ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Determinar la Variación de la Resistencia a la Compresión del Cemento Tipo I Curado en Aire y en Agua Mediante Modelos Matemáticos y Experimentales"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Henry David Arámbulo Ochoa

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres, a mi hermano, a mi Director de Tesis Ing. Mauricio Cornejo y a todos los profesores que brindaron su colaboraron en la realización del presente trabajo.

DEDICATORIA

EL PRESENTE TRABAJO ESTÁ DEDICADO A MIS PADRES Y HERMANO QUE SIEMPRE ME HAN BRINDADO SU APOYO.
A LOS PROFESORES QUE APORTARON SUS CONOCIMIENTOS
PARA MI FORMACIÓN ACADÉMICA.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

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

Ing. Mauricio Cornejo M.
DIRECTOR DE TESIS

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA
ESPOL
CIB-ESPOL

Ing. Rodrigo Perugachi B..
VOCAL

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"

Henry David Arámbulo Ochoa

RESUMEN

En la actualidad existen diferentes tipos de cementos que son productos de varias investigaciones realizadas en diferentes ciudades con el objetivo de cumplir con las exigencias del mercado que cada día son mayores

Este trabajo fue realizado en la ciudad de Guayaquil y se basa en determinar la variación de la resistencia a la compresión del cemento tipo I curado en aire y en agua mediante modelos matemáticos y estadísticos con el objetivo de tener valores de comparación que permitan conocer en otras investigaciones cual es el incremento o disminución de la resistencia a la compresión al agregar ciertos aditivos al cemento tipo I.

También se realizó el análisis al cemento tipo IV curado en aire y en agua para poder comparar los resultados con el cemento tipo I. y saber en que días y en que condiciones de curado logramos nuestras mayores resistencias

El cemento tipo I se lo adquirió en la fábrica de Holcim debido a que es un cemento sin aditivos y no es comercial, mientras que el cemento comercial tipo IV se lo adquirió en un local de venta de cemento. La realización de las pastas de cemento, curado y ensayos destructivos estuvo basada según la norma ASTM C 109.

Esta investigación se la realizó en dos etapas, la primera se basó en la experimentación y en el análisis estadístico de los datos obtenidos, mientras que en la segunda etapa se desarrolló un modelo teórico y su implementación en lenguaje de programación. Cuando se finalizaron las dos etapas, se realizó una comparación para determinar el ajuste entre las curvas del modelo teórico con las curvas obtenidas de los datos experimentales.

Mediante los diferentes análisis respectivos encontramos las ecuaciones características para los cementos tipo I y IV curados en aire y en agua. Estas ecuaciones encontradas fueron de tercer orden y son válidas en el intervalo de cero a veintiocho días.

Los esfuerzos obtenidos de los cementos tipo I y IV curados en agua son superiores a los curados en aire por lo tanto se puede afirmar que realizando un curado en agua lograremos mejores resultados.

En el cemento tipo I curado en aire se obtuvo el mayor esfuerzo a los 14 días, mientras que curado en agua no existió diferencias significativas entre las medias de los días 14, 21 y 28 de curados, lo que significa que en estos días el esfuerzo es casi igual y en el cemento tipo IV curado en aire y en agua el mayor esfuerzo se obtuvo a los 14 y 21 días de curado respectivamente

Mediante la creación de un algoritmo se encontró una curva característica para cada día de curado que representa el comportamiento del cemento tipo I y IV curados en aire y en agua de cero a veintiocho días

INDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN……..II

ÍNDICE GENERAL……V

ABREVIATURAS……..……..……..VIII

SIMBOLOGÍA…….……...IX

ÍNDICE DE FIGURAS……X

ÍNDICE DE TABLAS……..XIII

INTRODUCCIÒN……1

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES……3

1.1. Planteamiento del problema……3

1.1.1. Justificación……..4

1.2. Objetivos……5

1.2.1. Objetivos generales……5

1.2.2. Objetivos específicos……..5

1.3. Metodología……7

1.4. Estructura de la tesis……10

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEORICO……13

2.1. Breve historia del cemento……13

2.2. Cemento portland ……...16

2.2.1. Tipos de cemento portland……..18

2.2.2. Endurecimiento del cemento portland……...21

2.3. Curado del cemento……29

2.4. Hormigón……..……31

2.4.1. Resistencia del hormigón a la compresión…….……31

2.5. Otros materiales en el hormigón……..…33

2.5.1. Cenizas volantes……..……33

2.5.2. Puzolana natural……..……34

2.5.3. Escoria……..……..35

2.5.4. Humo de sílice……..……36

2.5.5. Arcillas calcinadas……..……..38

2.6. Diseño Lineal…….……..38

2.7. Estado del arte de la modelación del cemento…….……52

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA……61

3.1. Recolección de datos……61

3.2. Diseño del experimento……61

3.3. Pruebas en laboratorio……...68

3.4. Experimentación……..68

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS……79

4.1. Tabulación de datos y resultados……79

4.2. Identificación de cambios de propiedades……..83

4.3. Modelación de los resultados obtenidos…….……..128

4.4. Validación de los resultados obtenidos…….……139

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES…….……149

5.1. Conclusiones……...…149

5.2. Recomendaciones…….……..151

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials.
E	Módulo de Elasticidad
Eprom	Módulo de Elasticidad Promedio
in	pulgada
Kgf	Kilogramo Fuerza
Lbf	Libra Fuerza
MatLab	Matrix Laboratory
mm^2	milímetro cuadrado
MPa	Mega Pascales
N	Newton
Pa	Pascales

SIMBOLOGÍA

A	Área
°C	Grados centígrados
Hr	Horas
g	gramos
ml	mililitros
P	Carga máxima
fm	Resistencia a la compresión
σ_u	Esfuerzo último
σ_y	Esfuerzo de fluencia
μ	Media
σ	Desviación estándar
σ^2	Varianza
χ^2	Ji cuadrada
F	Fisher
ε	Deformación
W	Shapiro & Wilk

ÍNDICE DE FIGURAS

Pag.

FIGURA 1.1 Metodología……..……..7
FIGURA 2.1 Esquema de la formación e hidratación del cemento portland……..…….22
FIGURA 2.2 Resistencia a la compresión del cemento puro en función del tiempo de curado……24
FIGURA 2.3 Resistencia a la compresión de hormigones con diferentes tipos de cementos ASTM……..27
FIGURA 2.4 Comparación ε_i con el residuo ei……39
FIGURA 2.5 Curva normal……40
FIGURA 2.6 Curvas normales con μ1=μ2 y σ1< σ2……41
FIGURA 2.7 Distribuciones típicas F ……..……43
FIGURA 2.8 Valores tabulados de la distribución F ……..…..44
FIGURA 2.9 Curva esfuerzo deformación……..50
FIGURA 3.1 Curva esfuerzo deformación……..64
FIGURA 3.2 Moldes cúbicos……..70
FIGURA 3.3 Orden de apisonamiento……74
FIGURA 3.4 Llenado de primera capa de mezcla……..74
FIGURA 3.5 Llenado de la segunda capa de mezcla……75
FIGURA 3.6 Probetas cubiertas con un plástico……76
FIGURA 3.7 Probetas curadas en agua……..76
FIGURA 3.8 Probetas curadas en aire……77
FIGURA 3.9 Preparación de la máquina……78
FIGURA 3.10 Probeta en ensayo de ruptura……..78
FIGURA 4.1 Modelo de regresión lineal……..84
FIGURA 4.2 Comparación entre el modelo de regresión y validación……86
FIGURA 4.3 Histograma modelo cemento tipo I curado en aire……..88
FIGURA 4.4 Modelo: esfuerzo último C I aire vs días……..…91
FIGURA 4.5 Histograma modelo cemento tipo I curado en agua……91
FIGURA 4.6 Modelo: esfuerzo último C I agua vs días……..……..94
FIGURA 4.7 Histograma modelo cemento tipo IV curado en aire……...94
FIGURA 4.8 Modelo: esfuerzo último C IV aire vs días……..…..97

FIGURA 4.9 Histograma modelo cemento tipo IV curado en agua……97
FIGURA 4.10 Modelo esfuerzo último C IV agua vs días……..100
FIGURA 4.11 Histograma validación cemento tipo i curado en aire…….101
FIGURA 4.12 Validación: esfuerzo último C I aire vs días……103
FIGURA 4.13 Histograma validación cemento tipo I curado en agua……..104
FIGURA 4.14 Validación esfuerzo último C I agua vs días……106
FIGURA 4.15 Histograma validación cemento tipo IV curado en aire……..107
FIGURA 4.16 Validación: esfuerzo último C IV aire vs días……..109
FIGURA 4.17 Histograma validación cemento tipo IV curado en agua……110
FIGURA 4.18 Validación: esfuerzo último C IV agua vs días……112
FIGURA 4.19 Histograma modelo grupal cemento tipo I - IV……...113
FIGURA 4.20 Modelo grupal: esfuerzo último vs curado y cemento……117
FIGURA 4.21 Modelo grupal: esfuerzo último vs curado y cemento……118
FIGURA 4.22 Modelo grupal: esfuerzo último vs días……119
FIGURA 4.23 Histograma validación grupal cemento tipo I - IV……..120
FIGURA 4.24 Validación grupal: esfuerzo último vs tipo de curado y cemento……...124
FIGURA 4.25 Validación grupal: esfuerzo último vs curado y cemento…..125
FIGURA 4.26 Validación grupal: esfuerzo último vs días……...126
FIGURA 4.27 Modelo: cemento tipo I curado en aire 7 días……131
FIGURA 4.28 Modelo: cemento tipo I curado en aire 14 días……...131
FIGURA 4.29 Modelo: cemento tipo I curado en aire 21 días……...132
FIGURA 4.30 Modelo: cemento tipo I curado en aire 28 días……...132
FIGURA 4.31 Modelo: cemento tipo I curado en agua 7 días……...133
FIGURA 4.32 Modelo: cemento tipo I curado en agua 14 días……133
FIGURA 4.33 Modelo: cemento tipo I curado en agua 21 días……134
FIGURA 4.34 Modelo: cemento tipo I curado en agua 28 días……134
FIGURA 4.35 Modelo: cemento tipo IV curado en aire 7 días……...135
FIGURA 4.36 Modelo: cemento tipo IV curado en aire 14 días……135
FIGURA 4.37 Modelo: cemento tipo IV curado en aire 21 días……136
FIGURA 4.38 Modelo: cemento tipo IV curado en aire 28 días……136
FIGURA 4.39 Modelo: cemento tipo IV curado en agua 7 días……137
FIGURA 4.40 Modelo: cemento tipo IV curado en agua 14 días……..137
FIGURA 4.41 Modelo: cemento tipo IV curado en agua 21 días……..138
FIGURA 4.42 Modelo: cemento tipo IV curado en agua 28 días……..138
FIGURA 4.43 Validación: cemento tipo I curado en aire 4 días……139
FIGURA 4.44 Validación: cemento tipo I curado en aire 11 días……..139
FIGURA 4.45 Validación: cemento tipo I curado en aire 18 días……..140
FIGURA 4.46 Validación: cemento tipo I curado en aire 25 días……..140
FIGURA 4.47 Validación: cemento tipo I curado en agua 4 días……..141
FIGURA 4.48 Validación: cemento tipo I curado en agua 11 días……141
FIGURA 4.49 Validación: cemento tipo I curado en agua 18 días……142
FIGURA 4.50 Validación: cemento tipo I curado en agua 25 días……142
FIGURA 4.51 Validación: cemento tipo IV curado en aire 4 días……143

FIGURA 4.52 Validación: cemento tipo IV curado en aire 11 días……...143
FIGURA 4.53 Validación: cemento tipo IV curado en aire 18 días……...144
FIGURA 4.54 Validación: cemento tipo IV curado en aire 25 días……...144
FIGURA 4.55 Validación: cemento tipo IV curado en agua 4 días……...145
FIGURA 4.56 Validación: cemento tipo IV curado en agua 11 días…….145
FIGURA 4.57 Validación: cemento tipo IV curado en agua 18 días…….146
FIGURA 4.58 Validación: cemento tipo IV curado en agua 25 días…….146

ÍNDICE DE TABLAS

Pag.

TABLA 1 Compuestos principales del cemento portland……17
TABLA 2 Composiciones de compuestos típicos de cemento portland……...19
TABLA 3 Análisis de varianzas……44
TABLA 4 Alternativa al probar una hipótesis estadística……46
TABLA 5 Variación permisible de las probetas……70
TABLA 6 Lote de pastas……...73
TABLA 7 Variación permisible en función de la edad……..77
TABLA 8 Esfuerzo último experimental cemento tipo I curado en aire……79
TABLA 9 Esfuerzo último experimental cemento tipo I curado en agua……80
TABLA 10 Esfuerzo último experimental promedio cemento tipo I curado en aire……..80
TABLA 11 Esfuerzo último experimental promedio cemento tipo I curado en agua……81
TABLA 12 Esfuerzo último experimental cemento tipo IV curado en aire……81
TABLA 13 Esfuerzo último experimental cemento tipo IV curado en agua……82
TABLA 14 Esfuerzo último experimental promedio cemento tipo IV curado en aire……...82
TABLA 15 Esfuerzo último experimental promedio cemento tipo IV curado en agua……83
TABLA 16 Ecuaciones de regresión lineal……...84
TABLA 17 Comparación entre modelo regresión y validación……85
TABLA 18 Datos modelo: esfuerzos últimos de los cementos tipo I – IV……..87
TABLA 19 Datos generales modelo……..87
TABLA 20 Modelo: prueba de significancia para esfuerzo último C I aire……89
TABLA 21 Modelo: medias del cemento tipo I curado en aire……..90

TABLA 22 Modelo: prueba de significancia para esfuerzo último C I agua……..92
TABLA 23 Modelo: medias del cemento tipo I curado en agua……93
TABLA 24 Modelo: prueba de significancia para esfuerzo último C IV aire……..95
TABLA 25 Modelo: medias del cemento tipo IV curado en aire……...96
TABLA 26 Modelo: prueba de significancia para esfuerzo último C IV agua……98
TABLA 27 Modelo: medias del cemento tipo IV curado en agua…….99
TABLA 28 Datos validación: esfuerzos últimos de los cementos tipo I – IV……100
TABLA 29 Datos generales validación…..101
TABLA 30 Validación: prueba de significancia esfuerzo último C I aire……..102
TABLA 31 Medias del cemento tipo I curado en aire……...103
TABLA 32 Validación: prueba de significancia esfuerzo último C I agua……105
TABLA 33 Validación: medias del cemento tipo I curado en agua……106
TABLA 34 Validación: prueba de significancia esfuerzo último C IV aire……108
TABLA 35 Validación: medias del cemento tipo IV curado en aire……109
TABLA 36 Validación: prueba de significancia esfuerzo último C IV agua……111
TABLA 37 Validación: medias del cemento tipo IV curado en agua…….112
TABLA 38 Modelo: media grupal……113
TABLA 39 Modelo: prueba de significancia grupal esfuerzo último cemento tipo I – IV……..114
TABLA 40 Modelo: media grupal en función del tipo de cemento y curado……...115
TABLA 41 Modelo: media grupal en función de los días……116
TABLA 42 Modelo: media grupal en función de los días, curado y cemento……...116
TABLA 43 Validación: media grupal……...120
TABLA 44 Validación: prueba de significancia grupal esfuerzo último cemento tipo I – IV……..121
TABLA 45 Validación: media grupal en función del tipo de cemento y curado……...122
TABLA 46 Validación: media grupal en función de los días……...123
TABLA 47 Validación: media grupal en función de los días, curado y cemento……...123
TABLA 48 Comparación de los esfuerzos últimos promedios entre: modelo y validación……127
TABLA 49 Resumen ajuste cemento tipo I……148
TABLA 50 Resumen ajuste cemento tipo IV……148

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo vamos a determinar la variación de la resistencia a la compresión del cemento tipo I curado en aire y en agua mediante modelos matemáticos y experimentales.

