria de las muestras con adición de 17.5% de limolita a los tratamientos.....	84
Tabla 12: Asignación de los datos de 15% de adición de limolita para análisis estadístico	85
Tabla 13: Asignación de los datos de 17.5% de adición de limolita para análisis estadístico	85
Tabla 14: Análisis de varianza de los tratamientos para 15% de limolita y curado en aire	89
Tabla 15: Análisis de varianza de los tratamientos para 17.5% de limolita y curado en aire	90
Tabla 16: Asignación de los datos para comparaciones pareadas con los porcentajes de adición de limolita de 5%, 10%, 15%, 20% y 25%.....	94

Tabla 17: Asignación de los datos para comparaciones pareadas con los porcentajes de adición de limolita de 7.5%, 12.5%, 17.5%, 22.5% y 27.5%.....	95
Tabla 18: Datos de los mejores tratamientos del cemento Portland tipo I y IV con los de adición de 5% y 10% de limolita	105
Tabla 19: Datos de los mejores tratamientos del cemento Portland tipo I y IV con los de adición de 7.5% y 12.5% de limolita	106
Tabla 20: Valores de “a” y “m” para el modelo matemático	120

INTRODUCCIÓN

El presente estudio pretende modelar el cemento Portland tipo I con un porcentaje de aditivo en la composición de materiales estructurales. Para aquello se necesita primero conocer el material a tratar, la clase de aditivo a seleccionar y por último las cantidades necesarias de masa para nuestro trabajo. Una vez realizada dicha investigación se procede a escoger la experimentación y con los datos obtenidos se hace un análisis de su comportamiento con métodos estadísticos. Estos objetivos se sintetiza en:

- Estudiar la Resistencia a la Compresión del cemento Portland tipo I.
- Seleccionar un diseño de experimento que nos permita obtener un análisis con buenos resultados.
- Realizar la mejor experimentación del material compuesto que nos permita visualizar el efecto en la adición de limolita al cemento Portland Tipo I.
- Analizar los datos y resultados de la experimentación de una manera cualitativa y cuantitativa.
- Identificar los cambios en la resistencia del material modificado y sin adición comparando los mejores porcentajes con el cemento Tipo I y

IV y después modelar la curva esfuerzo vs deformación para ver si se ajusta o no el modelo de endurecimiento isotrópico.

Estos objetivos lograrán evaluar el comportamiento de la adición del aditivo para tiempos de curado diferentes en el cemento portland Tipo I.

En el diseño de la metodología en su parte experimental abarca el estudio de la influencia del Curado. El Curado es una condición de hidratación en la cual el cemento reacciona químicamente con el agua y sirve para mantener una adecuada humedad y temperatura a edades tempranas, de manera que éste pueda desarrollar las propiedades para lo cual fue desarrollado. Con un curado apropiado, el concreto llega a ser más resistente a la compresión, más impermeable, más resistente a la abrasión, y al congelamiento y descongelamiento. La mejora es rápida a edades tempranas, pero después continúa más lentamente por un período indefinido. La temperatura es un factor importante en el curado; si la temperatura está por debajo de los 10°C, esto desfavorece el desarrollo de resistencias a edades tempranas. La temperatura a utilizar es la del ambiente, la cuál, varía entre 25°C y 26°C. Existen otros factores que hacen variar la resistencia a la compresión como la relación agua - cemento y la velocidad de la carga, pero estos se los controla y se los mantiene constante para demostrar el efecto de la adición de la limolita.

Una vez realizado la experimentación se procede a analizar los resultados mediante un modelo estadístico de análisis de varianza llamado ANOVA. Este análisis nos proveerá información acerca de cuáles son los mejores tratamientos (porcentajes y días de curado). Después se procederá a utilizar el modelo de “endurecimiento isotrópico no lineal” para simular el comportamiento del material modificado.

La tesis está dividida en 5 capítulos, los cuales en orden abarcan la descripción del problema y la metodología en la investigación; el marco teórico del cemento, el método de curado y el aditivo; el análisis estadístico y la presentación de los resultados; y, las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

El presente capítulo desarrolla el planteamiento del problema, detallando su justificación. Después se presentan los objetivos seguido de la metodología y la estructura del trabajo.

1.1 Planteamiento del problema y justificación.

Hoy en día, el avance de la ciencia y tecnología tiene una alta relación en la manufactura del cemento. Las mejoras de la resistencia a la compresión del concreto es un problema actual y se debe en gran medida a que no se conoce con exactitud el agregado, la composición y el mejor proceso de curado para su aplicación. Es por eso que se hace indispensable encontrar una composición adecuada que aumente la resistencia a la compresión y por ende su vida útil.

El tipo de cemento utilizado es el cemento Portland tipo I; el agregado fue limolita, debido a su composición química que se asemeja a la del

cemento tipo I en la etapa de endurecimiento, y el tipo de curado seleccionado fue “curado al aire” sin adición de vapor u otra técnica.

Esta combinación sirve para encontrar la mejor resistencia a la compresión a edades tempranas cuyos fines sean de beneficio en trabajos que requieran estas condiciones.

1.2 Objetivos.

Objetivo General.

El objetivo general de este proyecto es identificar el efecto que tiene la introducción de un 15% de Limolita con curado al aire en la resistencia a la compresión del cemento portland tipo I.

Objetivos Específicos.

Los objetivos específicos son:

- Identificar la resistencia a la compresión del cemento portland tipo I y IV mediante una experimentación.
- Encontrar un diseño de experimento adecuado que permita encontrar la veracidad de nuestro experimento mediante un software moderno.
- Realizar la mejor experimentación para esta combinación de material compuesto mediante la norma ASTM C109, en la que los resultados sean los esperados.

- Analizar los datos y resultados de la experimentación de una manera cualitativa y cuantitativa.
- Identificar los cambios en la resistencia a la compresión del material modificado y sin modificar, comparando y obteniendo la mejor muestra para utilizarla en un modelo matemático.

1.3 Metodología

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

Identificación de la resistencia a la compresión del cemento portland tipo I y IV.

Se identificará la resistencia a la compresión del cemento Portland Tipo I y IV. Se lo hará mediante una experimentación acorde a la norma ASTM C109.

Diseño del Experimento.

En el diseño de experimento se planteará una hipótesis de investigación acerca de los efectos en la resistencia a la compresión para una sola variable explicativa llamada "Tiempo de curado". Se comenzará con la adición de 15% de limolita y después para una validación se hará una prueba de uniformidad añadiendo 17.5% de limolita para encontrar la veracidad de los datos.

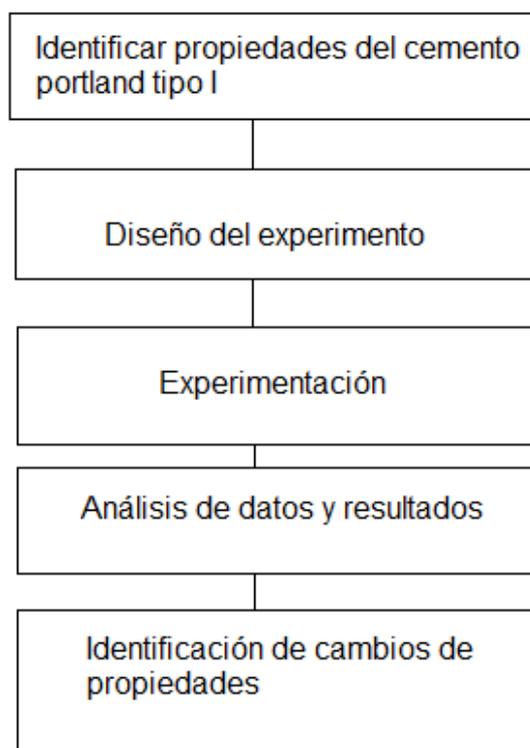


FIGURA 1.1. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Una vez realizado este análisis se procederá a verificar las diferencias significativas con los otros porcentajes de adición de limolita que se realizaron en el Laboratorio de Suelos y Rocas de la FICT. El análisis estadístico que nos ayuda a verificar si la hipótesis de investigación planteada se acepta o se rechaza depende muchos de los datos, pero existe un software llamado STATISTICAL 7. El programa consta de varios modelos lineales y no lineales en la cual para nuestro caso se seleccionó el análisis de varianza ANOVA.

ANOVA nos permite constatar si las muestras tienen una forma normalizada y también si las desviaciones se disparan. Después de saber si el experimento sigue un modelo lineal verificamos la dependencia del tiempo de curado con la resistencia a la compresión, usando varias muestras y obteniendo un factor de probabilidad p menor a 0.05. Si este factor es mayor a 0.05 se concluye que no hay diferencia significativa por lo que se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis de investigación, entonces, se dice que la variable dependiente no depende las muestras.

Experimentación.

En esta fase primero se efectúa la experimentación con 15% de adición de limolita en probetas de cincuenta milímetros cúbicos de arista para tiempos de curado diferentes acorde a la norma ASTM C 109/ C 109M. Se desea saber si la resistencia media a la compresión del material sin adición es igual al material modificado con el porcentaje seleccionado en 7, 14, 21 y 28 días respectivamente. Después, se realiza los experimentos con la adición de 17.5% de limolita. Las pruebas se realizarán a los 4, 11, 18 y 25 días respectivamente como validación de datos. Además, se menciona el tipo de máquina a utilizar y sus características. No se incluye ningún aditivo químico para la condición de curado.

Análisis de Datos y Resultados.

Una vez tabulados los datos y resultados se procede a realizar el respectivo análisis estadístico que consiste en ver la variación de la resistencia a la compresión con el tiempo de curado y el porcentaje.

Identificación del efecto.

Una vez realizado el análisis se comparará y seleccionará el mejor resultado para el ajuste y verificación del modelo matemático.

1.4 Estructura de la Tesis

La estructura de la tesis es la siguiente:

En el capítulo 1 se detallan las generalidades, es decir se menciona el problema y su justificación, los objetivos generales y específicos, la metodología y la estructura de la tesis.

El capítulo 2 se llama Marco Teórico y se trata de los conceptos de cemento Portland tipo I, limolita, métodos de curado, la limolita como aditivo y diseño de experimentos.

El capítulo 3 se llama Metodología y trata de la experimentación. Esto es: selección del material, los ensayos a realizarse y la modelación matemática.

El capítulo 4 se llama Presentación y Análisis de Resultados y se trata de tabulación de datos y resultados; análisis estadístico aplicado; la implementación del modelo matemático y simulación; y, el ajuste con la verificación del modelo.

Por último tenemos el capítulo 5 que se trata de las conclusiones y recomendaciones de nuestro proyecto.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEORICO

El presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos del cemento, dando una introducción al concreto seguido de las características del cemento portland, propiedades, ventajas, desventajas y tipos. También detallaremos los tipos de curado, la limolita como aditivo y conceptos acerca de diseño de experimentos.

2.1 Generalidades del Cemento Tipo I

Introducción al Concreto

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes que son la pasta más el agregado [1]. El agregado normalmente se compone de arena y grava o piedra triturada. En cambio la pasta se constituye de materiales de cementación (cemento Portland con o sin materiales cementantes suplementarios), agua y aire. La pasta actúa como pegamento, se endurece debido a la reacción química entre el cemento

y agua uniendo todos los agregados dentro de una masa de roca, la cuál, se conoce como concreto.

Los agregados se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arena manufacturada o natural con tamaños de partículas en el rango de 10mm; los agregados gruesos son partículas retenidas en el tamiz de 1.25mm y de hasta 150mm en tamaño. El tamaño de agregado grueso máximo que se usa es 20mm [1].

La pasta usualmente se compone de materiales de cementación, agua y aire atrapado o aire arrastrado a propósito. La pasta ordinariamente constituye cerca del 25% a 40% del volumen total del cemento. La figura 2.1 muestra que el volumen absoluto de materiales cementantes está usualmente entre 7% y 15% y el agua en 14% y 21%. El contenido de aire oscila entre un 4% a 8% del volumen de concreto [1]. Estos valores van de acuerdo al tipo de cemento a utilizar y la aplicación.

Debido al porcentaje de volumen de los agregados del concreto, la selección de estos es muy importante. Los agregados deben consistir de partículas con esfuerzos adecuados, resistencias a las condiciones que se va a exponer, y, no debe contener materiales que causen deterioración del mismo.

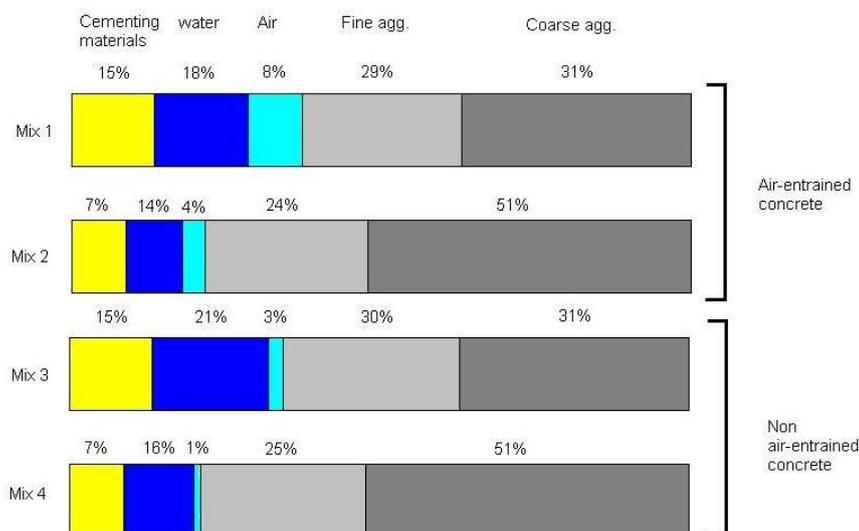


FIGURA 2.1: PORCENTAJES DE AGREGADOS PARA ELABORACION DE CEMENTO [1]

Una gradación continua de partículas de agregados es conveniente para el uso eficiente de la pasta. La calidad del concreto depende de la pasta y el agregado, y el aporte entre los dos. En la estructura del concreto, cada una de las partículas de agregado se recubre completamente con la pasta y también los espacios entre ellas, tal como se ilustra en la figura 2.2.

Para cualquier conjunto particular de materiales y condiciones de curado, la calidad del hormigón está fuertemente influenciada por la cantidad de agua que se usa en relación la cantidad de cemento. Innecesariamente, los altos contenidos de agua diluyen la pasta. Las ventajas de reducir el contenido de agua son:

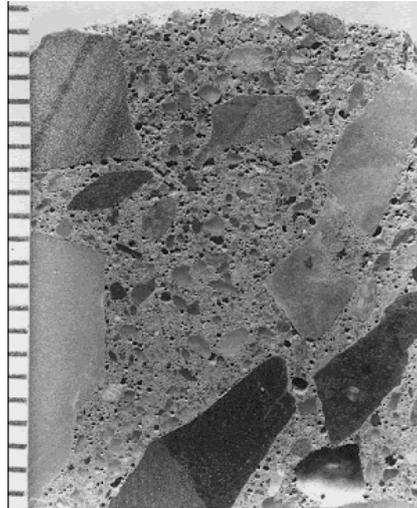


FIGURA 2.2. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL CONCRETO [2]

- Incremento del Esfuerzo a la compresión y flexión.
- Menor permeabilidad, por lo tanto menor absorción.
- Incremento de la resistencia a la meteorización (ruptura de las rocas por la acción del clima).
- Mejor aportación entre las capas sucesivas y entre el concreto con el refuerzo.
- Encogimiento y craqueo de secado reducido.
- Menos cambio de volumen entre el secado y la humectación.

Con la menor cantidad de agua utilizada, se obtendrá la mejor calidad del concreto siempre que la mezcla se pueda consolidar

adecuadamente. Las cantidades pequeñas de las mezclas de agua resultan en mezclas más rígidas; y con vibración, las mezclas rígidas pueden ser fácilmente colocadas. Por lo tanto, la consolidación por vibración permite una mejora en la calidad del concreto.

Las propiedades del concreto pueden ser cambiadas por adición de sustancias químicas, usualmente en forma líquida, durante el proceso de pesaje o medición volumétrica. Las mezclas químicas son comúnmente usadas para ajustar tiempos de endurecimiento o establecimiento, reducir la demanda de agua, incrementar la trabajabilidad, transportar partículas de aire, y, ajustar otras propiedades. Después de la proporción adecuada, la mezcla, la colocación, consolidación, acabado y curado, el concreto se endurece y se convierte en un material fuerte, incombustible, duradero, resistente a la abrasión, y de construcción en agua que no requiere mantenimiento y tiene un ilimitado número de aplicaciones.

El Cemento Portland.

El Cemento Portland, uno de los componentes básicos para la elaboración del concreto, debe su nombre a Joseph Aspdin, un albañil inglés quién en 1824 obtuvo la patente para este producto [3]. Debido a su semejanza con una caliza natural que se explotaba en la Isla de Portland, Inglaterra, lo denominó cemento Portland. El cemento

Portland es, con diferencia, el más importante en lo que se refiere a la cantidad producida.

Se fabrica por calentamiento de una mezcla de caliza y arcilla, u otros materiales de composición global similar, a una temperatura que provoca una fusión parcial. El producto, llamado clinker, se muele y se mezcla con un porcentaje pequeño de yeso. El clinkler contiene cuatro fases principales: C3S, β -C2S, C3A y solución sólida de ferrito (con composición comprendida aproximadamente entre C2F y C6A2F, y que se acerca con frecuencia a C4AF) [4].

En la mayoría de los países en que se fabrica el cemento Portland, 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 antes mencionadas y por factores físicos, como la finura alcanzada en la molienda.

Para clasificar a los cementos portland se utiliza a veces como referencia la clasificación de los Estados Unidos. Se basa parcialmente en la composición potencial, es decir, las proporciones de las cuatro fases principales calculadas a partir del análisis químico total por un

método estándar, conocido como método de Bogue. La composición de la fase potencial está probablemente en buen acuerdo con la verdadera composición de fases para la mayoría de los cementos Portland.

Según la norma ASTM C 150 existe ocho diferentes tipos de cemento, la clasificación está de acuerdo al uso y necesidad en el mercado de la construcción y son:

- **Tipo I:** Normal. 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.
- **Tipo IA:** Normal. Uso general, con inclusor de aire.
- **Tipo II:** Moderado. Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación. Genera normalmente menos calor que el cemento tipo I, y este requisito de moderado calor de hidratación puede especificarse a opción del comprador. En casos donde se especifican límites máximos

para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc. La Norma ASTM C 150 establece como requisito opcional un máximo de 70 cal/g a siete días para este tipo de cemento.

- **Tipo IIA:** Moderado. Igual que el tipo II, pero con inclusor de aire.
- **Tipo III:** Altas resistencias. Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas. Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas.
- **Tipo IIIA:** Altas resistencias. Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.
- **Tipo IV:** Bajo calor de hidratación. Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación. 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 hidratación inicia en el momento en que el cemento entra en contacto con el agua; el endurecimiento de la mezcla da principio generalmente a las tres horas, y el desarrollo de la resistencia se logra a lo largo de los primeros 30 días, aunque éste continúa aumentando muy lentamente por un período mayor de tiempo. En la fabricación del cemento se utilizan normalmente calizas de diferentes tipos, arcillas, aditivos -como el mineral de fierro cuando es necesario- y en ocasiones materiales silicosos y aluminosos. Estos materiales son triturados y molidos finamente, para luego ser alimentados a un horno rotatorio a una temperatura de 1,400 grados centígrados y producir un material nodular de color verde oscuro denominado CLINKER.

- **Tipo V:** Resistente a la acción de los sulfatos. Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos en vez del tipo II.

La presencia en el mercado de los cementos descritos anteriormente, de acuerdo a una encuesta de 1983 era [14]: 87% de los despachos correspondientes a los cementos tipo 1 y 11; el 3.2% para los cementos de alta resistencia tipo 111, y 0.6% para los cementos de alta

resistencia a los sulfatos tipo V. Sin registrar la presencia del tipo IV. Los cementos Portland puzolánicos y Portland de Escoria, en la misma encuesta señalaban el 1% de despachos. El margen restante se reparte entre el cemento de albañilería (4%) y, otros [14].

Según la norma ASTM C 595, existen cinco tipos de cementos mezclados para aplicaciones generales o especiales:

- **Tipo IS.-** El cemento Portland de escoria de alto horno se puede emplear en las construcciones de concreto en general. Para producir este tipo de cemento, la escoria del alto horno se muele junto con el clinker de cemento Portland, 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 cemento Portland IP puede ser empleado en general para construcciones y el tipo P se utiliza en construcciones donde no sean necesarias resistencias altas a edades tempranas. 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 cemento tipo S, de escoria, se usa comúnmente en donde se requieren resistencias inferiores. El contenido mínimo de escoria es del 70% en peso del cemento de escoria. Este cemento se fabrica mediante cualquiera de los siguientes métodos:
 - Mezclando escoria molida de alto horno y cemento Portland.
 - Mezclando escoria molida y cal hidratada.
 - Mezclando escoria molida, cemento Portland y cal hidratada.

- **Tipo I (PM).-** El cemento Portland tipo I (PM), modificado con puzolana, se emplea en todo tipo de construcciones de concreto. El cemento se fabrica combinando cemento Portland o cemento Portland de escoria de alto horno con puzolana fina. Esto se puede lograr:
 - 1) Mezclando el cemento Portland con la puzolana.
 - 2) Mezclando el cemento Portland de escoria de alto horno con puzolana.
 - 3) Moliendo conjuntamente el clínker de cemento con la puzolana.

- 4) Por medio de una combinación de molienda conjunta y de mezclado.

El contenido de puzolana es menor del 15% en peso del cemento terminado.

- **Tipo I (SM).**- El cemento Portland modificado con escoria, TIPO I (SM), se puede emplear en todo tipo de construcciones de concreto. El contenido máximo de escoria es del 25% del peso del cemento de escoria. Se fabrica mediante cualquiera de los siguientes procesos:

- 1) Moliendo conjuntamente el clínker con alguna escoria granular de alto horno.
- 2) Mezclando escoria molida y cal hidratada.
- 3) Mezclando escoria, cemento Portland y cal hidratada.

A todos los cementos mezclados arriba mencionados, se les puede designar la inclusión de aire agregando el sufijo A, por ejemplo, cemento TIPO S-A.

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 sub-fijo 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 [14].

Los requisitos de durabilidad según la Norma ASTM C 1157 van de acuerdo a la aplicación o al uso. Por ejemplo, donde se requieran altas resistencias tempranas, moderada o alta resistencia a los sulfatos, moderado o bajo calor de hidratación y opcionalmente baja reactividad con los agregados reactivos a los álcalis.

Para el caso de los Cementos Hidráulicos de la Norma ASTM C 1157, éstos se clasifican de acuerdo a lo siguiente:

- **Tipo GU:** De uso general en construcción. Se emplean cuando no se requieren condiciones especiales.
- **Tipo HE:** De alta resistencia inicial o temprana.
- **Tipo MS:** De moderada resistencia a los sulfatos.
- **Tipo HS:** De alta resistencia a los sulfatos.
- **Tipo MH:** De moderado calor de hidratación.
- **Tipo LH:** De bajo calor de hidratación.

Así mismo existe otra clasificación de cementos que son para albañilería según la norma ASTM C 91 y se clasifican de acuerdo a lo siguiente:

- **Tipo N:** Para uso en la preparación de morteros Tipo N de la Especificación ASTM C 270, sin mayor adición de cementos o cal hidratada, y para uso en la preparación de morteros Tipo S o M de la Especificación ASTM C 270 cuando el cemento es adicionado de acuerdo a los requerimientos de ASTM C 270.
- **Tipo S:** Para uso en la preparación de morteros Tipo S de la Especificación ASTM C 270, sin mayor adición de cementos ó cal hidratada.
- **Tipo M:** Para uso en la preparación de morteros Tipo M de la Especificación ASTM C 270, sin mayor adición de cementos ó cal hidratada.

2.2 Métodos de Curado de Cemento.

El curado es una condición en la cuál la pasta se la deja en reposo mientras se producen el fraguado y endurecimiento [4]. El fraguado es el espesamiento inicial, que sucede normalmente en pocas horas; el endurecimiento es un proceso más lento y origina las propiedades mecánicas.

El curado tiene por objetivo el impedir el secado prematuro del concreto, cuyas consecuencias son dobles [5]:

- La reacción química entre el agua y el cemento se interrumpe por la ausencia de agua, de tal manera que el concreto no adquiere sus propiedades.
- Se produce una contracción precoz lo que ocasiona fisuras.

Con un curado apropiado, el concreto es más resistente. El incremento es rápido en edades tempranas, pero continua lentamente cuando tiende a un período indefinido. La figura 2.3 ilustra la ganancia de la resistencia a la compresión con los días.

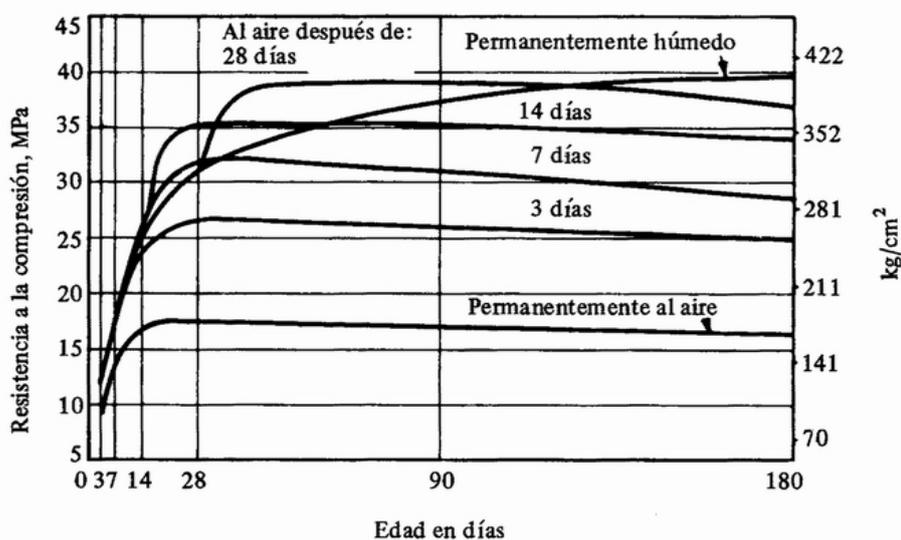


FIGURA 2.3. EFECTO DEL DE CURADO SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION [6].

Según el ACI, existen dos climas extremos que pueden provocar problemas durante el mezclado, transporte y colocación del concreto: el clima frío y el clima cálido. En el primer caso, la preocupación es que los compuestos del cemento no reaccionen con el agua o que lo hagan a una tasa muy lenta, hasta que se congele. En el otro caso, la principal preocupación es que el agua del concreto se evapore rápidamente y que una parte significativa del cemento no se hidrate, y por lo tanto no adquiera la resistencia y que presente porosidades. La combinación de las condiciones planteadas por el ACI para clima cálido son [6]:

- Alta temperatura ambiental
- Alta temperatura del concreto
- Baja humedad relativa
- Velocidad de viento considerable
- Radiación solar considerable

Según la PCA, es deseable una temperatura entre 10°C y 16°C para el concreto fresco; sin embargo, en clima cálido en donde es necesario frecuentemente un enfriamiento artificial, suele especificarse un límite hasta 32°C [6].

En fin, los aspectos importantes para el curado son los siguientes:

- **Agua de Curado.** Cuando se tiene cemento con una relación agua/cemento baja, la porosidad es pequeña y se requiere de un grado menor para que tenga porosidad alta. Además, con relaciones a/c pequeñas se vuelve necesario reaprovisionar agua al cemento ya que el propio secado del cemento hace que el agua de mezclado resulte insuficiente para mantener los capilares llenos de agua. Por otro lado, la baja porosidad es un factor que hace impermeable al concreto y no facilita la penetración del agua de curado al concreto, así como tampoco su evaporación [6].
- **Tiempo de Curado.** Se refiere al lapso en el cual se desarrollan las reacciones químicas del cemento con el agua, sin que realice acción alguna. También se refiere al tiempo durante el cual se ejecutan acciones específicas para mantener el concreto en las condiciones favorables de humedad y temperatura, como pueden ser aplicarle agua, cubrirlo del medio ambiente, calentarlo, etc. Para condiciones medias con cemento Portland normal y para elementos de hormigón armado, el periodo de curado mínimo debe ser de siete días, plazo que puede reducirse a la mitad si el cemento es de alta resistencia inicial. Por el contrario, hay que aumentarlo a quince

días cuando se trate de cementos lentos o de elementos de hormigón en masa.

En general y de acuerdo a las recomendaciones de la norma CSA A23.1, el proceso de curado debe prolongarse hasta que el hormigón haya alcanzado el 70% de su resistencia de cálculo y es a los 7 días con una temperatura mínima de 10°C dependiendo de la aplicación.

Métodos para curar el Cemento.

Una vez que inicia el endurecimiento del cemento este protegerá del sol y del viento mediante algún procedimiento que le conserve su humedad propia o le aporte nueva humedad. Según Powers [7], la hidratación del cemento se reduce en forma importante cuando la humedad dentro de los poros capilares de la pasta de cemento cae por debajo del 80%; de esto concluyó que para que se den las condiciones de humedad que permitan el curado natural, la humedad del aire debe ser al menos de un 80% para evitar que haya un flujo de humedad del concreto hacia el aire. Esto es válido si la evaporación no se diera por otras condiciones meteorológicas desfavorables como: alta velocidad del viento y diferencias significativas entre la temperatura del concreto y del aire. En base a esto los sistemas de curado se pueden dividir en dos grandes grupos:

a) Curado con agua.- Cualquiera que sea el método elegido de curado con agua, éste debe proporcionar una cubierta completa y continua de agua libre de componentes que puedan dañar la pasta de cemento. Se deben evitar los choques térmicos o fuertes gradientes de temperatura por el empleo de agua fría sobre el hormigón. Para tal efecto pueden emplearse:

Inmersión en Agua.- La inmersión se puede emplear en losas de piso, pavimentos, techos planos, y en cualquier superficie donde es posible retener el agua o donde exista una corriente continua de agua.

Nebulización.- En general es un buen método de curado cuando la temperatura ambiente es superior a unos 10°C. Los regadores de jardín son muy efectivos cuando no hay que preocuparse por el costo del agua. El rociado debe ser continuo y debe evitarse la intermitencia.

Cubiertas de material absorbente.- Sacos, arpilleras, mantas de algodón, alfombras y otras cubiertas absorbentes también resultan útiles en la retención del agua superficial del hormigón. Estos materiales deben estar libres de sustancias que dañen y decoloren el hormigón.

Capas de Arena o Aserrín.- las que deben estar perennemente húmedas Los materiales no deben contener cantidades peligrosas de materia orgánica u otra que pueda dañar el hormigón.

b) Materiales sellantes.- Evitan la pérdida excesiva de agua superficial su principal ventaja es el menor riesgo que el hormigón se seque por un descuido en el mantenimiento de la humedad. Asimismo, son materiales de fácil manejo y pueden aplicarse antes que los métodos con agua. Para tal efecto pueden emplearse:

Tejadillos Móviles.- son indicados en obras de trazado lineal.

Películas plásticas.- que pueden colocarse directamente sobre el hormigón Tienen la ventaja de ser livianas. La película debe poseer un espesor superior a 0.10 mm.

El papel impermeable.- es utilizado como las láminas plásticas, pero no mancha la superficie. Este papel consiste generalmente en dos capas de papel kraft cementadas juntas y reforzadas con fibras. El papel deberá estar conforme a la ASTM C171

Películas de Curado.- Son recubrimientos a base de aceites o resinas que se pulverizan sobre la superficie del hormigón y forman al polimerizarse, una película protectora que impide la

evaporación del agua; es el sistema mas eficaz y también el más costoso.

En resumen, las ventajas que se obtienen de curar el cemento son: ganancia de resistencia predecible, durabilidad mejorada y mejores condiciones de servicio y apariencia.

2.3 La Limolita.

Definición.

La limolita es una roca sedimentaria que posee una granulometría comprendida entre arena fina y arcilla. Este tipo de rocas proceden de la compactación y cementación de partículas detríticas de tamaño limo (<1/16mm).

Estructura.

Según Folk [9], la limolita está formado principalmente de partículas de limo, que se define como granos entre 62.5 y 3.9 micrómetros. Estas difieren de las areniscas debido a los poros pequeños y una propensión a obtener una importante fracción de arcilla. Aunque a menudo es confundido como un esquisto, la limolita carece de laminaciones que son típicos de los esquistos. La muestra no es una limolita pura ya que se observan partículas de tamaño arena muy fina (1/8-1/16mm). La figura 2.4 ilustra una muestra de origen eólico

(Dunas). Obsérvese la erosión alveolar sobre la superficie de la muestra (alvéolos = huecos) producida por el impacto de partículas tamaño arena impulsadas por el viento (deflación). Composicionalmente respondería a una CO_3Ca , aunque también se observan algunos granos de cuarzo (grisáceos) y de esquistos (negros) [8].



FIGURA 2.4. ASPECTO DE LA LIMOLITA [8]

2.4 Diseño Experimental.

En esta sección trataremos sobre diseño de experimentos, los principios básicos de los diseños de experimentos, ventajas y desventajas y conceptos de diseño factorial de dos factores con un ejemplo ilustrativo.

Definición.

Se entiende por diseño de experimentos a una metodología basada en útiles matemáticos y estadísticos cuyo objetivo es ayudar al experimentador a [10]:

1. Seleccionar la estrategia fundamental óptima que permita obtener la información buscada con el mínimo coste.
2. Evaluar los resultados experimentales obtenidos, garantizando la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan.

Principios básicos del diseño de experimento.

Según Reyes [11], los principios básicos del diseño de experimentos son:

- **Reproducción.-** consiste en repetir o hacer varias replicas para proporcionar una estimación del error experimental y permitir obtener una estimación más precisa del efecto medio de cualquier factor.
- **Aleatorización.-** asignación al azar de tratamiento a las unidades experimentales. Una suposición en los modelos estadísticos de diseño de experimentos en que las observaciones o los errores en ellas están distribuidos

independientemente. La aleatorización hace válida esta suposición.

- **Control local.**- cantidad de balanceo, bloqueo y agrupamiento de las unidades experimentales que se emplean en el diseño estadístico adaptado [11].El agrupamiento es una colocación de un conjunto de unidades experimentales homogéneas en grupos, de modo que los diferentes grupos puedan sujetarse a distintos tratamientos. El bloqueo proporciona control local del ambiente para reducir el error experimental. Las unidades experimentales se agrupan de manera que su variabilidad dentro de los grupos sea menor que entre las unidades antes de agruparlas. Por último, el balanceo consiste en la obtención de las unidades experimentales de manera que resulte una configuración balanceada.

Ventajas y desventajas del Diseño de Experimento.

a) Ventajas.

- Se requiere una estrecha colaboración entre los estadísticos y el investigador o científicos con las consiguientes ventajas en el análisis e interpretación de las etapas del programa.

- Se enfatiza respecto a las alternativas anticipadas y respecto a la pre-planeación sistemática, permitiendo aun la ejecución por etapas y la producción única de datos útiles para el análisis en combinaciones posteriores.
- Debe enfocarse la atención a las interrelaciones y a la estimación y cuantificación de fuentes de variabilidad en los resultados.
- El número de pruebas requerido puede determinarse con certeza y a menudo puede reducirse.
- La comparación de los efectos de los cambios es más precisa debido a la agrupación de resultados.
- La exactitud de las conclusiones se conoce con una precisión matemáticamente definida [11].

b) Desventajas.

- Tales diseños y sus análisis, usualmente están acompañados de enunciados basados en el lenguaje técnico del estadístico. Sería significativos a la generalidad de la gente, además, el estadístico no debería subestimar el valor de presentarnos los resultados en forma gráfica. De hecho, siempre debería considerar a la representación

gráfica como un paso preliminar de un procedimiento más analítico.

- Muchos diseños estadísticos, especialmente cuando fueron formulados por primera vez, se han criticado como demasiado caros, complicados y que requieren mucho tiempo. Tales críticas, cuando son válidas, deben aceptarse de buena fe y debe hacerse un intento honesto para mejorar la situación, siempre que no sea en detrimento de la solución del problema.

Diseño Factorial.

Se comenzará con una introducción del diseño factorial, definición, ventajas y desventajas en el uso de este diseño y por último un ejemplo de aplicación.

a) Introducción.

Cuando se estudia los efectos individuales y conjuntos de varias variables o factores y las combinaciones de los valores, o niveles, de esas variables, se necesita uno que no sea de un simple análisis de varianza individual sino un análisis más amplio, es decir analizar efectos principales y los efectos de interacción. A esto se le llama “diseño factorial” [12, 13]. Estos experimentos se los usa casi en todos los campos de

investigación especialmente cuando necesitamos conocer sobre un trabajo exploratorio y determinar la importancia de los factores y sus efectos principales con los de interacción.

b) Definición.

En general un experimento factorial completo “ axb ” se denomina a aquel experimento, en el cuál, dos factores, “A” y “B” van a ser investigados en los niveles “a” y “b”, respectivamente, con “ab” condiciones experimentales (tratamientos) correspondientes a todas las posibles combinaciones de los niveles de los dos factores [12]. Es costumbre omitir la palabra “completo” de manera que se debe sobreentender que un experimento factorial “ axb ” contiene condiciones experimentales correspondientes a todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores.

c) Ventajas y Desventajas.

Según Nava [13], las ventajas de utilizar un diseño factorial son:

- Producen ahorro y economía del recurso experimental así como de las mejoras en la inferencia.
- Los datos son usados en su totalidad.

- Se pueden apreciar los efectos de interacción entre los factores.

De la misma forma las desventajas son:

- Incremento en el número de unidades experimentales necesarias para llevar a cabo una realización completa de un diseño factorial.
- Al incrementarse el número de niveles de algunos factores o si el número de factores es grande, puede ser difícil la detección de efectos significativos en el experimento (la variabilidad se puede incrementar).

d) Ejemplo de aplicación.

Para presentar la idea de un simple experimento de dos factores (dos variables), supongamos que se desean determinar los efectos de la temperatura del gas y del ancho del horno sobre el tiempo en horas requerido para fabricar coque [12]. Las condiciones experimentales se muestran en la tabla 1. Vale recalcar que en este ejemplo solo se pretende analizar los efectos principales y el efecto de interacción entre los dos factores con diferentes niveles.

TABLA 1
EJEMPLO DE APLICACIÓN DE DISEÑO FACTORIAL CON
DOS FACTORES Y TRES REPLICAS [12].

FACTOR A, ancho del horno(plg)	FACTOR B, temperatura del gas (°F)	Rép 1	Rép 2	Rép 3	Total
4	1600	3,5	3	2,7	9,2
4	1900	2,2	2,3	2,4	6,9
8	1600	7,1	6,9	7,5	21,5
8	1900	5,2	4,6	6,8	16,6
12	1600	10,8	10,6	11	32,4
12	1900	7,6	7,1	7,3	22
	Total	36,4	34,5	37,7	108,6

Si se corrieran varios bloques (o réplicas), cada uno consistente en seis “tratamientos”, sería posible analizar los datos como una clasificación doble o bidireccional y probar diferencias significativas entre las medias de los seis tratamientos. Sin embargo, en este ejemplo se está interesado en conocer o saber si variaciones en el ancho del horno o en la temperatura del gas afectan el tiempo de coquificación y tal vez también si cualesquiera cambios en este tiempo atribuibles a variaciones en el ancho del horno son las mismas a diferentes temperaturas. Es posible contestar preguntas de este tipo si las condiciones experimentales, los tratamientos, consisten en combinaciones apropiadas de los “niveles” (o valores) de los diversos “factores”. A partir de estos datos,

vamos a realizar un análisis de varianza de este experimento con dos factores.

i. Hipótesis nula e Hipótesis de investigación.

La hipótesis nula es: las medias de los factores son iguales; mientras que para la hipótesis de investigación es lo contrario. Es decir, por lo menos existe una diferencia significativa entre las medias. El nivel de significancia es $\alpha=0.05$ para todas las pruebas.

ii. Análisis de varianza.

Mediante ANOVA obtenemos el análisis de varianza para los efectos principales y de interacción. La figura 2.5 y 2.6 muestra el análisis de varianza en STATISTICA. Se observa que la homogeneidad de la varianza y la distribución normal. En la figura 2.6 se observa el análisis de varianza para rechazar o retener nuestra hipótesis nula, la cuál, trata de la diferencia significativa entre las medias. También se observan los efectos principales y los de interacción que permite visualizar mejor los resultados. También ANOVA nos da la suma de los cuadrados y del error experimental con los grados de libertad totales y por factor que en este caso son dos.

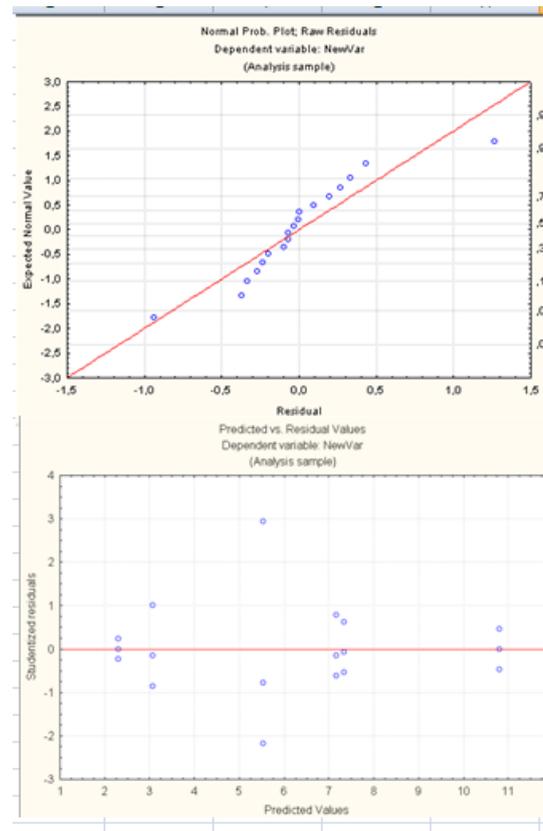


FIGURA 2.5. ANALISIS DE LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA Y NORMALIDAD.

Univariate Tests of Significance for tiempos de coquificación (hr) (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Fabianny\Escr)

Statistics Graphs Tools Data Workbook Window Help

Add to Workbook Add to Report

Vars Cases

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	655,2200	1	655,2200	2363,519	0,000000
FACTOR A, ancho del horno(plg)	123,1433	2	61,5717	222,102	0,000000
FACTOR B, temperatura del gas (°F)	17,2089	1	17,2089	62,076	0,000004
FACTOR A, ancho del horno(plg)*FACTOR B, temperatura del gas (°F)	5,7011	2	2,8506	10,283	0,002504
Error	3,3267	12	0,2772		

FIGURA 2.6. ANALISIS DE VARIANZA DEL EJEMPLO DE LOSTIEMPOS DE COQUIFICACION EN ANOVA.

iii. Resultados.

En la figura 2.6 se observa el corrector C igual a 655.22. La suma de cuadrados de los errores del factor A y B son 123.14 y 17.20, que sumados dan un valor de 140.34, y, la suma de cuadrados de la interacción da 5.70.

También observamos los cuadrados medios de los factores A, B y de la interacción que son 61.57, 17.21 y 2.85 respectivamente.

Los valores de F de Fisher para los factores A, B y la interacción son 222.10, 62.08 y 10.28, lo que comparamos con los hallados en la tabla del estadístico $F_{0.05}(v_1, v_2)$ que se anexa en el apéndice C. Para hallar v_1, v_2 , se sigue el siguiente procedimiento:

- $v_1 = a - 1$, donde a es el número de niveles del factor A.
- $v_2 = (ab - 1)(r - 1)$, donde a y b son los niveles de los factores A y B, y, r es el número de réplicas.
- Para el valor de $F_{0.05}$ para la interacción de los efectos, $v_1 = (a - 1)(b - 1)$ y $v_2 = (ab - 1)(r - 1)$.

Los valores de F para el factor A, B y la interacción son: 4.10, 4.96 y 4.10.

iv. Decisiones.

Para el efecto principal del factor A, como $F=222.10$ excede a 4.10, y para el efecto principal del factor B, como $F=62.08$ excede a 4.96, las hipótesis nulas deben rechazarse. Para el efecto de interacción, como $F=10.28$ excede a 4.10 debemos rechazar la hipótesis nula. La figura 2.7 muestra la tendencia de los tiempos medios de coquificación para anchos variables del horno, es diferente para cada una de las temperaturas del gas.

Está claro en esta figura que el aumento en el tiempo de coquificación para anchos variables del horno es “mayor” a la menor temperatura del gas. En vista de esta interacción, se debe tener mucho cuidado al establecer los resultados de este experimento.

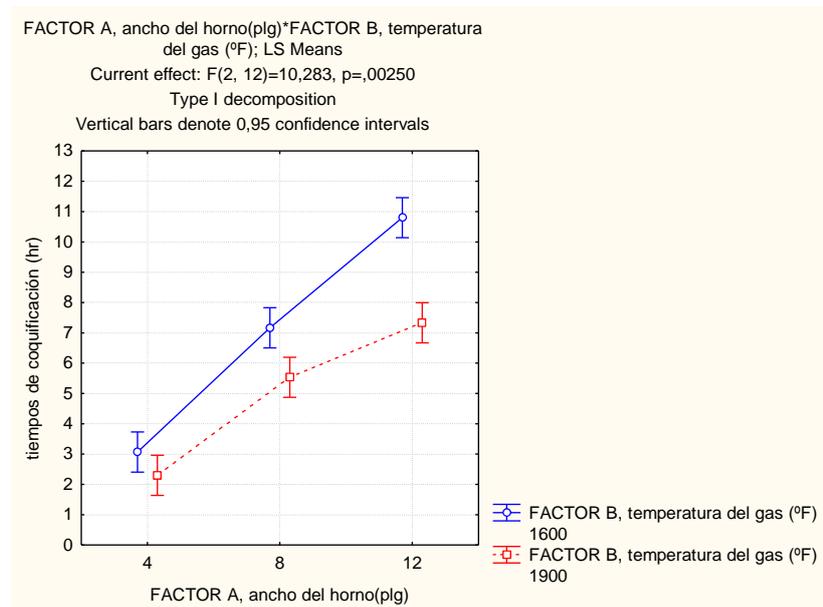


FIGURA 2.7. RESULTADOS DEL EJEMPLO DE COQUIFICACION EN ANOVA.

Por ejemplo, sería muy engañoso decir meramente que el efecto de incrementar la temperatura del gas de 1600 a 1900 grados Fahrenheit, es disminuir el tiempo de coquificación en $(63.1/9)-(45.5-9) = 1.96$ horas. De hecho, el tiempo se reduce en promedio en 0.77 horas cuando el ancho del horno es de 4 pulgadas y en 3.74 horas cuando el ancho es de 12 pulgadas. Entonces se puede deducir que si existe interacción entre el ancho del horno y la temperatura para este ejemplo.

Por último, se puede comparar las medias de los tratamientos para ver cuales son los mejores. Esto se logra con métodos de comparaciones simultáneas cuyo análisis se vera en los análisis de resultados de este presente proyecto junto con las pruebas de hipótesis para la evaluación en ANOVA.

CAPÍTULO 3

3. MATERIALES Y EXPERIMENTACION

En este capítulo se detallará primeramente los materiales y equipos utilizados para la experimentación, después se hablará sobre los ensayos de compresión a realizarse, y, por último la modelación matemática utilizada.

3.1 Materiales y equipos.

Los materiales a utilizar son:

- **Cemento.** El cemento a utilizar el cemento portland tipo I, la cantidad a utilizar es 250 gr. para cubo de 50x50x50mm. El total es 2550 gr para la adición de 15% de limolita. Para la adición de 17.5% de limolita lo que cambia es la proporción de agregado y cemento, la cantidad total es 2475 gr. para todas las probetas a utilizarse.

- **Agua.** La cantidad de agua se la selecciona de acuerdo al radio a/c. Se seleccionó 0.3 debido a que se obtienen mejores resultados en los tiempos de curado con esta relación.

- **Limolita y molienda.** Para la adición de 15% y 17.5% de limolita se hizo una molienda para llevar la muestra a granulometría de 45 micras (325 mesh) conforme al requerimiento de la norma ASTM C 595. El procedimiento se detalla a continuación y se muestra en la figura 3.1:
 - Se pesa 12000 gramos de limolita y se ubica el material en la trituradora de mandíbulas y hacemos pasar el material por esta un par de veces. Una vez terminada la trituración se obtiene una granulometría.

 - Luego se cuartea el material. Homogeneizamos una de las muestras, para que esta sea representativa y tomamos 100 gr. Con esto realizamos el tamizado en las mallas #14, #18, #40, #50 y un fondo. Colocamos los tamices en el agitador mecánico por quince minutos.



FIGURA 3.1. MOLIENDA DE LA LIMOLITA

- Una vez realizado esto y obteniendo un porcentaje granulométrico bueno de la muestra, hacemos pasar todo el material ahora por el molino de discos y nuevamente se ve su granulometría en los mismos tamices.
 - Se coloca el material en el molino de bolas por un tiempo de una hora y media; se verifica la granulometría con los tamices #50, #100, #200, #325 y un fondo colocados en el agitador mecánico por quince minutos. Al obtener el 76% del material en el fondo, se acepta el procedimiento.
- **Temperatura y Humedad.** Según la norma ASTM C109/C109M, la temperatura del aire en la vecindad de los equipos como materiales secos, moldes, placas y tazones se deben mantener en $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Mientras que la temperatura de la habitación será de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Según la norma ASTM C109/C109M.
- La humedad del laboratorio debe mantenerse no menos del 50%. El cuarto estará conforme a las especificaciones de la norma ASTM C511.

Una vez descrito los materiales procedemos a describir los equipos a utilizar para dicho ensayo:

- **Pesas y dispositivos de pesaje.**

Todos estos están de acuerdo a los requerimientos de las norma ASTM C 1005. El dispositivo se evaluará por una precisión y sesgo de una carga total de 3000 gr. La figura 3.2 muestra el dispositivo de pesaje.



FIGURA 3.2. DISPOSITIVO DE PESAJE Y TAZONES PARA MEDIR LA CANTIDAD DE CEMENTO EN GRAMOS.

- **Vasos graduados.**

De la capacidad adecuada (preferentemente grandes, suficiente para medir la mezcla de agua en una sola operación) para entregar

el volumen indicado a 20°C. La variación admisible será de 62mL. Las graduaciones serán de por lo menos de 5mL, salvo que la graduación de las líneas emitidas sea de 10mL de un vaso graduado de 250mL y 25mL para uno de 500mL. Las principales líneas de graduación serán círculos y estarán numeradas. La menor graduación se extenderá al menos una séptima parte alrededor, y en cambio, las graduaciones intermedias se extenderán por lo menos una quinta parte alrededor.

- **Moldes para probetas.**

Para las probetas de 50mm de arista se montaje ajustado. Según la norma ASTM C109/C109M, los moldes no tendrán más de tres compartimientos cúbicos y podrán separarse en no más de 2 partes. Estas partes cuando se ensamblan estarán positivamente mantenidas juntas. Además los moldes serán de metal duro no atacado por la pasta del cemento. Para moldes nuevos el número de dureza Rockwell del metal no deberá ser menos de 55 HRB. Los lados de los moldes serán suficientemente rígidos para impedir la difusión o deformaciones. La figura 3.3 el molde a utilizar.



FIGURA 3.3. MOLDES PARA CUBOS DE 50MM MARCA JDBLAB.

- **Mezclador, Tazón y paleta.**

Un mezclador mecánico impulsado eléctricamente; este se equipa con un tazón de mezcla y la paleta y deberá estar conforma a la norma ASTM C 305. La figura 3.4 muestra el mezclador mecánico junto con el tazón y la paleta giratoria.



FIGURA 3.4. MEZCLADOR MECANICO CON PALETA Y TAZON.

- **Una paleta.**

Esta incluye una cuchilla de acero de 4 a 6 pulgadas de longitud, con bordes rectos.

- **Una habitación húmeda.**

De acuerdo a la norma ASTM C 155. Como en nuestro caso la habitación es en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas y curado al aire, el único requerimiento que se ajusta es que la humedad relativa no sea menor al 50%.

- **La máquina de ensayo de compresión.**

Esta puede ser del tipo hidráulico o tornillo, con una apertura suficiente entre la superficie del rodamiento superior y la superficie del soporte interior de la máquina para permitir la utilización de los aparatos de verificación. La carga aplicada a la probeta se indicará con una precisión del 61%. Si la carga aplicada por compresión está registrada en un dial, este será provisto con una escala graduada que pueda leer, al menos, la lectura más cercana al 0.1% de la escala máxima de carga. El dial deberá ser legible en el 1% de la carga indicada en cualquier nivel de carga obtenida dentro de la gama. En ningún caso, el rango de carga en un dial se considerará que incluye cargas por debajo del valor de 100 veces el cambio de carga más pequeño que se pueda leer en la escala. La

escala deberá estar provisto de una línea de graduación igual a cero y numerados. El puntero del dial tendrá la longitud suficiente para alcanzar la graduación de las marca; el ancho del final del puntero no debe exceder la distancia clara entre las graduaciones más pequeñas. Cada dial estará equipado con un ajustamiento cero que es fácilmente accesible desde el exterior de la cubierta, y con un dispositivo adecuado en todo momento para actualizar, se indicará con una precisión del 1% de la carga máxima aplicada a la probeta.

El cojinete superior será una esfera asentada, bloque de metal endurecido fijada firmemente en el centro de la parte superior del cabezal de la máquina. El centro de la esfera se encuentra en el centro de la superficie del bloque en contacto con la probeta. El bloque se vinculará estrechamente en el asiento esférico, pero estará libre de inclinación en cualquier dirección. La diagonal o diámetro del cojinete será ligeramente superior a la diagonal de la cara del cubo de 50mm de arista, con el fin de facilitar el centrado de la probeta. Un bloque de cojinete de metal endurecido se utilizará en la probeta para reducir al mínimo el desgaste de la platina inferior de la máquina. La superficie del rodamiento destinada por contacto con la probeta tendrá una dureza Rockwell no menos de 60 HRC. Estas superficies no se apartan de las

superficies planas por más de 0.0005 pulgadas cuando los bloques son nuevos y deben ser mantenidas dentro de una variación de 0.001 pulgadas. La figura 3.5 muestra la máquina de ensayo a utilizar.

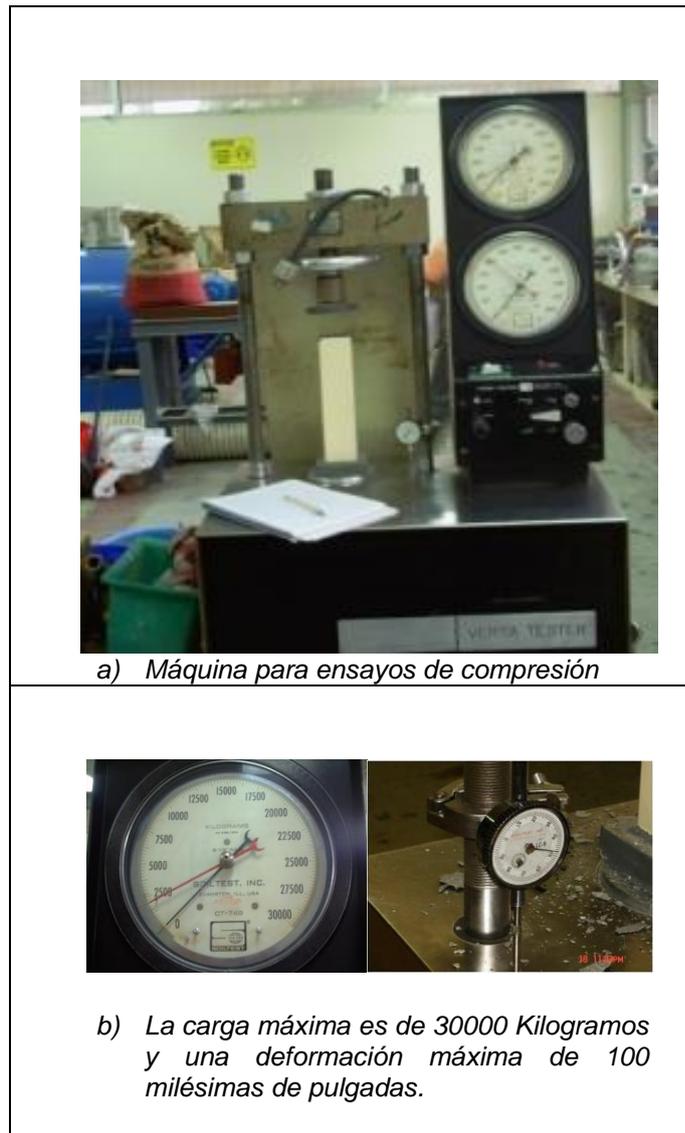


FIGURA 3.5. MAQUINA PARA ENSAYO DE COMPRESION.

Como podemos ver la máxima capacidad de la máquina es hasta 30000 kilogramos con deformaciones de 5 milésimas de pulgadas.

3.2 Ensayos a realizarse.

Para la realización de los ensayos se deberá armar tres probetas de un lote de mortero. El detalle de la preparación de los moldes de probetas, el procedimiento para el moldeado y el cálculo de la resistencia a la compresión se detalla a continuación.

i. Moldeado para las probetas de ensayo.

Aquí se detallará la composición de la pasta y el tiempo de curado. Para la composición se tendrán los siguientes pasos:

- **Para añadir el 15% de limolita.-** la cantidad de masa para una muestra o probeta es de 250 gr, por lo que para el caso de añadir 15% de limolita, esto es, 37.5 gr de limolita más 212.5 gr de cemento portland tipo I. Por otro lado, la mezcla total tiene para la capacidad de 12 muestras o probetas, entonces la cantidad de masa total será $250 \times 12 = 3000$ gr.
- **Para añadir 17.5% de limolita.-** como en el paso anterior, la cantidad de gramos de limolita para cada probeta es 43.75 gr y la de cemento Portland tipo I es 206.25 gr. De la

misma manera, la mezcla total será $250 \times 12 = 3000$ gramos debido a que son 12 cubos o probetas.

- **Agua de mezcla.**- debido a que el ratio a/c es 0.3, la cantidad de agua de mezcla para el cemento portland tipo I y la limolita será $3000 \times 0.3 = 900$ gr para ambos casos de porcentajes de limolita y curado al aire.

ii. Preparación de las Probetas.

- Verter el cemento Portland tipo I en el tazón y a continuación se agrega el porcentaje de limolita en posición vertical.
- Se pondrá en marcha el mezclador a velocidad lenta para que la mezcla sea homogénea. Después de 15 minutos de la puesta en marcha, se agregará agua. Esta operación deberá hacerse para ambos porcentajes.
- Se cambiará a velocidad rápida que se mantendrá durante 45 segundos.
- El molde se cubrirá interiormente con una delgada capa de aceite. Las uniones deberán sellarse. El molde y el marco se fijarán sobre una mesa de compactación.

- Se introducirá en cada uno de los compartimentos una primera capa de alrededor de 120 gr de mezcla, directamente desde el mezclador. Esta capa se nivelará por medio de una espátula plana con ocho movimientos de ida y vuelta apoyándose sobre el borde superior del dispositivo superpuesto.
- Se hará funcionar la mesa de golpes dando 30 caídas en 60 segundos para que las burbujas de agua salgan. Se colocará una segunda capa de mortero igual aproximadamente a la anterior, la cual se engrasará y compactará en la misma forma.
- Se emparejará la superficie, alisándola con la regla que se mantendrá débilmente inclinada sobre la horizontal.
- Se identificarán las probetas y se las cubrirá con un material plástico por 24 horas. Después se desmoldan suavemente los cubos y se los cura en aire de acuerdo al porcentaje requerido. Las probetas desmoldadas se limpiarán suavemente y se pesarán.

iii. Esfuerzo de compresión axial.

Limpiar cada muestra, eliminando las aristas vivas o incrustaciones de las caras que se pondrá en contacto con el rodamiento de bloques de la máquina de ensayo. Con cuidado, colocar la muestra en la máquina de ensayo por debajo del centro del bloque del soporte superior. Cargamos hasta llegar a cero en el medidor de compresión y encerramos el reloj comparador que nos da los datos de lo que se irá comprimiendo cada probeta hasta que llegue a su máximo punto de ruptura. Luego encendemos la máquina con lo que empieza a comprimirse la probeta y al mismo tiempo se va marcando la fuerza que se requiere para cada 0.005 pulgadas de compresión hasta que llegue a la máxima fuerza de compresión que es la fuerza de ruptura.

Para encontrar el valor del esfuerzo compresión se procede a registrar el total de carga máxima indicada por el ensayo máquina, y calcular la resistencia a la compresión de la siguiente manera:

$$\sigma=9.81xP/Ap, \quad (3.1)$$

Donde:

σ : Es el esfuerzo de compresión encontrado en MPa,

P: Carga máxima total en Kilogramos,

A_p : Área de la superficie donde se aplica la carga P, cuyo valor es 2500mm².

Cada probeta puede ser utilizada para la determinación de la resistencia a la compresión, en cualquier sistema de medidas sea SI o inglés. Sin embargo, en consonancia, las unidades para carga y área deben ser usadas para calcular el esfuerzo en la medida seleccionada. Si la sección transversal de la probeta varía en más de un 1.5% de la nominal, se utiliza el área real para el cálculo. La resistencia de compresión hallada será el promedio de las muestras. En nuestro caso, utilizamos el sistema SI para encontrar la resistencia máxima a la compresión. Para escoger las probetas a los días de ensayo requerido se hizo una permutación aleatoria; es decir, aleatoriamente se escogió los cubos de tal manera que tengan igual probabilidad de ocurrencia.

3.3 Modelación Matemática.

Para implementar el modelo utilizaremos leyes y conceptos de PLASTICIDAD [16]. Esto consiste en estudiar el comportamiento de un

material cuando se lo expone a un fenómeno físico. Dicha implementación consiste en:

- Ley de la descomposición aditiva: esta ley establece que la deformación ε es igual a una parte elástica más una plástica, como se muestra,

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (3.2)$$

- Ley de Hooke: esta ley nos dice que el esfuerzo está relacionado con la deformación mediante una constante.

$$\dot{\sigma} = E \dot{\varepsilon}^e \quad (3.3)$$

Reemplazamos (3.2) en (3.3) y nos da:

$$\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon^e = E\Delta\varepsilon - E\Delta\varepsilon^p$$

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\varepsilon^p \quad (3.4)$$

- Regla de Flujo para la tasa de deformación plástica. Esta contiene la magnitud de la tasa de deformación plástica y la razón de la función potencial plástica con respecto al esfuerzo. El signo depende si es compresión o tensión. A esta regla también es llamada asociativa.

$$\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma} \gg \dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda} \operatorname{sgn}(\sigma) \gg \Delta \varepsilon^p = \Delta \lambda \operatorname{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr}) \quad (3.5)$$

- Regla de endurecimiento: la ecuación a emplear es la siguiente:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} * \left(1 + \frac{2a}{m+\lambda} * \sqrt{m\lambda} \right) \quad (3.6)$$

Donde “a” es una constante que representa el incremento de la fluencia hasta la máxima resistencia, y, “m” es otra constante que tiene magnitud a partir de la región plástica.

Ahora para describir la evolución de σ_y con deformación plástica continua se provee la siguiente ecuación:

$$\dot{\sigma}_y = H' | \dot{\varepsilon}^p | \dot{\lambda} = H' \dot{\lambda} \quad (3.7)$$

Donde H' es el módulo plástico y se interpreta como la pendiente de la curva esfuerzo – deformación en la región plástica y depende del multiplicador plástico λ . Entonces el comportamiento en la región plástica quedaría de la siguiente manera:

$$H' = \frac{\partial \sigma_y}{\partial \lambda} = H'(\lambda) \gg \Delta \sigma_y = H'_{n+1} \Delta \lambda$$

$$H'_{n+1} = H'(\lambda_{n+1})$$

$$\sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n} + H'_{n+1} \Delta \lambda \quad (3.8)$$

- Condición de Consistencia: en la condición de consistencia tenemos que cumplir lo siguiente:

$$F_{n+1} = 0 \quad (3.9)$$

Donde F representa la función residual que depende especialmente de $\Delta\lambda$. Al comparar (3.8) y (3.9) quedaría una función de la siguiente manera:

$$F(\sigma, \sigma_y) \gg F_{n+1} = F(\sigma_{n+1}, \sigma_{y,n+1})$$

$$\begin{aligned} F_{n+1} &= \text{sgn}\sigma_{n+1} * (\sigma_{n+1}^{tr} - \Delta\lambda E \text{sgn}\sigma_{n+1}) - H'_{n+1}\Delta\lambda = 0 \\ &= |\sigma_{n+1}^{tr}| - \Delta\lambda E - \sigma_{y,n} - H'_{n+1}\Delta\lambda = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

La única manera de encontrar una solución para que F sea cero es evaluar un $\Delta\lambda$ que haga cero el residuo mediante el método de Newton Rhapsion [16].

$$r(\Delta\lambda) = |\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{y,n} - \Delta\lambda(E + H'_{n+1}) = 0$$

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

$$r_{k+1} = r_k + \left. \frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda} \right|_k \delta\Delta\lambda = 0 \gg \delta\Delta\lambda = - \left(\left. \frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda} \right|_k \right)^{-1} r_k \quad (3.11)$$

Con la ecuación (3.11) podemos ir actualizando nuestro $\Delta\lambda$:

$$\Delta\lambda_{k+1} = \Delta\lambda_k - \left(\frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda} \Big|_k \right)^{-1} r_k$$

Al reemplazar (3.11) en (3.10) y derivar la ecuación nos queda:

$$\frac{\partial r}{\partial \Delta\lambda} = -E - H'_{n+1} - \Delta\lambda \frac{\partial H'}{\partial \Delta\lambda} = - \left(E + H' + \Delta\lambda \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial \Delta\lambda^2} \right) \quad (3.12)$$

La ecuación (3.12) representa la iteración para hallar el respectivo $\Delta\lambda$ que permita realizar la curva esfuerzo – deformación en la región plástica. Para hallar H' usamos la ecuación (3.6) y la derivamos:

$$\sigma_y(\lambda) = \sigma_{y0} \left(1 + \frac{2a}{m + (\lambda_n + \Delta\lambda)} \sqrt{m(\lambda_n + \Delta\lambda)} \right)$$

$$\gg \frac{\partial \sigma_y}{\partial \lambda} = H' = a\sigma_{y0} \sqrt{\frac{m}{\lambda}} \left(\frac{m-\lambda}{[m+\lambda]^2} \right) \quad (3.13)$$

En el siguiente capítulo implementaremos la modelación matemática para encontrar una simulación acorde a los resultados obtenidos en la experimentación.

CAPÍTULO 4

4. ANALISIS DE RESULTADOS

El siguiente capítulo muestra los resultados de los ensayos de compresión obtenidos durante la experimentación. Los datos se presentan en tablas y curvas y a partir de estos se prosigue con el análisis estadístico y el modelo matemático.

4.1 Tabulación de datos y resultados.

En los ensayos de compresión realizados en el laboratorio de suelos y rocas de la FICT de la ESPOL, se tomaron en cuenta parámetros que en cierta forma influyen en los datos. Estos son la temperatura y humedad relativa. A parte de estos parámetros, existe otro que es la velocidad de aplicación de la carga. Para nuestro análisis presentaremos los valores de temperatura y humedad relativa tomada durante los ensayos y la velocidad de aplicación de la carga. Cabe recalcar que estos parámetros están controlados y por ende su

influencia dentro del experimento está dentro del error experimental. A continuación se presenta los datos por la adición de 15% de limolita y la validación con una adición de 17.5% de limolita.

Presentación de datos por la adición de 15% de limolita y curado en aire.

La tabla 2 muestra los resultados de los ensayos a los 7 días.

TABLA 2
ENSAYOS DE COMPRESION DE LAS MUESTRAS CON ADICION
DE 15% DE LIMOLITA A LOS 7 DIAS DE CURADO

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0,000	0,00	0	0,000	0,00	0	0,000	0,00	0
0,003	0,59	3	0,003	0,55	4	0,003	0,67	3
0,005	0,98	6	0,005	1,29	7	0,005	1,33	6
0,008	2,00	14	0,008	2,51	15	0,008	2,55	14
0,010	4,63	20	0,010	5,34	21	0,010	5,89	21
0,013	7,81	27	0,013	9,34	27	0,013	10,32	28
0,015	13,11	34	0,015	15,30	34	0,015	16,25	35
0,018	18,99	42	0,018	21,19	42	0,018	21,39	41
0,020	24,92	51	0,020	27,47	51	0,020	28,45	51
0,023	33,35	58	0,023	32,37	58	0,023	34,73	57
0,025	41,20	65	0,025	41,40	63	0,025	43,16	65
0,028	49,05	74	0,028	48,27	73	0,028	51,99	74
			0,030	52,19	83	0,029	55,13	84
T(°C)	25,8							
%HR	72,5							

Los resultados dieron valores de resistencias últimas de un máximo de 55.13MPa y un mínimo de 49.05MPa. La temperatura fue de 25.8°C con 72.5% de humedad relativa. El comportamiento de las curvas se muestra en la figura 4.1.

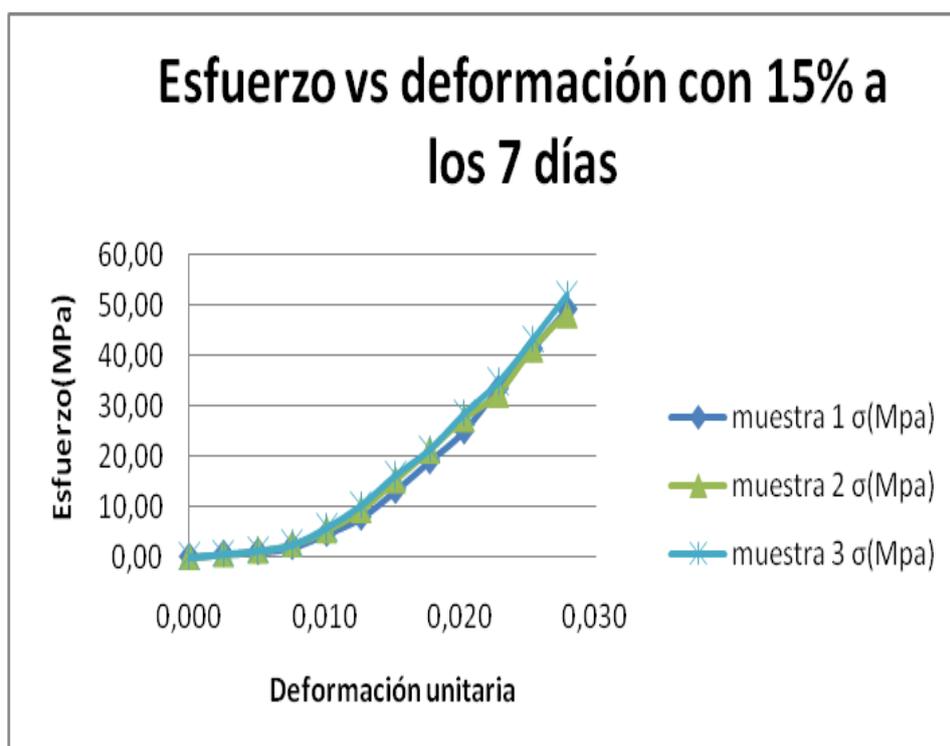


FIGURA 4.1. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRA A LOS 7 DIAS DE CURADO

De la gráfica se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 2212.87MPa, esfuerzo de fluencia promedio 34.98MPa y el esfuerzo máximo promedio de 52.12MPa. El procedimiento para obtener los valores mencionados fue por extrapolación de datos. Como se puede observar los primeros puntos de la curva no son lineales debido a

deformaciones y al asentamiento inicial de la carga; por lo que, no se los incluyó para obtener un módulo de elasticidad promedio. En el anexo A se encuentran las gráficas de esfuerzo versus deformación con una línea de tendencia con los puntos de pendiente constante.

Los resultados de los ensayos realizados a los 14 días de curado se presentan en la tabla 3.