En la actualidad los estudios se basan en tratar de mejorar la resistencia a la compresión del cemento portland debido a que en todo el mundo se utiliza esta materia prima para la construcción de edificios, carreteras, represas, etc. Por lo tanto el objetivo es lograr resistencias altas o iguales con el uso de aditivos existentes en la naturaleza y de esta manera disminuir costos de producción sin causar daños ambientales.

Esta investigación servirá como referencia para que en otros trabajos puedan comparar si existe o no mejorías en la resistencia a la compresión del cemento con diferentes tipos de aditivos para cumplir con las diferentes exigencias del mercado que cada día se incrementan y también cambian las condiciones ambientales.

El cemento tipo I y IV utilizado en esta investigación fue adquirido en la ciudad de Guayaquil.

Se comparará los datos obtenidos en el modelo y validación del cemento tipo I y IV curados en aire y en agua respectivamente.

La metodología que se desarrollará es la siguiente: Identificación de los tipos de cemento, diseño del experimento, experimentación, análisis de los resultados, identificar los cambios en la resistencia del cemento, modelación y validación de los resultados obtenidos

El análisis adecuado mediante un proceso de experimentación, que se ajuste a las normas internacionales vigentes es muy importante debido al gran uso del cemento en condiciones normales y severas.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad todos los países utilizan como materia prima el cemento para la construcción de edificios, casas, carreteras, etc. Desde que se conoce al cemento existen estudios enfocados en tratar de mejorar su propiedad mecánica con el uso de aditivos, ya que tener un buen cemento es señal de progreso en un país.

En nuestro país a partir del año 1980 se ha evidenciado un incremento de trabajo en el área de la construcción y vial, por eso hay una necesidad de mejorar su propiedad mecánica sin que esto signifique un incremento en su precio final al consumidor. Además teniendo un estudio de su propiedad mecánica a la resistencia a la compresión en la ciudad de Guayaquil del cemento tipo I ayudaría como referencia para realizar pruebas de cemento más ciertos porcentajes de aditivos que existan en esta ciudad y de esta manera poder comparar si con esos porcentajes de aditivos mejora o no su

propiedad mecánica y si ese aditivo hay lo suficiente en la naturaleza para poder explotarlo.

Según estudios realizados en otros países se sabe que mezclando el cemento con materiales inorgánicos por ejemplo con zeolita se obtiene una mayor resistencia a la compresión y esta mejoría va a depender del porcentaje y las características de la zeolita que son únicas en cada parte del mundo.

En la costa de nuestro país tenemos materiales inorgánicos como por ejemplo zeolita y limonita que mezclando con el cemento van a mejorar su propiedad mecánica y esto sería un gran aporte para nuestra ciudad y el país, ya que se va a obtener un cemento con mejor calidad sin causar daños ambientales ni causar incrementos en el costo.

1.1.1. Justificación

Debido a que tenemos estos materiales inorgánicos en nuestra región surge este tema de tesis que se va a realizar en la ciudad de Guayaquil con el objetivo de tener un elemento de comparación como el cemento tipo I y IV curado en aire y en agua así tendremos la propiedad mecánica de dicho cemento en esta ciudad. Los datos de resistencia a la compresión del

cemento tipo I y IV que se obtendrán en esta tesis servirán como base de comparación para las diferentes tesis que analizarán al cemento tipo I más un determinado porcentaje de aditivo con el objetivo de mejorar su propiedad mecánica.

Después de realizar los ensayos destructivos procederemos a determinar la variación de la resistencia a la compresión del cemento tipo I curado en aire y en agua mediante modelos matemáticos y experimentales.

Los resultados obtenidos los compararemos con el cemento tipo IV.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Generales

Modelar la resistencia a la compresión del cemento tipo I curado en aire y en agua en 7, 14, 21 y 28 días.

Comparar los datos obtenidos en el modelo y validación del cemento tipo I y IV

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la resistencia a la compresión uniaxial del cemento tipo I curado en aire y en agua.
- Diseñar el modelo de experimento.

- Realizar las pruebas de laboratorio cumpliendo las norma ASTM C109/C 109M – 02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars
- Analizar los datos obtenidos en laboratorio utilizando herramientas matemáticas adecuadas como son: MatLab y Statistica.
- Interpretar los resultados obtenidos con las herramientas matemáticas
- Comparar los resultados obtenidos del cemento tipo 1 curado en aire y en agua

1.3. Metodología

La metodología de la presente tesis está graficada en la figura 1.1 que se detalla a continuación.

FIGURA 1.1 METODOLOGÍA

- Identificación de los tipos de cemento
- Diseño del experimento
- Experimentación
- Análisis de los resultados
- Identificar los cambios en la resistencia del cemento
- Modelación de los resultados obtenidos
- Validación de los resultados obtenidos

En la metodología de la presente tesis primero identificaremos los diferentes tipos de cementos que existen y el campo de aplicación de cada uno de ellos en forma general.

Después se analizará de manera detalla al cemento tipo 1, se darán algunas definiciones tomadas de varios libros e internet, se mostrarán sus características y fórmula química.

Definiremos que es un cemento curado en aire y curado en agua, se explicará para qué se realizan estos curados, cuales son sus ventajas y desventajas, con cual procedimiento obtendremos mejores resultados, que resistencias a la compresión podremos lograr con estos curados.

Para poder desarrollar nuestro diseño de experimento primero debemos definir nuestras variables dependientes e independientes, siendo la función de respuesta la resistencia a la compresión uniaxial al respectivo tiempo de ensayo

Las variables independientes que se presentarán en este trabajo son las condiciones de curado las cuales son:

- Curado al ambiente.
- Curado bajo agua.

Y las variables que se mantendrán constantes serán la relación agua/cemento. A esta relación se le va a realizar su ensayo mecánico cumpliendo el procedimiento establecido según la norma ASTM C109/C 109M – 02 a 7, 14, 21 y 28 días respectivamente y en las debidas condiciones de curado. Para cada tiempo de ensayo mediremos la resistencia a la compresión.

El diseño de nuestro experimento consiste primero en realizar la experimentación y la segunda que consiste en la elaboración de un algoritmo que nos permitirá obtener un modelo matemático mediante el cual se obtendrá una curva simulada que será bien aproximada a los datos experimentales

La experimentación se la desarrollará para el cemento tipo I y IV curados en aire y en agua en probetas de $51x51x51mm^3$. Para cada una de estas probetas se realizará ensayos destructivos en 7, 14, 21 y 28 días respectivamente para nuestro modelo y para la validar el modelo se realizará las pruebas en 4, 11, 18 y 25 días.

Terminadas las pruebas de laboratorio se procederá al análisis de los resultados. Para desarrollar estos análisis de resultados se utilizará el algoritmo de inelasticidad que es aplicado mediante MatLab, a través del cual obtenemos los correctores plásticos característicos del material

Mientras que el programa Statistica nos servirá para determinar el mejor curado y también para conocer si existen o no diferencias significativas entre los diferentes tratamientos.

Finalmente se procederá a comparar los resultados obtenidos del cemento tipo I y IV curados en condiciones ambientales y en condiciones bajo agua.

Los resultados obtenidos en esta investigación servirán como referencia para que en otros estudios puedan comparan las mejoras en la propiedad mecánica que se puede obtener agregando ciertos porcentajes de aditivos al cemento tipo I.

1.4. Estructura de la tesis

La estructura de la tesis empieza primero con un resumen, para que el lector desde el principio tenga un conocimiento general de lo que se va a tratar en el presente trabajo que se lo realizará específicamente en la ciudad de Guayaquil.

En el resumen se podrá conocer el propósito por el cual se va a realizar la presente tesis y que se espera hacer con los datos obtenidos.

El capítulo 1 esta basado en las Generalidades. En este capítulo se desarrolla planteamiento del problema con el objetivo de saber el ¿Por qué? se ha seleccionado al cemento tipo I para realizar un ensayo destructivo y ¿Para qué? servirán los resultados de esta experimentación y que beneficios obtendremos en nuestra ciudad y país con este estudio.

En la Justificación se puede leer el motivo por el cual se realiza este trabajo, ¿Para qué? nos sirve obtener un elemento de comparación como el cemento tipo I curado en aire y en agua.

Los objetivos generales y específicos se desarrollan en este capítulo con el fin de conocer que es lo que se espera obtener al finalizar este trabajo de tesis.

Otro punto importante es la Metodología que nos indica como se va a desarrollar este presente trabajo y finalmente tenemos la estructura de la tesis que describe los capítulos que se van a tratar.

En el capítulo 2 explicamos todo el marco teórico de nuestra tesis, desarrollamos algunas definiciones con sus principales características, procedimientos, ventajas y desventajas. También se hace un resumen de otras investigaciones que tienen un aporte importante para nuestra tesis

El capítulo 3 está basado en la metodología. Se explicará todo el procedimiento que se realizará en el laboratorio, el diseño del experimento, se explicará el algoritmo que se utilizará en MatLab y por último la experimentación.

El capítulo 4 muestra los resultados y sus respectivos análisis. Se desarrolla una modelación de los resultados obtenidos y para saber si estos resultados son los correctos entonces se hace una validación del modelo matemático con los datos experimentales.

Finalmente en el capítulo 5 tenemos las conclusiones y recomendaciones desarrolladas en este trabajo

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Breve historia del Cemento

La aplicación de materiales de cementación es muy antigua. Ya en el año 700 a.C. los etruscos que se localizaban en Italia utilizaban mezclas de puzolana y cal para hacer morteros, que consistía en una masa que se forma por la unión de estos materiales que al hidratarse se vuelven pastosos, se solidifican y adquieren rigidez. Los romanos en el año 100 a.C. mezclaban la puzolana y cal para hacer hormigón. Aproximadamente hasta el año 1750 solo se utilizaban morteros de cal y materiales puzolánicos (harina de ladrillos, etc.)

En los años 1750 – 1800 se realizaron investigaciones de mezclas calcinadas de arcilla y caliza. En el año 1756 ya existe un investigador John Smeaton que realiza una comparación del aspecto y dureza del cemento Portland en el sur de Inglaterra, también encontró que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba

puzolana con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso. Al conocer el papel de la arcilla que hasta esa época se la consideraba indeseable, Smeaton fue el primero en descubrir las propiedades químicas de la cal hidráulica, posterior a esta investigación Joseph Parker fabrica el primer cemento natural utilizando el vocablo “cemento” porque anteriormente se denominaba “caement” aquellos agentes que se mezclan con agua para obtener una pasta aglutinante. En 1818 hay una explicación científica desarrollada por Vicat al comportamiento de estos conglomerantes

Aunque ciertos tipos de cementos que se fraguan y endurecen con agua de origen mineral eran conocidos desde la antigüedad, recién en el año de 1824 un fabricante de cemento Joseph Aspdin patenta el cemento Portland, dándole este nombre por el parecido con la piedra de Portland por su color y dureza [1].

Entre los años 1825-1872 recién aparecen las primeras fábricas de cemento en Inglaterra, Francia, Alemania., Estados Unidos

El primer cemento Portland fue producido en Gran Bretaña en 1845, que consistía en una mezcla de piedra caliza y arcillas que se calentaban hasta convertirse en carbonilla (o escorias) y después se las trituraba.

En esa época al cemento se lo fabricaba en hornos verticales, esparciendo las materias primas sobre capas de coque a las que se prendía fuego. Recién los primeros hornos rotatorios surgieron hacia 1880. A partir de este año empieza una producción masiva del cemento en los países industrializados

En América Latina la industria del cemento llega en los albores del siglo XX. En 1901, una pequeña fábrica es instalada en Guatemala, en 1906 se instala en México una planta con una producción de 20.000 toneladas/año y en 1908 empieza a operar la primera planta de cemento de Sudamérica en Chile.

En nuestro país Ecuador se construyó la primera fábrica en Guayaquil por el Ingeniero José Rodríguez Bonín (Industrias y Construcciones) que inició su producción en junio de 1923 con 3.000 toneladas/año, con la marca “Cóndor”.

El cemento Portland mezclado con áridos y agua forma un producto llamado hormigón, que es una roca amorfa artificial que puede tomar las más variadas formas y tiene unas propiedades mecánicas a la compresión muy importantes y su resistencia a la tracción puede mejorarse con la utilización de armaduras (hormigón armado)

El cemento Portland ha tenido un gran desarrollo y actualmente es uno de los materiales industrializados de construcción de mayor consumo en el mundo.

2.2. Cemento Portland

Las materias primas básicas para la fabricación del cemento portland consisten en: caliza (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3). Estos compuestos se mezclan en diferentes proporciones e interactúan en el horno rotatorio a temperaturas de 1400 a 1650 ºC (2600 a 2900 °F) para formar una serie de productos más complejos, hasta lograr un equilibrio químico. Sin embargo este equilibrio no se mantiene durante el enfriamiento, y la velocidad de éste afecta el grado de cristalización y la cantidad de material amorfo presente en el clinker enfriado. Para controlar el tiempo de fraguado se adiciona una pequeña cantidad de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

Podemos considerar que el cemento se encuentra en un estado de equilibrio congelado, es decir, que los productos congelados reproducen el equilibrio existente durante la temperatura de formación del clinker. Esta suposición se la realiza para poder calcular la composición de compuestos de los cementos comerciales.

Composición química del cemento portland.

El cemento portland se divide básicamente en cuatro componentes principales que se indican en la tabla

TABLA 1

COMPUESTOS PRINCIPALES DEL CEMENTO PORTLAND [2]

Compuesto	Fórmula química	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF

Los silicatos que se encuentran en el cemento en realidad no son compuestos puros, pues contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen un efecto importante en los ordenamientos atómicos, las formas cristalinas y las propiedades hidráulicas de estos silicatos.

Existen muchos métodos para calcular la composición potencial del cemento Portland, pero este tema queda fuera del alcance de este trabajo.

Además de los compuestos principales nombrados en la tabla 1, existen otros compuestos menores los cuales son: MgO, TiO_2, Mn_2O_3, K_2O y Na_2O, que por lo general no sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso del cemento. Pero dos de estos compuestos menores son de interés: los óxidos de sodio y de potasio, Na_2O y K_2O, conocidos como “álcalis”, aunque también existen otros álcalis.

Según estudios realizados, se ha podido determinar que estos compuestos reaccionan con algunos agregados y que los productos de esta reacción ocasionan una desintegración del concreto, además también afecta la rapidez con que el cemento adquiere resistencia

2.2.1. Tipos de cemento portland.

Se obtienen varios tipos de cemento portland por variación de las cantidades de los componentes relacionados antes. En general, hay cinco tipos principales cuyas composiciones químicas básicas se dan en la Tabla 02.

Obtenemos varios tipos de cemento portland por la variación de las cantidades de los componentes mencionados en la tabla 1. En general tenemos

TABLA 2

COMPOSICIONES DE COMPUESTOS TÍPICOS DE CEMENTO PORTLAND [2]

Tipo de cemento	Designación ASTM C150	Composiciones, % peso			
		C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Ordinario	I	55	20	12	9
Moderado calor de hidratación y moderada resistencia al sulfato	II	45	30	7	12
Endurecimiento rápido	III	65	10	12	8
Bajo calor de hidratación	IV	25	50	5	13
Resistente a sulfato	V	40	35	3	14

El cemento más común el tipo I, y las perdidas en porcentajes corresponden al yeso y algunos componentes como sulfatos alcalinos, oxido de magnesio, etc.

Cemento Portland Tipo I: Es el cemento portland normal para usos generales. Se utiliza cuando el hormigón no va a estar expuesto a ataques fuertes por sulfatos del agua o del suelo, o cuando no va a producirse un incremento importante de temperatura por el calor generado en el proceso de hidratación

del cemento. Aplicaciones características de este tipo de hormigón son: en aceras, edificios, puentes, tanques y embalses.

Cemento Portland Tipo II: Se utiliza donde sea importante un ataque moderado por sulfato como en las estructuras de desagüe donde las concentraciones de sulfato en las aguas residuales son mayores de lo normal. El cemento de este tipo se utiliza normalmente en los meses de verano para pilares y paredes de retención ya que este cemento tiene un moderado calor de hidratación.

Cemento Portland Tipo III: Es un tipo de cemento de pronta resistencia, adquiere altas resistencias en corto período de tiempo. Se emplea cuando las piezas de hormigón se van a retirar rápidamente de una estructura que tenga que ponerse rápidamente en uso.

Cemento Portland Tipo IV: Es un cemento de bajo calor de hidratación que se utiliza cuando la cantidad de calor tiene que ser mínima. Este tipo se utiliza en grandes estructuras como presas, donde el calor generado por el endurecimiento del cemento es un factor crítico.

Cemento Portland Tipo V: Es un cemento muy resistente a los sulfatos que se utiliza cuando el hormigón va a estar expuesto a severos ataques de sulfato de suelos o aguas residuales de alto contenido en sulfatos.

2.2.2. Endurecimiento del cemento portland.

El cemento portland endurece al reaccionar con agua, por las denominadas reacciones de hidratación. Estas reacciones son complejas y no del todo conocidas. En otras palabras, en presencia del agua, los silicatos y aluminatos nombrados en la tabla 1 forman productos de hidratación, que con el paso del tiempo producen una masa firme y dura. En la **figura 2.1** se muestra esquemáticamente los modelos de formación e hidratación del cemento

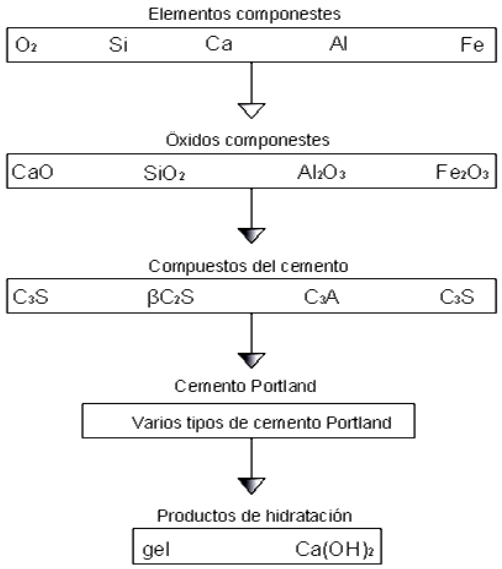

FIGURA 2.1 ESQUEMA DE LA FORMACIÓN E HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND [1]

Los compuestos de los diferentes tipos de cemento pueden reaccionar con el agua de dos formas diferentes. En la primera, se produce una adición directa de algunas moléculas de agua, lo cual constituye una reacción de hidratación real. En el segundo tipo de reacción con agua es la hidrólisis. Pero por comodidad o costumbre se aplica el término de hidratación a todas las reacciones del cemento con agua.

El silicato dicálcico y el silicato tricálcico constituyen aproximadamente un 75 % en peso del cemento portland, y cuando estos componentes reaccionan con el agua durante el proceso de endurecimiento del cemento producen como

principal producto de hidratación el silicato tricálcico hidratado. Este producto está formado por partículas extremadamente pequeñas (de menos de 1 μm) y es un gel coloidal. Por hidratación del silicato tricálcico y silicato dicálcico se produce también hidróxido cálcico que es un material cristalino. Estas reacciones son:

$$2C_3S + 6H_2O \longrightarrow C_3S_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

$$2C_2S + 4H_2O \longrightarrow C_3S_2 \cdot 3H_2O + Ca(OH)_2$$

El silicato tricálcico (C_3S) endurece rápidamente y es el principal responsable de la temprana resistencia del cemento portland Figura 2.2. Como se puede observar en la figura la mayor parte de la hidratación del silicato tricálcico sucede en dos días, por lo tanto los cementos que tienen temprana resistencia tienen gran cantidad de silicato tricálcico.

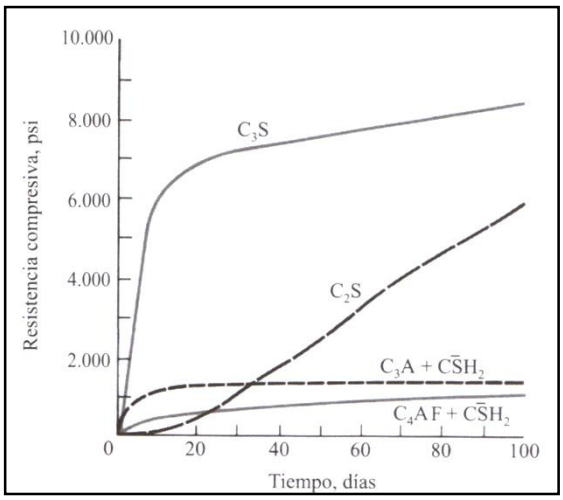

FIGURA 2.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PURO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CURADO [2]

También podemos observar en la figura 2.2 que el silicato dicálcico (C_2S) posee una lenta reacción de hidratación con agua y es el principal responsable del incremento de la resistencia del cemento al cabo de una semana.

Las velocidades de hidratación del C_3S y C_2S son bastantes diferentes entre sí en estado, también las propiedades de los físicas de los hidratos de silicato de calcio revisten interés en relación con las propiedades de fraguado y endurecimiento del cemento

El aluminato tricálcico (C_3A) se hidrata rápidamente con alta proporción de calor liberado en la hidratación. El aluminato

tricálcico contribuye ligeramente al desarrollo de resistencias prematuras y se mantiene en un nivel bajo en los cementos resistentes a los sulfatos (tipo V). Para reducir la temperatura de clinqueado durante el proceso de fabricación del cemento se añade aluminoferrito tetracálcico

La cantidad de C_3A presente en la mayoría de los cementos es comparativamente pequeña, pero su comportamiento y relación estructural con las otras fases del cemento le confieren importancia. El hidrato de aluminato tricálcico forma un material intersticial prismático oscuro y a menudo se encuentra en forma de láminas planas rodeadas individualmente por el silicato de calcio hidratado.

Como podemos ver en la figura 2.2, la reacción de C_3A puro con el agua es muy violenta y se produce un inmediato endurecimiento de la pasta. Para prevenir este fraguado relámpago, se agrega yeso. La cantidad de yeso requerido aumenta con el contenido de C_3A junto con el contenido de álcali del cemento

El tiempo en que se completan las reacciones de hidratación determina la resistencia y durabilidad del hormigón. La hidratación es relativamente rápida durante los primeros días

una vez que el hormigón fresco se ha colocado en su respectivo sitio. El agua debe retenerse al comenzar el periodo de curado y también hay que prevenir la evaporación.

Los productos de la hidratación del cemento poseen baja solubilidad en agua y esto se debe a la estabilidad del cemento endurecido en contacto con el agua. El cemento hidratado se enlaza fuertemente con el cemento que no ha reaccionado.

La velocidad de hidratación disminuye continuamente, cualquiera que sea la forma de precipitación de los productos de la hidratación de modo que, después de haber transcurrido mucho tiempo, todavía queda una buena cantidad de cemento deshidratado

La mayor parte de la resistencia a la compresión se alcanza aproximadamente a los 28 días pero la resistencia se puede ir incrementando de manera progresiva durante años y esto se puede ver en la figura 2.3 para diferentes tipos de cementos ASTM, en función del tiempo de curado

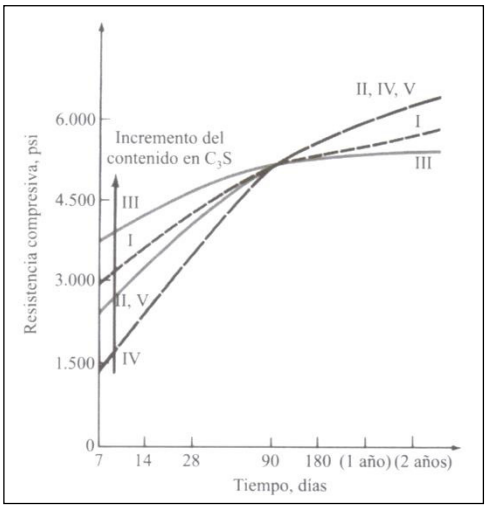

FIGURA 2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGONES CON DIFERENTES TIPOS DE CEMENTOS ASTM [2]

Fraguado

Este término se lo utiliza para describir la pasta del cemento. El fraguado se refiere a un cambio de fluido a un estado rígido. Al parecer el fraguado es causado por una hidratación selectiva de algunos componentes del cemento. Los primeros en reaccionar son el C_3A y C_3S. Para evitar que se fragüe primero el C_3A se añade yeso y de esta manera entonces fragua primero el C_3S. Si permitiéramos fraguar primero al C_3A, obtuviéramos un hidrato de aluminato de calcio más poroso y el resto de los componentes del cemento se hidrataría dentro de una estructura porosa y por lo tanto las características de este cemento serían adversas.

Podemos recordar que la relación agua / cemento determina la porosidad de la pasta de cemento endurecida en cualquier etapa de hidratación. De ahí que tanto la relación agua / cemento como el grado de compactación, afectan el volumen de los huecos del concreto.

La relación entre la resistencia y el volumen total de huecos no es una propiedad exclusiva del concreto, pues se halla también en otros materiales frágiles donde el agua forma poros: por ejemplo, la resistencia del yeso está en función directa del contenido de huecos.

El proceso de fraguado va acompañado por cambios de temperatura en la pasta de cemento. El fraguado inicial corresponde a un rápido incremento de temperatura, y el final, al máximo en temperatura. El tiempo de fraguado de un cemento disminuye conforme aumenta la temperatura, pero sobre los 30ºC ocurre un efecto adverso. A bajas temperaturas el tiempo de fraguado se retarda.

También existe un fraguado falso, que se puede presentar en los primeros minutos después de haberlo mezclado con agua, este fraguado no despide calor en forma apreciable y si se lo

vuelve a mezclar sin agregar agua, se restablece su plasticidad y fragua normalmente sin pérdidas de resistencia.

2.3. Curado del cemento.

Para obtener un excelente concreto, la colocación apropiada de la mezcla debe ir seguida de un ambiente adecuado durante las primeras etapas de endurecimiento. Al proceso de promover la hidratación del cemento se la llama Curado, el cual consiste en controlar la temperatura y los movimientos de humedad hacia dentro y afuera del concreto

El cemento puede ser mantenido húmedo mediante varias formas de curado:

- Agregando humedad adicional al cemento
- Evitando que la humedad salga del cemento mediante el uso de una membrana impermeable.

En esta tesis vamos a desarrollar dos tipos de curado los cuales son

- Curado en agua
- Curado en aire

Curado del cemento portland en agua.

El método de curado con agua es el método más eficiente de curado y consiste en una inundación o inmersión total del cemento, aunque hoy día es poco frecuente por la dificultad de su aplicación. La inundación se puede emplear en forjados, pavimentos, techos planos, o cualquier superficie donde sea posible retener el agua o exista una corriente continua de agua.

Es importante evitar la pérdida prematura de agua, así como los choques térmicos que se producirían si el agua de curado está muy fría, ya que puede generar agrietamiento. La diferencia de temperatura entre el cemento y el agua no debe superar 10° C.

Curado del cemento portland en aire.

El método de curado de cemento en aire consiste en cubrir al cemento con unas cubiertas de material absorbente que pueden ser sacos, mantas de algodón, arena, aserrín y otras cubiertas absorbentes que también resultan útiles en la retención del agua superficial del cemento. Con estos materiales se cubre al cemento y se empapan con agua. Es preciso vigilar el estado de humedad y remojarlos con frecuencia.

El cemento va a estar expuesto al aire libre y no se lo recubrirá con ningún material en nuestro experimento para de esta manera lograr resultados más reales.

Por medio de los dos curados se mejoran todas las propiedades del cemento.

2.4. Hormigón

El hormigón es un excelente material estructural en el campo, por ejemplo, para la construcción de presas, puentes, edificios, etc.

Las ventajas que ofrece el hormigón como material de construcción son muchas. Por ejemplo: economía, durabilidad, flexibilidad de diseño, resistencia al fuego, capacidad de ser fabricado en el sitio y apariencia estética. Desventajas del hormigón desde el punto de vista de ingeniería son su baja resistencia a la tracción, su baja ductilidad y su ligera contracción.

2.4.1. Resistencia del hormigón a la compresión

El hormigón, que es básicamente un material compuesto de base cerámica, tiene mayor resistencia a la compresión que resistencia a la tracción. En diseños de ingeniería el hormigón sufre principalmente cargas en compresión. Se puede aumentar

la capacidad de resistencia del hormigón a la tracción reforzándolo con barras de acero

La resistencia del hormigón depende del tiempo, puesto que su resistencia se genera como consecuencia de reacciones de hidratación que se producen siguiendo una cinética dada. La resistencia a la compresión del hormigón depende también fuertemente de la relación agua/cemento, con grandes proporciones agua/cemento se produce hormigón de baja resistencia. Sin embargo, hay un límite en bajos valores de la relación agua/cemento puesto que a menos agua es más difícil trabajar con el hormigón

En el diseño del hormigón se deben considerar los siguientes aspectos:

- El hormigón tiene que ser capaz de fluir o ser compactado a la forma del recipiente en que se vierta.
- El hormigón debe tener buena resistencia y durabilidad.
- En los diferentes estudios un factor importante que siempre debe ser considerado es el costo.

.

2.5. Otros materiales en el hormigón

Hasta la actualidad se han hecho muchas investigaciones para analizar los beneficios de mezclar el hormigón con diferentes materiales. A continuación se describirá algunos de estos materiales.

2.5.1. Cenizas volantes.

La ceniza volante, es un subproducto de la combustión de los materiales naturales que está compuesto por finas partículas que quedan almacenadas en el interior de la caldera, así como también de la piedra pómez o piedra volcánica, los cuales son ampliamente usados como materiales cementantes y/o ingredientes puzolánicos en el hormigón de cemento Portland. La ceniza volante puede ser introducida en la mezcla de hormigón sea como un material de la dosificación separadamente de los otros elementos (Grava, Arena, Cemento, Agua), o como un componente de la mezcla del cemento. El uso de la ceniza volante en el hormigón está incrementándose en todo el mundo ya que esta mejora algunas propiedades del concreto y a menudo reduce el costo del concreto.

La ceniza volante en el concreto hace eficiente el uso de los productos de hidratación del cemento Pórtland como son las

soluciones de hidróxido de calcio y álcali, los cuales están relacionados dentro de la estructura porosa de la pasta de cemento que combinada con las partículas puzolánicas de la ceniza forman un medio cementante.

Además la temperatura generada por la hidratación del cemento Pórtland es un importante factor en el inicio de la reacción de la ceniza volante, ya que el concreto que contiene ceniza volante es propiamente curado, debido a que la ceniza reacciona llenando los espacios entre las partículas de cemento hidratadas, por lo tanto baja la permeabilidad del concreto en relación al agua y agregados químicos.