TABLA 3
ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS CON ADICION
DE 15% DE LIMOLITA A LOS 14 DIAS DE CURADO

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0,000	0,00	0	0,000	0,00	0	0,000	0,00	0
0,003	1,22	3	0,003	0,82	3	0,003	0,98	3
0,005	3,81	6	0,005	2,43	6	0,005	2,67	6
0,008	7,30	13	0,008	6,20	14	0,008	6,00	14
0,010	12,28	19	0,010	12,01	20	0,010	10,12	20
0,013	16,87	26	0,013	17,30	27	0,013	14,95	27
0,015	22,76	34	0,015	23,15	34	0,015	20,80	34
0,018	29,43	42	0,018	30,21	42	0,018	26,88	43
0,020	35,90	52	0,020	36,10	51	0,020	32,18	51
0,023	41,40	58	0,023	42,18	58	0,023	37,87	59
0,025	48,07	66	0,025	48,46	65	0,025	42,77	66
0,028	50,42	73	0,026	49,05	74	0,028	47,28	74
						0,030	49,44	82
T(°C)	26,9							
%HR	75							

Estos resultados mostraron un valor máximo de resistencia última de 50.42MPa y un mínimo de 49.05MPa. La temperatura fue de 26.9 con

una humedad relativa de 75%. La figura 4.2 muestra el comportamiento de las tres curvas.

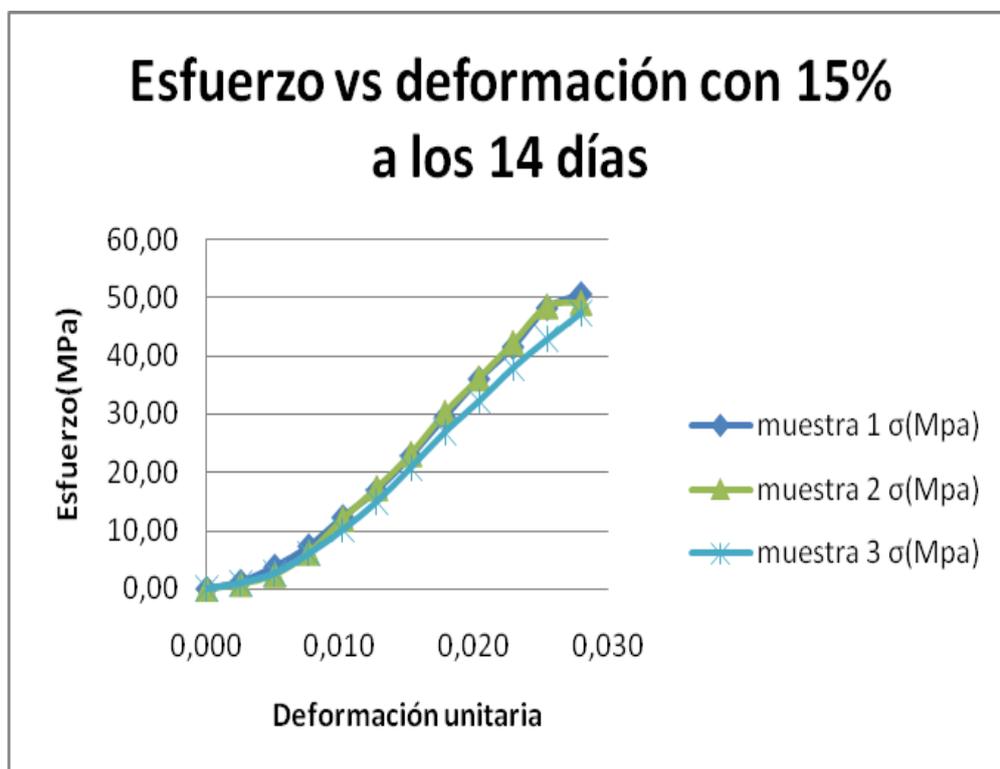


FIGURA 4.2. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRAS A LOS 14 DIAS DE CURADO

De la gráfica se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 2262.7MPa, esfuerzo de fluencia promedio 40.84MPa y el esfuerzo máximo promedio de 46.63MPa.

A continuación, en la tabla 4 presenta los ensayos realizados a los 21 días de curado.

TABLA 4
ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS CON ADICIÓN
DE 15% DE LIMOLITA A LOS 21 DIAS DE CURADO

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0,000	0,00	0	0,000	0,00	0	0,000	0,00	0
0,003	0,98	3	0,003	0,78	3	0,003	0,71	4
0,005	1,96	6	0,005	1,57	6	0,005	1,37	7
0,008	4,32	14	0,008	2,94	14	0,008	2,16	15
0,010	9,03	20	0,010	7,06	20	0,010	4,32	20
0,013	14,52	27	0,013	12,95	27	0,013	7,85	28
0,015	20,60	34	0,015	19,03	34	0,015	13,73	34
0,018	28,45	42	0,018	26,49	40	0,018	18,84	42
0,020	35,32	51	0,020	33,35	50	0,020	25,51	52
0,023	43,16	58	0,023	41,20	57	0,023	31,39	59
0,025	51,99	65	0,025	51,01	65	0,025	39,24	65
0,028	60,82	74	0,028	56,51	75	0,028	48,07	73
0,030	66,71	83						
T(°C)	25,3							
%HR	71,4							

La tabla 4 da valores de resistencias últimas de un máximo de resistencia de 66.71MPa y un mínimo de 48.07MPa. La temperatura fue de 25.3°C y la humedad relativa de 71.4%. La figura 4.3 muestra las curvas esfuerzo versus deformación.



FIGURA 4.3. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRAS A LOS 21 DIAS DE CURADO

De las curvas se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 2520.67MPa, esfuerzo de fluencia promedio 42.99MPa y el esfuerzo máximo promedio de 57.09MPa.

Por último, presentamos los resultados realizados en los ensayos del día 28 de curado.

TABLA 5
ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS CON ADICION
DE 15% DE LIMOLITA A LOS 28 DIAS

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0,000	0,00	0	0,000	0,00	0	0,000	0,00	0
0,003	0,39	3	0,003	0,78	5	0,003	1,77	5
0,005	0,98	6	0,005	1,57	8	0,005	5,49	15
0,008	1,57	14	0,008	3,14	15	0,008	10,99	21
0,010	3,53	20	0,010	5,49	21	0,010	16,02	26
0,013	7,65	27	0,013	10,59	30	0,013	22,56	32
0,015	13,15	34	0,015	17,46	39	0,015	29,43	39
0,018	20,60	42	0,018	24,53	47	0,018	36,30	47
0,020	26,49	51	0,020	31,39	55	0,020	43,16	54
0,023	33,45	58	0,023	39,24	65	0,023	50,03	62
0,025	39,24	65	0,025	44,15	76	0,025	51,01	74
0,028	46,11	74						
0,030	51,99	83						
0,032	54,94	90						
T(°C)	26,30							
%HR	68,20							

Estos datos revelaron un valor máximo de resistencia de 54.94MPa y un mínimo de 44.15MPa con respecto al último esfuerzo. La temperatura fue de 26.3°C con una humedad relativa de 68.20% que es menor comparada con los demás días de ensayos. La figura 4.4 muestra las curvas de las tres muestras.

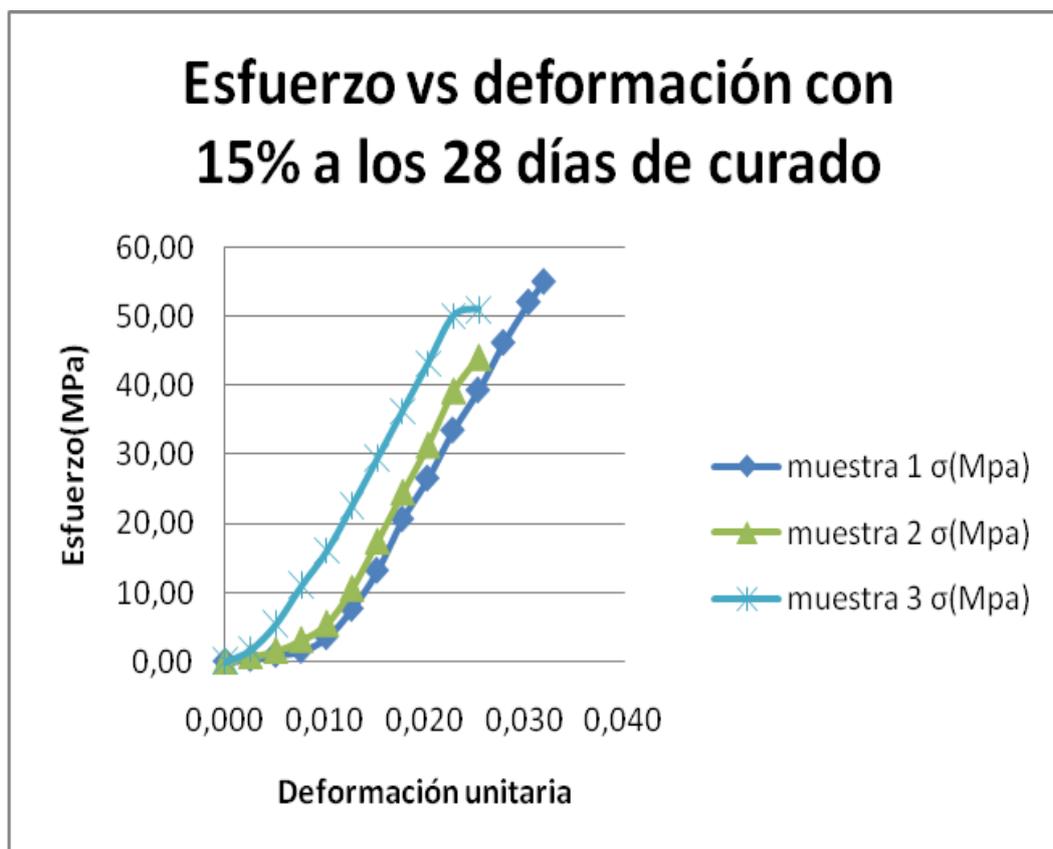


FIGURA 4.4. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRAS A LOS 28 DIAS DE CURADO

De estas curvas se tiene los valores promedio de módulo de elasticidad igual a 2565.3MPa, el esfuerzo de fluencia de 43.65MPa y el esfuerzo máximo con un valor de 50.03MPa.

Los valores hallados en las curvas experimentales son útiles ya que como se verá más adelante, estos sirven para modelar y simular el comportamiento a través de MATLAB.

Presentación de datos por la adición de 17.5% de limolita y curado en aire.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de compresión con adición de 17.5% de limolita y curado al aire como validación. La tabla 6 muestra los valores de las resistencias y las deformaciones con un 17.5% de limolita y curado en aire a los 4 días.

TABLA 6
ENSAYOS DE COMPRESION DE LAS MUESTRAS CON ADICION
DE 17.5% DE LIMOLITA A LOS 4 DIAS DE CURADO

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0,000	0,00	0	0,000	0,00	0	0,000	0,00	0
0,003	0,63	4	0,003	0,59	4	0,003	0,63	3
0,005	1,37	7	0,005	1,26	7	0,005	1,88	5
0,008	2,20	14	0,008	2,24	13	0,008	3,81	13
0,010	4,51	19	0,010	2,90	21	0,010	7,97	19
0,013	7,42	28	0,013	5,77	27	0,013	12,28	25
0,015	12,71	34	0,015	10,48	34	0,015	17,89	32
0,018	17,46	42	0,018	14,91	42	0,018	23,54	40
0,020	23,54	51	0,020	20,60	51	0,020	32,37	49
0,023	29,82	58	0,023	26,49	58	0,023	39,63	55
0,025	37,67	66	0,025	31,78	63	0,025	46,70	62
0,028	44,15	76	0,028	38,26	73	0,028	48,07	70
			0,030	41,59	79			
T(°C)	25,8							
%HR	72,5							

Estos datos tuvieron un valor máximo de resistencia de 48.07MPa y un mínimo de 41.59MPa. La temperatura fue de 25.81°C con una humedad relativa de 72.5%. El tiempo en la muestra 3 fue pequeño por lo que influyó en el comportamiento de la curva. Las curvas esfuerzos y deformación se encuentran en el apéndice A, pero mostraremos una gráfica con las tres curvas. Esta se observa en la figura 4.5.

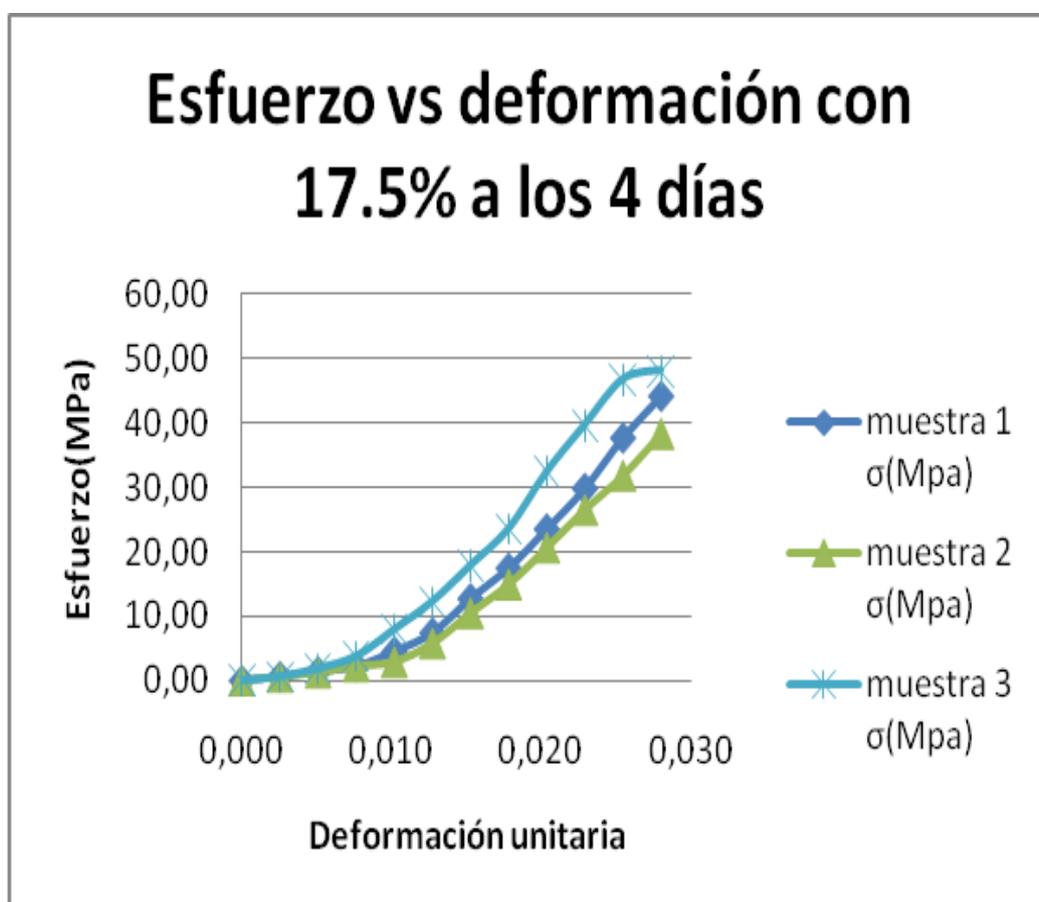


FIGURA 4.5. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRAS A LOS 4 DIAS DE CURADO

De la gráfica se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 2191MPa, esfuerzo de fluencia promedio 31.73MPa y el esfuerzo máximo promedio de 44.6MPa.

Para los 11 días, la tabla 7 muestra los siguientes resultados.

TABLA 7
ENSAYOS DE COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS CON ADICION
DE 17.5% A LOS 11 DIAS DE CURADO DE CURADO

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,003	0,82	4	0,003	0,59	3	0,003	1,45	3
0,005	1,96	6	0,005	1,84	6	0,005	3,37	5
0,008	4,04	14	0,008	4	14	0,008	7,85	14
0,01	7,38	20	0,01	8,67	20	0,01	14,36	20
0,013	11,54	27	0,013	14,79	27	0,013	20,21	27
0,015	17,03	34	0,015	20,99	34	0,015	26,88	34
0,018	22,56	42	0,018	28,25	42	0,018	34,34	42
0,02	30,02	51	0,02	34,73	51	0,02	40,61	50
0,023	37,08	58	0,023	41,79	58	0,023	45,32	59
0,025	44,93	66	0,025	47,28	65			
0,028	53,37	75	0,026	52,39	70			
			0,030	0,00	79			
T(°C)	26,9							
%HR	75							

Estos valores tuvieron un valor máximo de resistencia de 48.07MPa y un mínimo de 41.59MPa. A diferencia de la humedad relativa anterior, esta aumentó un 3% con una mínima variación en la temperatura. La figura 4.6 muestra el comportamiento de las tres curvas.



FIGURA 4.6. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRAS A LOS 11 DIAS DE CURADO

De las curvas se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 2520MPa, esfuerzo de fluencia promedio 38MPa y el esfuerzo máximo promedio de 48MPa. Como se ve hay diferencia entre las tres curvas, dos tienen casi el mismo esfuerzo máximo mientras otra tiene un esfuerzo menor.

Siguiendo con los días de curado, en el día 18, la tabla 8 presenta los siguientes resultados.

TABLA 8
ENSAYOS DE COMPRESION DE LAS MUESTRAS CON ADICION
DE 17.5% DE LIMOLITA A LOS 18 DIAS DE CURADO

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0,000	0,00	0	0,000	0,00	0	0,000	0,00	0
0,003	0,71	3	0,003	0,78	3	0,003	0,98	4
0,005	1,57	6	0,005	1,77	6	0,005	2,55	7
0,008	3,73	14	0,008	4,32	14	0,008	6,08	15
0,010	7,65	20	0,010	8,04	20	0,010	11,18	20
0,013	12,56	27	0,013	13,15	27	0,013	17,27	28
0,015	17,66	34	0,015	19,03	34	0,015	24,53	34
0,018	23,54	42	0,018	25,51	40	0,018	31,39	42
0,020	30,41	51	0,020	32,37	50	0,020	38,26	52
0,023	37,28	58	0,023	40,22	57	0,023	46,70	59
0,025	44,15	65	0,025	47,09	65	0,025	53,96	65
0,028	51,01	74	0,028	53,96	75			
0,030	54,15	83						
T(°C)	25,6							
%HR	71,4							

Estos valores revelaron un valor máximo de resistencia de 54.15MPa y un mínimo de 53.96MPa. La temperatura fue de 25.6°C con una humedad relativa de 71.4%. La figura 4.7 muestra el comportamiento de estos ensayos. Como se ve existe una semejanza entre las tres muestras ya que las tres tienen el mismo esfuerzo máximo y con la misma deformación total.

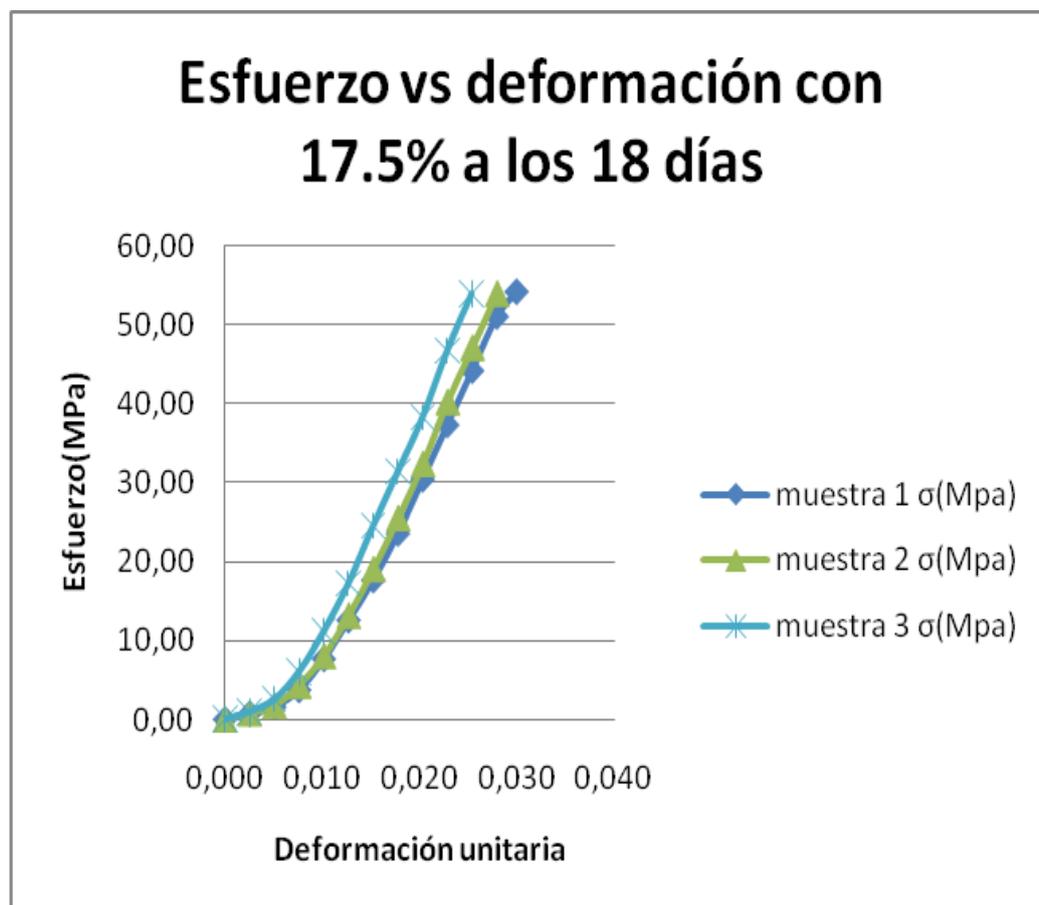


FIGURA 4.7. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRAS A LOS 18 DIAS DE CURADO

De estas curvas se tiene los valores promedio de módulo de elasticidad igual a 2506MPa, el esfuerzo de fluencia de 41.19MPa y el esfuerzo máximo con un valor de 54.02MPa.

Por último, en la tabla 8 se muestran los resultados a los 25 días de curado.

TABLA 9
ENSAYOS DE COMPRESION DE LAS MUESTRAS CON ADICION
DE 17.5% DE LIMOLITA A LOS 25 DIAS DE CURADO

muestra 1			muestra 2			muestra 3		
ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)	ϵ	σ (Mpa)	t(seg)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,003	0,78	3	0,003	0,78	5	0,003	0,78	4
0,005	2,55	6	0,005	2,16	8	0,005	2,35	7
0,008	5,69	14	0,008	5,3	15	0,008	5,1	14
0,01	11,58	20	0,01	10,4	21	0,01	11,18	19
0,013	17,66	27	0,013	16,48	30	0,013	16,48	24
0,015	25,51	34	0,015	23,54	39	0,015	22,56	29
0,018	32,37	42	0,018	31,39	47	0,018	28,45	34
0,02	41,2	51	0,02	39,24	55	0,02	35,9	41
0,022	48,07	58	0,022	47,09	65	0,023	42,18	47
						0,025	50,03	53
						0,028	56,9	60
						0,029	59,84	67
T(°C)	26,3							
%HR	68,2							

Estos valores tuvieron un valor máximo de resistencia de 59.84MPa y un mínimo de 47.09MPa. La temperatura fue de 26.3°C pero la humedad relativa varió a 68.2%. La figura 4.8 muestra el comportamiento de estas tres muestras. Aquí se ve otra vez diferencia entre las tres muestras ya que dos tienen el mismo esfuerzo máximo mientras la otra difiere con un valor menor.

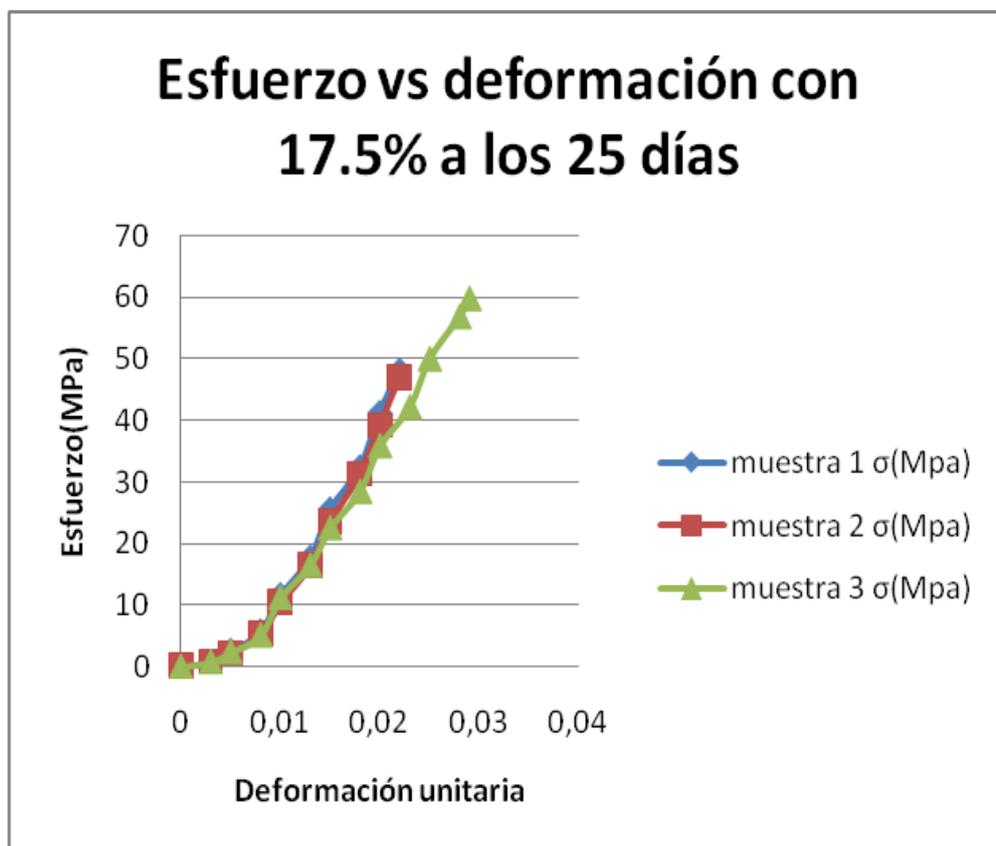


FIGURA 4.8. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LAS MUESTRAS A LOS 25 DIAS DE CURADO

De las curvas anteriores se tiene los valores de módulo de elasticidad promedio 2582MPa, el esfuerzo de fluencia de 39.40MPa y el esfuerzo máximo con un valor de 47.74MPa.

Una vez presentados los resultados, hay que analizarlos y ver si existe relación entre los días de curado y las resistencias últimas. A continuación se hará el análisis estadístico con los esfuerzos de compresión máximos “ f_c ”.

4.2 Análisis Estadístico

El tiempo de curado influye en la resistencia a la compresión del concreto en general. Deseamos conocer si añadiendo un porcentaje conocido de limolita y curado al aire, se obtienen efectos en la resistencia a la compresión. Se harán varias pruebas, primero comenzamos con la adición de 15% de limolita y después con 17.5% de limolita como validación.

Hipótesis de Investigación.

Nuestra hipótesis es: “Existe variación en la resistencia a la compresión a medida que varía el tiempo de curado”.

Hipótesis nula.

Esta es: “No existe variación en la resistencia a la compresión a medida que el tiempo de curado varía”.

Diseño del tratamiento.

Como diseño tenemos la resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días. En el caso de la validación este será a los 4, 11, 18 y 25 días. Se puede comparar con el cemento blanco y el tipo IV como tratamiento de control, ya que ambos son estándares con cuya efectividad se puede comparar.

Diseño del experimento.

Es un diseño totalmente aleatorizado. A cada día de ensayo se le asignó tres muestras al azar del mismo tamaño y peso (50mm de arista y 263 gr). Cada muestra se la separó y se le asignó un código para identificar el día del ensayo. Para la validación se hace el mismo procedimiento.

Cada muestra que se usó era relativamente homogénea y se usó un diseño totalmente aleatorizado para evitar la asignación subjetiva de tratamientos. El procedimiento adecuado fue:

Paso 1. Asignar la secuencia del 1 al 12 a las muestras.

Paso 2. Obtener una permutación aleatoria de los números del 1 al 12 y anotarlos en el orden de la permutación. La permutación se obtuvo mediante un programa de computación y es: 12, 11, 8, 7, 3, 4, 1, 9, 10, 5, 2, 6.

Paso 3. Asignamos a las tres primeras muestras (12, 11 y 8) de los cuatro moldes al tratamiento (7 días). Las siguientes tres muestras (7, 3 y 4) al tratamiento de 14 días y así sucesivamente. La asignación final se muestra en la tabla 10. Lo mismo se hace para los datos de la adición de 17.5% de limolita y curado al aire a los 4, 11, 18 y 25 días respectivamente.

TABLA 10
PERMUTACION ALEATORIA DE LAS MUESTRAS CON ADICION DE
15% DE LIMOLITA A LOS TRATAMIENTOS

Muestra	12	11	8	7	3	4	1	9	10	5	2	6
Tratamiento	7	7	7	14	14	14	21	21	21	28	28	28

La permutación aleatoria de los números asegura que cada una de las asignaciones de tratamiento posible tiene la misma probabilidad de ocurrencia.

De la misma manera se le asigna números aleatorios a las muestras de la validación. Esto se muestra en la tabla 11.

TABLA 11
PERMUTACION ALEATORIA DE LAS MUESTRAS CON ADICION DE
17.5% DE LIMOLITA A LOS TRATAMIENTOS

Muestra	12	11	8	7	3	4	1	9	10	5	2	6
Tratamiento	4	4	4	11	11	11	18	18	18	25	25	25

A continuación se mostrará la tabla 12 y 13 con las resistencias a la compresión y los días de curado (tratamientos).

TABLA 12
ASIGNACION DE LOS DATOS DE 15% DE ADICION DE LIMOLITA
PARA ANALISIS ESTADISTICO

días	fc
7	49,05
7	52,19
7	55,13
14	50,42
14	49,05
14	49,44
21	66,71
21	56,5
21	48,07
28	54,94
28	44,15
28	51,01

TABLA 13
ASIGNACION DE LOS DATOS DE 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA
PARA ANALISIS ESTADISTICO

días	fc
4	44,15
4	41,59
4	48,07
11	53,37
11	52,39
11	45,32
18	54,15
18	53,96
18	53,96
25	48,07
25	47,09
25	59,84

Presentados los datos, procedemos a al análisis de las resistencias máximas ver si existe diferencia significativa entre las medias.

Estadístico F para evaluar la hipótesis nula.

Antes que nada debemos asegurarnos de que nuestra varianza tenga una distribución normal y que sea homogénea. Para esto utilizaremos STATISTICA y veremos la tendencia con la prueba de Levene. Esta prueba se la muestra en la figura 4.9.

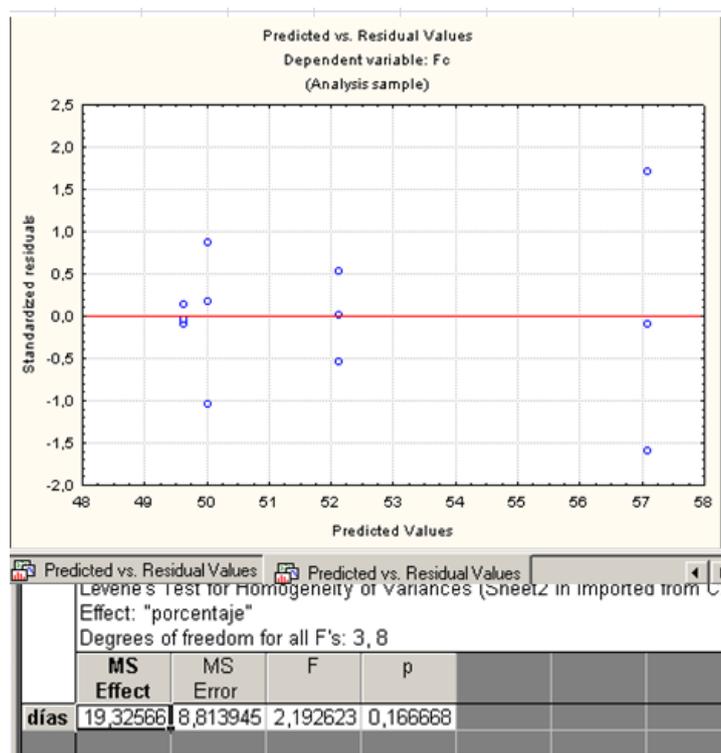


FIGURA 4.9. PRUEBA DE LEVENE PARA VERIFICAR LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA PARA 15% DE ADICION DE LIMOLITA.

Al aplicar la prueba de Levene obtenemos un valor de p de 0.16 mayor a 0.05, entonces concluimos que nuestra varianza es homogénea.

De la misma manera se hace el análisis para la validación. La figura 4.10 muestra la distribución y la prueba de Levene para conocer si nuestros datos son normales. Cabe recalcar como el valor de p es aproximadamente 0.05 se puede asegurar que la varianza es homogénea.

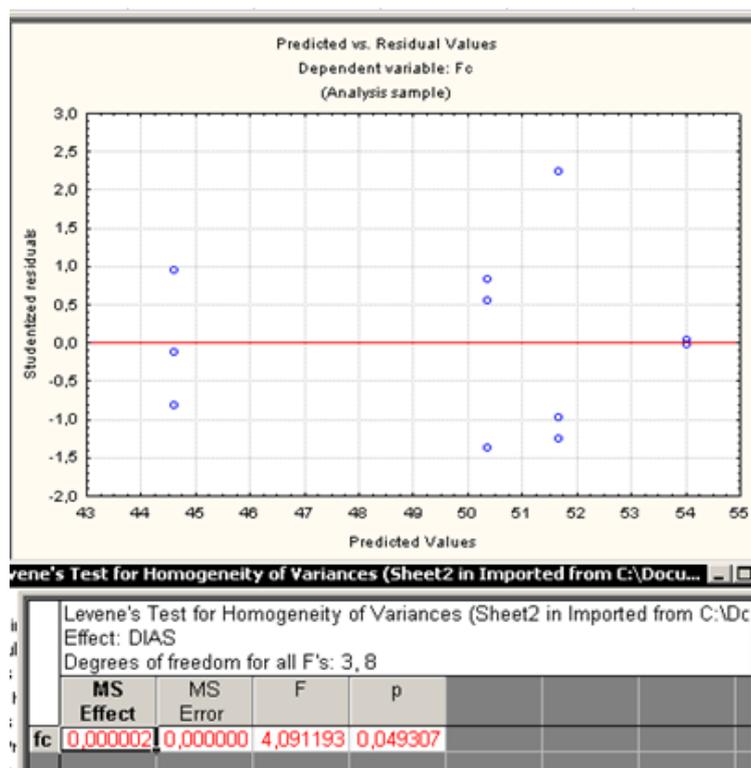


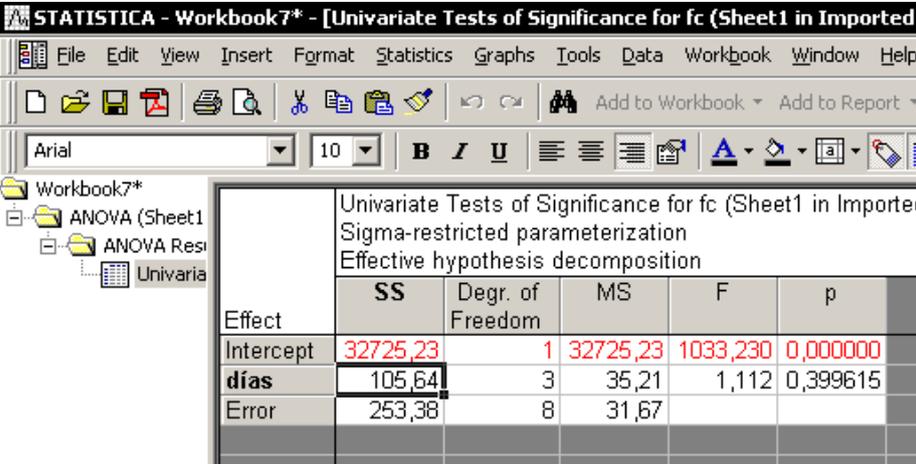
FIGURA 4.10. PRUEBA DE LEVENE PARA VERIFICAR LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA EN LA VALIDACION.

Como podemos observar el estadístico p calculado no es muy significativo, por lo que nuestros datos están normalizados y no muestran varianza heterogénea.

Ahora vamos a evaluar si existe diferencia significativa para rechazar o retener nuestra hipótesis nula.