Esta metodología de añadir la ceniza volante en el cemento proporciona propiedades al concreto que no pueden ser logradas solo con el uso del cemento Pórtland.

2.5.2. Puzolana natural.

La puzolana se puede definir como un silicio o un material silícico – alumínico, el cual posee poco o ningún poder cementante formado por partículas finamente divididas y en presencia de humedad, es químicamente reactivo con hidróxido de calcio a temperatura ordinaria que forma en el proceso un componente con propiedades cementantes.

Los beneficios de usar puzolana natural en el concreto son:

Reducción de costos, reduce el aumento de la temperatura durante la hidratación inicial, mejora en trabajabilidad el concreto fresco, mejora la resistencia a los sulfatos, reduce directamente la expansión a la reacción álcali – sílice, y contribuye a la durabilidad y resistencia del concreto endurecido.

Además, es un excelente aislante térmico por lo tanto es resistente al frío, al fuego, a la intemperie y ayuda a que el concreto este libre de sales solubles en agua, que permite mejorar las condiciones de habitabilidad si se la emplea en la construcción de viviendas. También no tienen riesgos en la salud del ser humano, debido a que no poseen sílice libre.

Estos beneficios también son válidos para las cenizas volantes

2.5.3. Escoria.

La escoria granulada de alto horno molida también llamada cemento de escoria, se produce de la escoria siderúrgica de alto horno, el cual es un cemento hidráulico no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio. Este producto se desarrolla en un alto horno. La escoria fundida a la temperatura de cerca de 1500°C se enfría rápidamente y

se apaga en el agua para formar un material granulado vítreo. El material granulado, el cual es molido hasta menos de 45 μm. La escoria granulada es áspera y tiene forma angular. En presencia del agua y de un activador, NaOH o CaOH, ambos suministrados por el cemento Pórtland, la escoria se hidrata y se endurece de una manera similar al cemento Pórtland. Sin embargo, las escorias enfriadas por el aire no presentan las propiedades hidráulicas de las escorias enfriadas por el agua.

La escoria granulada de alto horno fue desarrollada en Alemania en 1853 y se ha usado desde el inicio del siglo XX .La escoria granulada de alto horno molida, cuando es empleada en los concretos para uso general, normalmente constituye del 30% al 45% de la masa del material cementante en la mezcla, pero algunos concretos de escoria tienen 70% o más de escoria.

2.5.4. Humo de sílice.

El humo de sílice, también llamado de microsílice. El humo de sílice condensado es un subproducto que se usa como una puzolana. Este subproducto es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferro-silicio.

El humo de sílice sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000°C. Cuando se enfría, el humo se condensa y se colecta en bolsas de tela enormes. El humo de sílice condensado se procesa para removerle las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas. El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85%) en una forma no cristalina (amorfa).

Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica. Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1 mm de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0.1 μm, aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento.

El humo de sílice se vende en forma de polvo pero es más comúnmente encontrado en la forma líquida. El humo de sílice se usa en cantidades que varían del 5% al 10% de la masa total de material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto.

2.5.5. Arcillas calcinadas.

Las arcillas calcinadas se emplean en edificaciones de concreto para uso universal. Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutas parciales del cemento, normalmente entre 15% y 35% y también para aumentar la resistencia al ataque de sulfato, controlar la reactividad álcali-agregado y reducir la permeabilidad.

2.6. Diseño lineal.

En el presente trabajo de investigación vamos a realizar una regresión, pues estamos interesados en la respuesta que tiene el cemento.

Cuando existe una sola variable de regresión independiente x y una sola variable dependiente Y, este caso se conoce como una regresión lineal simple. Los datos se pueden representar mediante los pares de observaciones $\{(x_i, y_i); i = 1, 2, \dots, n\}$. Vamos a definir $Y_i = Y|x_i$ por medio de un modelo estadístico. Si suponemos que todas las medias $\mu_{Y|x_i}$ caen en una línea recta, cada Y_i se puede describir con el modelo de regresión lineal simple

$$Y_i = \mu_{Y|x_i} + E_i = \alpha + \beta x_i + E_i$$

Donde el error del modelo E_i, debe tener una media de cero. Cada observación (x_i, y_i) en nuestra muestra satisface la ecuación

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i,$$

Donde ε_i es el valor que toma E_i cuando Y_i toma el valor y_i.

También con el uso de la línea de regresión estimada o ajustada

$$\hat{y} = a + bx,$$

Cada par de observaciones satisface la relación

$$y_i = a + bx_i + e_i,$$

Donde $e_i = y_i - \hat{y}_i$ se lo conoce como residuo y nos dice el error en el ajuste del modelo en el i-ésimo punto de los datos. [3]

La diferencia entre e_i y ε_i mostramos en la figura 2.4

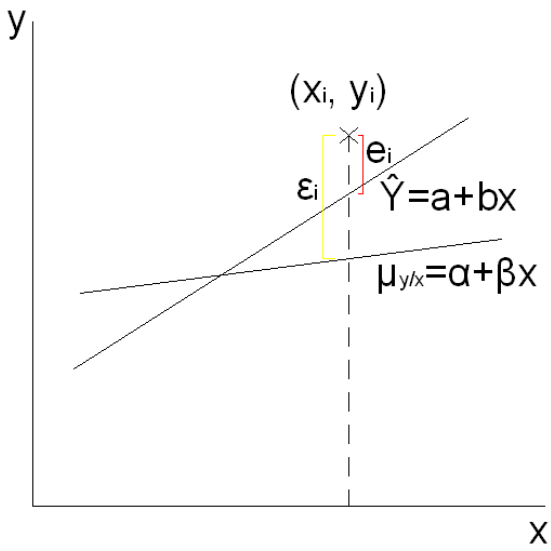

FIGURA 2.4 COMPARACIÓN ε_i CON EL RESIDUO e_i

DISTRIBUCIÓN NORMAL

La distribución normal es la distribución continua de probabilidad más importante en el área de estadística. Su propio nombre indica su extendida utilización, justificada por la frecuencia o normalidad con la que ciertos fenómenos tienden a parecerse en su comportamiento a esta distribución. Su gráfica tiene la forma de una campana y se la denomina curva normal, la cual se muestra en la figura 2.5 La distribución normal también es conocida como distribución gaussiana, en honor a Karl Friedrich .[3]

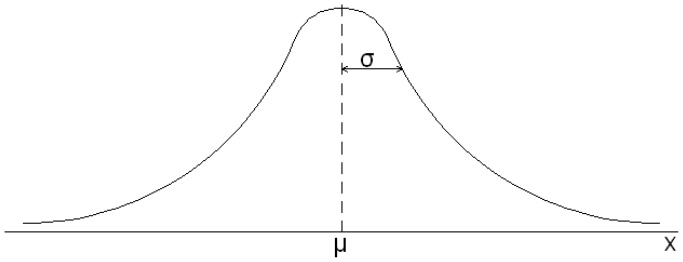

FIGURA 2.5 CURVA NORMAL

Por ejemplo en la figura 2.6 se dibujó dos curvas normales que tienen la misma media μ pero diferentes desviaciones estándar σ. Las dos curvas están centradas en la misma posición sobre el eje horizontal, pero la curva que tiene mayor desviación estándar tiene menor altura y se extiende más lejos, lo cual nos indica que entre más variable sean nuestros valores más baja y ancha será la curva correspondiente. También se puede decir que los parámetros μ y σ2 son realmente la media y varianza de la distribución normal.

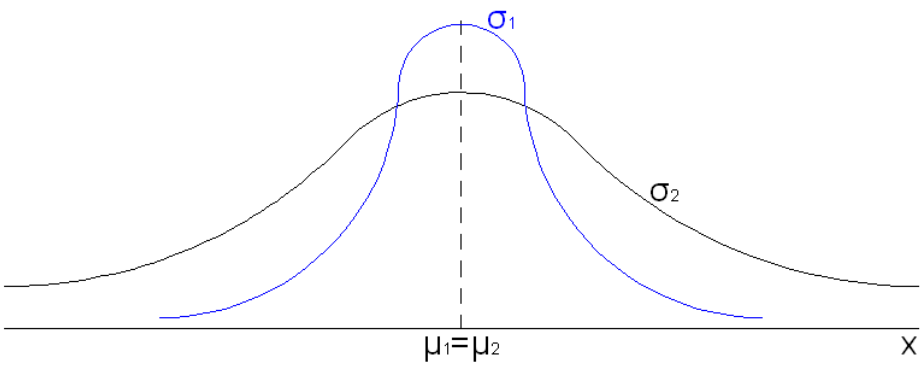

FIGURA 2.6 CURVAS NORMALES CON μ1=μ2 y σ1< σ2

Observando las curvas normales de las figuras 2.5 y 2.6, se pueden nombrar las siguientes propiedades:

- El punto sobre el eje horizontal donde la curva es un máximo se llama moda y ocurre que x = μ
- Alrededor del eje vertical la curva es simétrica a través de la media
- Los puntos de inflexión de la curva ocurren en x = μ ± σ, es cóncava hacia abajo si μ - σ < X < μ + σ, y es cóncava hacia arriba en cualquier otro punto.
- La curva normal se aproxima al eje horizontal de manera asintótica conforme nos alejamos de la media en cualquier dirección.
- El área total bajo la curva y sobre el eje horizontal es igual a 1.

Para comprobar si los valores obtenidos experimentalmente tienen una distribución normal, existen muchas pruebas estadísticas como Shapiro & Wilk, Anderson-Darling, Darling-Pearson, Kolmogorov-Smirnov y X^2 de bondad de ajuste.

ESTADÍSTICO DE PRUEBA DE SHAPIRO & WILK

Hemos decidido aplicar el estadístico de prueba de Shapiro & Wilk por su simplicidad y además El test de Shapiro-Wilk es un contraste de ajuste que se utiliza para comprobar si unos datos determinados (X1, X2,…, Xn) han sido extraídos de una población normal. Los parámetros de la distribución no tienen porqué ser conocidos y está adecuado para muestras pequeñas (n<50).

Ho: X es Normal.

H_a: X no es Normal

Un contraste de ajuste tiene como objetivo comprobar si con base en la información suministrada por una muestra se puede aceptar que la población de origen sigue una determinada distribución de probabilidad, en nuestro caso, la **distribución normal**. El estadístico propuesto por Shapiro-Wilk es

$$W_{Cal} = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^{n}(X - \bar{X})^2}$$

Para aceptar la hipótesis nula de que tenemos una distribución normal, deberá cumplirse entonces lo siguiente:

$$W_{cal} < W_{n,\alpha}$$

Donde $W_{n,\alpha}$ es un valor de la tabla de Shapiro-Wilk que se muestra en el anexo D correspondiente a un tamaño muestral n<50 y a un nivel de confianza α de 0.01, 0.05, 0.1.

Para calcular el estadístico de prueba W_{cal}, utilizaremos el programa Statistica y lo compararemos con W_{tab}.

DISTRIBUCIÓN F

La distribución F tiene una gran aplicación en los problemas que involucran dos o más muestras, realiza comparaciones entre varianzas muestrales.

Podemos definir a la distribución F como la razón de dos variables aleatorias ji cuadrada independientes, dividida cada una entre su número de grados de libertad

$$F=\frac{U/v_1}{V/v_2}$$

Donde U y V son variables aleatorias independientes con distribuciones ji cuadrada y con v_1 y v_2 grados de libertad [3]

A continuación se muestran curvas típicas de F.

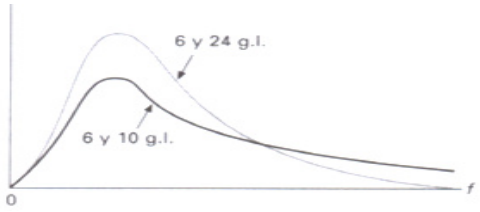

FIGURA 2.7 DISTRIBUCIONES TÍPICAS F [3]

En la figura 2.8 encontramos que la región sombreada representa valores superiores a f_α y es un área igual a α. En el anexo E se muestra la tabla F con los valores f_α sólo para α. = 0.05, y para varias combinaciones de v_1 y v_2 grados de libertad.

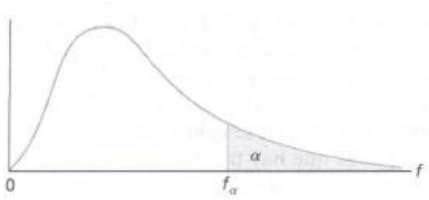

FIGURA 2.8 VALORES TABULADOS DE LA DISTRIBUCIÓN F [3]

La distribución F la usamos para extraer inferencias acerca de las varianzas de nuestras muestras y utilizaremos el programa Statistica para calcular el F_o de nuestros valores y se realizará una comparación con $F_\alpha(v_1, v_2)$ que lo obtenemos del anexo E.

El programa Statistica nos muestra una tabla con los siguientes significados

TABLA 3

ANÁLISIS DE VARIANZAS

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios
Tratamientos	t - 1	SC tratamiento	$CMT = \frac{CST}{t-1}$
Error	N - t	SC error	$CME = \frac{SCE}{N-T}$
Total	N - 1	SC total	

La tabla 3 de análisis de varianza resume el conocimiento acerca de la variabilidad en las observaciones del experimento. Se ha hecho una partición en dos de la suma de cuadrados total, una representa la variación entre las medias de tratamientos, la otra el error experimental.

La varianza del error experimental s^2 se estima mediante

$$s^2 = \frac{SCE}{N - t}$$

Donde s^2 se conoce como el cuadrado medio del error (CME). La otra media al cuadrado de importancia es el cuadrado medio de tratamiento (CMT), que se calcula con:

$$CMT = \frac{SCT}{t - 1}$$

El CME es un estimador sin sesgo de la varianza del error experimental σ^2; es decir, el valor esperado del (CME) = σ^2, o bien: $E(CME) = \sigma^2$

El valor esperado del CMT es: $E(CMT) = \sigma^2 + r\theta^2$

Por lo tanto CMT estima una combinación de la varianza del error experimental y la varianza entre las medias de los tratamientos en el modelo completo de las medias.

PRUEBA DE HIPÓTESIS

El estadístico de prueba calculado a partir de la tabla de análisis de varianza para probar la hipótesis nula H_0: $\mu_1 = \mu_2 = \ldots = \mu_t$ es:

$$F_O = \frac{CMT}{CME}$$

Que tiene una distribución F cuando la hipótesis nula es cierta.

CME es un estimador sin sesgo de σ^2, bajo cualquier hipótesis

CMT es un estimador sin sesgo de σ^2, sólo bajo el modelo de la hipótesis nula (modelo reducido), entonces $\theta^2 = 0$ y $E(CMT) = \sigma^2$. Con la hipótesis alterna $CMT > \sigma^2$, en consecuencia, el valor del estadístico F_0 será mayor que el del denominador. Los valores grandes F_0 sugieren un rechazo de la hipótesis nula.

TABLA 4

ALTERNATIVA AL PROBAR UNA HIPÓTESIS ESTADÍSTICA

	H_o es verdadera	H_o es falsa
Aceptar H_o	Decisión correcta	Error tipo II
Rechazar H_o	Error tipo I	Decisión correcta

Para la prueba de hipótesis se utiliza una región crítica de un lado en la cola de la derecha. La hipótesis nula H_0 se rechaza para una probabilidad de un error tipo I de α si:

$$F_o > F_{\alpha\,(t-1,\ N-t)}$$

Donde F_0 = CMT / CME y $F_{\alpha\,(t-1,\ N-t)}$ es el valor de la distribución F que es excedido con probabilidad α. Por lo tanto se puede decir que no aceptamos la hipótesis, osea que las medias de los diferentes tratamientos no son iguales.

PRUEBA DE TUKEY

La prueba de Tukey es un método estándar que sirve para realizar comparaciones pareadas que sustentan la veracidad del error tipo I. esta prueba permite la formación de intervalos de confianza de 100(1 – a)% simultáneos para todas las comparaciones pareadas. El método se basa en la distribución del rango studentizado. [3].

El método de comparaciones pareadas de Tukey consiste en hallar una diferencia significativa entre las medias de los diferentes tratamientos.

Para la realización de la prueba de Tukey utilizaremos el programa Statistica

PRUEBA DE LA BONDAD DE AJUSTE

Las pruebas de bondad de ajuste son pruebas de hipótesis para verificar si los datos observados en una muestra aleatoria se ajustan

con un determinado nivel de significancia a una distribución de probabilidad (uniforme, exponencial, normal, poisson, ji cuadrada u otra cualquiera).

La hipótesis nula H_o indica la distribución propuesta, mientras que la hipótesis alternativa H_a, nos indica que la variable en estudio tiene una distribución que no se ajusta a la distribución propuesta.

Para realizar la prueba, se clasifican los datos observados en k clases o categorías, y se contabiliza el número de observaciones en cada clase, para posteriormente comparar la frecuencia observada en cada clase con la frecuencia que se esperaría obtener en esa clase si la hipótesis nula es correcta.

Utilizaremos χ^2 que es un valor de una variable aleatoria cuya distribución muestral se aproxima muy cerca con la distribución ji cuadrada con v = k – 1 grados de libertad, para comprobar si los datos observados y los datos esperados tienen un buen ajuste.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde

k = Número de clases, k>2, o_i = Frecuencia observada en la clase i, e_i = Frecuencia esperada en la clase i, si Ho es correcta. χ^2

Se utiliza k -1 grados de libertad en la distribución X^2, pues hay sólo k – 1 frecuencias de celdas libremente determinadas.

Si los valores observados se encuentran cerca de los valores esperados, el valor de X^2 será pequeño, lo cual quiere decir que tenemos un buen ajuste. Si los valores observados difieren de manera considerable con los valores esperados, entonces el valor X^2 será grande y tendremos un pobre ajuste.

Tener un buen ajuste significa que aceptamos la hipótesis nula H_o, mientras que un pobre ajuste conduce a su rechazo. En el anexo F mostramos la tabla de la X^2, donde el v nos indica los grados de libertad, mientras que α nos indica el nivel de confianza con el cual estamos trabajando. La región crítica se encuentra en la cola derecha de la distribución ji cuadrada.

Con un nivel de significancia α, encontramos el valor crítico χ_α^2 del anexo F. por lo tanto $\chi^2 > \chi_\alpha^2$ constituye la zona crítica. [3]

Gráfica esfuerzo deformación

La figura 2.9 esfuerzo deformación es una curva característica que representa el comportamiento del material

Esta figura consta de dos partes que son: La zona elástica y la zona plástica. En la zona elástica tenemos que la pendiente es constante

y es igual al módulo de Young, quiere decir que al material se le puede aplicar una fuerza de compresión y este no sufrirá ninguna deformación.

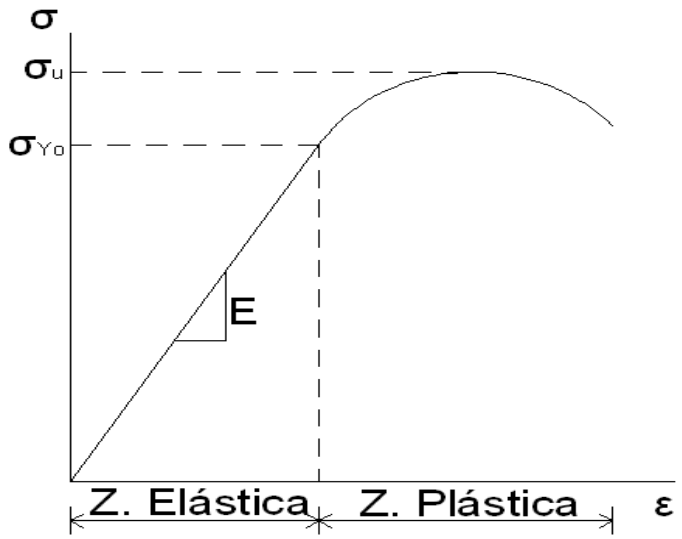

FIGURA 2.9 CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN

En la zona elástica tenemos: $\Delta\sigma = \mathrm{E}\Delta\varepsilon^{e}$, que es la ley de Hooke

En la figura 2.9 donde la pendiente empieza a decrecer es el punto de fluencia lo que significa que a partir de ese punto el material ya entra en la zona plástica y el material empieza a deformarse y ya no regresa a su estado inicial

$$\varepsilon = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{p}$$

Donde:

ε= Deformación axial total.

ε^{e}= Deformación en la zona elástica.

ε^{p}= Deformación en la zona plástica

La derivada con respecto al tiempo del esfuerzo axial en la zona elástica es representada por:

$$\dot{\sigma} = \mathrm{E}\dot{\varepsilon}^{e}$$

En la zona plástica tenemos: $\Delta\sigma_{\mathrm{y}} = H'\Delta e^{p}$

$$H' = \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{y}}}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{p}}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^{\mathrm{e}}}$$

Por definición se cumple que:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_y > 0, & H' > 0 \; Endurecimiento \\ \dot{\sigma}_y = 0, & H' = 0 \; Plasticidad \; Prefecta \\ \dot{\sigma}_y < 0, & H' < 0 \; Ablandaniento \end{cases}$$

La ley de Hooke en la zona elástica:

$$\Delta\sigma = \mathrm{E_T}\Delta\varepsilon = \mathrm{E}\Delta\varepsilon^{\mathrm{e}}$$

$$\text{en la región plástica } \Delta\sigma = \Delta\sigma_{\mathrm{y}}$$

Función de Fluencia

$f(\sigma, \sigma_{yo}) = |\sigma| - \sigma_{yo} = 0$, es la función de fluencia inicial

Si existe una deformación axial y la barra se está comprimiendo, entonces tenemos la razón de cambio de la deformación plástica:

$$\dot{\varepsilon^{p}} = \dot{\lambda} \; si \; \sigma > 0$$

$$\dot{\varepsilon^{p}} = -\dot{\lambda} \; si \; \sigma < 0$$

Por lo tanto $\dot{\varepsilon}^{p} = \dot{\lambda} \; sgn(\sigma)$

$$sgn(\sigma) = \begin{cases} +1, \sigma > 0 \\ -1, \sigma < 0 \end{cases}$$

$$\dot{\lambda} = la\ magnitud\ de\ \dot{\varepsilon}^p, \begin{cases} |\dot{\varepsilon}^p| = |\dot{\lambda}||sgn(\sigma)|, donde\ |sgn(\sigma)| = 1 \\ por\ lo\ tanto: |\dot{\varepsilon}^p| = \dot{\lambda} \end{cases}$$

También podemos escribir $\dot{\varepsilon}^p = \dot{\lambda}\frac{\partial f}{\partial \sigma}$, $\frac{\partial f}{\partial \sigma} = sgn(\sigma)$, que significa la regla de flujo plástico

Y la función de fluencia en la zona plástica:

$$f(\sigma, \sigma_y) = |\sigma| - \sigma_y = 0, \text{es la función de fluencia actual}$$

El esfuerzo en la zona plástica es:

$$\dot{\sigma_y} = H'|\dot{\varepsilon}^p| = H'\dot{\lambda}$$

Carga / Descarga y condiciones de consistencia

Existen algunas limitaciones en la zona plástica que son:

$$\dot{\lambda} \geq 0, \qquad f(\sigma, \sigma) =\leq 0$$

Dentro del régimen elástico: f < 0, $\dot{\lambda} = 0$

Dentro del régimen plástico: f = 0, $\dot{\lambda} > 0$

Por lo tanto tenemos la condición de Kuhn – Tucker que siempre se cumple esta ecuación tanto en la zona elástica como en la zona plástica $\dot{\lambda} f > 0$ [4]

2.7. Estado del arte de la modelación del cemento

La resistencia del concreto es afectada por muchos factores, como la relación agua – cemento, la composición y finura, los agregados, la temperatura y la edad del curado. Aún no existe un modelo

matemático que interprete de manera cuantitativa todos estos factores

Una investigación realizada por Knudsen está basada en un modelo matemático para predecir la resistencia a la compresión en la mezcla cemento – humo de sílice.

El modelo propuesto brinda la oportunidad de predecir la resistencia a la compresión, basado en la medición de las emisiones de calor durante las 48 h de hidratación del cemento si el infinito valor de resistencia a la compresión es conocido. [5]

Algunos investigadores realizaron diversos estudios antes que Knudsen con el objetivo de tratar de predecir el comportamiento del cemento por ejemplo:

Popovics realizó un modelo exponencial de cemento que es probablemente el primer modelo no lineal de endurecimiento del cemento, sin embargo Joens y Osbaeck describieron los efectos de la porosidad y la resistencia del cemento portland, también concluyeron que el desarrollo de lo microestructura en las pastas de cemento deberían ser interpretadas cuantitativamente desde el punto de vista de la cinética

Otro estudio realizado por Tsivilis y Parissakis nos muestra que la fineza del cemento es un factor importante en la temprana resistencia del cemento mientras que las propiedades químicas y mineralógicas contribuyen al desarrollo de las resistencias en edades avanzadas

Pero el primer modelo analítico de hidratación del cemento (modelo de dispersión) fue desarrollado por Knudsen. El estudio se basó en el desarrollo de un modelo matemático que describió con fiabilidad el efecto de principios de la hidratación en las propiedades del cemento de escoria Pórtland que contienen diversos porcentajes de humo de sílice (0, 2, 5, 8, 11 y 15% en masa).

Este investigador desarrolló una ecuación de hidratación que la relacionó con la resistencia a la compresión obteniendo:

$$k_{k1}\left(\frac{fc}{fc_{\infty}-fc}\right)+k_{k2}\left(\frac{fc}{fc_{\infty}-fc}\right)^{2}=t-to'$$

Donde:

- fc: resistencia a la compresión de mortero en el momento t, (MPa);
- fc_{∞}: resistencia a la compresión después de un tiempo infinito de curado(MPa), es decir, los 360 días de resistencia a la compresión de morteros

- to': edad cuando empieza a desarrollarse la resistencia (h),
- k_{k1} y k_{k2}: constantes de velocidad (h).

El modelo dispersión de Knudsen fue probado en las curvas de hidratación experimental

El modelo de Knudsen está siendo aplicado convenientemente tanto el grado de hidratación experimental como los datos de desarrollo de la resistencia como una función de tiempo usando el análisis de regresión no lineal.

Mientras que en otra investigación se realizó un estudio numérico y experimental del temprano desarrollo de las propiedades en la pasta del cemento. [6]

Este experimento se realizó con cemento portland con una relación agua-cemento de 0.37y 5% de humos de sílice curado a 20 ° C en condiciones herméticamente cerradas durante 5 días.

Se analizaron diversas propiedades tales como la conductividad eléctrica, resistencia, rigidez, porosidad, la penetración Vicat y deformación autógena fueron medidas y modeladas. La cinética de hidratación fue estudiada por medio de calorimetría isotérmica y calculada por medio de dos códigos numéricos (HYMOSTRUC, CEMHYD3D)

Los modelos permiten predecir la evolución de la microestructura de la pasta de cemento, del nivel de hidratación en función de la composición química del cemento, de la distribución de tamaño de partícula y el agua-cemento.

El efecto de la temperatura en las propiedades físicas de la pasta de cemento también se tiene en cuenta. Además, el modelo permite examinar la zona de transición entre el agregado y la de pasta, el desarrollo del módulo de elasticidad y la temprana edad de fluencia, y la compresión autógena de pasta de cemento y hormigón.

Los resultados de las simulaciones fueron comparados con los datos experimentales y se encontraron claras correlaciones entre la conductividad eléctrica, compresión autógena y conectividad de sólidos.

También se ha investigado los efectos que provoca la puzolana en el cemento tomada de diferentes lugares de Turquía. Las puzolánicas ofrecen una posibilidad de una producción económica en la industria del hormigón y mejorar las propiedades del hormigón, como la durabilidad. Los efectos de una puzolana sobre las propiedades del concreto varían con el tipo y el volumen de puzolana.

El tamaño de las partículas de distribución de cementos mezclados, la fijación del tiempo, el calor de hidratación, y resistencia a la compresión de mezclas de los morteros de cemento fueron determinados. El experimento se realizó para tres diferentes puzolanas y usando una relación agua-cemento y arena-cemento de 0.45 y 2.75 respectivamente para realizar las pruebas destructivas en 3, 7, 28, y 91 días. [7]

También existe un estudio del uso óptimo de una puzolana natural para la máxima resistencia a la compresión del hormigón [8]

En este estudio, se investigó el efecto de una puzolana natural sobre las propiedades del concreto. Se produjeron quince mezclas de concreto en tres series con el control de mezclas, teniendo 300, 350 y 400 kg de contenido de cemento. Estos controles de mezclas fueron modificados a una combinación de 250, 300 y 350 kg de cemento y el contenido de 40, 50, 75 y 100 kg de puzolana además de 1 m^3 de hormigón. La eficiencia de la puzolana fue obtenida mediante el uso de las ecuaciones de resistencia de Feret y Bolomey a los 28 días transcurridos de los hormigones; la cantidad máxima de puzolana con la eficacia máxima se determinó. Este estudio muestra que las eficiencias obtenidas de cada ecuación de

fuerza son similares y la disminución de estos valores con el aumento de proporción puzolana / cemento.

Además existe un estudio que analiza los efectos de los materiales puzolánicos y los métodos de curado en el módulo elástico de HPC (concreto de alto rendimiento) [9]

En esta investigación se evalúa el efecto de puzolanas como ceniza, humo de sílice y escoria de alto horno y el efecto de curado en el módulo elástico del concreto de alto rendimiento HPC y su variación con el tiempo.

La resistencia de compresión y el módulo de elasticidad son dos de las propiedades más importantes que deben conocerse. Además, el conocimiento del módulo de elasticidad a edad temprana y cómo cambia con el tiempo es importante para predecir efectos a largo plazo y durabilidad de estructuras de concretos. Hay una necesidad así, para evaluar el módulo de elasticidad y estudiar los factores que influyen en su predicción con el tiempo.
Varias series de mezclas de concreto fueron hechas y probadas para evaluar el módulo de elasticidad.

Las pruebas de resistencia a compresión se desarrollaron de acuerdo a la norma ASTM C-39 Tres probetas de 100 mm x 200 mm

se probaron para resistencia al 1, 3, 7, 14, y 28 días y tres cilindros para el módulo de elasticidad a 3, 7, 14, y 28 días.

Los resultados de prueba muestran que el modulo de elasticidad es mayor con el curado húmedo que en el curado en aire y el curado combinado.

También hay simulación computarizada de los procesos de fractura del concreto que utiliza modelos de mesonivel de estructuras reticulares. Es un algoritmo heurístico que se genera por la composición del concreto en el espacio 3D, produciendo especímenes con comparablemente alto contenido de agregado y distribución realista [10]

El modelo mecánico del concreto puede ser distinguido en tres niveles: El nivel macroscópico del material es considerado como homogéneo. Por lo tanto, los modelos no toman en consideración la composición material. En el nivel microscópico, la estructura de la pasta del cemento se modela, particularmente los medios porosos y por último en el nivel intermediario el concreto se considera como un material bifásico, ya sea como pequeños agregados rodeados por pasta de cemento endurecido o como partículas agregadas gruesas dispersadas en una matriz del mortero.