Ho: “No existe diferencia entre los tratamientos”

Utilizamos el programa STATISTICA para observar si existe o no diferencia significativa. ANOVA nos permite realizar un análisis de varianza y ver las fuentes de variación. A continuación se muestra la figura 4.11 con el análisis de varianza.



Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	32725,23	1	32725,23	1033,230	0,000000
días	105,64	3	35,21	1,112	0,399615
Error	253,38	8	31,67		

FIGURA 4.11. ANALISIS DE VARIANZA DE LAS RESISTENCIAS CON RESPECTO A LOS DIAS DE CURADO PARA 15% DE ADICION DE LIMOLITA

Como se puede observar ANOVA nos da los valores de grados de libertad, suma de cuadrados, el estadístico F (Fisher) y el factor p.

Estos resultados también se resumen en la tabla 14 con la suma de los cuadrados totales.

TABLA 14
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS TRATAMIENTOS PARA 15% DE
LOMOLITA Y CURADO EN AIRE

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
entre grupos	105,64	3	35,21	1,11	0,40	4,07
dentro de los grupos	253,38	8	31,67			
Total	359,02	11				

El valor de F_o es 1.11 y es menor que 4.07 por lo retenemos la hipótesis nula a favor de la hipótesis de investigación. Por ende, se visualiza que las medias de los tratamientos no tienen diferencia significativa.

Para la validación se hace el mismo procedimiento. La figura 4.12 muestra los el análisis en ANOVA.

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	30196,32	1	30196,32	1504,218	0,000000
días	144,34	3	48,11	2,397	0,143651
Error	160,60	8	20,07		

FIGURA 4.12. ANALISIS DE VARIANZA DE LAS RESISTENCIAS CON RESPECTO A LOS DIAS DE CURADO PARA LA VALIDACION

La tabla 15 muestra los valores obtenidos en el análisis ANOVA.

**TABLA 15
ANALISIS DE VARIANZA DE LOS TRATAMIENTOS PARA 17.5% DE LOMOLITA Y CURADO EN AIRE**

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	144,34	3	48,11	2,40	0,14	4,07
Dentro de los grupos	160,60	8	20,07			
Total	304,93	11				

Así mismo vemos que el valor de F_0 es menor que F calculado por lo que retenemos la hipótesis nula a favor de la hipótesis de investigación.

Es decir no hay diferencia entre las medias de los tratamientos en la validación.

Podemos ver que todas las medias de los tratamientos son iguales para 15% de adición y 17% de adición de limolita. Ahora mostraremos las curvas que se ajustan a ese comportamiento bajo los parámetros de temperatura y humedad relativa tomadas en los ensayos. Las figuras 4.13 y 4.14 muestran la línea de tendencia.

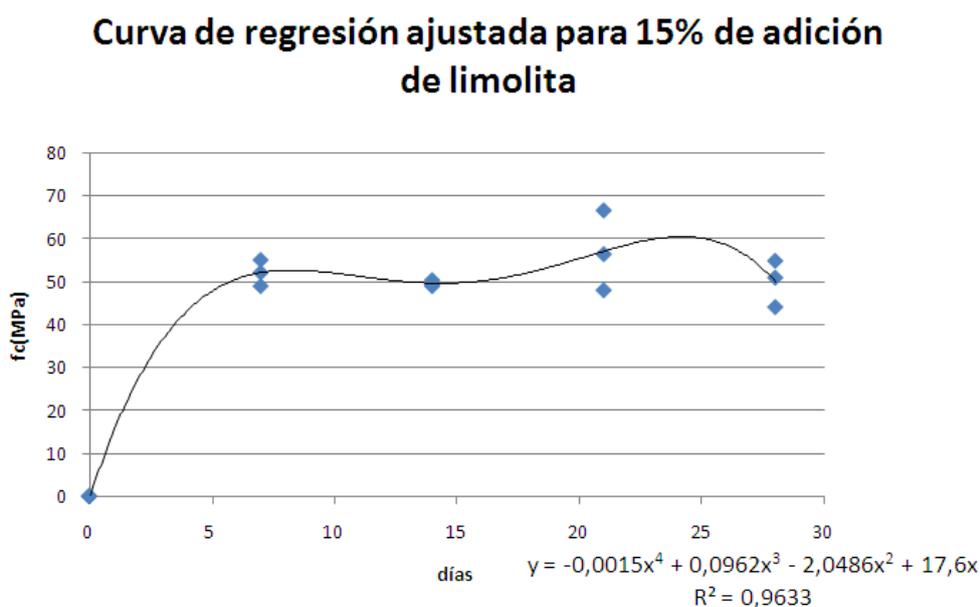
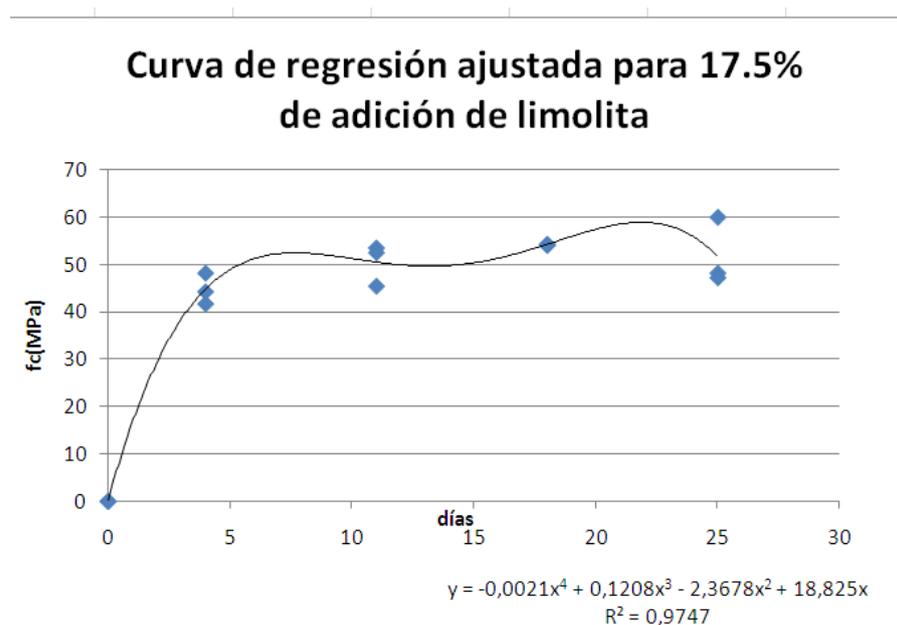


FIGURA 4.13. CURVA DE REGRESION NO LINEAL PARA LA ADICIÓN DE 15% DE LIMOLITA

Como podemos observar esta curva nos da una relación con un polinomio de cuarto grado y un valor de R de 0.981. Lo mismo se hace para la validación.



**FIGURA 4.14. CURVA DE REGRESION NO LINEAL PARA LA
VALIDACION**

La relación que existe aquí es con un polinomio de cuarto grado y el valor de R es 0.987. A partir de las curvas se puede apreciar que a partir del día 4 la resistencia llega a valores de 45 - 50MPa. Pero después fluctúa el aumento muy lentamente; esto es de esperarse debido a que en el análisis de varianza de ambos se dedujo que no había diferencia significativa entre las medias de los tratamientos.

En resumen, para la adición de 15% la media general es 52.22+/-5.71MPa y para la validación la media es 50.16+/-5.26MPa. Ahora entraremos a comparar los tratamientos entre sí con los datos de 5%, 10%, 20% y 25% de limolita que se obtuvieron durante la experimentación.

Comparación entre tratamientos con 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de adición de limolita.

Para la comparación entre los porcentajes de limolita y el tiempo de curado usaremos un procedimiento diferente al modelo lineal ANOVA; esto es mediante diseño factorial. Este diseño toma en cuenta dos factores que son el porcentaje y el día de curado y ve si existe interacción entre estos. Tukey logra este objetivo al establecer un criterio relativamente alto para rechazar la hipótesis nula. Sin embargo, aumentar el criterio de rechazo trae como consecuencia mayor dificultad para detectar cualquier diferencia pareada que estuviese presente. En síntesis, Tukey proporciona la mejor protección contra errores de decisión, junto con inferencias fuertes sobre magnitud y dirección de las diferencias con un intervalo de confianza grande.

La tabla 16 y 17 muestra los valores de las resistencias últimas con los porcentajes y días de curado.

TABLA 16
ASIGNACION DE LOS DATOS PARA COMPARACIONES
PAREADAS CON LOS PORCENTAJES DE ADICION DE LIMOLITA
DE 5%, 10%, 15%, 20% Y 25%.

Porcentaje	Días	Esfuerzo ultimo	Porcentaje	Días	Esfuerzo ultimo
5	7	35,55	15	21	66,7
5	7	42,58	15	21	51,01
5	7	34,34	15	21	48,07
5	14	83,62	15	28	54,94
5	14	65,83	15	28	44,14
5	14	73,83	15	28	51,012
5	21	68,49	20	7	48,02
5	21	74,72	20	7	40,57
5	21	66,72	20	7	40,18
5	28	68,49	20	14	43,51
5	28	77,39	20	14	60,17
5	28	78,28	20	14	47,04
10	7	57,94	20	21	64,9
10	7	43,51	20	21	68,45
10	7	46,06	20	21	68,45
10	14	45,08	20	28	60,45
10	14	66,64	20	28	66,67
10	14	52,92	20	28	60,45
10	21	85,23	25	7	46,06
10	21	83,75	25	7	45,67
10	21	92,65	25	7	56,84
10	28	70,38	25	14	48,61
10	28	75,73	25	14	48,02
10	28	71,26	25	14	47,82
15	7	49,05	25	21	70,23
15	7	52,19	25	21	71,12
15	7	55,13	25	21	71,12
15	14	50,42	25	28	64,01
15	14	49,05	25	28	47,04
15	14	49,44	25	28	54,88

TABLA 17
ASIGNACION DE LOS DATOS PARA COMPARACIONES
PAREADAS CON LOS PORCENTAJES DE ADICION DE LIMOLITA
DE 7.5%, 12.5%, 17.5%, 22.5% Y 27.5%.

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

La prueba se conoce por varios nombres, entre ellos “diferencia honestamente significativa”. El método se basa en el estadístico q

$$HSD(k, \alpha_F) = q_{\alpha_F, k, v} \sqrt{\frac{MSE}{n}}$$

Donde:

HSD (k, α_F): diferencia honestamente significativa.

q : estadístico estandarizado de Student con un grupo de k medias de tratamiento en un arreglo ordenado, con un error experimental α_F y “ v ” grados de libertad.

MSE: estimación de la varianza del error experimental.

n : el número de grupo o tratamientos.

Las suposiciones para el modelo en cuanto a la homogeneidad de las varianzas y la distribución normal, se pueden evaluar con los residuales. La figura 4.15 muestra el análisis de los residuales que nos dice que no hay evidencia de varianza heterogénea o no normalidad.

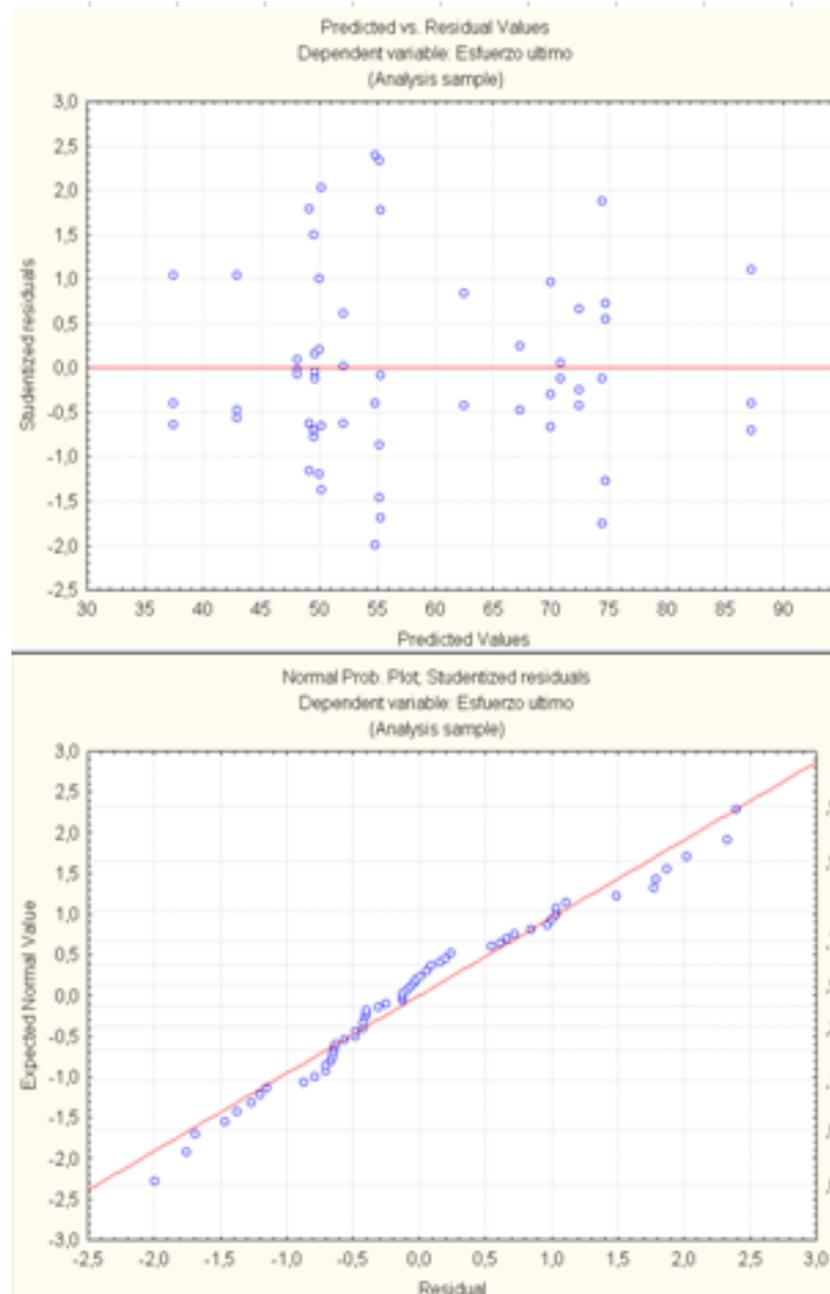


FIGURA 4.15. ANALISIS RESIDUAL PARA EVALUAR LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA Y LA NORMALIDAD USANDO DISEÑO FACTORIAL.

La figura 4.16 muestra la varianza del error experimental utilizando diseño factorial; es decir, observar los efectos principales y el efecto de interacción entre los dos factores. Como se observa existen diferencias significativas en los efectos principales y en el efecto de interacción.

Univariate Tests of Significance for Esfuerzo ultimo (Sheet Sigma-restricted parameterization Type I decomposition)					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	206791,0	1	206791,0	5729,363	0,000000
Porcentaje	1757,2	4	439,3	12,171	0,000001
Días	4713,8	3	1571,3	43,533	0,000000
Porcentaje*Días	3019,2	12	251,6	6,971	0,000001
Error	1443,7	40	36,1		

FIGURA 4.16. VARIACION DEL ERROR EXPERIMENTAL ENTRE FACTORES.

Los valores para el análisis de tukey son:

$$\alpha_r = 0.05$$

$$v = 40 \text{ grados de libertad}$$

$$k = 20 \text{ grupos de medias}$$

$$MSE = 36.1$$

Con estos valores hallamos el HSD en STATISTICA utilizando ANOVA.

A continuación presentamos el análisis realizado y las diferencias significativas entre las medias como una probabilidad, si esta es menor a 0.05, entonces decimos que existe diferencia significativa entre estas.

La figura 4.17 muestra estos detalles con las probabilidades de diferente color para diferenciar cuáles son mejores que otros.

STATISTICA - Workbook52* - [Tukey HSD test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Fabianny\Escritorio\corrección primera parte\GRUPAL\DATOS

Tukey HSD test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Fabianny\Escritorio\corrección primera parte\GRUPAL\DATOS

Approximate Probabilities for Post Hoc Tests

Error: Between MS = 36,093, df = 40,000

Cell No.	Porcentaje	Días	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	5	7	37,487												
2	5	14	0,000179	0,000179	0,000185	0,000179	0,670466	0,089964	0,000179	0,000180	0,288231	0,606119	0,074974	0,551357	0,999801
3	5	21	0,000185	0,999989	0,999989	1,000000	0,001212	0,030320	0,518258	1,000000	0,006508	0,001562	0,037048	0,001950	0,000192
4	5	28	0,000179	1,000000	0,999972	0,999972	0,015216	0,242682	0,097064	1,000000	0,072109	0,019730	0,279927	0,024452	0,000505
5	10	7	0,670466	0,001212	0,015216	0,001039									
6	10	14	0,089964	0,030320	0,242682	0,025890	0,999612								
7	10	21	0,000179	0,518258	0,097064	0,558917	0,000179	0,000186							
8	10	28	0,000180	1,000000	1,000000	1,000000	0,003681	0,082428	0,276208						
9	15	7	0,288231	0,006508	0,072109	0,005489	1,000000	1,000000	0,000180	0,019794					
10	15	14	0,606119	0,001562	0,019730	0,001331	1,000000	0,999881	0,000179	0,004824	1,000000				
11	15	21	0,074974	0,037048	0,279927	0,031742	0,999095	1,000000	0,000189	0,098727	1,000000	0,999685			
12	15	28	0,551357	0,001950	0,024452	0,001651	1,000000	0,999961	0,000179	0,006063	1,000000	1,000000	0,999885		
13	20	7	0,999801	0,000192	0,000505	0,000190	0,998746	0,633163	0,000179	0,000235	0,928569	0,996941	0,580420	0,994091	
14	20	14	0,522210	0,002196	0,027391	0,001861	1,000000	0,999980	0,000179	0,006848	1,000000	1,000000	0,999936	1,000000	0,991837
15	20	21	0,000226	0,993575	1,000000	0,990044	0,063963	0,573311	0,024486	0,999897	0,238377	0,080386	0,626114	0,096958	0,002009
16	20	28	0,001364	0,640423	0,990044	0,599784	0,441176	0,997029	0,001653	0,873091	0,827704	0,504224	0,992471	0,558593	0,029481
17	25	7	0,622007	0,001467	0,018511	0,001251	1,000000	0,999838	0,000179	0,004515	1,000000	1,000000	0,999587	1,000000	0,997518
18	25	14	0,798847	0,000719	0,008554	0,000628	1,000000	0,999852	0,000179	0,002050	0,999998	1,000000	0,994067	1,000000	0,999886
19	25	21	0,000182	1,000000	1,000000	0,999999	0,009441	0,172420	0,142512	1,000000	0,047195	0,012303	0,201802	0,015338	0,000360
20	25	28	0,073160	0,038036	0,285133	0,032600	0,998994	1,000000	0,000189	0,101070	1,000000	0,999645	1,000000	0,999868	0,073404

FIGURA 4.17. RESULTADOS DE LA PRUBA DE TUKEY USANDO DISEÑO FACTORIAL.

Al revisar los resultados observamos que existe diferencia significativa entre los tratamientos de:

- 5% y 10%, en los días 14, 21 y 28 del 5% con el días 7 del 10%.
- 5% y 15%, en los días 14 y 28 del 5% con todos los días del 15%.
- 5% y 20%, solo en los días 7 y 14 del 20% con los días 14, 21 y 28 del 5%.

- 5% y 25%, en los días 7, 14 y 21 del 5% con los días 7 y 14 del 25%.
- 10% y 15%, en los días 21 y 28 del 10% con todos los días del 15%.
- 10% y 20%, en los días 7 y 14 del 20% con los días 21 y 28 del 10%.
- 10% y 25%, en los días 7 y 14 del 25% con los días 21 y 28 del 10%.

En fin, existen otras diferencias significativas que podríamos mencionar pero solo recalcamos las más importantes.

Para los datos de validación hacemos el mismo análisis comenzando con la variación del error experimental. La diferencia aquí es que los datos ya estaban normalizados. La figura 4.18, 4.19 y 4.20 muestra el análisis de la validación y los resultados utilizando Tukey. Otra vez se observa que hay distribución de normalidad y no demuestra varianza heterogénea.

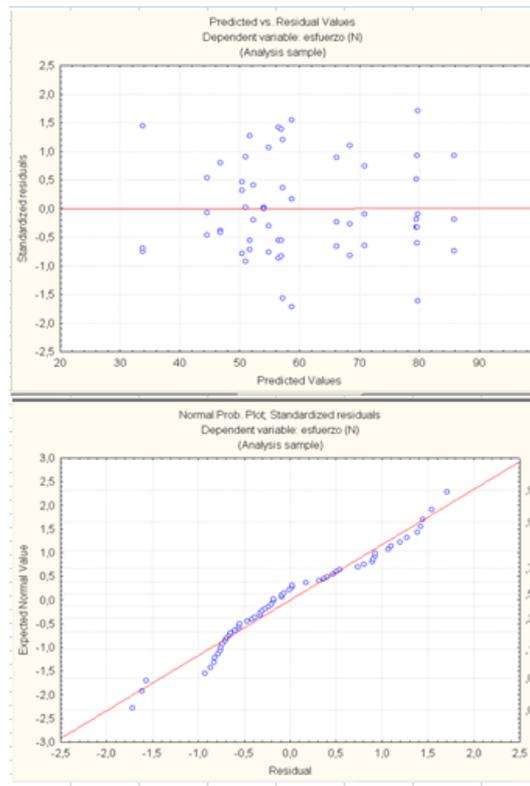


FIGURA 4.18. ANALISIS RESIDUAL PARA EVALUAR LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA Y LA NORMALIDAD EN LA VALIDACION USANDO DISEÑO FACTORIAL.

Univariate Tests of Significance for esfuerzo (N) (Sheet2 in Imported from...)					
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
dias	1547,8	3	515,9	12,482	0,000007
porcentaje*dias	2891,9	12	241,0	5,830	0,000010
Error	1653,4	40	41,3		

FIGURA 4.19. VARIACION DEL ERROR EXPERIMENTAL ENTRE LOS FACTORES PARA LA VALIDACION USANDO DISEÑO FACTORIAL.

Workbook2* - [Tukey HSD test; variable esfuerzo (N) (Sheet2 in Imported from C:\Documents and Settings\Fabianny\Mis documentos\DATOS PARA ANOV...]

Insert Format Statistics Graphs Tools Data Workbook Window Help

Tukey HSD test; variable esfuerzo (N) (Sheet2 in Imported from C:\Documents and Settings\Fabianny\Mis documentos\DATOS PARA ANOV...)

Approximate Probabilities for Post Hoc Tests

Error: Between MS = 41.334, df = 40,000

Cell No.	porcentaje	días	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	75	4	58,729	68,474	79,767	79,471	66,183	56,513	85,823	79,590	44,603	50,360	54,023	51,68
2	75	11	0,934237	0,934237	0,028529	0,033062	0,995307	1,000000	0,001173	0,031189	0,461495	0,983602	0,999991	0,9975
3	75	18	0,028529	0,811137	0,811137	0,840438	1,000000	0,737057	0,153736	0,828973	0,006497	0,111877	0,421646	0,190
4	75	25	0,033062	0,840438	1,000000	1,000000	0,530623	0,009038	0,999656	1,000000	0,000184	0,000417	0,002362	0,000
5	125	4	0,995307	1,000000	0,530623	0,569131	0,569131	0,010579	0,999360	1,000000	0,000185	0,000475	0,002768	0,000
6	125	11	1,000000	0,737057	0,009038	0,010579	0,938247	0,938247	0,056284	0,553638	0,021695	0,272872	0,713082	0,413
7	125	18	0,001173	0,153736	0,999656	0,999360	0,056284	0,000432	0,999493	0,999493	0,000179	0,000183	0,000228	0,000
8	125	25	0,031189	0,828973	1,000000	1,000000	0,553638	0,009932	0,999493	0,999493	0,000184	0,000445	0,002597	0,000
9	175	4	0,461495	0,006497	0,000184	0,000185	0,021695	0,743006	0,000179	0,000184	0,999829	0,950455	0,9975	0,997
10	175	11	0,983602	0,111877	0,000417	0,000475	0,272872	0,999574	0,000183	0,000445	0,999829	1,000000	1,0000	1,000
11	175	18	0,999991	0,421646	0,002362	0,002768	0,713082	1,000000	0,000228	0,002597	0,990514	1,000000	1,0000	1,000
12	175	25	0,997517	0,190458	0,000725	0,000829	0,413701	0,999986	0,000189	0,000785	0,997514	1,000000	1,000000	1,000
13	225	4	0,738232	0,020466	0,000201	0,000206	0,062823	0,934781	0,000179	0,000204	1,000000	1,000000	0,996626	0,999
14	225	11	1,000000	0,529374	0,003746	0,004397	0,810141	1,000000	0,000272	0,004123	0,900521	0,999995	1,000000	1,000
15	225	18	0,721074	1,000000	0,968813	0,977329	0,999993	0,438720	0,357861	0,974153	0,001837	0,037929	0,190980	0,070
16	225	25	1,000000	0,812493	0,012950	0,015125	0,967301	1,000000	0,000573	0,014214	0,659398	0,996343	1,000000	0,999
17	275	4	0,993177	0,147698	0,000548	0,000625	0,340525	0,999913	0,000185	0,000589	0,999251	1,000000	1,000000	1,000
18	275	11	0,999187	0,238208	0,000963	0,001111	0,488005	0,999998	0,000194	0,001048	0,993564	1,000000	1,000000	1,000
19	275	18	0,003748	0,000186	0,000179	0,000179	0,000213	0,012309	0,000179	0,000179	0,861954	0,212548	0,043508	0,126
20	275	25	1,000000	0,781195	0,011091	0,012966	0,956325	1,000000	0,000510	0,012179	0,696381	0,999054	1,000000	0,999

FIGURA 4.20. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE TUKEY PARA LA VALIDACION USANDO DISEÑO FACTORIAL.

De los resultados se observa que existe diferencia significativa entre:

- 7.5% y 12.5%, solo en el día 4 del 7.5% con los días 18 y 25 del 12.5%.
- 7.5% y 17.5%, en los días 18 y 25 del 7.5%.
- 7.5% y 22.5%, en los días 18 y 25 del 7.5% con los días 4, 11 y 25 del 22.5%.
- 7.5% y 27.5%, solo en los días 18 y 25 del 7.5%.
- 12.5% y 17.5%, los días 18 y 25 del 12.5% con todos los días del 17.5%.

- 12.5% y 27.5%, solo en los días 18 y 25 del 12.5% con todos los días del 27.5%.

Así podemos hallar más diferencias significativas, pero estas son las más importantes.

Concluido el análisis factorial, mostraremos una superficie en 3D para visualizar mejor los resultados obtenidos. La figura 4.21 muestra la relación entre los porcentajes y días de curado.

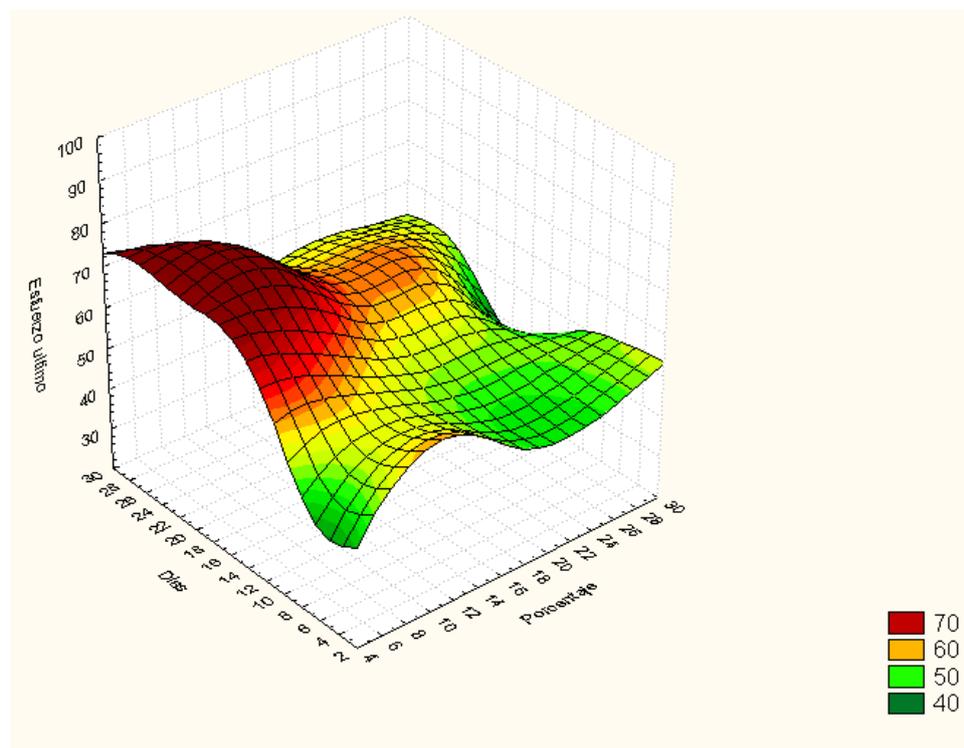


FIGURA 4.21. GRAFICO ESFUERZO VS DIAS Y PORCENTAJES.

Otra alternativa es presentar solo el contorno. La figura 4.22 muestra el contorno con los valores de resistencias de distintos colores.

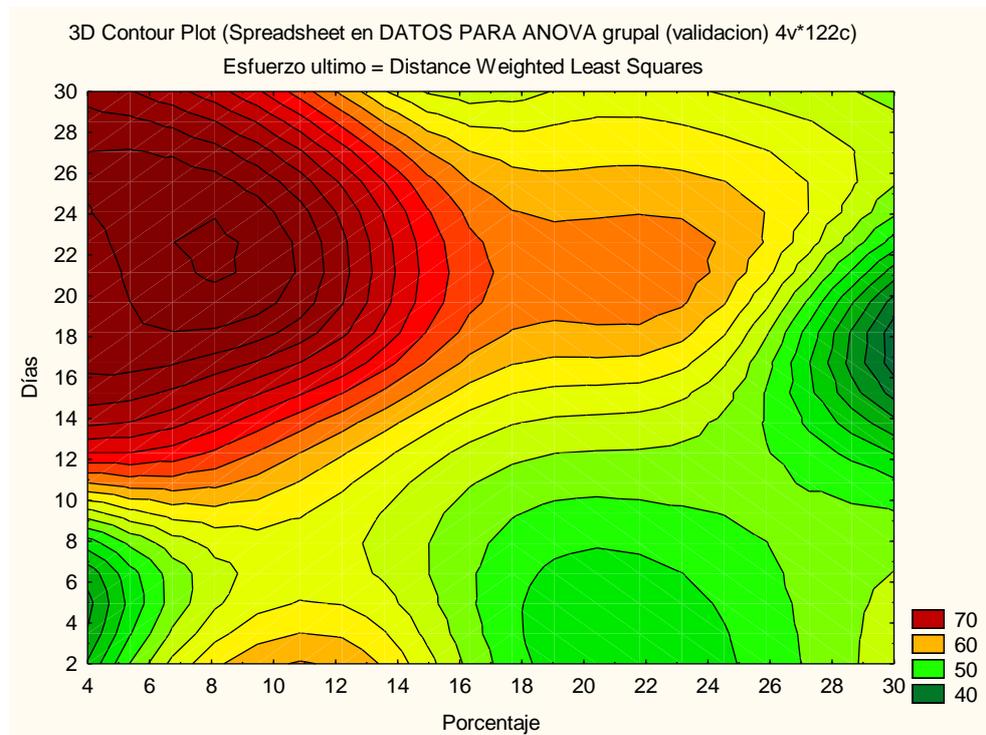


FIGURA 4.22. GRAFICO DE NIVELES DE ESFUERZO VS DIAS Y PORCENTAJES.

Comparación entre tratamientos con el Cemento Tipo I sin adición y Tipo IV.

Ahora vamos a ver si existe diferencias significativas entre los mejores tratamientos de nuestro análisis con los datos del cemento tipo I y tipo IV. La tabla 18 y 19 muestra el arreglo para la comparación entre estos tratamientos.

TABLA 18
DATOS DE LOS MEJORES TRATAMIENTOS DEL CEMENTO
PORTLAND TIPO I Y IV CON LOS DE ADICION DE 5% Y 10% DE
LIMOLITA.

Tratamiento (Tipo de cemento)	fc (MPa)	Recíproco(1/fc)
I	76,96	0,012966
I	76,96	0,012966
I	79,52	0,012549
I	83,79	0,011911
I	84,65	0,011790
I	84,65	0,011790
IV	49,95	0,019951
IV	45,24	0,022023
IV	48,07	0,020731
IV	50,89	0,019583
IV	49,95	0,019951
IV	49,01	0,020333
I+5%	68,49	0,014565
I+5%	74,72	0,013354
I+5%	66,72	0,014951
I+5%	68,49	0,014565
I+5%	77,39	0,012894
I+5%	78,28	0,012748
I+10%	85,23	0,011710
I+10%	83,75	0,011917
I+10%	92,65	0,010774
I+10%	70,38	0,014175
I+10%	75,73	0,013176
I+10%	71,26	0,014000

Las siglas I, IV, I+5%, I+10%, representan las resistencias a la compresión de los cementos Portland Tipo I, IV, Tipo I más 5% de limolita y Tipo I más 10% de limolita a los 21 y 28 días de curado al aire.

TABLA 19
DATOS DE LOS MEJORES TRATAMIENTOS DEL CEMENTO
PORTLAND TIPO I Y IV CON LOS DE ADICION DE 7.5% Y
12.5% DE LIMOLITA.

Tratamiento (Tipo de cemento)	fc
I	83,80
I	97,48
I	82,94
I	88,07
I	81,23
I	83,80
IV	40,53
IV	44,30
IV	36,76
IV	46,75
IV	37,33
IV	44,30
I+7.5%	79,17
I+7.5%	90,74
I+7.5%	69,39
I+7.5%	78,28
I+7.5%	82,73
I+7.5%	77,40
I+12.5%	81,07
I+12.5%	91,76
I+12.5%	84,64
I+12.5%	75,73
I+12.5%	77,51
I+12.5%	85,53

El análisis se lo hace por contraste entre tratamientos ya que nos interesa conocer:

- ¿Es mejor el tratamiento de la adición de 5% y 10% de limolita que el Cemento Portland Tipo I?

- ¿El Cemento Portland Tipo I con adición y sin adición es mejor que el tipo IV?

Introduciendo los datos en STATISTICA, comprobamos la homogeneidad de la varianza del error experimental. La figura 4.23, 4.24, 4.25 Y 4.26 muestra el análisis de normalidad y varianza.

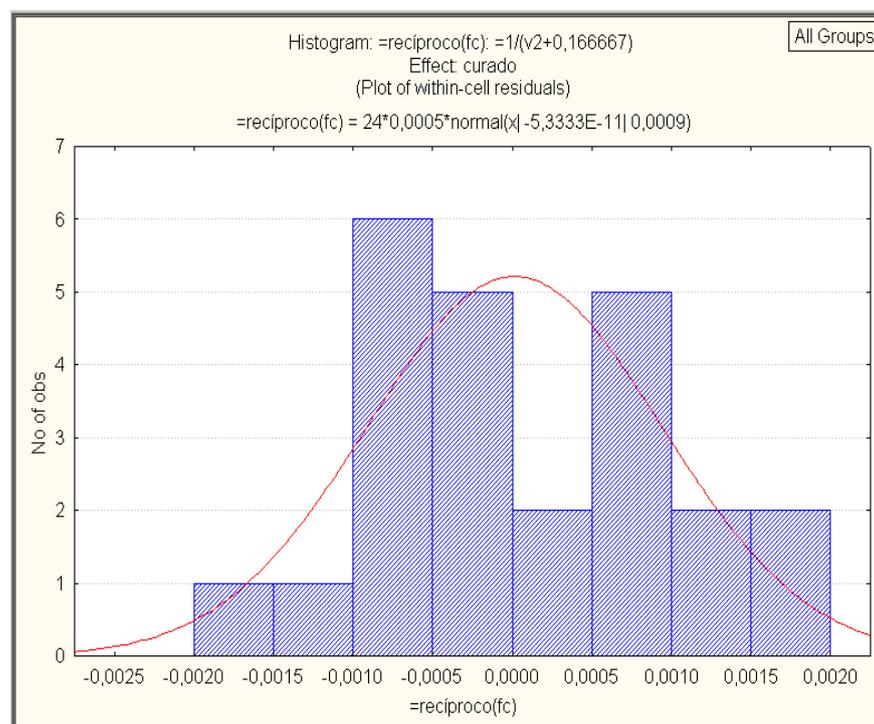


FIGURA 4.23. HISTOGRAMA DE LOS RESIDUOS PARA VER LA NORMALIDAD DE LOS DATOS.

La gráfica muestra distribución normal ya que la mayoría de los datos cae en la región de la campana.

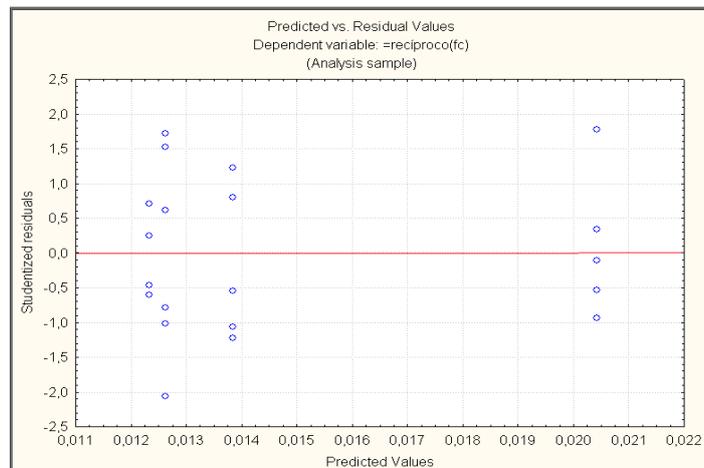


FIGURA 4.24. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS LOS RESIDUOS DE STUDENT.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (Sheet4 in Workbook5_(Recovered))				
Effect: curado				
Degrees of freedom for all F's: 3, 20				
	MS	MS	F	p
	Effect	Error		
=reciproco(fc)	0,000000	0,000000	3,159304	0,047227

Tests of Homogeneity of Variances (Sheet4 in Workbook5_(Recovered))					
Effect: curado					
	Hartley	Cochran	Bartlett	df	p
	F-max	C	Chi-Sqr.		
=reciproco(fc)	5,798435	0,482539	3,384712	3	0,336025

FIGURA 4.25. PRUEBAS ESTADISTICAS PARA LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA DEL RECÍPROCO DE LA VARIABLE DEPENDIENTE.

En las figuras anteriores se observa que existe varianza homogénea aplicando una transformación estabilizadora que es la recíproca $1/y$. Nuestra hipótesis de investigación sería: “¿Algún tipo especial de cemento tiene mejor resistencia a la compresión?”

Univariate Tests of Significance for =reciproco(fc) (Sheet4 in Workbo					
Sigma-restricted parameterization					
Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	0,005262	1	0,005262	5423,760	0,000000
curado	0,000261	3	0,000087	89,528	0,000000
Error	0,000019	20	0,000001		

FIGURA 4.26. ANALISIS DE VARIANZA USANDO “ANOVA” PARA LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE EL TIPO I Y IV.

Como podemos observar existe diferencia significativa por lo que, al menos una de las media es diferente.

Aplicando el método de Tukey para comparar pares, se obtiene lo siguiente:

Tukey HSD test; variable fc (Spreadsheet212)					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = 33,920, df = 20,000					
Cell No.	tipo de cemento	{1}	{2}	{3}	{4}
1		86,220	41,662	79,618	82,707
2	IV		0,000175	0,234842	0,725777
3	I+7.5%	0,234842	0,000175	0,000175	0,000175
4	I+12.5%	0,725777	0,000175	0,795416	

FIGURA 4.27. METODO DE TUKEY PARA LA COMPARACION DEL CEMENTO TIPO IV CON EL TIPO I.

Lo que podemos deducir acerca de las diferencias significativas entre los contrastes lo siguiente:

- No existe diferencia significativa entre la media del cemento tipo I junto con las medias de la adición de 5% y 10% de limolita.
- Existe diferencia significativa entre la media del cemento tipo IV con las medias juntas del cemento tipo I.
- En este caso particular se observa diferencia significativa entre las medias de la adición de 5% y 10% de limolita al cemento tipo I.

Lo mismo aplicamos para los datos de validación. En las figuras 4.28, 4.29, 4.30 Y 4.31 se muestra el análisis utilizando ANOVA. Para este caso no se hizo una transformación estabilizadora de la varianza debido a que la distribución salió normal.

Como se observa no existe residuales inusitados, además, se ve que la varianza es homogénea y existe diferencia significativa entre los tratamientos. Por ende, existe por lo menos una media que es diferente. Ahora procedemos a aplicar el método de Tukey, la figura 4.32 nos da los resultados del método aplicado con sus respectivas diferencias significativas entre pares; es decir, combinación de medias entre los cuatro tipo de cemento analizados.

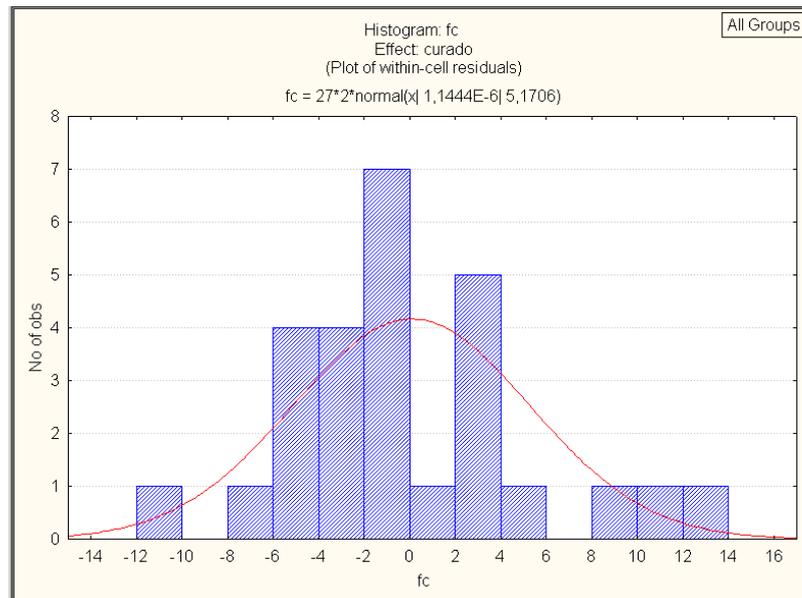


FIGURA 4.28. HISTOGRAMA DE LOS RESIDUOS PARA VER LA NORMALIDAD DE LOS DATOS PARA LA VALIDACION.

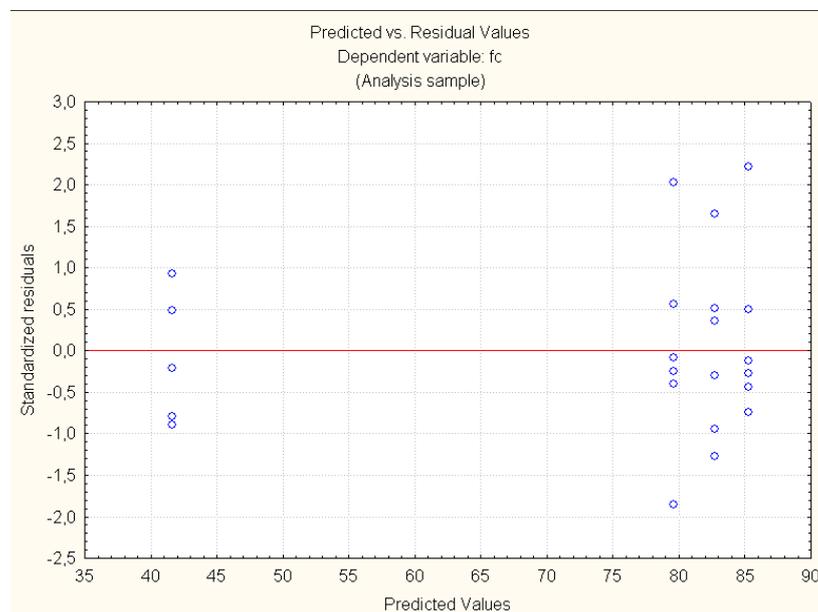


FIGURA 4.29. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS LOS RESIDUOS DE STUDENT PARA LA VALIDACION.

Levene's Test for Homogeneity of Variances (fc)				
Effect: curado				
Degrees of freedom for all F's: 3, 23				
	MS Effect	MS Error	F	p
fc	3,813126	11,40566	0,334319	0,800625

Tests of Homogeneity of Variances (Sheet5 in '...')					
Effect: curado					
	Hartley F-max	Cochran C	Bartlett Chi-Sqr.	df	p
fc	2,917182	0,393563	1,513713	3	0,679109

FIGURA 4.30. PRUEBAS ESTADISTICAS PARA LA HOMOGENEIDAD DE LA VARIANZA DE LA VALIDACION.

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet5 in Work...					
Sigma-restricted parameterization					
Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	146931,2	1	146931,2	4861,678	0,000000
curado	8069,9	3	2690,0	89,006	0,000000
Error	695,1	23	30,2		

FIGURA 4.31. ANALISIS DE VARIANZA USANDO "ANOVA" PARA LAS DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE EL CEMENTO TIPO I Y IV EN LA VALIDACION.

Tukey HSD test; variable fc (Sheet5 in Workbook5_(Recovered));					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = 30,222, df = 23,000					
Cell No.	curado	{1}	{2}	{3}	{4}
1		85,316	41,662	79,618	82,707
2	IV	0,000164	0,000164	0,229556	0,804600
3	I+7.5%	0,229556	0,000164	0,000164	0,000164
4	I+12.5%	0,804600	0,000164	0,765975	

FIGURA 4.32. METODO DE TUKEY PARA LA COMPARACION DEL CEMENTO TIPO IV CON EL TIPO I EN LA VALIDACION.

Lo que podemos deducir acerca de las diferencias significativas es lo siguiente:

- No existe diferencia significativa entre la media del cemento tipo I junto con las medias de la adición de 7.5% y 12.5% de limolita.
- Existe diferencia significativa entre la media del cemento tipo IV con las medias juntas del cemento tipo I.
- En este caso particular se observa diferencia significativa entre las medias de la adición de 7.5% y 12.5% de limolita al cemento tipo I.

De todo el análisis se ve que los mayores valores de las resistencias máximas están entre el porcentaje de 5% y 12.5% de adición.

En el apéndice D se muestra el método de Dunnet que compara el control con los tratamientos para ver el mejor. De los resultados obtenidos se llegó a la misma deducción.

4.3 Modelo Matemático y Simulación.

Una vez establecida la implementación en la modelación matemática en la sección anterior, procedemos a elaborar el algoritmo del modelo de endurecimiento no lineal.

Algoritmo para el modelo matemático.

Paso 1:

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

Paso 2:

$$F_{n+1}^{tr} = |\sigma_{n+1}^{tr}| - \sigma_{y,n} > 0?$$

No, set $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}$, $\sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n}$ y salir

Paso 3:

Si cumple la desigualdad, entonces comenzamos a utilizar Newton Rhapsion para encontrar los valores de $\Delta\lambda$:

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

Paso 4:

Evaluamos:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\lambda \operatorname{sgn}(\sigma_{n+1}^{tr}), y$$

$$\sigma_{y,n+1} = \sigma_{y,n} + H'_{n+1}\Delta\lambda$$

Una vez establecido el algoritmo procedemos al desarrollo en MATLAB. A continuación presentamos el desarrollo con un ejemplo. Se sugirieron como módulo de elasticidad de 2000MPa, fluencia de 10MPa y los valores de a y m de 1 y 0.03 respectivamente.

Desarrollo en Matlab.

```

E=2000;
sigmayo=10;
m=0.03;
a=1;
deltae=0.00001;
sigman(1,1)=0;
sigmayn(1,1)=sigmayo;
eps=0:deltae:0.15;
eps=eps';
d=size(eps);
e=d(1,1);
lampdao=10^-20;
lampda(1,1)=lampdao;
deltalampda=zeros(e,1);

for k=1:e-1

sigmatrn1=sigman(k,1)+E*deltae;
Fntnrn1=abs(sigmatrn1)-sigmayn(k,1);
so=sigmayn(1,1);

if Fntnrn1>0

deltalampda(1,1)=10^-20; %se asume este valor inicial
Fo=Fntnrn1-
deltalampda(1,1)*(E+a*sigmayo*(m/(deltalampda(1,1)+lampdao)
^0.5)*(m-deltalampda(1,1)-
lampdao)/((m+deltalampda(1,1)+lampdao)^2));
Fn1=Fo;
i=1;
Tol=10^-10;
lim=30;

while abs(Fn1)>=abs(Fo)*Tol&i<lim,

fp=-E-a*sigmayo*(m/(deltalampda(i,1)+lampdao))^(1/2)*(m-
deltalampda(i,1)-
lampdao)/(m+deltalampda(i,1)+lampdao)^2+1/2*a*sigmayo*delta

```

```

lampda(i,1)/(m/(deltalampda(i,1)+lampdao)^(1/2)*(m-
deltalampda(i,1)-
lampdao)/(m+deltalampda(i,1)+lampdao)^2*m/(deltalampda(i,1)
+lampdao)^2+a*sigmayo*deltalampda(i,1)*(m/(deltalampda(i,1)
+lampdao)^(1/2)/(m+deltalampda(i,1)+lampdao)^2+2*a*sigmayo
*deltalampda(i,1)*(m/(deltalampda(i,1)+lampdao)^(1/2)*(m-
deltalampda(i,1)-lampdao)/(m+deltalampda(i,1)+lampdao)^3);

Fn(i,1)=Fntrn1-
deltalampda(i,1)*(E+a*sigmayo*(m/(deltalampda(i,1)+lampdao)
)^0.5)*(m-deltalampda(i,1)-
lampdao)/((m+deltalampda(i,1)+lampdao)^2));

    deldellampda=-fp^-1*Fn(i,1);
    deltalampda(i+1,1)=deltalampda(i,1)+deldellampda;

Fn(i+1,1)=Fntrn1-
deltalampda(i+1,1)*(E+a*sigmayo*(m/(deltalampda(i+1,1)+lam
pdao)^0.5)*(m-deltalampda(i+1,1)-
lampdao)/((m+deltalampda(i+1,1)+lampdao)^2));
Fn1=Fn(i+1,1);
i=i+1;

end
deltalampda(k,1)=deltalampda(i,1);
delta=deltalampda(i,1);
lampdal=delta + lampdao;
Hp=a*sigmayo*(m/lampdal)^0.5*(m-lampdal)/(m+lampdal)^2;
sigman(k+1,1)=sigmatrn1-E*delta*sign(sigmatrn1);
sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1)+Hp*delta;
lampdao=lampdal;
lampda(k+1,1)=lampdao;
else

    sigman(k+1,1)=sigmatrn1;
    sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1);
end

end

size(sigman)
size(eps)

plot(eps,sigman), ylabel('esfuerzo'), xlabel('deformación')
grid

```

Al ejecutar este algoritmo en MATLAB, se obtiene una curva esfuerzo versus deformación. El resultado se ilustra en la figura 4.33. Al analizar este modelo se puede apreciar lo siguiente:

1. La curva posee una parte elástica que va desde el esfuerzo 0 hasta 10Mpa, después continúa con una curva no lineal que representa la zona plástica.
2. El valor de λ en la parte elástica tiene un valor de cero. Esto se debe a que λ es un corrector que solo actúa en la parte plástica y cambia a medida que avanzamos en la deformación.

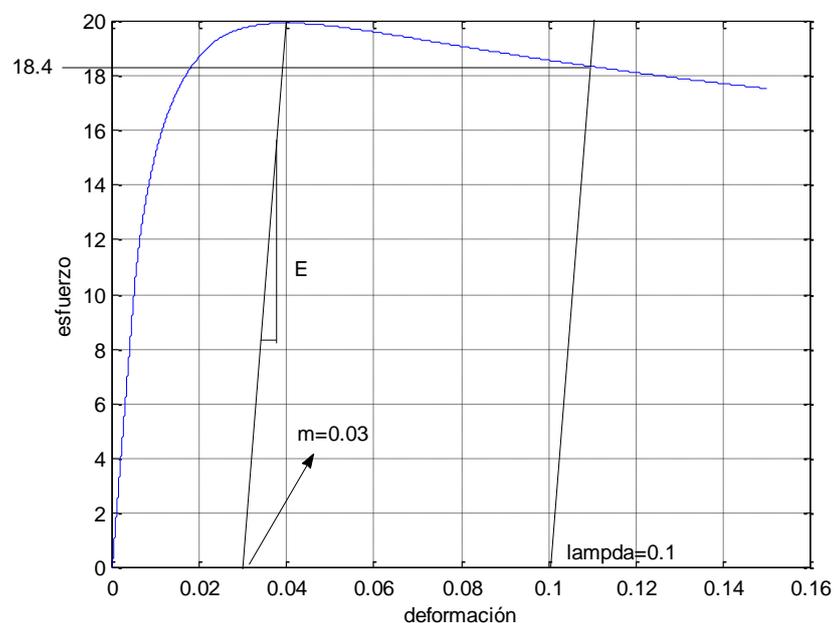


FIGURA 4.33. MODELO ISOTROPICO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA.

3. De la ecuación podemos obtener lo siguiente:

Cuando $m=\lambda=0.03$,

$$\sigma_y = \sigma_{yo} * \left(1 + \frac{2a}{m+\lambda} * \sqrt{m\lambda} \right) = \sigma_{yo} * \left(1 + \frac{2a}{\lambda+\lambda} * \sqrt{\lambda\lambda} \right) = \sigma_{yo} * (1 + a)$$

pero $a=1$, entonces:

$$\sigma_y = 2 * \sigma_{yo} = 2 * 10 = 20MPa$$

Este valor de 20MPa lo comprobamos en la figura 4.30 trazando una recta con una pendiente E desde 0.03. Esta recta tiene que pasar por el valor máximo del esfuerzo que es 20MPa.

4. Podemos comprobar también en el gráfico que para un valor dado de $\lambda=0.1$, este llega al valor descrito en la ecuación.

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sigma_{yo} * \left(1 + \frac{2a}{m + \lambda} * \sqrt{m\lambda} \right) = 10 * \left(1 + \frac{2 * 1}{0.03 + 0.1} * \sqrt{0.06 * 0.1} \right) \\ &= 18.4MPa \end{aligned}$$

Por lo que deducimos que nuestro modelo si es predictivo con respecto a la ecuación dada.

5. Para obtener los valores deseados se tuvo que asignar una tolerancia de 10^{-10} y un delta épsilon (deformación) de 0.00001. Si disminuimos el intervalo de la deformación, entonces veremos que la curva se aleja de los valores deseados.

Este va a ser el modelo y la simulación que se utilizarán para verificar si nuestro modelo se ajusta o no a los resultados obtenidos.

4.4 Ajuste y verificación del modelo.

Para el ajuste del modelo vamos a obtener los datos de módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia y resistencia máxima para hallar los valores de a y m que es lo que necesitamos. Los valores de “ a ” y “ m ” se calcularon de las curvas del experimento. Es así que, las fórmulas son:

$$a = 1 - \frac{\sigma_{yo}}{\sigma_{max}}$$

$$m = \varepsilon_{max} - \frac{\sigma_{max}}{E}$$

Se calcula para cada muestra el valor respectivo de “ a ” y “ m ”. Si los valores no varían mucho se hace un promedio. La tabla 20 muestra los valores de módulo de elasticidad, fluencia y resistencia máxima para cada ensayo de compresión realizado a sus respectivos días junto con los valores de “ a ” y “ m ”. Cabe señalar que no se ve valores de “ a ” y “ m ” constantes debido a la variación de la resistencia a la compresión, resistencia de fluencia, módulo de elasticidad y la deformación máxima. Además se obtuvo también los valores de la adición de 17.5% de limolita para los 4, 11, 18 y 25 días de curado al aire respectivamente. La obtención de estos valores es de suma importancia en el modelo y simulación del comportamiento del material modificado.

TABLA 20
VALORES DE “a” y “m” PARA EL MODELO MATEMATICO

Porcentaje	días	E	fluencia	fc	a	m
15%	7	2037,7	37,27	49,05	0,32	0,0081
	7	2198,6	36,89	52,19	0,41	0,0063
	7	2402,3	38,95	55,13	0,41	0,0061
	14	2279,3	38,65	50,42	0,30	0,0059
	14	2361,9	39,14	49,05	0,25	0,0052
	14	2131,9	40,32	49,44	0,23	0,0068
	21	2573,9	47,58	66,71	0,40	0,0041
	21	2692,5	46,1	56,51	0,23	0,007
	21	2176,1	35,32	48,07	0,36	0,0059
	28	2536,7	42,68	54,94	0,28	0,0103
	28	2588,2	35,32	44,15	0,25	0,0079
	28	2571	39,73	51,01	0,28	0,0052
	17,5%	4	2020,9	33,75	44,15	0,31
4		2029,9	29,14	41,59	0,43	0,0095
4		2364,6	36,00	48,07	0,34	0,0077
11		2356,2	41,01	53,37	0,35	0,0053
11		2516,2	44,54	52,39	0,18	0,0072
11		2578,7	37,48	45,32	0,21	0,0054
18		2335	40,72	54,15	0,33	0,0068
18		2531,4	43,66	53,96	0,22	0,0067
18		2573,6	42,78	53,96	0,27	0,004
25		2679	36,79	48,07	0,31	0,0041
25		2607	35,32	47,09	0,33	0,0039
25		2459,6	46,11	59,84	0,30	0,0047

A continuación se presenta una curva experimental con el ensayo de 7 días para implementar el modelo al experimento. Se puede observar que existe una parte con pendiente constante igual al módulo de elasticidad y

después comienza a variar hasta la resistencia máxima. La figura 4.34 representa el modelo del experimento.

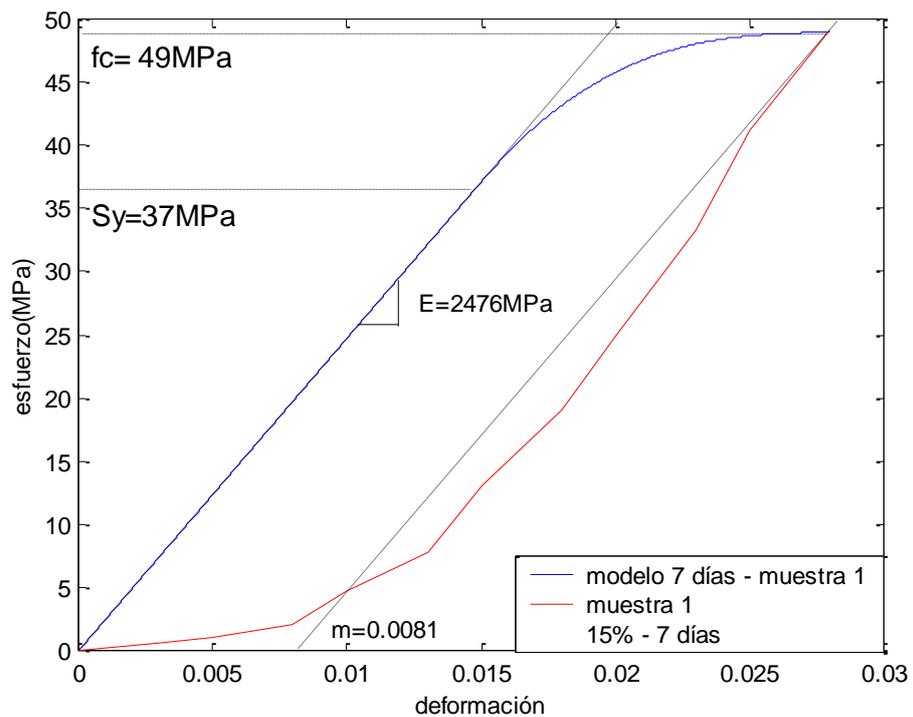


FIGURA 4.34. MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION A LOS 7 DIAS DE CURADO.

Como se observa la resistencia máxima de la curva experimental coincide con la resistencia de la curva del modelo, el esfuerzo de fluencia comienza en 37MPa y el valor de “m” es aproximadamente 0.0081. Estos datos se ajustan al valor obtenido en el experimento. En el apéndice B se muestran las curvas experimentales con las del modelo implementado para cada muestra.

Para los ensayos con la adición de 17.5%, la figura 4.35 muestra un ejemplo del comportamiento de la resistencia con la deformación.

De la figura 4.35 se puede observar que las resistencias máximas para ambas curvas es aproximadamente 44MPa, la fluencia en el modelo es de aproximadamente 33MPa como se obtuvo en la experimentación y el valor de “m” es igual a 0.006. El resto de figuras se encuentra en el apéndice B.

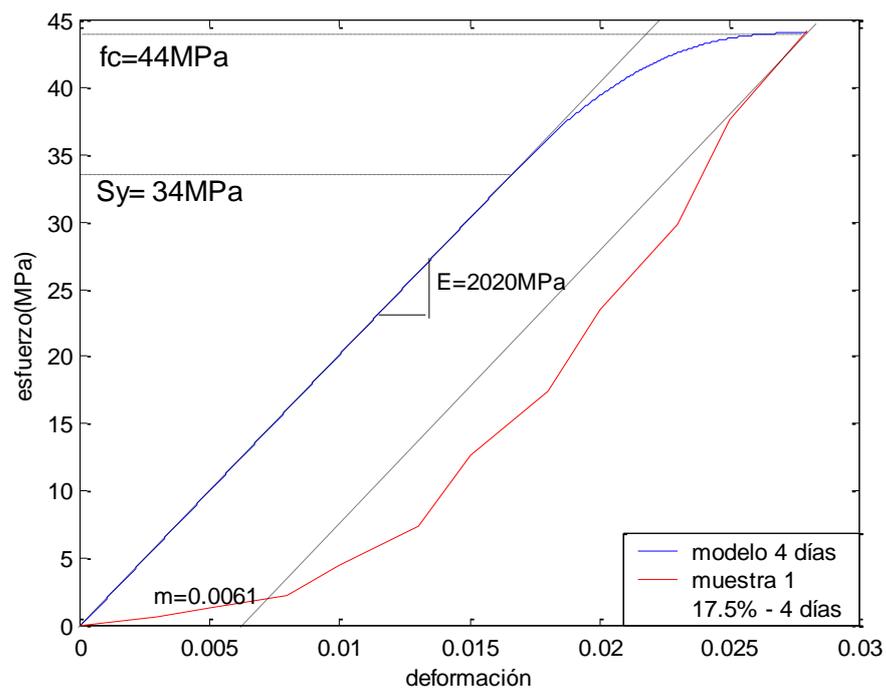


FIGURA 4.35. MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA PARA 17.5% DE ADICION A LOS 4 DIAS.

En general, podemos decir que para cada día de ensayo se tienen valores de “a” y “m” diferentes, por lo que no podemos establecer un valor constante para cada parámetro. La variación es debido a que estos valores dependen tanto del módulo de elasticidad, fluencia y resistencia máxima, por ende por cada día que se cura la pasta se obtiene una variación significativa de a y m.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. En la experimentación realizada con 15% y 17.5% de adición de limolita, se visualiza que no existe diferencia significativa entre los días de curado. Esto significa que no existe una diferencia entre las medias de los tratamientos debido a que en los primeros días el curado cumplió la etapa de endurecimiento.
2. La resistencia media a la compresión para la adición de 15% de limolita al Cemento Tipo I es 52.22MPa. Este valor es menor comparado con la resistencia media del Cemento Tipo I cuyo valor es 84.36MPa a los 28 días de curado. Pero existe un pequeño incremento comparando con la resistencia del Cemento Tipo IV cuyo valor es 48.63MPa a los 28 días de curado.

3. En la comparación de tratamientos a nivel grupal, se tomaron los porcentajes de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de adición de limolita. El análisis sugiere que existe diferencia significativa entre el rango de 5% y 10% con los demás porcentajes. Por lo que, se deduce que los mejores tratamientos son: 5% y 10% en los días 21 y 28 de curado. Además en la comparación entre estos cuatro tratamientos se concluyó que las medias de estos tratamientos son iguales.
4. Para la validación se comprobó que el porcentaje de 7.5% y 12.5% tenía diferencia significativa con otros porcentajes del grupo. En síntesis, para la validación la adición entre 7.5% y 12.5% de limolita es mejor que los otros porcentajes en los días de curado 21 y 28.
5. En la comparación de los mejores resultados de la adición de limolita con el Cemento Portland Tipo I y IV, se halló diferencia significativa entre la media del Tipo IV con las otras medias del Tipo I. Es decir, se visualiza que el Tipo I tiene mayor resistencia a la compresión que el Tipo IV; además, también se enfoca que no hay diferencia significativa con la adición de 5% y 10% de limolita, por lo que, los tres cemento Tipo I son mejores que el Tipo IV con la condición de curado en aire.
6. En la modelación matemática se utilizó el modelo de endurecimiento no lineal. Este se ajustó a la experimentación con los datos obtenidos

para cada muestra. Los valores de “a” y “m” son adimensionales y varían en función de la fluencia, resistencia máxima, módulo de elasticidad y la deformación máxima.

5.2 Recomendaciones

El presente proyecto de investigación brinda resultados primarios óptimos en la relación de adición de limolita y los días de curado con la resistencia a la compresión. Se sugiere las siguientes investigaciones:

1. Efectos de la rapidez de carga en la resistencia a la compresión.
2. Efectos de la relación agua-cemento en la resistencia a la compresión.
3. Análisis de temperatura y humedad en el curado.
4. Pruebas para tamaño de grano y estructura con la adición de los porcentajes de limolita a diferentes días de curado.
5. Proyectos de adición de diferentes puzolanas al cemento tipo I para ver el comportamiento de este con el material utilizado en este trabajo de investigación.

APÉNDICE A

**CURVAS ESFUERZOS VERSUS DEFORMACION UNITARIA DE LOS
ENSAYOS DE COMPRESIÓN CON 15% Y 17.5% DE ADICION DE
LIMOLITA**

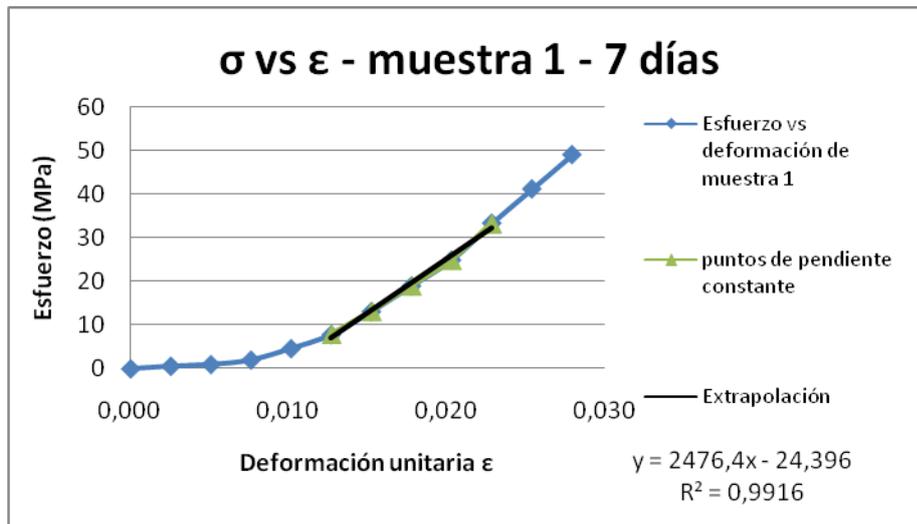


FIGURA A.1. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 7 DIAS DE CURADO

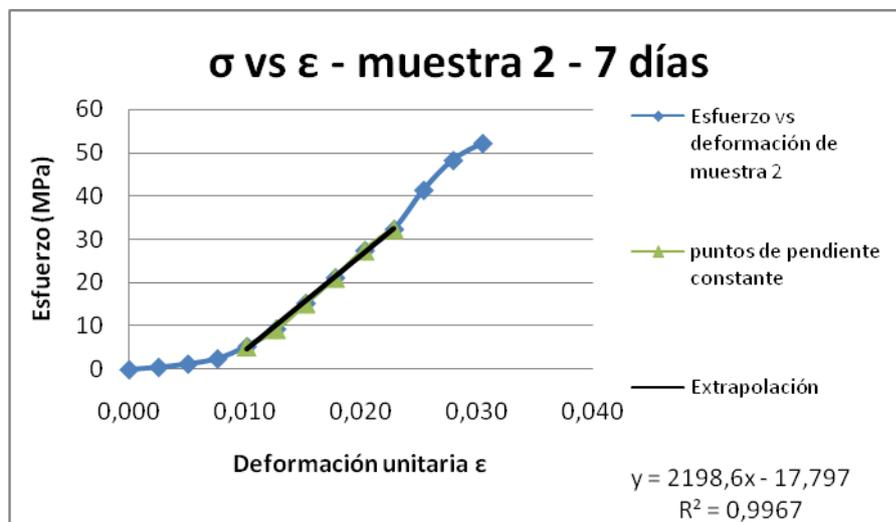


FIGURA A.2. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 7 DIAS DE CURADO

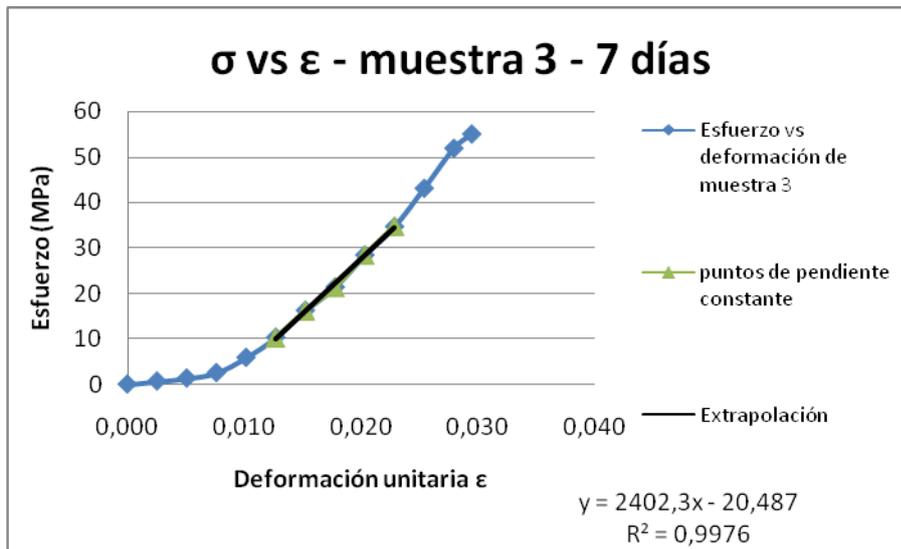


FIGURA A.3. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 7 DIAS DE CURADO

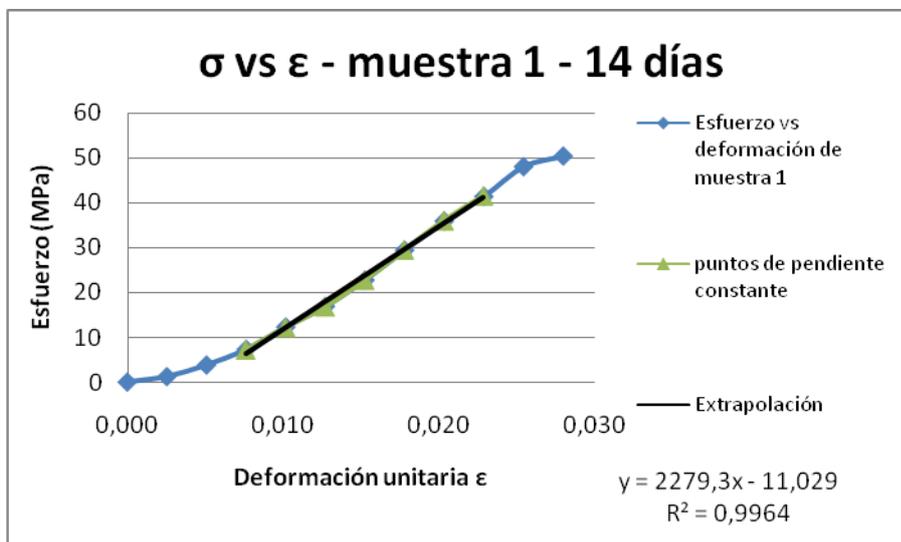


FIGURA A.4. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 14 DIAS DE CURADO