Los modelos de mesonivel son herramientas que permiten pronosticar los efectos cualitativos y cuantitativos de propiedades mecánicas independientes de diferentes componentes de materiales en las propiedades mecánicas globales del material compuesto.

También se puede calcular la resistencia a la compresión de materiales heterogéneos utilizando un algoritmo que está basado en una discretización de elementos finitos y se aplica a las imágenes digitales. Este algoritmo se enfoca en una representación realista de la microestructura de los materiales, se prueba la determinación de la compresión mediante el algoritmo de una mezcla de cemento compuesto, con su real microestructura almacenados en una imagen digital. [11]

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. Recolección de datos

La recolección de los datos de nuestra experimentación para su posterior análisis se lo realizará una vez concluidas las probetas de pasta de cemento con sus respectivos ensayos mecánicos.

Para la realización de nuestras probetas utilizaremos la norma: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Designation: C 109/C 109M – 02) [12]

3.2. Diseño del experimento

Nuestro objetivo es determinar la variación de la resistencia a la compresión del cemento tipo I y IV curados en aire y en agua mediante modelos matemáticos y experimentales.

El análisis del cemento tipo I y IV se lo realizará en cubos de $51mm^3$ y con un tiempo de fraguado para realizar los ensayos mecánicos a

7, 14, 21, 28 días para el modelo y 4, 11, 18, 25 días para su validación respectivamente.

Los datos que vamos a obtener de manera experimental de todas las muestras en los diferentes días, los vamos a transformar a Newton para poder dividirlo con el área y así obtener el esfuerzo en unidades de Mega Pascales.

Después graficaremos las curvas esfuerzo último versus días de curado para los diferentes tipos de cementos con sus respectivos curados con el propósito de poder encontrar las ecuaciones representativas para cada tipo de cemento mediante regresión y estas ecuaciones posteriormente las utilizaremos en la validación del modelo.

Después de haber obtenido las ecuaciones, analizaremos los datos para ver si existe una relación entre los diferentes cementos, si los datos obtenidos tienen o no una distribución normal, si hay alguna relación entre las medias de los diferentes tratamientos y en que días obtenemos nuestros mayores esfuerzos. Para realizar todo este análisis estadístico utilizaremos la herramienta matemática Statistica y se realizará un análisis de varianzas.

Y para finalizar el análisis se hará uso de otra herramienta matemática llamada MatLab, la cual nos permitirá graficar las curvas experimentales esfuerzo – deformación unitaria y mediante un algoritmo se encontrará una curva modelo para cada día de curado que sea representativo de los datos experimentales para posteriormente verificar cual es el ajuste y el error que tienen los datos experimentales con respecto al modelo encontrado.

Para utilizar el algoritmo vamos a utilizar las medias en cada deformación

El algoritmo consta de los siguientes pasos.

Se considera un intervalo en el tiempo $t \in [t_n, t_{n+1}]$, y asumir que:

$\sigma_n \; y \; \sigma_{Y,n}$ son conocidos.

Entonces se debe encontrar $\sigma_{n+1} \; y \; \sigma_{Y,n+1}$ los cuales deberán satisfacer la condición de Kuhn – Tucker para un incremento de deformación $\Delta\varepsilon$

También ${\sigma_{n+1}}^{tr}$ se conoce como el predictor del esfuerzo elástico y $E\Delta\varepsilon^p$ es el corrector del esfuerzo plástico

Paso 1: Calcular $\sigma_{n+1}^{tr} = \sigma_n + E\Delta\varepsilon$

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

No, $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr}, \quad \sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n}$ y salir.

Paso 3: Si, empieza Newton – Raphson e itere hasta

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

Paso 4: $\sigma_{n+1} = \sigma_{n+1}^{tr} - E\Delta\lambda sgn(\sigma_{n+1}^{tr})$ y

$\sigma_{Y,n+1} = \sigma_{Y,n} + H'_{n+1}(\Delta\lambda)$ y salir. [4]

En el programa también se debe implementar las siguientes fórmulas que se las obtiene de la siguiente figura

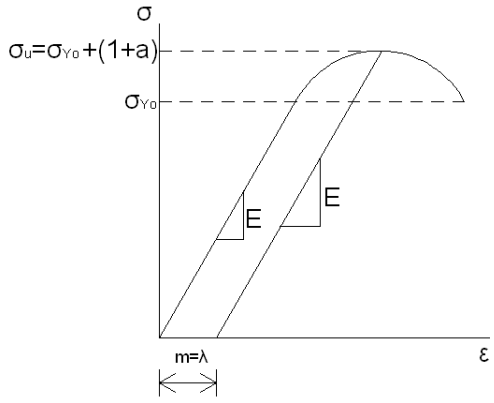

FIGURA 3.1 CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN

$$\sigma_u = \sigma_{Y0}(1+a) \qquad \text{y} \quad \sigma_y = \sigma_{Y0}\left(1 + \frac{2a}{m+\lambda}\sqrt{m\lambda}\right)$$

El algoritmo desarrollado nos indica el comportamiento del material y a continuación mostramos el algoritmo

Datos del algoritmo

σ(1): El valor inicial del esfuerzo en el origen. [MPa].

sy(1): Esfuerzo de Fluencia. [MPa]

E: El módulo elástico o módulo de Young. [MPa].

ε: Es el rango de deformación

dε: Es la variación de la deformación.

H': Es el módulo plástico del material.

λ: Es la magnitud de ε^p, este valor irá cambiando al ingresar a la zona plástica.

Δ λ: Variación de λ

λ(1): Es el valor inicial de λ el cual es cero, ya que partimos de la región elástica.

a, m: constantes del material.

σtr: Predictor del esfuerzo elástico. [MPa].

Datos del proyecto:

Mostramos un ejemplo de un día de curado.

```
%NEWTON RAPHSON NON-LINEAR HARDENING
% CEMENTO TIPO I- CURADO EN AIRE - DIA 7 - SIMULADO
clc;
clear all;
m=0.003;
a=0.7;
E=5265.25;
de=0.002490196;
et=0.019;
epsilon=0:de:et;
ntotal=et/de;
sigma=zeros(ntotal,1);
sigma(1,1)=0;
```

```
sigmay=zeros(ntotal,1);
sigmay(1,1)=65.56;
tol=1e-15;
L(1,1)=0;
% Mediante el lazo for encontramos los esfuerzos del material en la
zona elástica.
for n=1:ntotal
st(n,1)=sigma(n,1)+E*de;
Ft(n,1)=abs(st(n,1))-sigmay(n,1);
% El lazo if nos permite saber si estamos en la zona elástica o
plástica.
if Ft(n,1)>0; %DEFORMACION PLASTICA%
    kdl(1,1)=tol;
    for k=1:20
        KL(k,1)=kdl(k,1)+L(n,1);
        H(n,1)=a*sigmay(1,1)*sqrt(m/KL(k,1))*((m-
        KL(k,1))/(m+KL(k,1))^2);
        r(k,1)=Ft(n,1)-kdl(k,1)*(E+H(n,1));
        nr(k,1)=norm(r(k,1));
        if nr(k,1)<tol*nr(1,1)
            break
        end
```

```
A=-
1/2*(2*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m
^2*kdl(k,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m^2*L(n,1)+6*E*(m*KL
(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,1)^2+12*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*kdl(k,
1)*L(n,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*m*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k
,1))^(3/2)*kdl(k,1)^3+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)^2*L(n
,1)+6*E*(m*KL(k,1))^(3/2)*kdl(k,1)*L(n,1)^2+2*E*(m*KL(k,
1))^(3/2)*L(n,1)^3+kdl(k,1)*m^4*a*sigmay(1,1)+2*m^4*a*
sigmay(1,1)*L(n,1)-
3*kdl(k,1)*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^2-
2*m^2*a*sigmay(1,1)*L(n,1)^3-
6*kdl(k,1)^2*m^3*a*sigmay(1,1)-
6*kdl(k,1)*m^3*a*sigmay(1,1)*L(n,1)+kdl(k,1)^3*m^2*a*si
gmay(1,1))/(m+kdl(k,1)+L(n,1))^3/(m*KL(k,1))^(3/2);
rdl(k+1,1)=-(r(k,1)/A);

kdl(k+1,1)=kdl(k,1)+rdl(k+1,1);


 end
 dl(n+1,1)=kdl(k,1);
L(n+1,1)=KL(k,1);
sigma(n+1,1)=st(n,1)-E*dl(n+1,1)*sign(st(n,1));
sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1)+H(n)*dl(n+1,1);
```

```
else
   L(n+1,1)=0;
    sigma(n+1,1)=st(n,1);
    sigmay(n+1,1)=sigmay(n,1);
end
end
hold on
plot(epsilon',sigma, 'r')
sigma
```

Todos los resultados obtenidos en los diferentes días de curados servirán como referencia para diferentes análisis.

3.3. Pruebas en laboratorio

Cumpliendo con la norma ASTM C109, para los días establecidos se procede a realizar los ensayos destructivos

Los datos de los equipos utilizados para realizar las pruebas de ensayos destructivos se muestran en el anexo K

3.4. Experimentación

Siguiendo los procedimientos de la norma ASTM C 109, utilizaremos:

Morteros cúbicos de 2 in o (51mm), podemos utilizar sistema inglés o sistema métrico.

Equipos

Los equipos que utilizaremos en esta investigación están basados a la norma ASTM C109 que mencionaremos a continuación:

- Los pesos y balanzas deben cumplir con los requerimientos de la especificación ASTM C1005. La balanza deberá ser evaluada por precisión y sesgo con una carga de 2000 g.
- Los vasos graduados, de capacidad adecuada deben ser lo suficientemente largos para medir la mezcla de agua en una sola operación. Las divisiones en los mismos deben ser cada 5 ml con una variación permisible de ±2mL, y si el vaso es de 250 o 500 ml, entonces deberá tener divisiones por lo menos cada 10 y 25 ml respectivamente. La forma y largo de las divisiones varían de acuerdo al tipo que represente la misma (principal, última o intermedia).
- Los moldes para las muestras cúbicas de 51mm deben ser ajustados convenientemente Dichos moldes no deben tener más de tres compartimentos cúbicos, y separados en no mas de dos partes. Las partes de los moldes deben ser de una metal duro no atacable por los morteros. Para moldes nuevos

la dureza del metal debe ser mayor a 55 HRB, los lados deben ser rígidos para prevenir derramamiento o ladeo del molde. Las caras interiores del molde deben ser de superficies planas y conforme a las tolerancias mostradas en la tabla 5 según la norma ASTM C109.

TABLA 5

VARIACIÓN PERMISIBLE DE LAS PROBETAS [15]

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

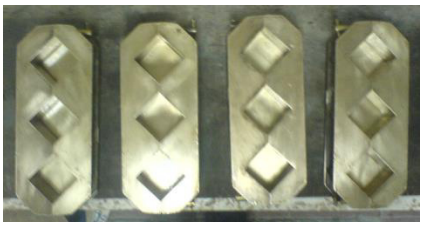

FIGURA 3.2 MOLDES CÚBICOS

- La mezcladora tazón y paleta se debe usar según lo establecido en la norma ASTM C 305. la mezcladora mecánica debe ser impulsada eléctricamente
- Tabla y molde de flujo se debe usar conforme a los requerimientos de especificación ASTM C230.

- La paleta, con una cuchilla de acero de 4 a 6 pulgadas [100 a 150 mm] de longitud, con bordes rectos.
- Vitrina o cuarto de humedad conforme a los requerimientos de especificación ASTM C 511.
- La máquina de pruebas debe tener espacio suficiente para permitir el uso de aparatos verificadores. La carga aplicada a la muestra de análisis deberá estar indicada con una precisión de ±1 %. Si la carga aplicada por la compresión máquina está registrada en un dial, el dial se pondrá a disposición de una escala graduada que se pueden leer por lo menos a una aproximación de 0,1% de la escala máxima de carga y el puntero del dial debe ser lo suficientemente largo para alcanzar las marcas y el ancho no debería tapar dos escalas consecutivas. El equipo debe poseer un calibrador inicial.
- Si la máquina de pruebas es digital, el display debe ser legible fácilmente y con incrementos de igual o menor al 0.10 % de la carga total

Materiales

El material a utilizarse en esta investigación esta conformada por dos pastas de cemento.

La primera pasta de cemento es de:

- Cemento Portland tipo I
- Agua

La segunda pasta de cemento es de:

- Cemento Portland tipo IV
- Agua

Lote de ensayo

Debe realizarse dos o tres muestras por cada lote de morteros para cada uno de los periodos de prueba o ensayo de edad cumpliendo lo establecido en la norma ASTM C109.

Temperatura y Humedad

La temperatura del aire en las proximidades de la losa de mezcla, los materiales secos, moldes, placas base, y en el tazón de mezcla, se mantendrá entre 73.5 ± 5.5 ºF o [23 ± 3ºC].

La temperatura de la mezcla de agua, habitación húmeda, y el agua en el tanque de almacenamiento será de 73.5 ± 3,5ºF o [23 ± 2ºC].

La humedad relativa del laboratorio no podrá ser inferior al 50%. El cuarto húmedo se ajustará a los requisitos de la especificación ASTM C 511.

Procedimiento

Utilizaremos una relación de 0.3 para la mezcla agua / cemento

La cantidad de materiales a mezclar será la siguiente

TABLA 6

LOTE DE PASTAS

Un lote de mortero	
Número de muestras	12
Cemento	3000 gr.
Relación Agua / Cemento (0.3)	900 gr.

La norma nos establece realizar los ensayos en 7, 14, 21 y 28 y para validar nuestro modelo también vamos a realizar las pruebas en 4, 11, 18 y 25 días. En las pruebas del modelo y validación siempre vamos a tener 7 días de separación para realizar el ensayo destructivo.

El moldeado de la muestras se lo debe realizar en un tiempo no mayor a 2min y 30s después de haber finalizado la mezcla original del lote de pastas.

La primera capa del molde debe ser de 25mm en todos los compartimentos cúbicos (la mitad del cubo).

Se debe apisonar el mortero en cada compartimento cúbico 32 veces en unos 10 segundos en 4 rondas, cada ronda debe ser perpendicular a las otras y cada ronda consta de 8 golpes como se muestra en la figura 3.3

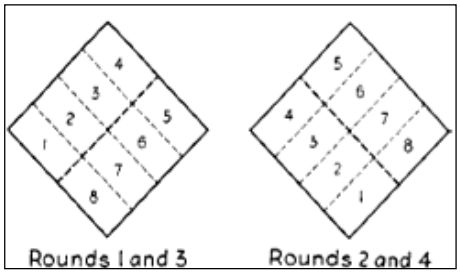

FIGURA 3.3 ORDEN DE APISONAMIENTO [12]

FIGURA 3.4 LLENADO DE PRIMERA CAPA DE MEZCLA

La presión del apisonamiento debe ser lo suficiente para garantizar la uniformidad de llenado de los moldes. Las 4 rondas de apisonamiento (32 golpes) del mortero deberá ser completado en un cubo antes de pasar al siguiente.

Cuando el apisonamiento de la primera capa ha finalizado en todos los compartimentos, llenar los compartimentos con el resto de mortero y, a continuación, apisonar, tal como se especifica para la primera capa.

FIGURA 3.5 LLENADO DE LA SEGUNDA CAPA DE MEZCLA

Al término del apisonamiento, las cimas de todos los cubos deben extenderse ligeramente por encima de las cimas de los moldes.