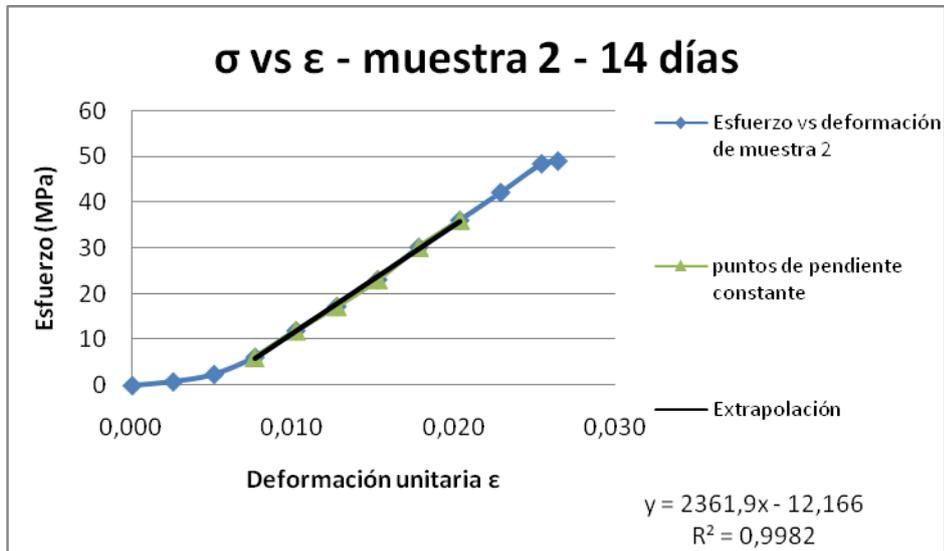


FIGURA A.5. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 14 DIAS DE CURADO

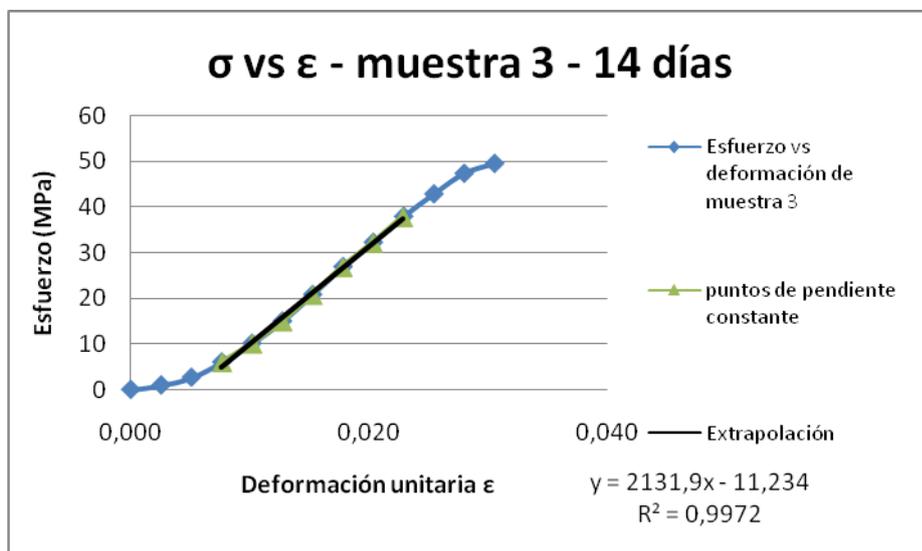


FIGURA A.6. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 14 DIAS DE CURADO

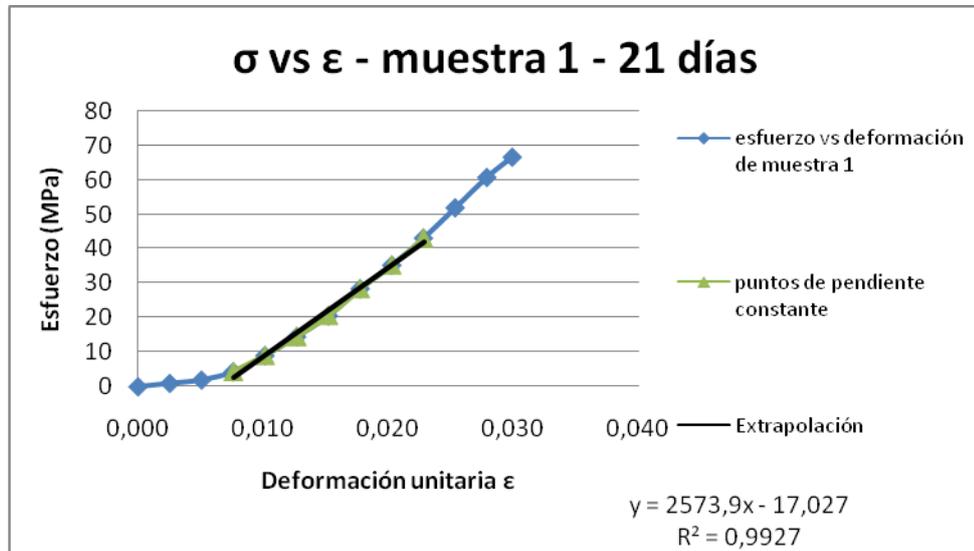


FIGURA A.7. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 21 DIAS DE CURADO

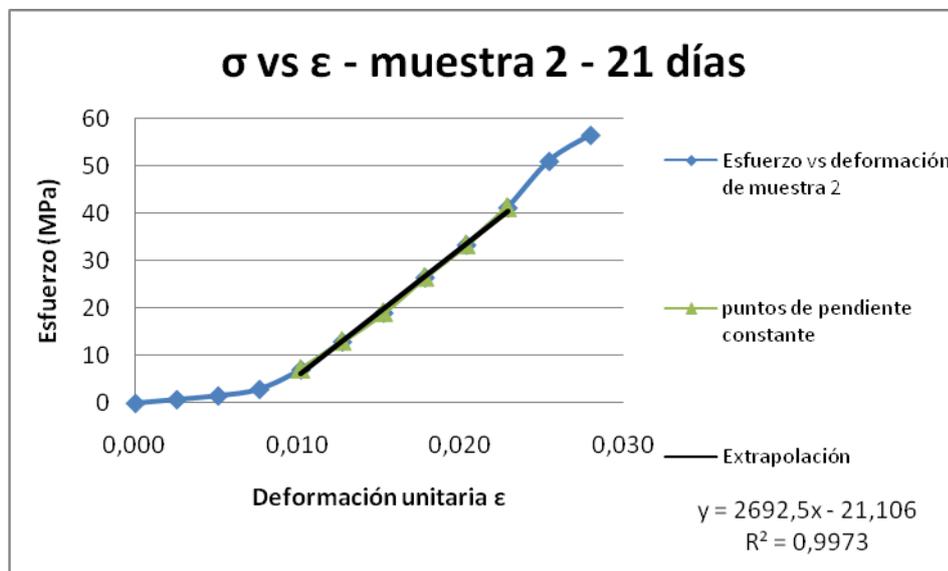


FIGURA A.8. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 21 DIAS DE CURADO

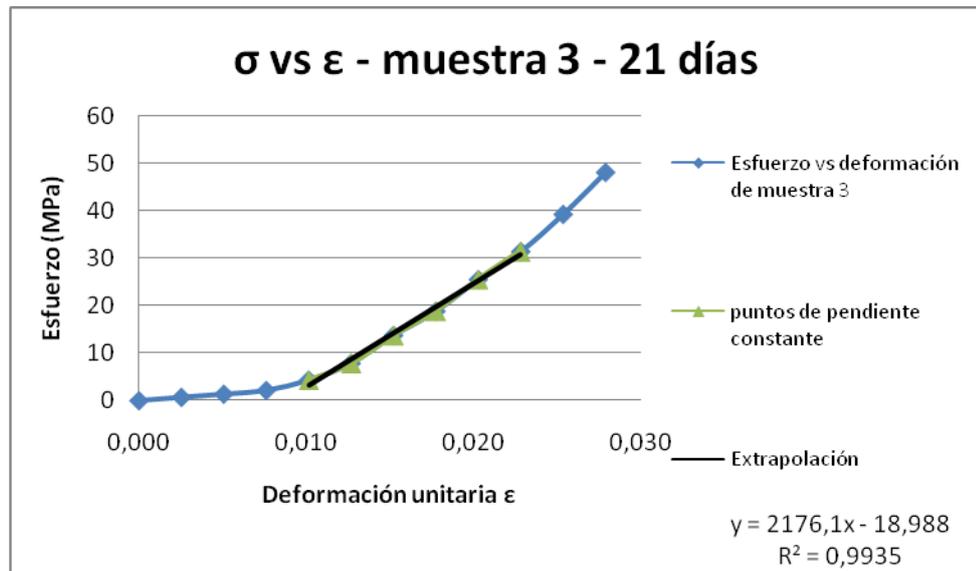


FIGURA A.9. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 21 DIAS DE CURADO

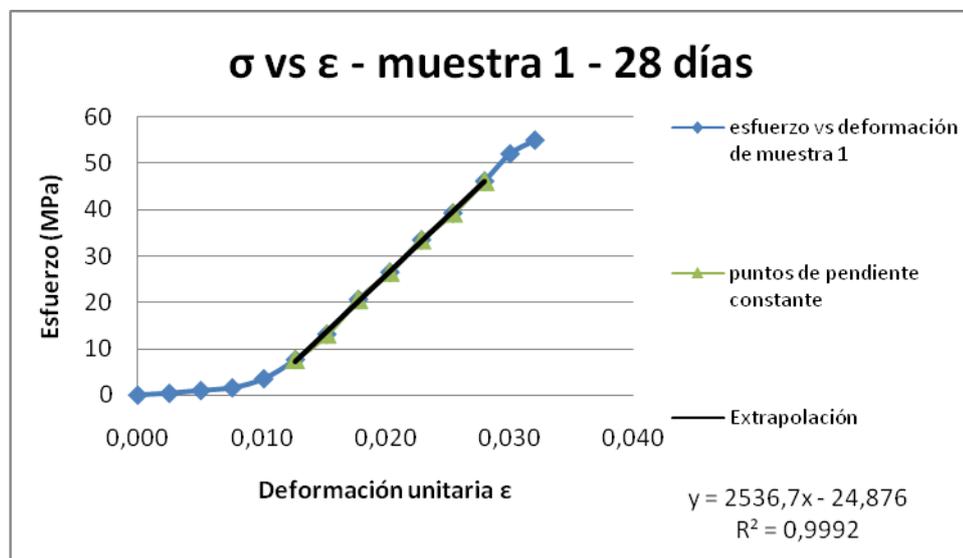


FIGURA A.10. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 28 DIAS DE CURADO

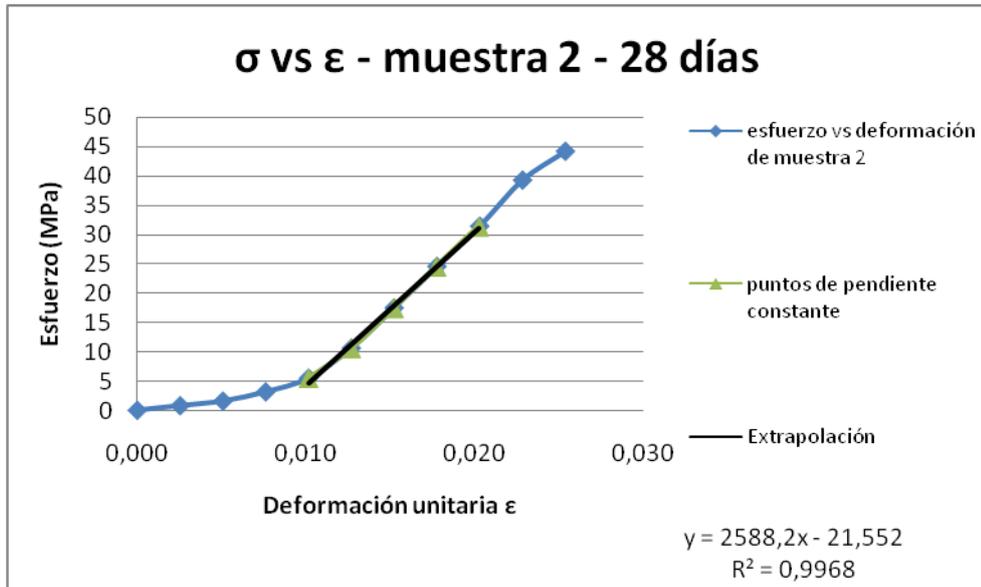


FIGURA A.11. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 28 DIAS DE CURADO

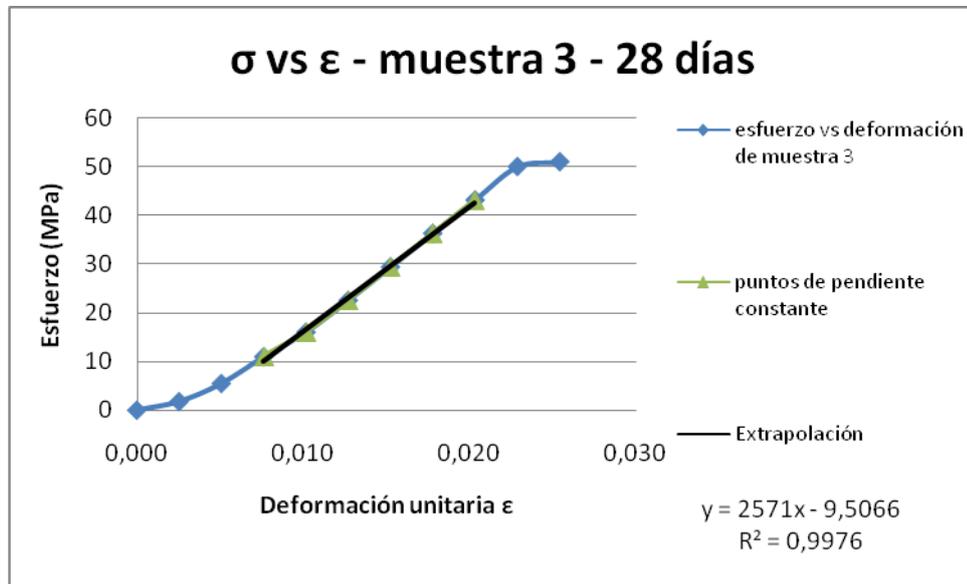


FIGURA A.12. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 28 DIAS DE CURADO

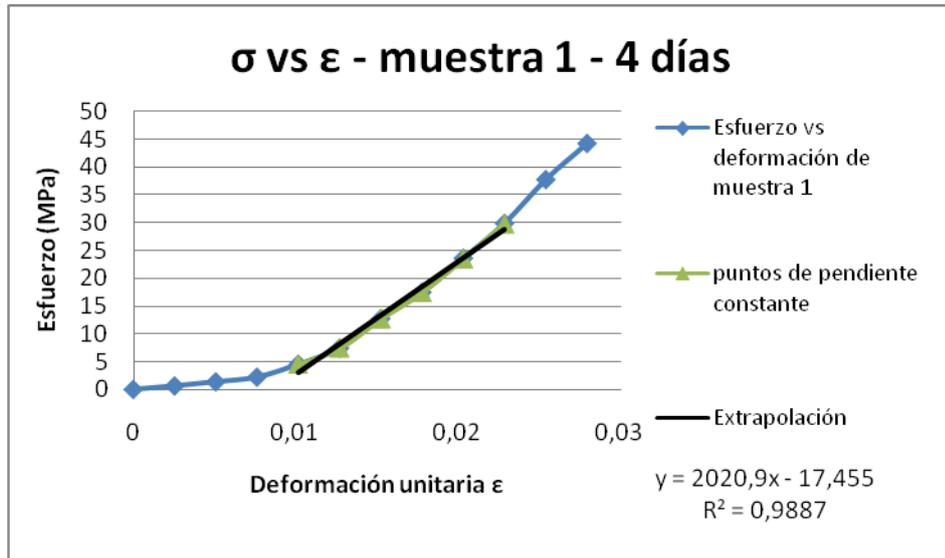


FIGURA A.13. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 4 DIAS DE CURADO

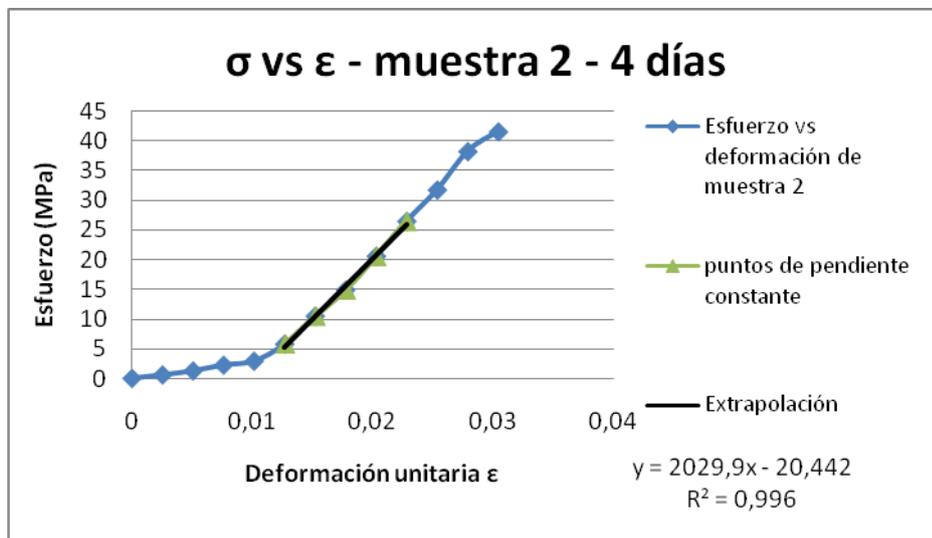


FIGURA A.14. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 4 DIAS DE CURADO

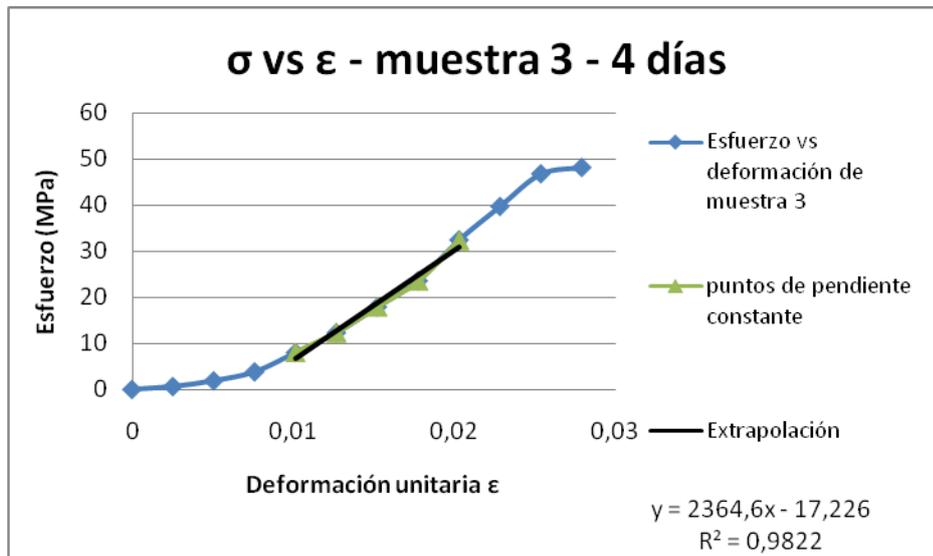


FIGURA A.15. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 4 DIAS DE CURADO

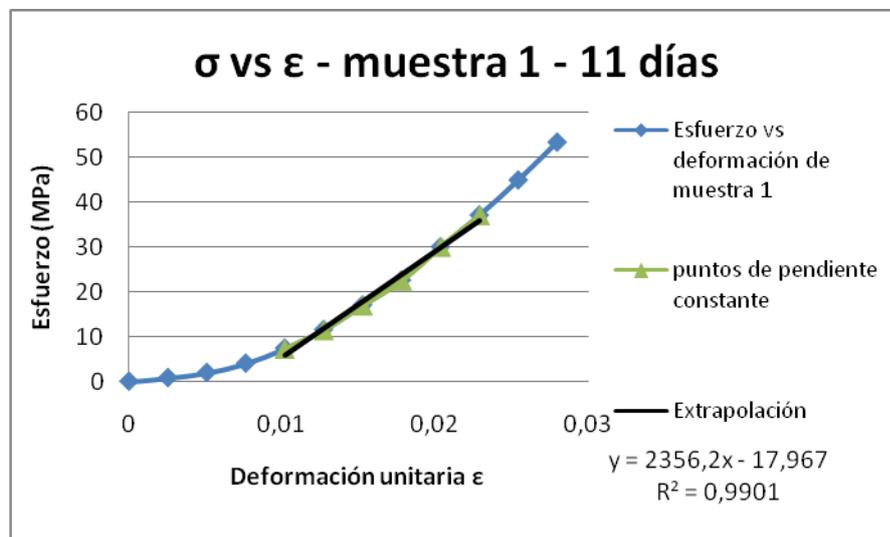


FIGURA A.16. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 11 DIAS DE CURADO

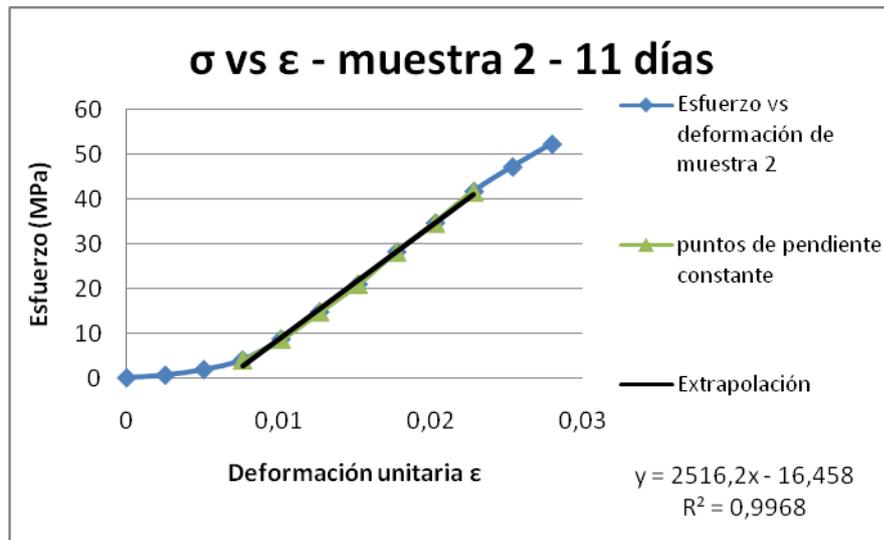


FIGURA A.17. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 11 DIAS DE CURADO

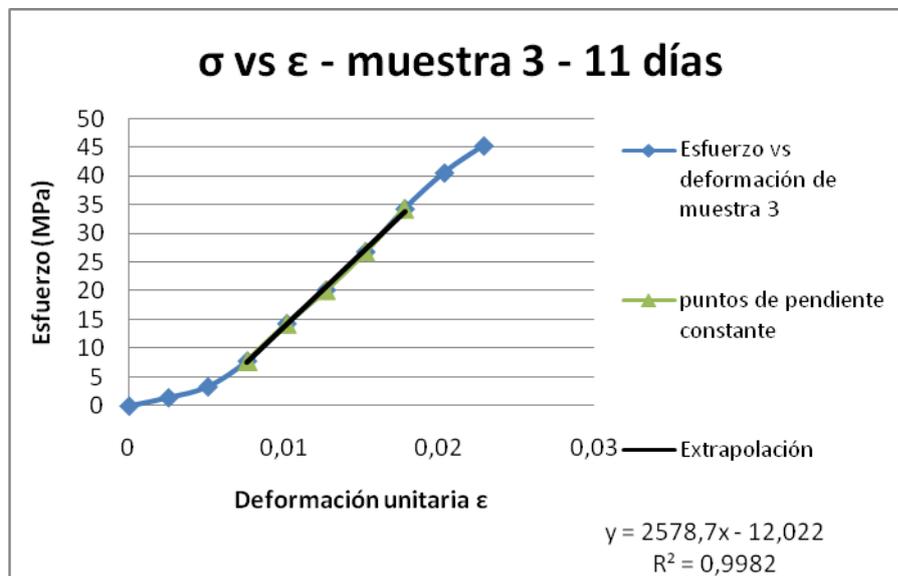


FIGURA A.18. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 11 DIAS DE CURADO

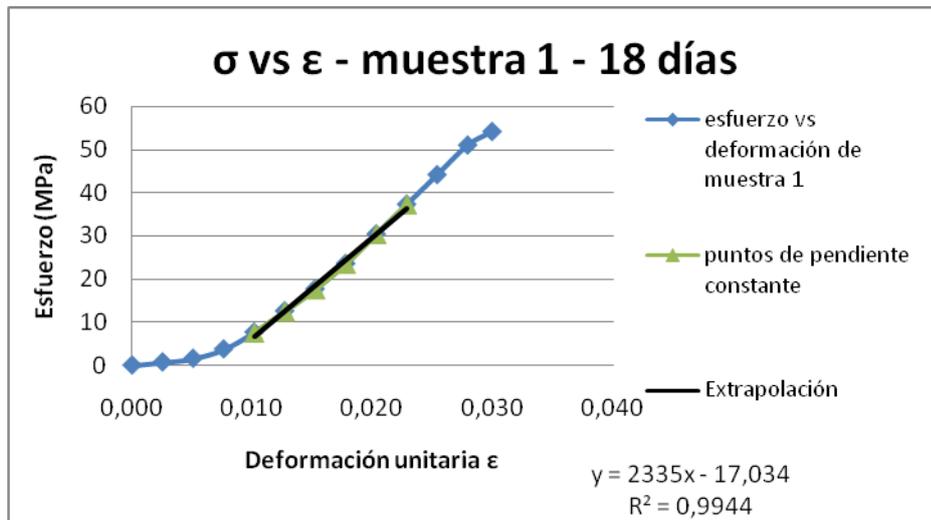


FIGURA A.19. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 18 DIAS DE CURADO

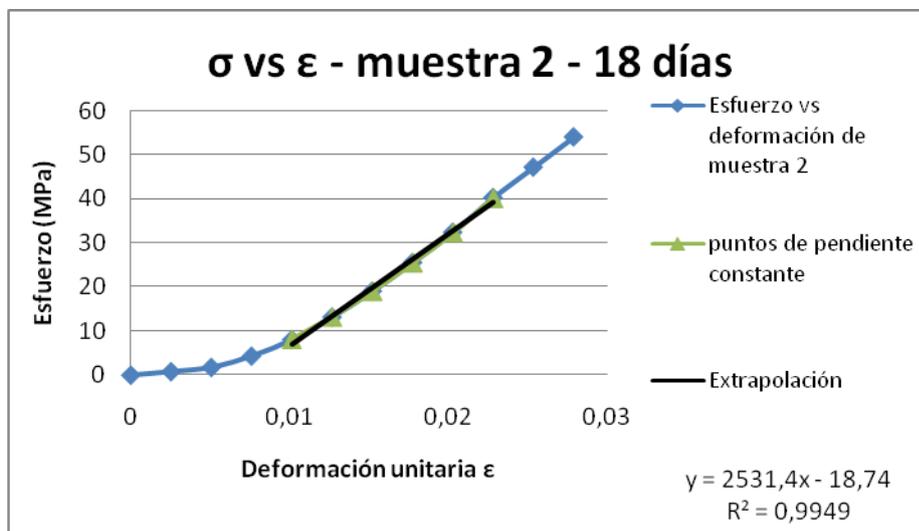


FIGURA A.20. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 18 DIAS DE CURADO

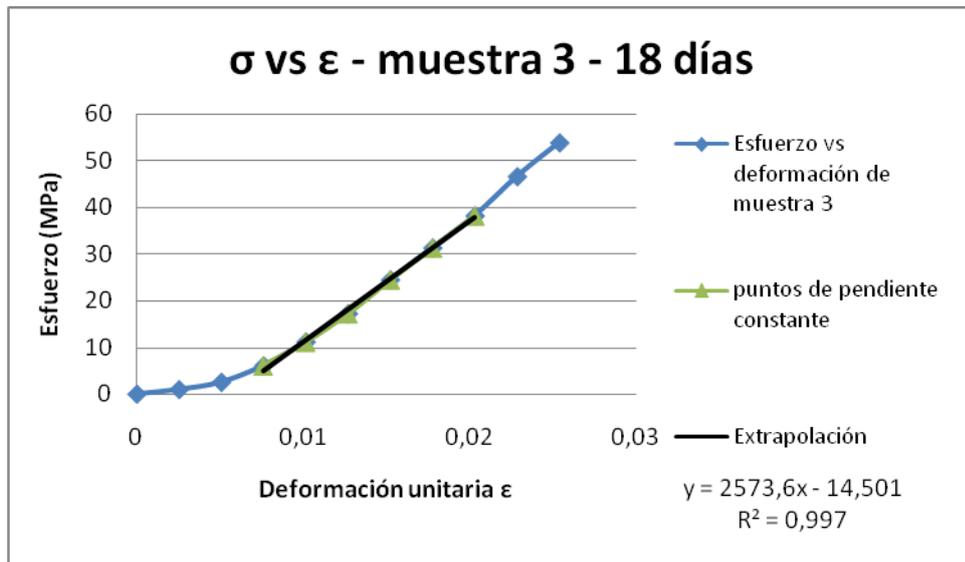


FIGURA A.21. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 18 DIAS DE CURADO

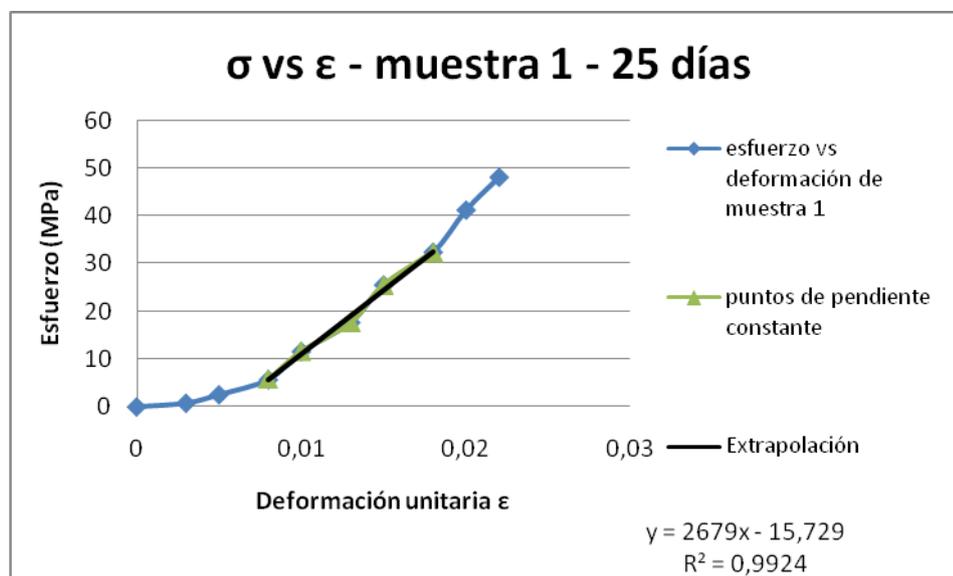


FIGURA A.22. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 25 DIAS DE CURADO

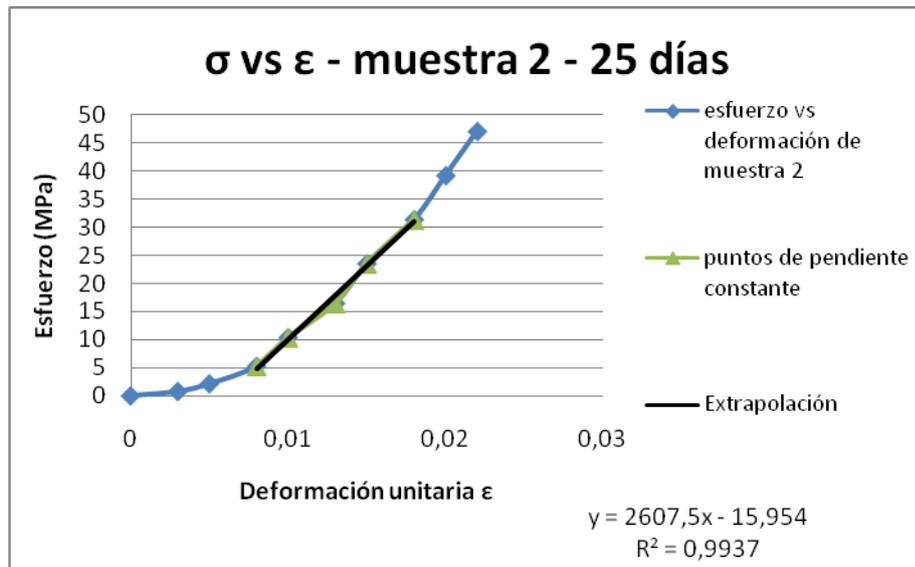


FIGURA A.23. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 25 DIAS DE CURADO

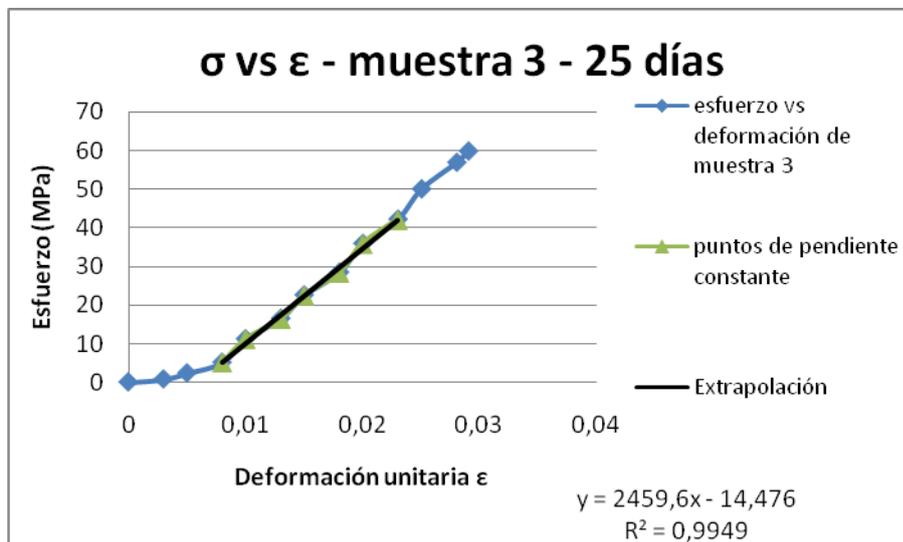


FIGURA A.24. ESFUERZO DE COMPRESION VS DEFORMACION UNITARIA PARA LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA A LOS 25 DIAS DE CURADO

APÉNDICE B

**MODELOS DE ESFUERZOS VERSUS DEFORMACION UNITARIA DE LOS
ENSAYOS DE COMPRESIÓN CON 15% Y 17.5% DE ADICION DE
LIMOLITA**

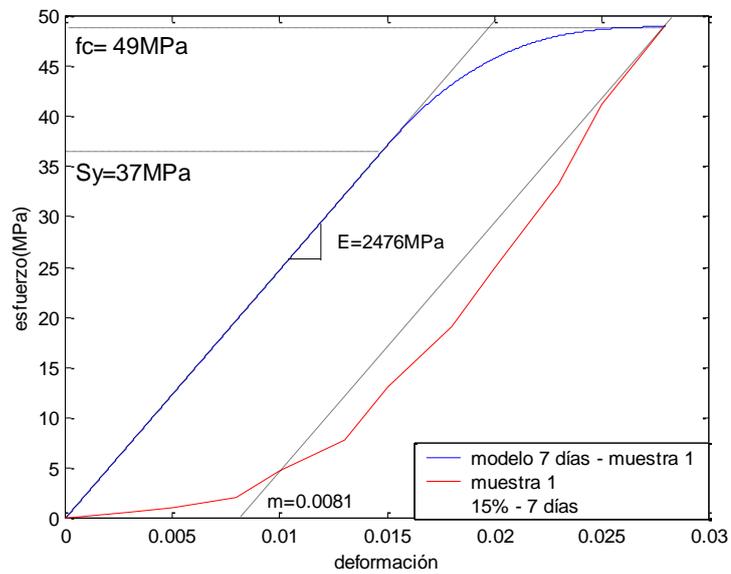


FIGURA B.1 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 7 DIAS.

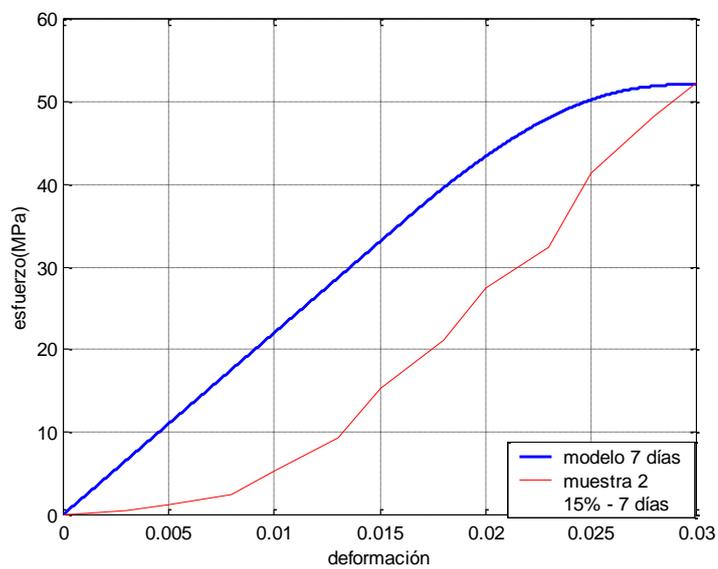


FIGURA B.2 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 7 DIAS.

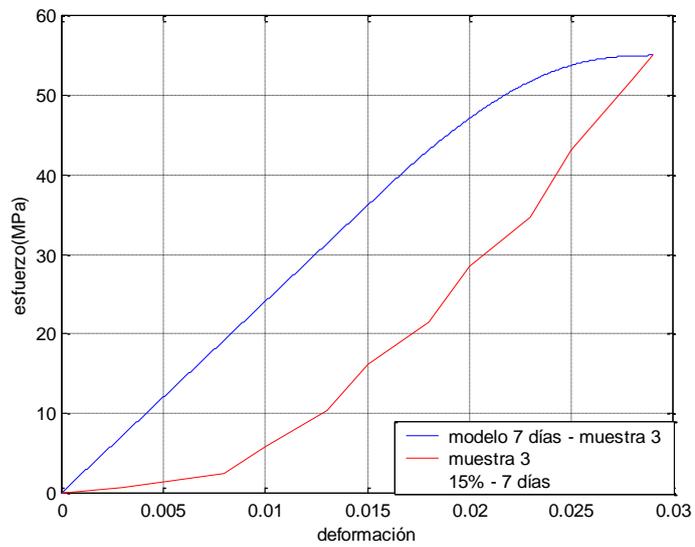


FIGURA B.3 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 7 DIAS.

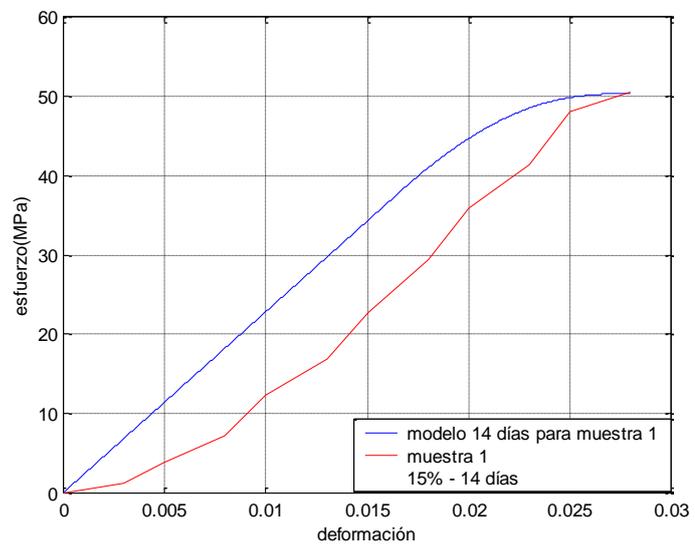


FIGURA B.4 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 14 DIAS.

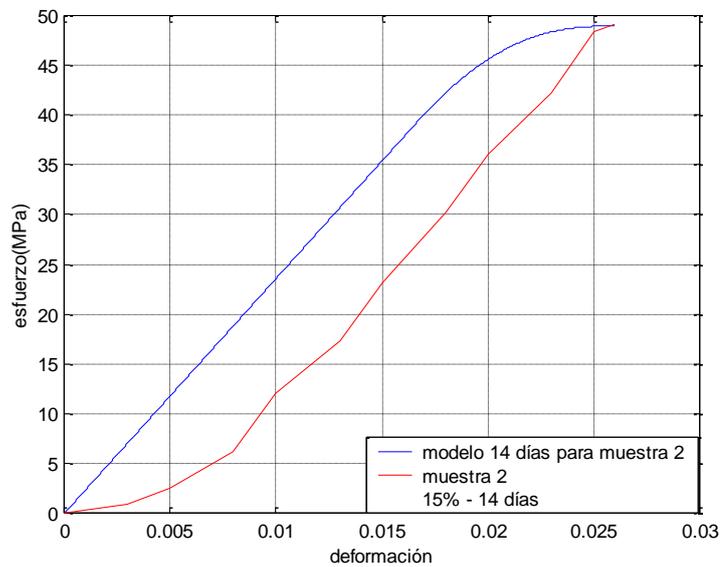


FIGURA B.5 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 14 DIAS.

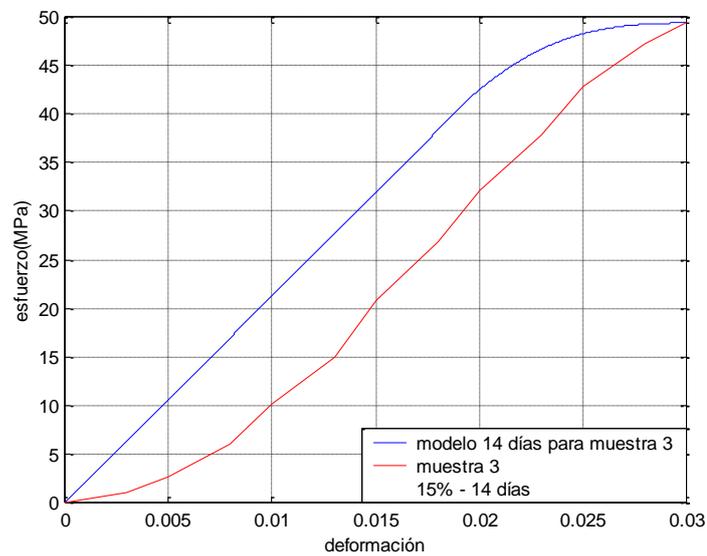


FIGURA B.6 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 14 DIAS.

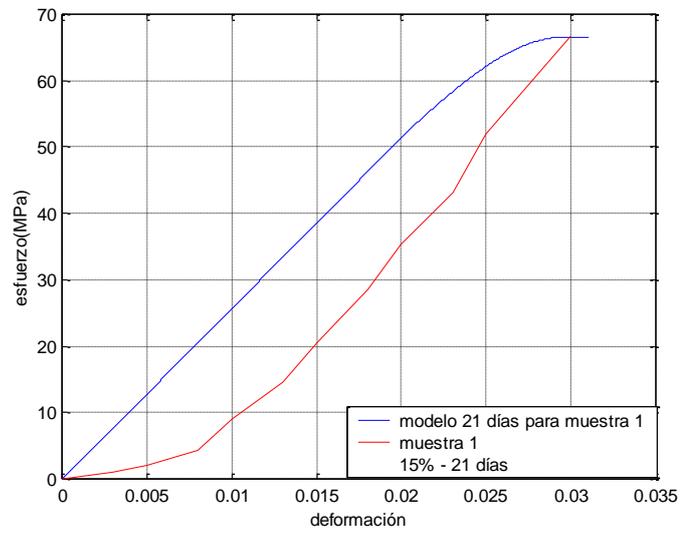


FIGURA B.7 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 21 DIAS.

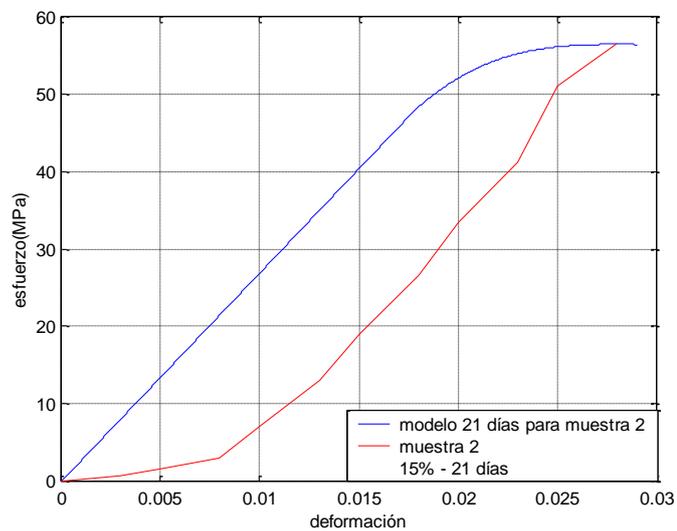


FIGURA B.8 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 21 DIAS.

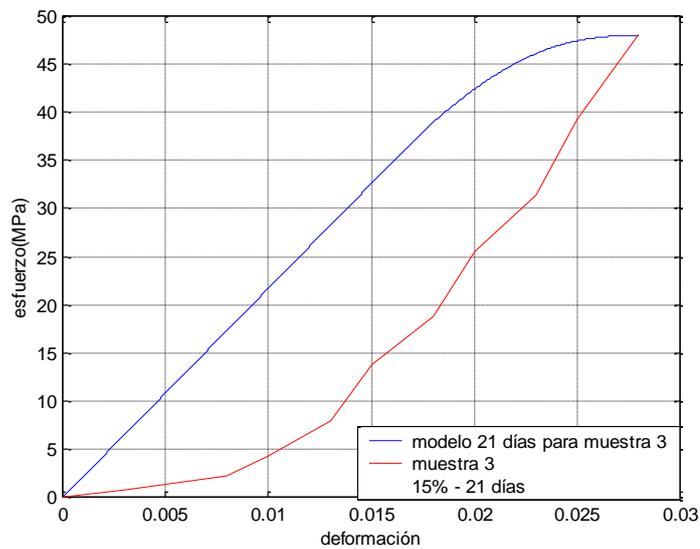


FIGURA B.9 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 21 DIAS.

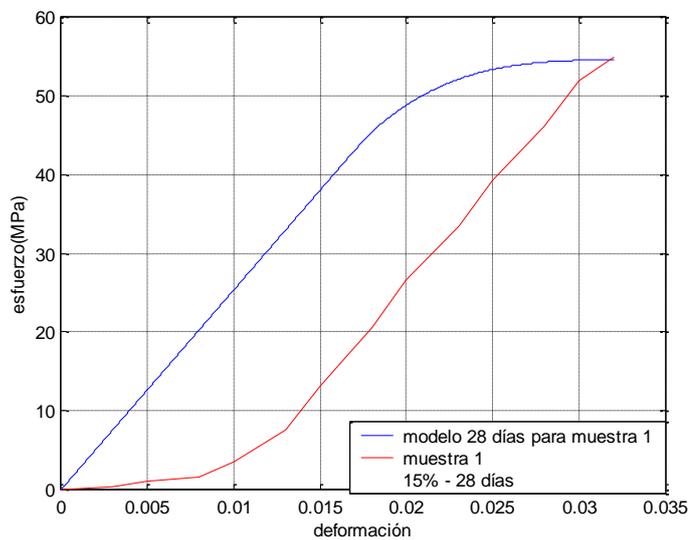


FIGURA B.10 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 28 DIAS.

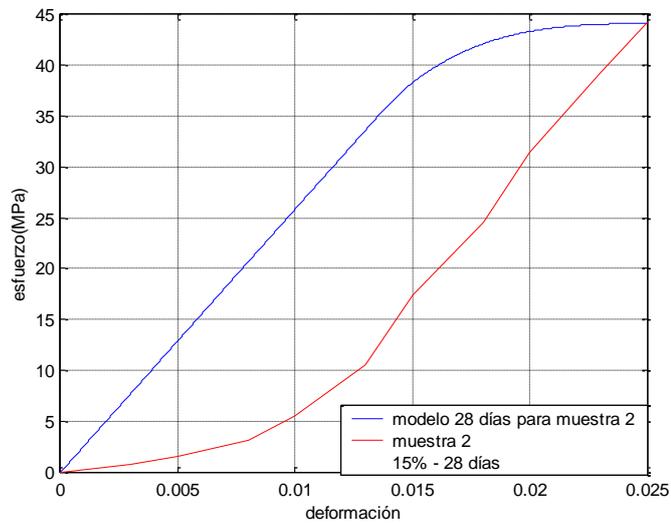


FIGURA B.11 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 28 DIAS.

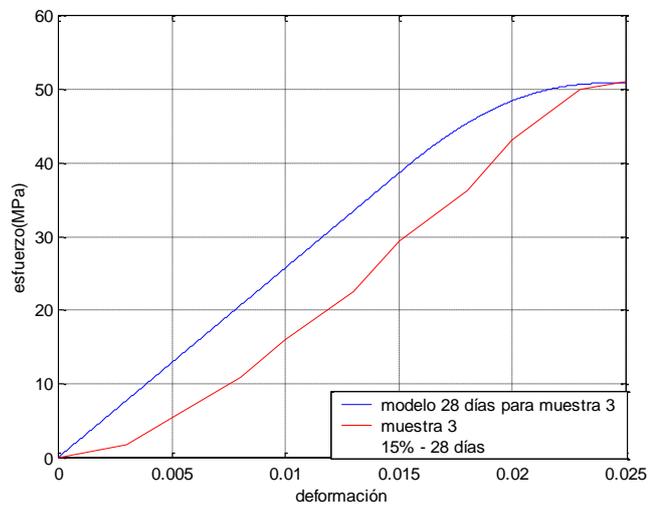


FIGURA B.12 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 15% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 28 DIAS.

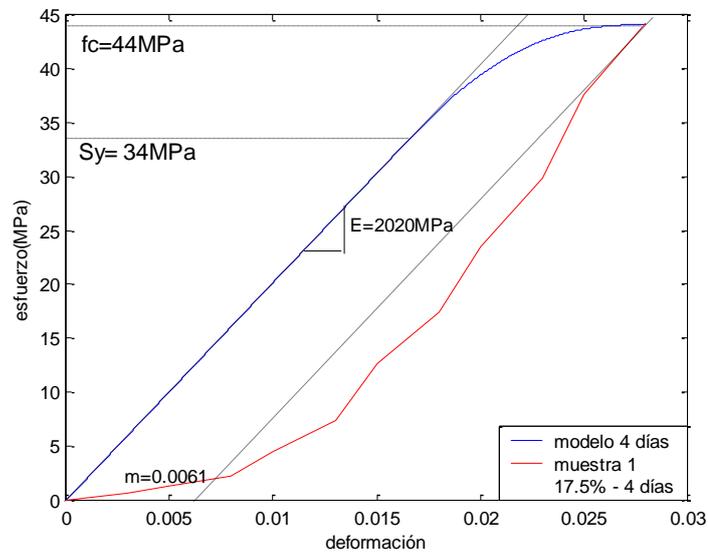


FIGURA B.13 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 4 DIAS.

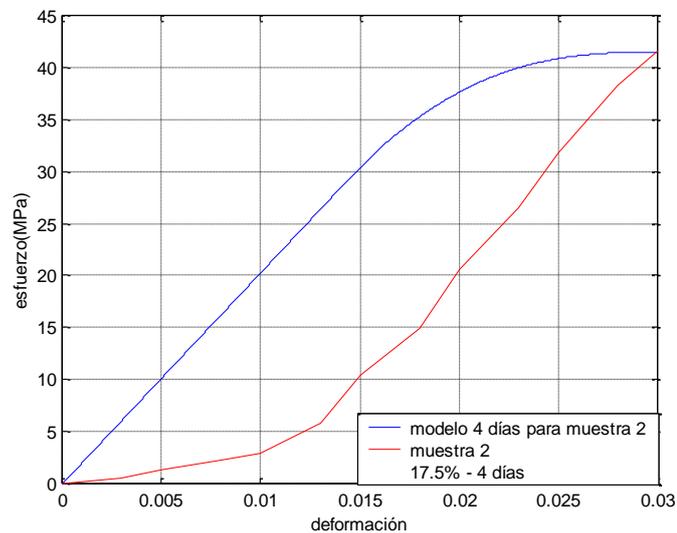


FIGURA B.14 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 4 DIAS.

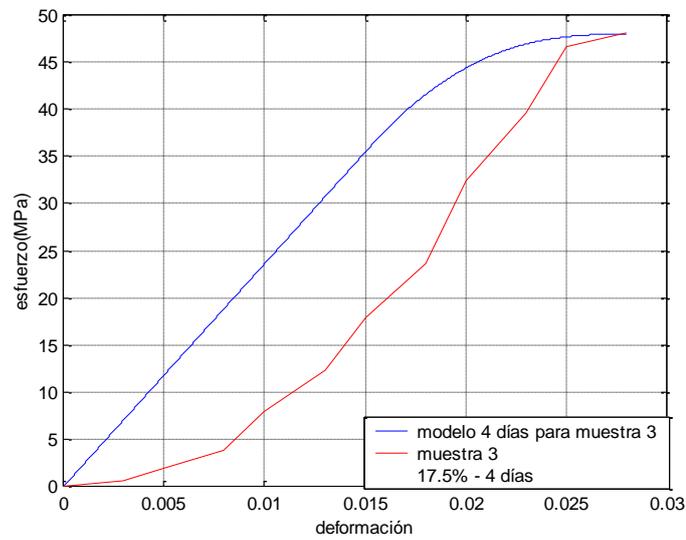


FIGURA B.15 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 4 DIAS.

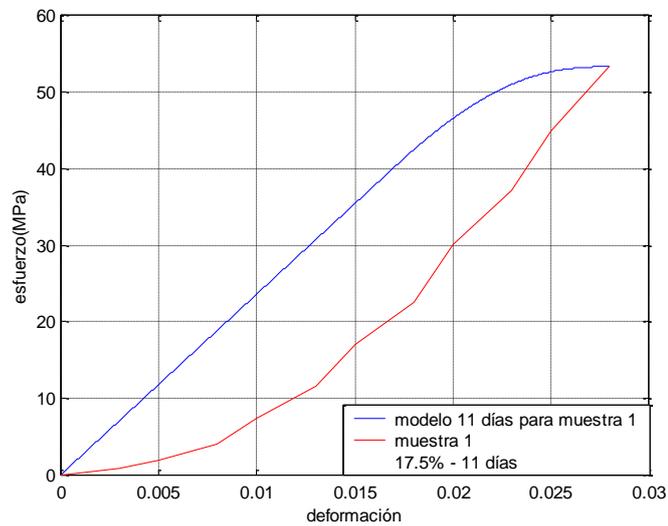


FIGURA B.16 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 11 DIAS.

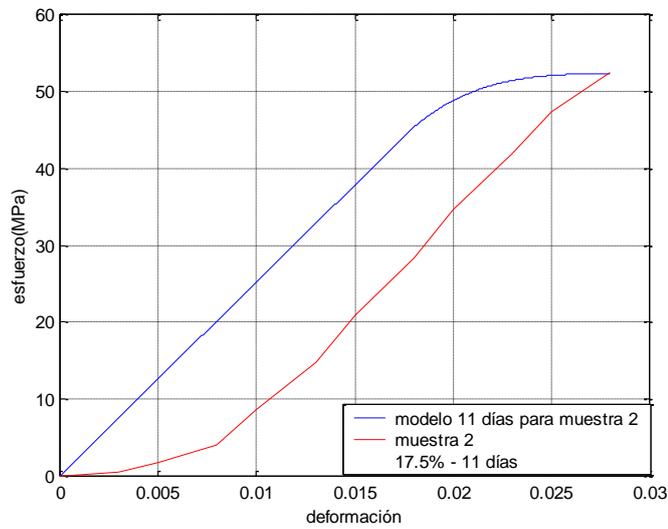


FIGURA B.17 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 11 DIAS.

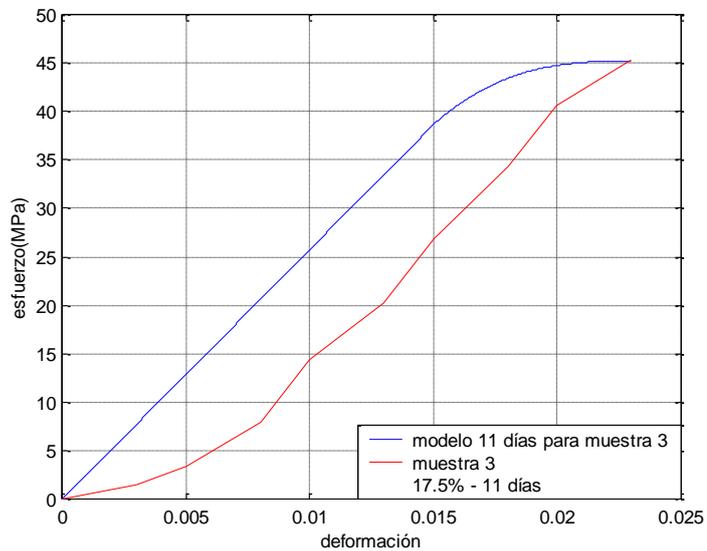


FIGURA B.18 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 11 DIAS.

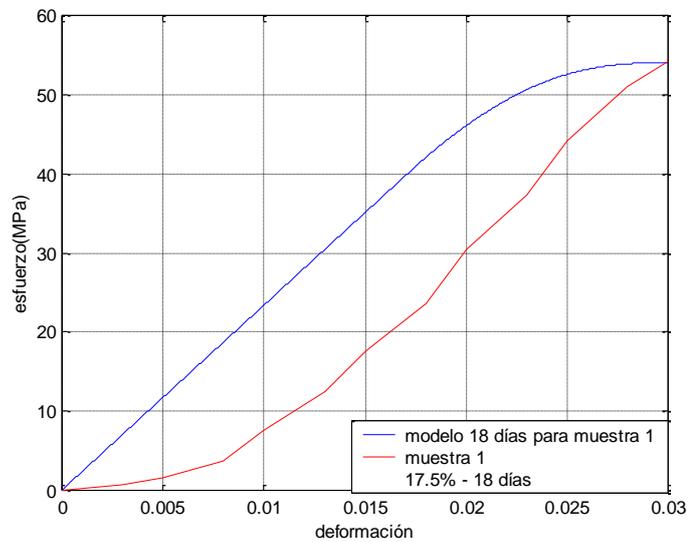


FIGURA B.19 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 18 DIAS.

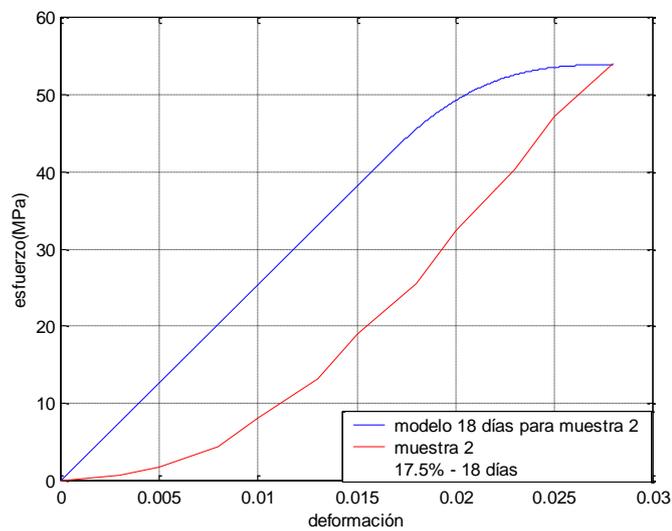


FIGURA B.20 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 18 DIAS.

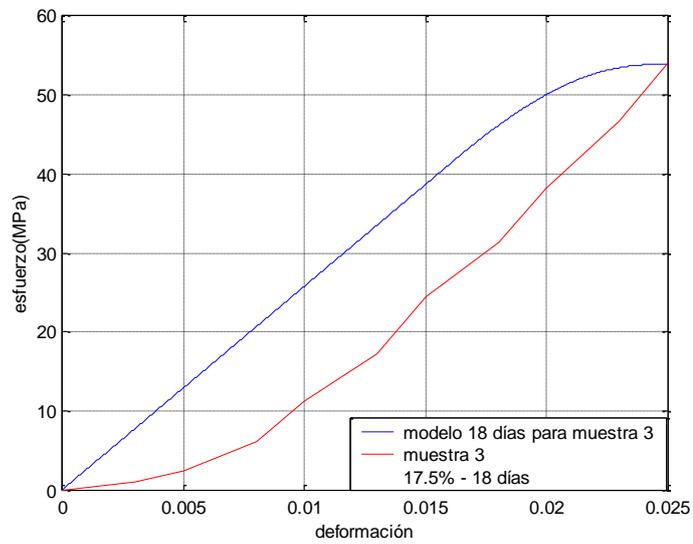


FIGURA B.21 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 18 DIAS.

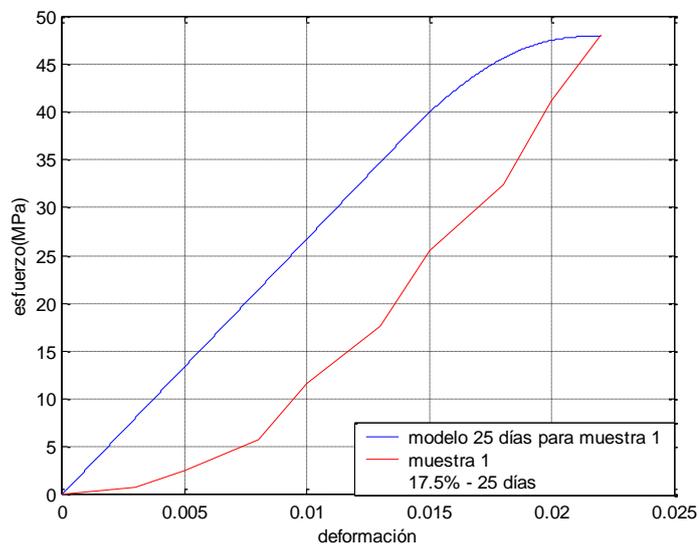


FIGURA B.22 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 1 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 25 DIAS.

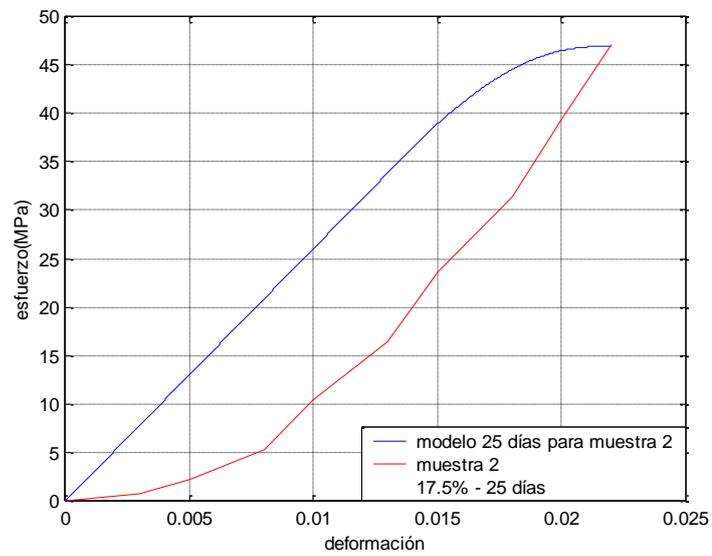


FIGURA B.23 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 2 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 25 DIAS.

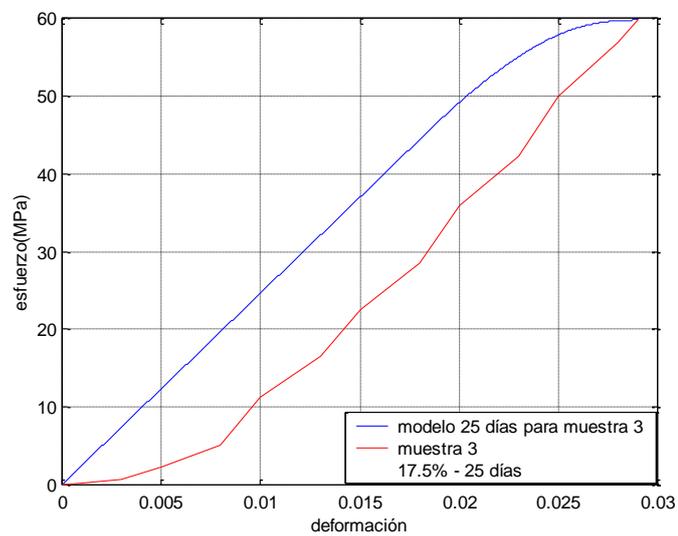


FIGURA B.24 MODELO DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACION UNITARIA DE LA MUESTRA 3 CON 17.5% DE ADICION DE LIMOLITA CON CURADO A LOS 25 DIAS.

APÉNDICE C

TABLAS ESTADÍSTICAS

Tabla D(a) Valores de F_{α}

v_1 - Grados de libertad del numerador	v_2 - Grados de libertad del denominador																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18.50	19.00	19.20	19.20	19.30	19.30	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.40	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
3	10.10	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.38	2.38	2.30	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.93
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

FIGURA C.1. TABLA DE FISHER PARA $\alpha=0.05$ [12].

$\nu_1 = \text{Grados de libertad del numerador}$

$\nu_2 = \text{Grados de libertad del denominador}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	4.052	5.000	5.403	5.625	5.764	5.859	5.928	5.982	6.023	6.056	6.106	6.157	6.209	6.235	6.261	6.287	6.313	6.339	6.366
2	98.50	99.00	99.20	99.20	99.30	99.30	99.40	99.40	99.40	99.40	99.40	99.40	99.40	99.50	99.50	99.50	99.50	99.50	99.50
3	34.10	30.80	29.50	28.70	28.20	27.90	27.70	27.50	27.30	27.20	27.10	26.90	26.70	26.60	26.50	26.40	26.30	26.20	26.10
4	21.20	18.00	16.70	16.00	15.50	15.20	15.00	14.80	14.70	14.50	14.40	14.20	14.00	13.90	13.80	13.70	13.60	13.50	13.50
5	16.30	13.30	12.10	11.40	11.00	10.70	10.50	10.30	10.20	10.10	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
6	13.70	10.90	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
7	12.20	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
8	11.30	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.83
9	10.60	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
10	10.00	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.70	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.19	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
19	8.19	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.86	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.53	2.45	2.36	2.27	2.17
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38
∞	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00

FIGURA C.2 TABLA DE FISHER PARA $\alpha=0.01$ [12].

**Critical Values of the
Studentized Range Statistic¹**

df _{WG}	α	Number of Groups									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	.05	3.64	4.60	5.22	5.67	6.03	6.33	6.58	6.80	6.99	
	.01	5.70	6.98	7.80	8.42	8.91	9.32	9.67	9.97	10.24	
6	.05	3.46	4.34	4.90	5.30	5.63	5.90	6.12	6.32	6.49	
	.01	5.24	6.33	7.03	7.56	7.97	8.32	8.61	8.87	9.10	
7	.05	3.34	4.16	4.68	5.06	5.36	5.61	5.82	6.00	6.16	
	.01	4.95	5.92	6.54	7.01	7.37	7.68	7.94	8.17	8.37	
8	.05	3.26	4.04	4.53	4.89	5.17	5.40	5.60	5.77	5.92	
	.01	4.75	5.64	6.20	6.62	6.96	7.24	7.47	7.68	7.86	
9	.05	3.20	3.95	4.41	4.76	5.02	5.24	5.43	5.59	5.74	
	.01	4.60	5.43	5.96	6.35	6.66	6.91	7.13	7.33	7.49	
10	.05	3.15	3.88	4.33	4.65	4.91	5.12	5.30	5.46	5.60	
	.01	4.48	5.27	5.77	6.14	6.43	6.67	6.87	7.05	7.21	
11	.05	3.11	3.82	4.26	4.57	4.82	5.03	5.20	5.35	5.49	
	.01	4.39	5.15	5.62	5.97	6.25	6.48	6.67	6.84	6.99	
12	.05	3.08	3.77	4.20	4.51	4.75	4.95	5.12	5.27	5.39	
	.01	4.32	5.05	5.50	5.84	6.10	6.32	6.51	6.67	6.81	
13	.05	3.06	3.73	4.15	4.45	4.69	4.88	5.05	5.19	5.32	
	.01	4.26	4.96	5.40	5.73	5.98	6.19	6.37	6.53	6.67	
14	.05	3.03	3.70	4.11	4.41	4.64	4.83	4.99	5.13	5.25	
	.01	4.21	4.89	5.32	5.63	5.88	6.08	6.26	6.41	6.54	
15	.05	3.01	3.67	4.08	4.37	4.59	4.78	4.94	5.08	5.20	
	.01	4.17	4.84	5.25	5.56	5.80	5.99	6.16	6.31	6.44	
16	.05	3.00	3.65	4.05	4.33	4.56	4.74	4.90	5.03	5.15	
	.01	4.13	4.79	5.19	5.49	5.72	5.92	6.08	6.22	6.35	
17	.05	2.98	3.63	4.02	4.30	4.52	4.70	4.86	4.99	5.11	
	.01	4.10	4.74	5.14	5.43	5.66	5.85	6.01	6.15	6.27	
18	.05	2.97	3.61	4.00	4.28	4.49	4.67	4.82	4.96	5.07	
	.01	4.07	4.70	5.09	5.38	5.60	5.79	5.94	6.08	6.20	
19	.05	2.96	3.59	3.98	4.25	4.47	4.65	4.79	4.92	5.04	
	.01	4.05	4.67	5.05	5.33	5.55	5.73	5.89	6.02	6.14	
20	.05	2.95	3.58	3.96	4.23	4.45	4.62	4.77	4.90	5.01	
	.01	4.02	4.64	5.02	5.29	5.51	5.69	5.84	5.97	6.09	
24	.05	2.92	3.53	3.90	4.17	4.37	4.54	4.68	4.81	4.92	
	.01	3.96	4.55	4.91	5.17	5.37	5.54	5.69	5.81	5.92	
30	.05	2.89	3.49	3.85	4.10	4.30	4.46	4.60	4.72	4.82	
	.01	3.89	4.45	4.80	5.05	5.24	5.40	5.54	5.65	5.76	
40	.05	2.86	3.44	3.79	4.04	4.23	4.39	4.52	4.63	4.73	
	.01	3.82	4.37	4.70	4.93	5.11	5.26	5.39	5.50	5.60	
60	.05	2.83	3.40	3.74	3.98	4.16	4.31	4.44	4.55	4.65	
	.01	3.76	4.28	4.59	4.82	4.99	5.13	5.25	5.36	5.45	
120	.05	2.80	3.36	3.68	3.92	4.10	4.24	4.36	4.47	4.56	
	.01	3.70	4.20	4.50	4.71	4.87	5.01	5.12	5.21	5.30	
∞	.05	2.77	3.31	3.63	3.86	4.03	4.17	4.29	4.39	4.47	
	.01	3.64	4.12	4.40	4.60	4.76	4.88	4.99	5.08	5.16	

FIGURA C.3. VALORES CRITICOS PARA LA HSD DE TUKEY [15].

APÉNDICE D

COMPARACIONES DE LOS TRATAMIENTOS CON EL CONTROL.

El estadístico tabulado para calcular intervalos de confianza simultáneos de 100 (1- α)% para las diferencias entre las medias de tratamientos individuales con el tratamiento de control $\mu_i - \mu_c$, utilizando el procedimiento de Dunnett, se basa en el mismo estadístico usado en las comparaciones múltiples con el mejor tratamiento. Se evaluará por cada día de ensayo cuál es el mejor tratamiento comparando con dos controles: Cemento Portland Tipo I y Cemento Portland Tipo IV.

Comparación con el Cemento Portland Tipo I

Primero vemos si nuestros datos cumplen una distribución normal y una varianza homogénea, ya que ANOVA se basa en estas suposiciones. La figura D.1, D.2 y D.3 muestran los resultados del análisis previo.