Almacenamiento de las muestras

El almacenamiento de las muestras de análisis se lo realiza inmediatamente después de terminar de moldear.

Colocamos todas las probetas en el laboratorio cuya temperatura debe mantenerse a 23ºC±3ºC.

En el laboratorio después de concluir el llenado procedemos a tapar con un plástico durante 24 horas

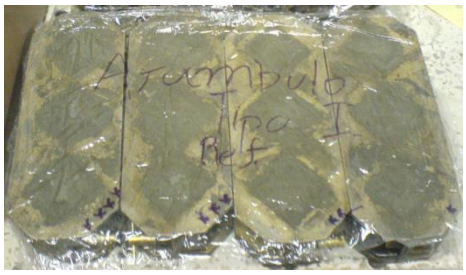

FIGURA 3.6 PROBETAS CUBIERTAS CON UN PLÁSTICO

Las probetas deben permanecer 24 horas con sus superficies cubiertas con un plástico e inmediatamente después de ese tiempo procedemos a realizar el curado.

Sumergimos totalmente en un recipiente con agua las probetas que van hacer curadas en agua

FIGURA 3.7 PROBETAS CURADAS EN AGUA

Las probetas que van hacer curadas en aire se las deja expuestas al medio ambiente

FIGURA 3.8 PROBETAS CURADAS EN AIRE

En el momento de realizar los ensayos destructivos debemos tener en cuenta los tiempos de nuestras probetas, debido a que estos tiempos ya están establecidos en la norma y por lo tanto nosotros debemos estar en esas tolerancias. A continuación mostramos esas tolerancias permitidas según la norma C109

TABLA 7

VARIACIÓN PERMISIBLE EN FUNCIÓN DE LA EDAD

Edad de la muestra	Tolerancia Permisible
24 horas	± ½ hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas

Antes de realizar la ruptura se limpia las superficies hasta obtener las caras totalmente limpias y planas.

En los días correspondientes se realizan las pruebas destructivas. Las muestras son colocadas en la máquina en una posición recta, sin inclinación y en el centro para después aplicar una carga a una velocidad de 200 a 400ls/s (900-1800 N/s), se tomaron lecturas cada cinco milésimas de pulgada de variación hasta que se produzca la ruptura de la probeta.

FIGURA 3.9 PREPARACÍON DE LA MÁQUINA

FIGURA 3.10 PROBETA EN ENSAYO DE RUPTURA

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Tabulación de datos y resultados

A continuación se muestran algunas tablas resumidas con algunos valores importantes que nos servirán para los diferentes análisis.

TABLA 8

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL CEMENTO TIPO I

CURADO EN AIRE

CEMENTO TIPO I: σu (MPa)					
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		7	76,9589	76,9589	79,5242
		14	83,7996	84,6547	84,6547
		21	63,1532	63,1532	71,6364
		28	74,3936	73,5385	74,3936
	VALIDACIÓN	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		4	67,5528	68,4079	76,9589
		11	82,9445	82,9445	84,6547
		18	83,7996	97,4812	82,9445
		25	88,0751	81,2344	83,7996

TABLA 9

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL CEMENTO TIPO I

CURADO EN AGUA

CEMENTO TIPO I: σu (MPa)					
CURADO AL AGUA	MODELO	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		7	89,7853	90,6404	87,2200
		14	99,1914	97,4812	89,7853
		21	102,6118	108,5975	76,9589
		28	95,7710	97,4812	94,0608
	VALIDACIÓN	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		4	80,3793	82,9445	80,3793
		11	101,7567	102,6118	102,6118
		18	108,5975	109,4526	108,5975
		25	90,6404	88,9302	89,7853

TABLA 10

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL PROMEDIO CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

DATOS EXPERIMENTALES PROMEDIO CEMENTO TIPO I							
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		7	78,2415	65,5575	5265,2519	0,0026	0,19
		14	84,3697	70,1181	5631,5303	0,0024	0,20
		21	71,6364	63,4674	2238,9927	0,0054	0,13
		28	74,1085	57,9757	3777,2459	0,0028	0,28
	VALIDACIÓN	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		4	70,9732	54,1562	5402,6063	0,0018	0,31
		11	83,5146	71,2582	5457,5480	0,0021	0,17
		18	83,7996	76,3888	4382,2593	0,0033	0,10
		25	84,6547	64,1324	5150,7899	0,0025	0,32

TABLA 11

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL PROMEDIO CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

DATOS EXPERIMENTALES PROMEDIO CEMENTO TIPO I							
CURADO AL AGUA	MODELO	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		7	89,2153	69,2630	5562,8531	0,0014	0,29
		14	95,4860	80,3793	5379,7139	0,0022	0,19
		21	96,0561	72,1133	5544,5392	0,0026	0,33
		28	95,7710	76,9589	5150,7899	0,0013	0,24
	VALIDACIÓN	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		4	81,2344	60,1419	7371,3526	0,0039	0,35
		11	102,3268	88,0751	6295,4099	0,0037	0,16
		18	108,8825	88,3602	6803,6211	0,0039	0,23
		25	89,7853	66,1276	6043,5935	0,0026	0,36

TABLA 12

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

CEMENTO TIPO IV: σu (MPa)					
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		7	49,9570	45,2441	48,0718
		14	50,8996	49,9570	49,0144
		21	45,2441	40,5311	42,4163
		28	40,5311	42,4163	42,9819
	VALIDACIÓN	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		4	45,2441	39,5886	38,6460
		11	42,4163	46,1866	42,2278
		18	40,5311	44,3015	36,7608
		25	46,7522	37,3263	44,3015

TABLA 13

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL CEMENTO TIPO IV

CURADO EN AGUA

CEMENTO TIPO IV: σu (MPa)					
CURADO AL AGUA	MODELO	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		7	47,1292	48,0718	51,8422
		14	65,9809	58,6288	58,6288
		21	76,3494	74,4642	75,4068
		28	70,6938	70,6938	55,6125
	VALIDACIÓN	DÍAS	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		0	0	0	0
		4	46,1753	45,3202	46,1753
		11	59,3828	52,7847	56,5551
		18	63,1532	64,0958	59,9484
		25	70,6938	63,1532	54,6699

TABLA 14

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL PROMEDIO CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

DATOS EXPERIMENTALES PROMEDIO CEMENTO TIPO IV							
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		7	49,9570	44,1758	1587,4825	0,0034	0,13
		14	50,8996	42,1021	1690,7148	0,0023	0,21
		21	43,8302	37,0750	1335,1370	0,0020	0,18
		28	41,9764	33,3047	1441,1731	0,0032	0,26
	VALIDACIÓN	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		4	42,4163	34,5614	1701,4394	0,0025	0,23
		11	46,1866	41,0967	1650,3395	0,0019	0,12
		18	44,3015	37,0750	1420,7051	0,0037	0,19
		25	46,7522	39,5257	1537,7934	0,0045	0,18

TABLA 15

ESFUERZO ÚLTIMO EXPERIMENTAL PROMEDIO CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

DATOS EXPERIMENTALES PROMEDIO CEMENTO TIPO IV							
CURADO AL AGUA	MODELO	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		7	51,8422	42,4163	1861,7489	0,0020	0,22
		14	65,9809	58,8801	1940,9574	0,0034	0,12
		21	75,4068	66,9235	1764,7361	0,0046	0,13
		28	70,6938	61,2680	1875,1211	0,0021	0,15
	VALIDACIÓN	DÍAS	σu (MPa)	σy (MPa)	E (MPa)	m	a
		0	0	0	0		
		4	46,1753	39,3345	3159,1511	0,0028	0,17
		11	57,9690	43,9873	1732,0994	0,0014	0,32
		18	63,6245	55,6125	1665,4802	0,0041	0,14
		25	66,9235	57,3091	1875,3475	0,0042	0,17

Todas las tablas con los días respectivos de curados se muestran en los anexos A y B

4.2. Identificación de cambios de propiedades

Análisis de Regresión Lineal.

Mediante regresión lineal buscamos obtener el mejor modelo que se ajuste a los datos obtenidos experimentalmente. Mediante un modelo polinomial de tercer orden se encontró el mejor ajuste para los diferentes datos, con unas correlaciones superiores al 95 %, por lo cual podemos concluir que nuestros modelos son aceptables. En

la figura 4.1 se muestran las diferentes curvas experimentales con sus respectivas curvas de regresión.

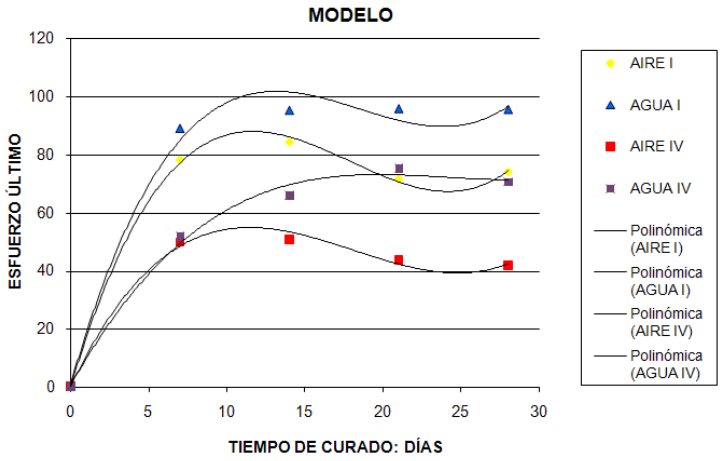

FIGURA 4.1 MODELO DE REGRESIÓN LINEAL

En la tabla 16 se muestran las ecuaciones de regresión obtenidas con sus respectivos coeficientes de correlación.

TABLA 16

ECUACIONES DE REGRESIÓN LINEAL

CEMENTOS Y CURADOS	ECUACIÓN DE REGRESIÓN	R^2
C I AIRE	$y = 0{,}021x^3 - 1{,}139x^2 + 17{,}91x + 0{,}274$	0,998
C I AGUA	$y = 0{,}019x^3 - 1{,}106x^2 + 18{,}77x + 1{,}034$	0,989
C IV AIRE	$y = 0{,}013x^3 - 0{,}716x^2 + 11{,}22x + 0{,}396$	0,993
C IV AGUA	$y = 0{,}005x^3 - 0{,}412x^2 + 9{,}578x + 0{,}605$	0,993

Validación del modelo de regresión lineal.

Estas ecuaciones de regresión obtenidas en los datos experimentales representan la resistencia última del material y las

utilizamos para verificar si los modelos se ajustan a los datos de validaciones de los diferentes cementos con sus respectivos curados.

En la siguiente tabla 17 comparamos los datos obtenidos del experimento en los días de validación con los resultados que se obtienen del modelo de regresión lineal y se puede observar que hay una variación en los datos iniciales a los 4 días de aproximadamente 20MPa en especial del cemento tipo I, lo cual se debe a los errores experimentales.

TABLA 17

COMPARACIÓN ENTRE MODELO REGRESIÓN Y VALIDACIÓN

	DÍAS	AIRE C I	AGUA C I	AIRE C IV	AGUA C IV
VALIDACIÓN: DATOS EXPERIMENTALES	4	70,9732	81,2344	42,4163	46,1753
	11	83,5146	102,3268	46,1866	57,9690
	18	83,7996	108,8825	44,3015	63,6245
	25	84,6547	89,7853	46,7522	66,9235
MODELO REGRESIÓN	DÍAS	AIRE C I	AGUA C I	AIRE C IV	AGUA C IV
	4	55,034	59,634	34,652	32,645
	11	87,416	98,967	54,483	62,766
	18	76,09	91,358	46,188	68,681
	25	64,274	75,909	36,521	60,68

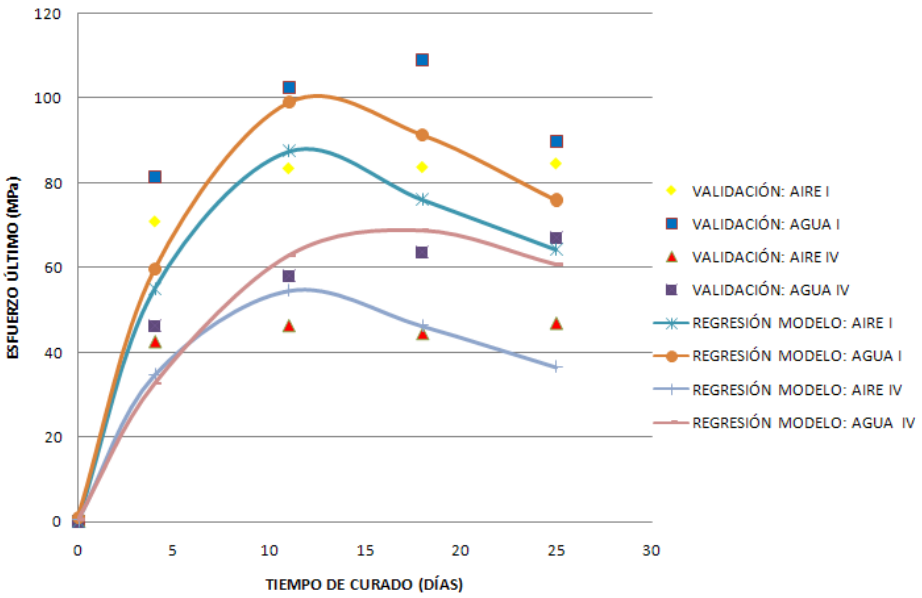

FIGURA 4.2 COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO DE REGRESIÓN Y VALIDACIÓN

Ahora para analizar los datos utilizaremos el programa Statistica, mediante el cual verificaremos si nuestros datos son normales para poder realizar un análisis de varianzas (ANOVA).

Para utilizar el programa Statistica trabajaremos con los esfuerzos últimos promedios mostrados en las tablas: 8, 9, 12 y 13 respectivamente.

En la tabla 18 mostramos todos los esfuerzos últimos de todas las probetas en los diferentes días de curado

TABLA 18

DATOS MODELO: ESFUERZOS ÚLTIMOS DE LOS CEMENTOS TIPO I - IV

	1 DÍAS	2 ESF. ULT. C I AIRE	3 ESF. ULT. C I AGUA	4 ESF. ULT. C IV AIRE	5 ESF. ULT. C IV AGUA
1	7	76,96	89,79	49,96	47,13
2	7	76,96	90,64	45,24	48,07
3	7	79,52	87,22	48,07	51,84
4	14	83,8	99,19	50,9	65,98
5	14	84,65	97,48	49,96	58,63
6	14	84,65	89,79	49,01	58,63
7	21	63,15	102,61	45,24	76,35
8	21	63,15	108,6	40,53	74,46
9	21	71,64	76,96	42,42	75,41
10	28	74,39	95,77	40,53	70,69
11	28	73,54	97,48	42,42	70,69
12	28	74,39	94,06	42,98	55,61

TABLA 19

DATOS GENERALES MODELO

	Descriptive Statistics (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV)						
Variable	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.	Standard Error
ESF. ULT. C I AIRE	12	75,56667	63,15000	84,6500	52,9960	7,27983	2,101507
ESF. ULT. C I AGUA	12	94,13250	76,96000	108,6000	65,8584	8,11532	2,342691
ESF. ULT. C IV AIRE	12	45,60500	40,53000	50,9000	14,7815	3,84467	1,109860
ESF. ULT. C IV AGUA	12	62,79083	47,13000	76,3500	116,5730	10,79690	3,116796

ANÁLISIS MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

Primero verificaremos si nuestros datos son normales, debido a que es un requisito para poder realizar el análisis de varianzas.