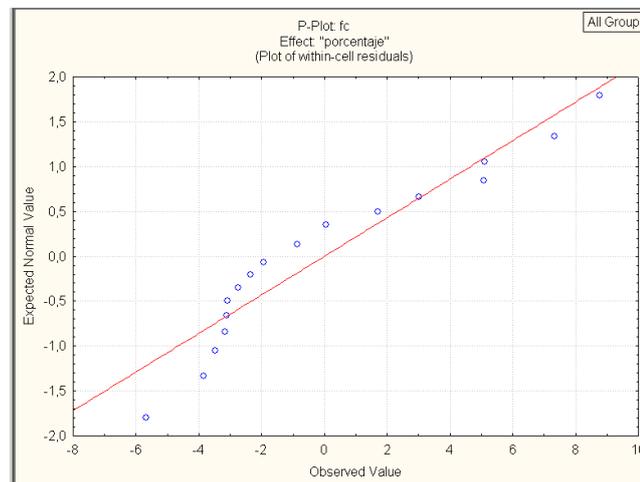


FIGURA D.1. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 7 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

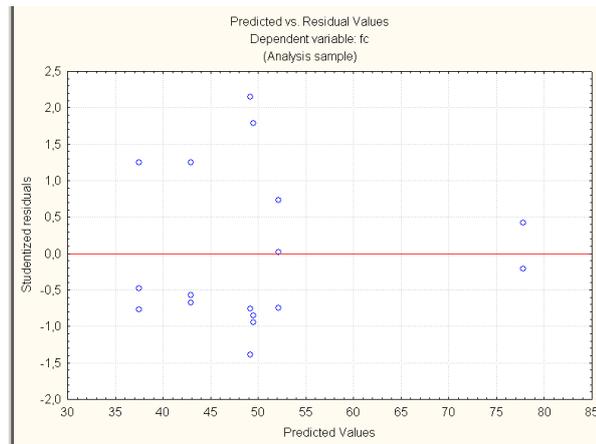


FIGURA D.2. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 7 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet1 in Imported from C:\Docu
Marked effects are significant at p < ,05000

Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
fc	27,95024	5	5,590047	226,8850	12	18,90708	0,295659	0,906150

FIGURA D.3. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 7 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I

Según los gráficos del análisis previo vemos que hay varianza balanceada y la distribución es normal. La prueba de Brown-Forsythe es la más robusta que la de Levene. Como la probabilidad es mayor a 0.05 se acepta la hipótesis nula de que las varianzas son iguales. Ahora podemos aplicar el método de Dunnet para ver cuales medias son menores que el control. La figura D.4 y D.5 muestra los resultados del análisis.

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet1 in Imported from C Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	47753,17	1	47753,17	1907,118	0,000000
porcentaje	2916,11	5	583,22	23,292	0,000009
Error	300,47	12	25,04		

FIGURA D.4. ANALISIS DE VARIANZA PARA 7 DIAS COMPARANDO CON EL CEMENTO TIPO I.

Dunnett test; variable fc (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Setting...		
Dunnett test; variable fc (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 28,670, df = 12,000		
Cell No.	porcentaje	(1)
1	0	65,977
2	5	0,999981
3	10	0,999969
4	15	0,999926
5	20	0,999981
6	25	0,999966

FIGURA D.5. METODO DE DUNNET PARA 7 DIAS CON CEMENTO TIPO I

Como podemos observar no existe diferencia significativa entre el control con todos. Por lo tanto no hay mejor tratamiento que el control.

Lo mismo aplicamos para 14, 21 y 28 días. Los resultados a los 14 días comparando con el Tipo I se muestran en las figuras D.6, D.7, D.8, D.9 y D.10.

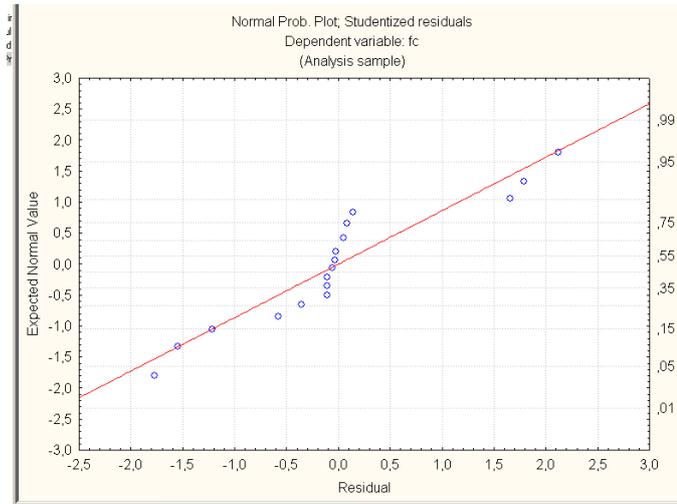


FIGURA D.6. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 14 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

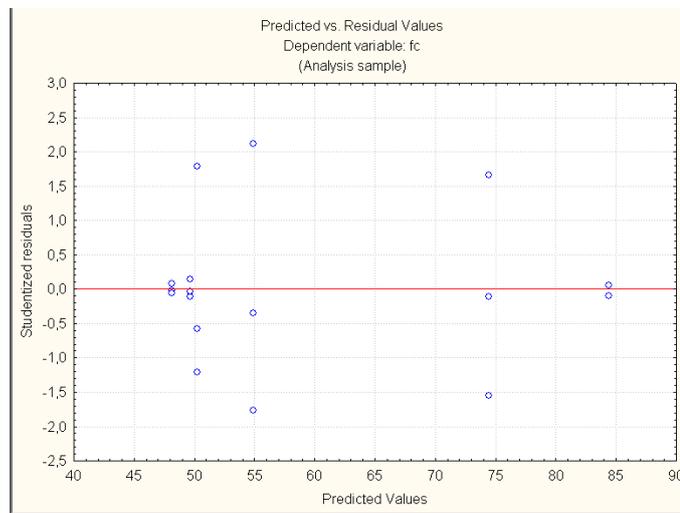


FIGURA D.7. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 14 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet2 in Imported from C:\Docu Marked effects are significant at p < ,05000								
Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
fc	160,4332	5	32,08663	242,6501	12	20,22084	1,586810	0,237006

**FIGURA D.8. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 14 DIAS
COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I**

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet2 in Imported Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	65413,13	1	65413,13	1419,612	0,000000
porcentaje	3511,39	5	702,28	15,241	0,000077
Error	552,94	12	46,08		

**FIGURA D.9. ANALISIS DE VARIANZA PARA 14 DIAS COMPARANDO
CON EL CEMENTO TIPO I.**

Dunnett test; variable fc (Sheet2 in Imported from C:\Documents and Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 46,078, df = 12,000		
Cell No.	porcentaje	{1}
1	0	74,103
2	5	0,815686
3	10	0,999947
4	15	0,999979
5	20	0,999978
6	25	0,999980

**FIGURA D.10. METODO DE DUNNET PARA 14 DIAS COMPARANDO
CON CEMENTO TIPO I**

De las figuras anteriores se puede visualizar que no existe diferencia significativa con la adición de 5%, 10%, 15%, 20% y 25%. Por lo que no hay mejor tratamiento que el control.

Para los 21 días, las figuras D.11, D.12, D.13, D.14 y D.15 muestran el resultado del análisis.

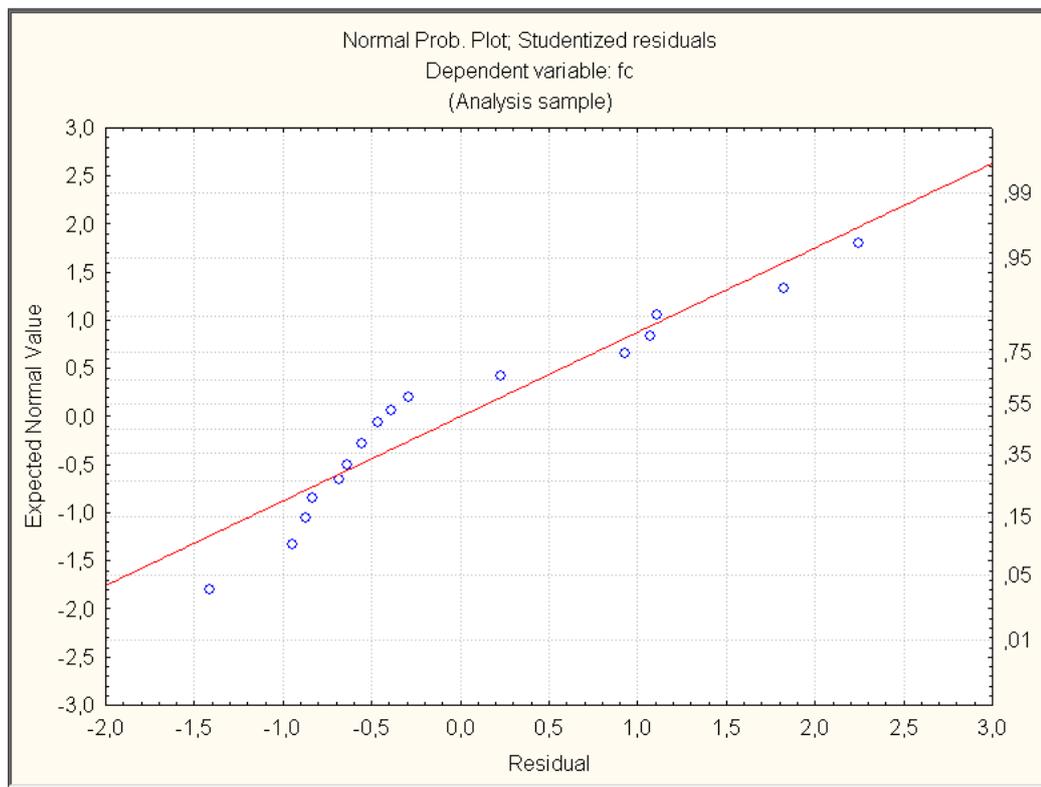


FIGURA D.11. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

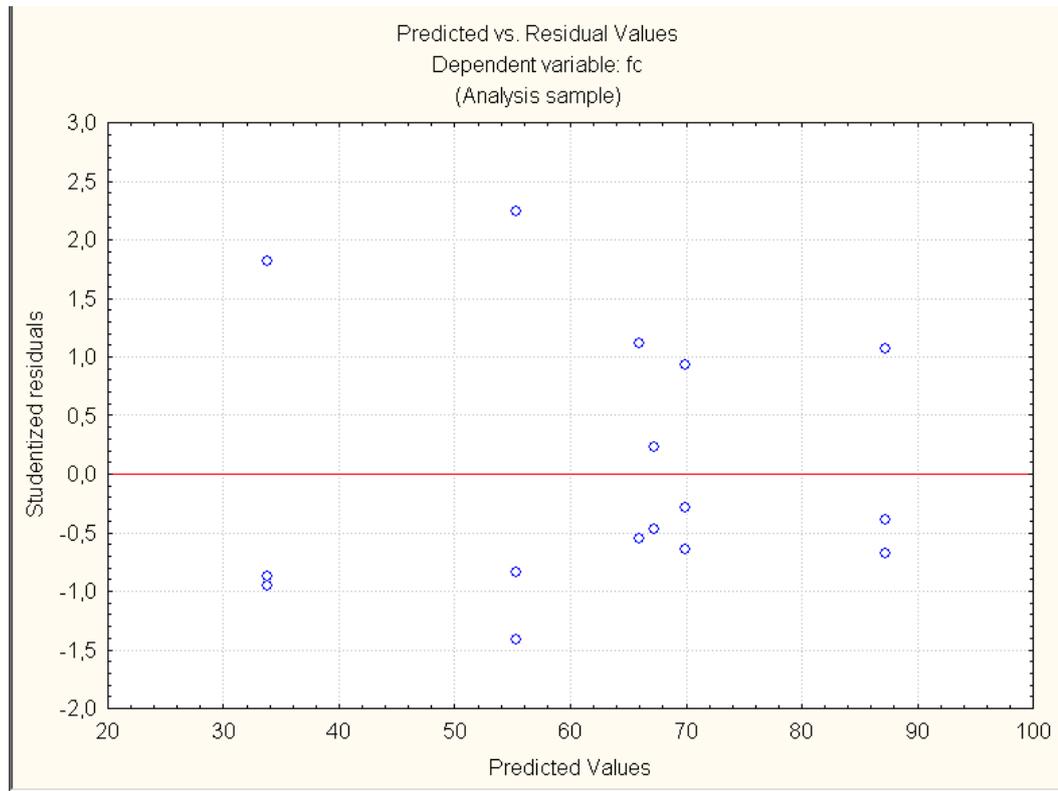


FIGURA D.12. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet3 in Imported from C:\Docume								
Marked effects are significant at p < ,05000								
Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
fc	46,68637	5	9,337274	368,9279	12	30,74400	0,303711	0,901360

FIGURA D.13. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet3 in Imported fr Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	72022,40	1	72022,40	1850,803	0,000000
porcentaje	4714,60	5	942,92	24,231	0,000007
Error	466,97	12	38,91		

FIGURA D.14. ANALISIS DE VARIANZA PARA 21 DIAS COMPARANDO CON EL CEMENTO TIPO I.

Dunnnett test; variable fc (Sheet3 in Imported from C:\Documents an Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 35,283, df = 12,000	
Cell No.	porcentaje {1}
1	0
2	5 0,996402
3	10 0,125452
4	15 0,999980
5	20 0,999198
6	25 0,999982

FIGURA D.15. METODO DE DUNNET PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I

De las figuras anteriores se puede apreciar que no existe ningún tratamiento mejor que el control.

Por último, comparando a los 28 días las figuras D.16, D.17, D.18, D.19 y D.20 muestran los resultados obtenidos.

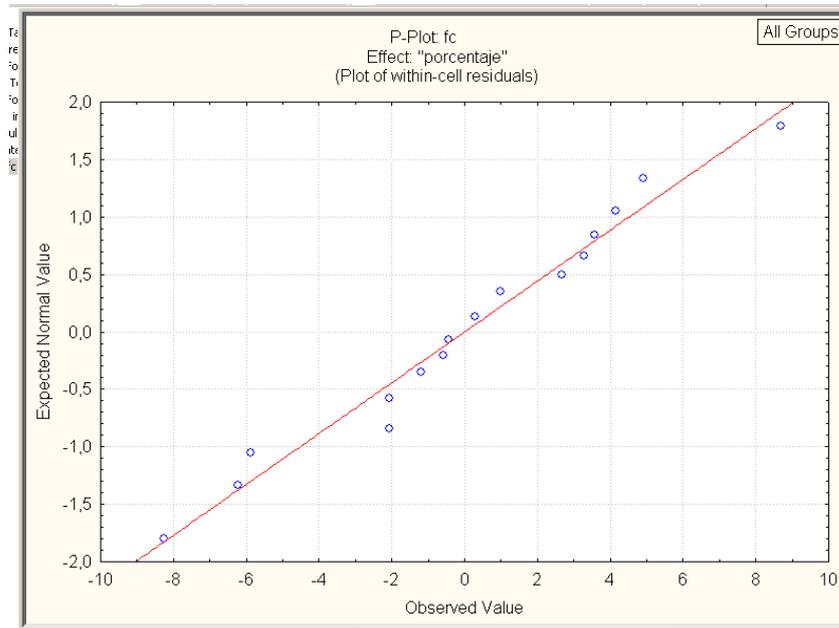


FIGURA D.16. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

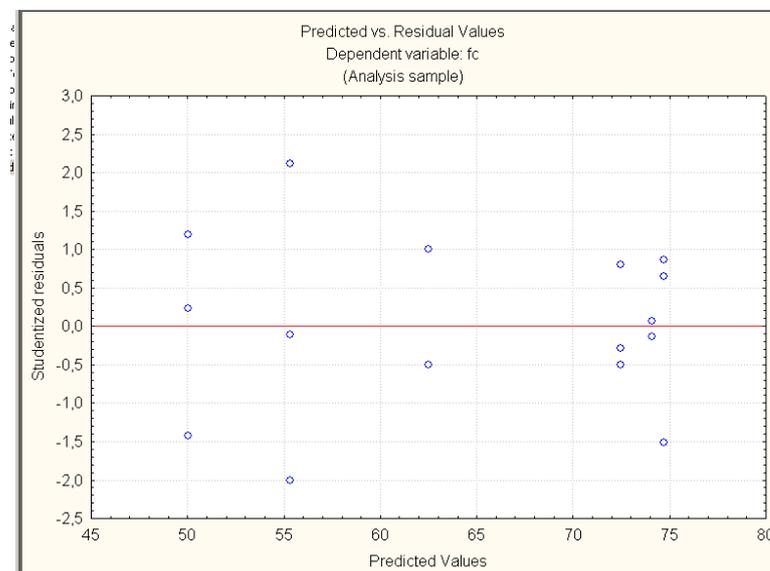


FIGURA D.17. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet4 in Imported from C:\Docum Marked effects are significant at p < ,05000								
Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
fc	50,65704	5	10,13141	158,1210	12	13,17675	0,768885	0,589783

**FIGURA D.18. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 28 DIAS
COMPARANDO CON CEMENTO TIPO I.**

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet4 in Imported Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	75716,66	1	75716,66	2976,145	0,000000
porcentaje	1670,79	5	334,16	13,135	0,000161
Error	305,29	12	25,44		

**FIGURA D.19. ANALISIS DE VARIANZA PARA 28 DIAS COMPARANDO
CON EL CEMENTO TIPO I.**

Dunnett test; variable fc (Sheet4 in Imported from C:\Documents and Setting...		
Dunnett test; variable fc (Sheet4 in Imported from C:\Documents and Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 25,441, df = 12,000		
Cell No.	porcentaje	{1}
1	0	84,363
2	5	0,999477
3	10	0,999865
4	15	0,999982
5	20	0,999981
6	25	0,999981

**FIGURA D.20. METODO DE DUNNET PARA 28 DIAS COMPARANDO
CON CEMENTO TIPO I**

De las gráficas anteriores, se ve que no existen diferencias significativas entre el Cemento Tipo I con 5%, 10%, 15%, 20% y 25% de adición de limolita.

Comparación con el Cemento Portland Tipo IV.

Ahora vamos a hacer el mismo análisis anterior con los porcentajes de 5%, 10%, 15%, 20% y 25% comparando con el Cemento Portland Tipo IV.

Para los 7 días de curado, las figuras D.21, D.22, D.23, D.24 y D.25 muestran los resultados.

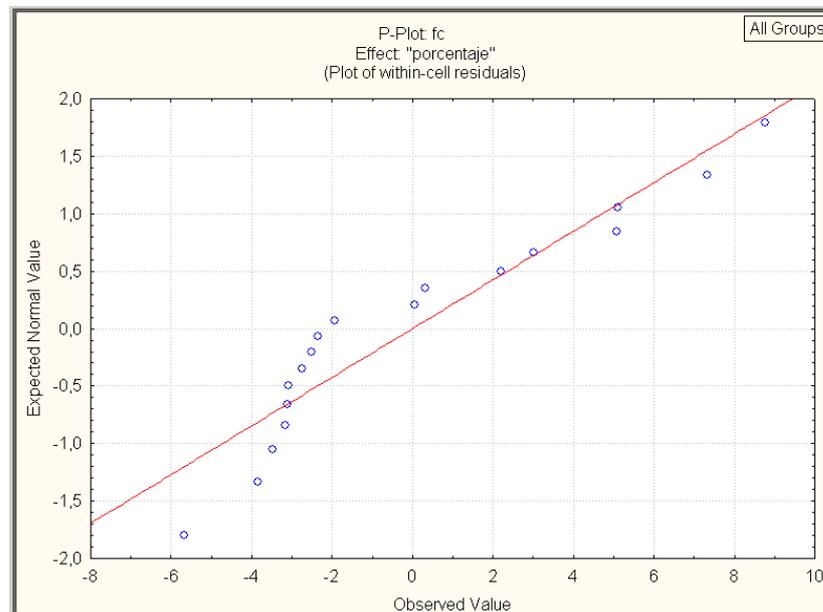


FIGURA D.21. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 7 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

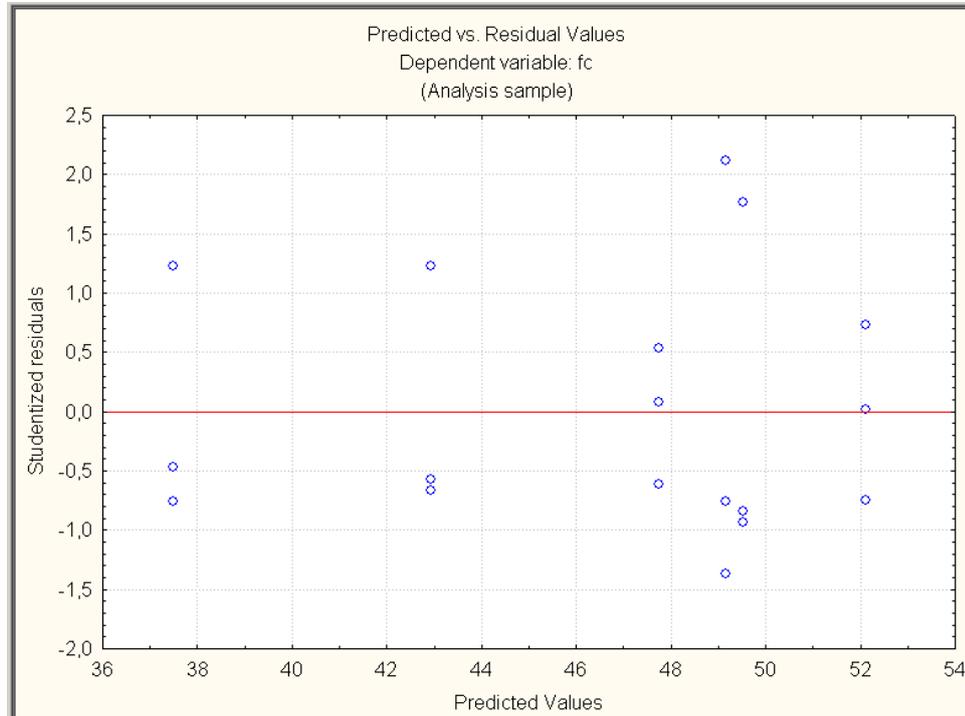


FIGURA D.22. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 7 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet1 in Imported from ...)							
Marked effects are significant at p < ,05000							
Variable	df	MS	SS	df	MS	F	p
	Effect	Effect	Error	Error	Error		
fc	5	4,173220	226,6683	12	18,88902	0,220934	0,946580

FIGURA D.23. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 7 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\...)					
Sigma-restricted parameterization					
Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	38915,76	1	38915,76	1519,290	0,000000
porcentaje	430,50	5	86,10	3,361	0,039594
Error	307,37	12	25,61		

FIGURA D.24. ANALISIS DE VARIANZA PARA 7 DIAS COMPARANDO CON EL CEMENTO TIPO IV.

Dunnnett test; variable fc (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\...)		
Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control)		
Error: Between MS = 25,614, df = 12,000		
Cell No.	porcentaje	{6}
1	5	0,999640
2	10	0,714255
3	15	0,401222
4	20	0,988091
5	25	0,679358
6	tipo IV	

FIGURA D.25. METODO DE DUNNET PARA 7 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV

De los resultados obtenidos vemos que no hay diferencia significativa si deseamos saber los mejores tratamientos que el control. Por ende, se ve que a los 7 días no hay una mejora en la resistencia.

Ahora analizaremos a los 14 días, las figuras D.26, D.27, D.28, D.29 y D.30 muestran los resultados obtenidos.

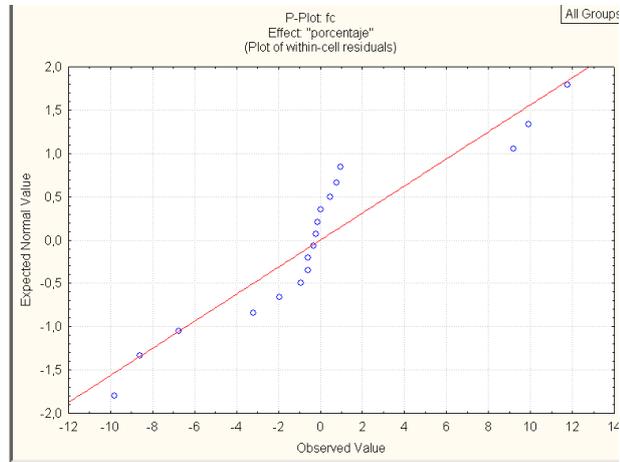


FIGURA D.26. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 14 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

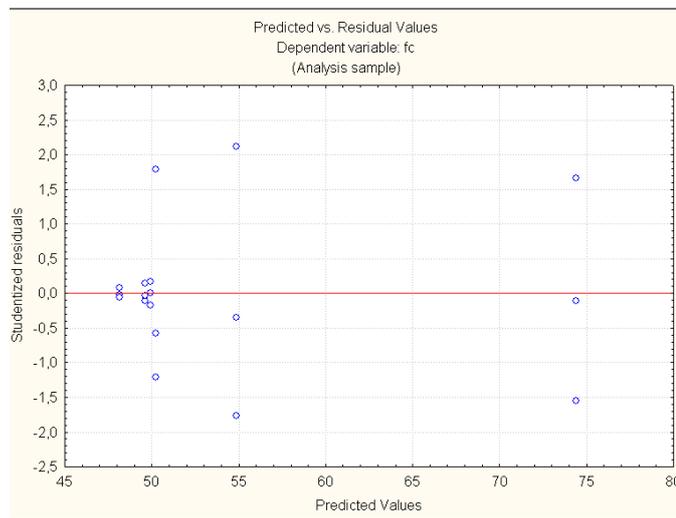


FIGURA D.27. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 14 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet2 in Imported from C:\Docume Marked effects are significant at p < ,05000								
Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
fc	154,5894	5	30,91789	242,7492	12	20,22910	1,528386	0,252959

D.28. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 14 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet2 in Imported Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	53560,07	1	53560,07	1159,682	0,000000
porcentaje	1499,84	5	299,97	6,495	0,003816
Error	554,22	12	46,19		

FIGURA D.29. ANALISIS DE VARIANZA PARA 14 DIAS COMPARANDO CON EL CEMENTO TIPO IV.

Dunnett test; variable fc (Sheet2 in Imported from C:\Documents and Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 46,185, df = 12,000					
Cell No.	porcentaje	{6}			
1	5	0,001778			
2	10	0,475451			
3	15	0,849554			
4	20	0,817857			
5	25	0,910731			
6	tipo IV				

FIGURA D.30. METODO DE DUNNET PARA 14 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV

De los resultados obtenidos vemos que hay diferencia significativa entre el 5% de adición de limolita y el tipo IV por lo que se deduce que mejor es el cemento con adición de 5% de limolita para los 14 días.

Para los 21 días se muestran los siguientes resultados.

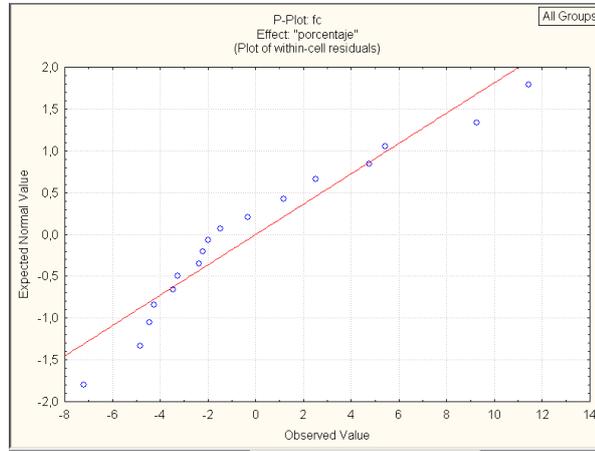


FIGURA D.31. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

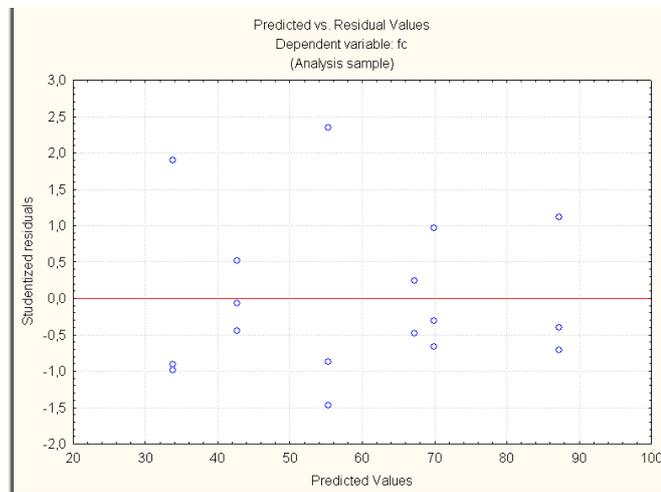


FIGURA D.32. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet3 in Imported from C:\Documents and Settings\Fabio								
Marked effects are significant at p < ,05000								
Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
fc	55,15547	5	11,03109	325,1249	12	27,09375	0,407145	0,834833

D.33. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet3 in Imported fr					
Sigma-restricted parameterization					
Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	63469,26	1	63469,26	1770,132	0,000000
porcentaje	5686,19	5	1137,24	31,717	0,000002
Error	430,27	12	35,86		

FIGURA D.34. ANALISIS DE VARIANZA PARA 21 DIAS COMPARANDO CON EL CEMENTO TIPO IV.

Dunnnett test; variable fc (Sheet3 in Imported from C		
Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control)		
Error: Between MS = 35,856, df = 12,000		
Cell No.	porcentaje	{6}
1	5	0,000279
2	10	0,000024
3	15	0,045081
4	20	0,000651
5	25	0,997918
6	tipo IV	

FIGURA D.35. METODO DE DUNNET PARA 21 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

De los resultados se ve que existe diferencia significativa entre el tipo IV con 5%, 10%, 15% y 20%. Pero si vemos los valores más pequeños de p de 5% y 10% vemos que son los más eficientes según el análisis.

Por último se presentan los resultados a los 28 días.

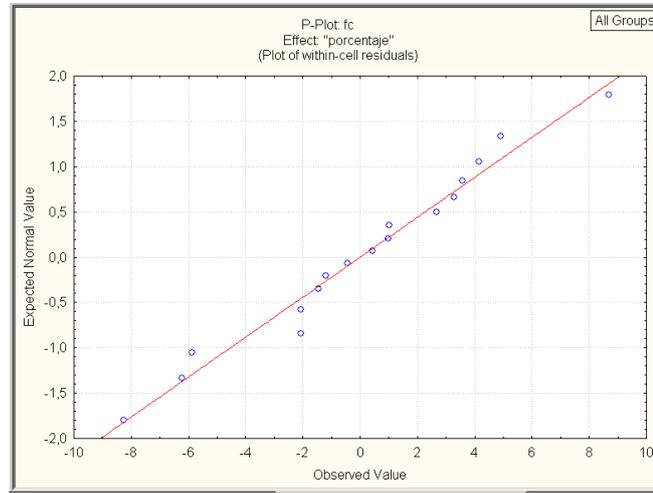


FIGURA D.36. GRAFICO DE PROBABILIDAD NORMAL QUE MUESTRA LOS RESIDUOS AJUSTANDOSE A LA RECTA PARA 28 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

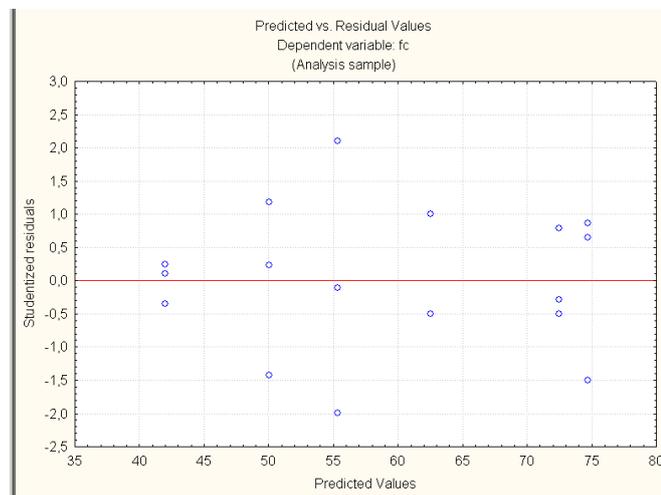


FIGURA D.37. GRAFICO DE LAS MEDIAS ESTIMADAS VS RESIDUOS DE STUDENT PARA 28 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Brown-Forsythe Test of Homog. of Variances (Sheet4 in Imported from C:\Documents and Settings\user\My Recent Documents\...)								
Marked effects are significant at p < ,05000								
Variable	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
fc	43,43682	5	8,687363	159,5017	12	13,29180	0,653588	0,664797

D.38. PRUEBA DE BROWN-FORSYTHE PARA 28 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

Univariate Tests of Significance for fc (Sheet4 in Imported Sigma-restricted parameterization Type I decomposition)					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	63730,45	1	63730,45	2482,234	0,000000
porcentaje	2468,95	5	493,79	19,233	0,000024
Error	308,10	12	25,67		

FIGURA D.39. ANALISIS DE VARIANZA PARA 28 DIAS COMPARANDO CON EL CEMENTO TIPO IV.

Dunnett test; variable fc (Sheet4 in Imported from Probabilities for Post Hoc Tests (M>Control) Error: Between MS = 25,675, df = 12,000)			
Cell No.	porcentaje	{6}	
1	5	0,000031	
2	10	0,000040	
3	15	0,123616	
4	20	0,000708	
5	25	0,014193	
6	tipo IV		

FIGURA D.40. METODO DE DUNNET PARA 28 DIAS COMPARANDO CON CEMENTO TIPO IV.

De los resultados obtenidos a los 28 días nos damos cuenta que los mejores son el 5%, 10%, 20% y 25%. Pero si analizamos las probabilidades el que tiene menor valor de p son los más eficientes; es decir, 5% y 10%.

En general, en la comparación del Cemento Portland Tipo I con los de adición de limolita vemos que no hay mejor tratamiento o porcentaje que tenga la resistencia a la compresión alta; en cambio, para el cemento tipo IV vemos que los mejores resultados se obtienen con 5% y 10% de adición de limolita al tipo I, a los 21 y 28 días respectivamente. Se concluye que añadiendo 5% y 10% de limolita al tipo I aumenta la resistencia a la compresión con respecto al tipo IV.

BIBLIOGRAFIA

1. Kosmatka S. / Kerkhoff B. / Panarese W., *Design and Control of Concrete Mixtures*, Portland Cement Association EB101, 7ª Edición, Canadá 2002, pp 1-6.
2. Wolker Hollis N., "Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete: A Petrographic Manual", www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/04150/, septiembre del 2008.
3. Bellis Mary., "The History of Concrete and Cement", www.inventors.about.com/library/inventors/blconcrete.htm, septiembre del 2008.
4. Taylor H. / Fernandez J. Antonio. / Montemayor M. / Romero F., *La Química de los Cementos*, Urmo S.A., España 1978, pp 13-17.
5. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, AC., "Revista Construcción y Tecnología", www.imcyc.com/revista/1999/mayo/curado1.htm, agosto del 2008.

6. Solís Romel, Moreno Eric., “Influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión del concreto en clima cálido subhúmedo”, www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen9/, septiembre del 2008.
7. Power T.C., *A discussion of a cement hydration in relation to the Curing of Concrete*, Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin 25, Washington 1947, pp 187- 188.
8. Silva P., “Guión de Reconocimiento de Rocas”, web.usal.es/~epavila/webrocas/rockini.html#P0, septiembre del 2008.
9. Folk R., *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphill Publishing Company, Austin Texas 1980, pp 22-23.
10. Ferré R., Rius X., “Introducción al Diseño Estadístico de Experimentos”, www.quimica.urv.es/quimio/general, septiembre del 2008.
11. Reyes S., “Diseño de Experimentos”, www.monografias.com, octubre del 2008.
12. Johnson R., *Probabilidad y Estadística para Ingenieros de Miller y Freund*, Prentice-Hall, 5ta. Edición, pp 442-452, México 1997.
13. Nava L., “Diseño de Experimentos (Diseño Factorial)”, www.webdelprofesor.ula.ve/economia/navalu/docencia, septiembre del 2008.

14. González M., “Características de los Cementos Portland en Norteamérica”, Asocem, pp 2-13, Lima 1997.
15. Pearson and H.O. Hartley, Biometrika tables for statisticians, 3ra. Edición, Volumen 1, Cambridge University Press, 1970.
16. Andrade J., Plasticity Modeling and Computation, Lecture Notes, 2008 (handed out in class).