De la figura 4.3 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.91$

$W_{tabla}=0.859$, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.91 > 0.85$$

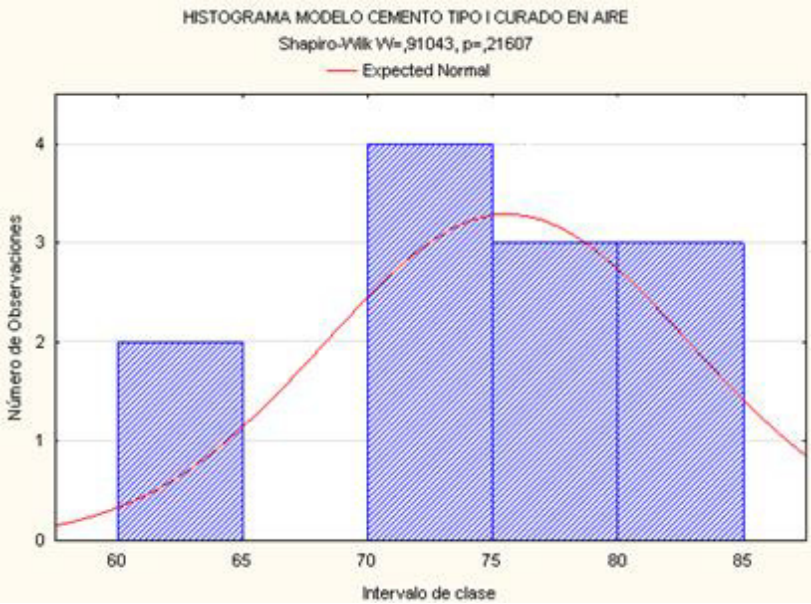

FIGURA 4.3 HISTOGRAMA MODELO CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

Por lo tanto nuestros datos son normales entonces podemos aplicar ANOVA (Análisis de varianzas)

En el programa de Statistica utilizaremos one way anova debido a que solo analizaremos una variable en función de los días de curado.

TABLA 20

MODELO: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA ESFUERZO ÚLTIMO C I AIRE

Effect	Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C I AIRE (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	68523,85	1	68523,85	10268,48	0,000000
DÍAS	529,57	3	176,52	26,45	0,000167
Error	53,39	8	6,67		

Mediante el estadístico de prueba de Fisher F que nos indica si existe o no diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curados analizaremos la tabla 20.

Para que existan diferencias significativas entre las medias, debe cumplirse lo siguiente:

$$F_o > F_{(v1,\ v2)}$$

Donde F_o lo obtenemos del programa de Statistica, mientras que $F_{(v1,\ v2)}$ lo obtenemos de la tabla de Fisher que mostramos en el anexo E

Tenemos N= 12 muestras y t= 4 grados de libertad que son los diferentes días de curados

Para $v_1=t - 1$, $v_2= N – t$

Del análisis de varianza de la tabla 20, tenemos que los cuadrados medios requeridos son CMT = 176.52 con 3 grados de libertad y CME = 6.67 con 8 grados de libertad.

Del anexo E tenemos: $F_{(v1, v2)} = F_{(3, 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

$$26.45 > 4.07$$

Como $F_0 = 26.45$ cae en la región crítica $F_0 > 4.07$, se rechaza la hipótesis nula Por lo tanto concluimos que si existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 21

TABLA 21

M0DELO: MEDIAS DEL CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

Cell No.	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=26,452, p=,00017 Type I decomposition DÍAS	ESF. ULT. C I AIRE Mean	ESF. ULT. C I AIRE Std.Err.	ESF. ULT. C I AIRE -95,00%	ESF. ULT. C I AIRE +95,00%	N
1	7	77,81333	1,491445	74,37405	81,25261	3
2	14	84,36667	1,491445	80,92739	87,80595	3
3	21	65,98000	1,491445	62,54072	69,41928	3
4	28	74,10667	1,491445	70,66739	77,54595	3

En la figura 4.4 mostramos el esfuerzo último en función de los diferentes días de curado, y podemos observar que en los 14 días se obtuvo un esfuerzo último promedio mayor que los demás días de curado

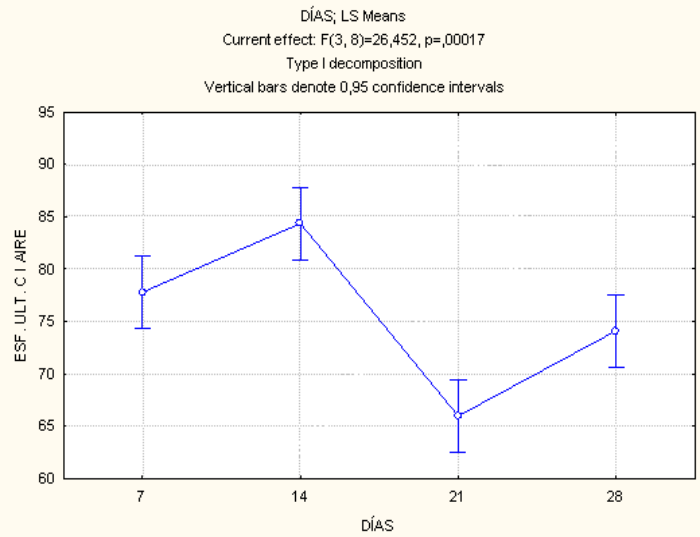

FIGURA 4.4 MODELO: ESFUERZO ÚLTIMO C I AIRE VS DÍAS

ANÁLISIS MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

Verificaremos si nuestros datos son normales, debido a que es un requisito para poder realizar el análisis de varianzas.

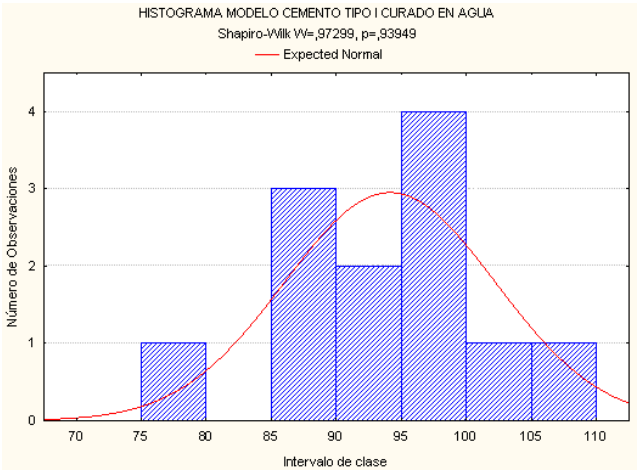

FIGURA 4.5 HISTOGRAMA MODELO CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

De la figura 4.5 obtenemos:

$W_{gráfica}$=0.97

W_{tabla}=0.859, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.97 > 0.85$$

Por lo tanto nuestros datos son normales entonces podemos aplicar ANOVA (Análisis de varianzas)

Se utilizará one way anova porque solo analizaremos una variable en función de los días de curado.

TABLA 22

MODELO: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA ESFUERZO ÚLTIMO C I AGUA

Effect	Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C I AGUA (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	106331,1	1	106331,1	1356,062	0,000000
DÍAS	97,1	3	32,4	0,413	0,748328
Error	627,3	8	78,4		

Para que exista diferencias significativas, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

De la tabla 22 tenemos: $F_o = 0.413$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1, v2)} = F_{(3, 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

$$0.413 > 4.07$$

Por lo tanto concluimos que no existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 23.

TABLA 23

MODELO: MEDIAS DEL CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

Cell No.	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=,41299, p=,74833 Type I decomposition DÍAS	ESF. ULT. C I AGUA Mean	ESF. ULT. C I AGUA Std.Err.	ESF. ULT. C I AGUA -95,00%	ESF. ULT. C I AGUA +95,00%	N
1	7	89,21667	5,112459	77,42732	101,0060	3
2	14	95,48667	5,112459	83,69732	107,2760	3
3	21	96,05667	5,112459	84,26732	107,8460	3
4	28	95,77000	5,112459	83,98065	107,5594	3

En la figura 4.6 mostramos el esfuerzo último en función de los diferentes días de curado y podemos observar que en los días 14, 21 y 28 se obtuvieron esfuerzos últimos promedios similares.

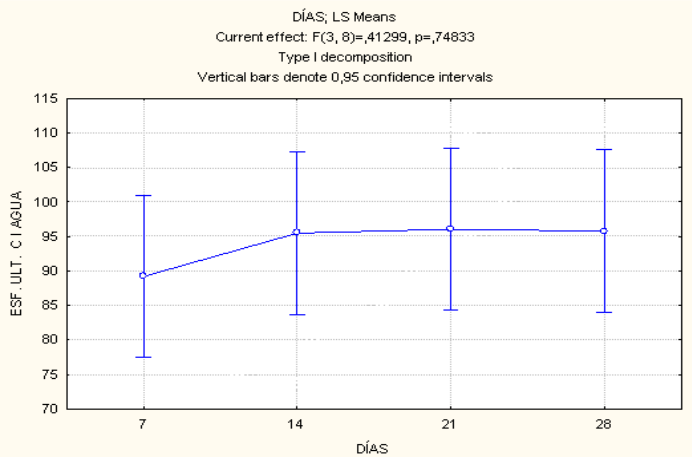

FIGURA 4.6 MODELO: ESFUERZO ÚLTIMO C I AGUA VS DÍAS

ANÁLISIS MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

Vamos a verificar si nuestros datos son normales

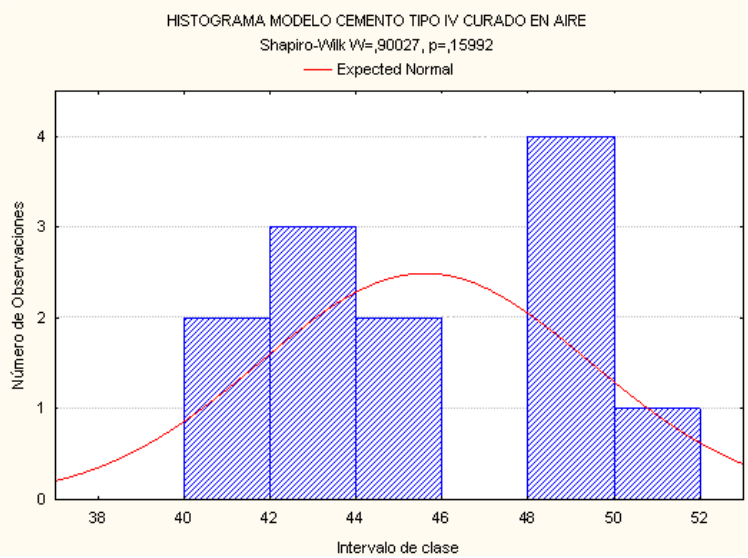

FIGURA 4.7 HISTOGRAMA MODELO CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

De la figura 4.7 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.9$

$W_{tabla}=0.859$, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.9 > 0.85$$

Nuestros datos son normales, por lo tanto podemos aplicar ANOVA (Análisis de varianzas)

Aplicaremos one way anova para una variable en función de los días de curado.

TABLA 24

MODELO: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA ESFUERZO ÚLTIMO C IV AIRE

Effect	Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C IV AIRE (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	24957,79	1	24957,79	7232,885	0,000000
DÍAS	134,99	3	45,00	13,040	0,001900
Error	27,60	8	3,45		

Para que exista diferencias significativas, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

De la tabla 24 tenemos: $F_o = 13.04$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1, v2)} = F_{(3, 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

$$13.04 > 4.07$$

Por lo tanto podemos concluir que si existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 25

TABLA 25

MODELO: MEDIAS DEL CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=13,040, p=,00190 Type I decomposition					
Cell No.	DÍAS	ESF. ULT. C IV AIRE Mean	ESF. ULT. C IV AIRE Std.Err.	ESF. ULT. C IV AIRE -95,00%	ESF. ULT. C IV AIRE +95,00%	N
1	7	47,75667	1,072474	45,28354	50,22980	3
2	14	49,95667	1,072474	47,48354	52,42980	3
3	21	42,73000	1,072474	40,25687	45,20313	3
4	28	41,97667	1,072474	39,50354	44,44980	3

En la figura 4.8 mostramos el esfuerzo último en función de los diferentes días de curado y se puede observar que en los 14 días se obtuvo un esfuerzo último promedio mayor que los demás días de curado

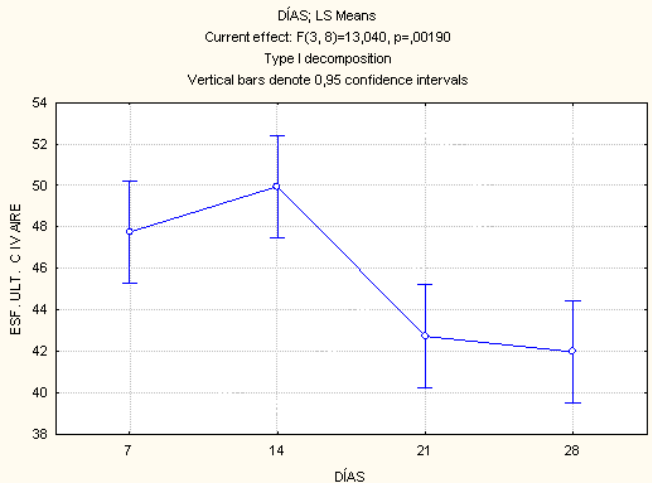

FIGURA 4.8 MODELO: ESFUERZO ÚLTIMO C IV AIRE VS DÍAS

ANÁLISIS MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

Se verificará si nuestros datos son normales

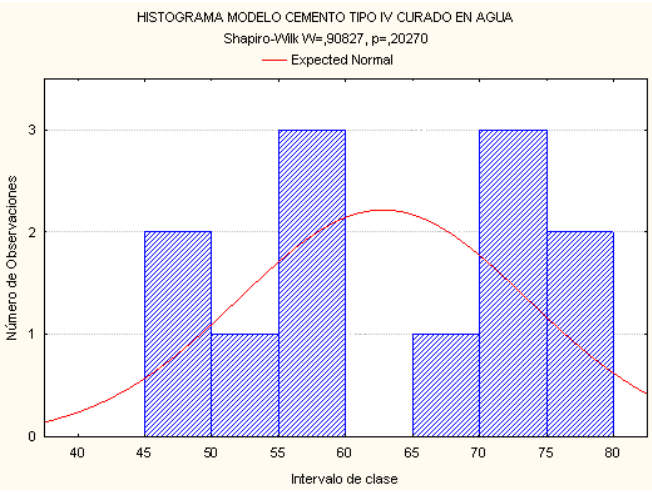

FIGURA 4.9 HISTOGRAMA MODELO CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

De la figura 4.9 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.9$

$W_{tabla}=0.859$, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.9 > 0.85$$

Por lo tanto nuestros datos son normales entonces podemos aplicar análisis de varianzas.

Aplicaremos one way anova para analizar una variable en función de los días de curado.

TABLA 26

MODELO: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA ESFUERZO ÚLTIMO C IV AGUA

Effect	Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C IV AGUA (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	47312,27	1	47312,27	1875,311	0,000000
DÍAS	1080,47	3	360,16	14,276	0,001412
Error	201,83	8	25,23		

Para que exista diferencias significativas entre las medias, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

De la tabla 26 tenemos: $F_o = 14.276$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1, v2)} = F_{(3, 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

$$14.276 > 4.07$$

Por lo tanto concluimos que si existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 27

TABLA 27

MODELO: MEDIAS DEL CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

Cell No.	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=14,276, p=,00141 Type I decomposition DÍAS	ESF. ULT. C IV AGUA Mean	ESF. ULT. C IV AGUA Std.Err.	ESF. ULT. C IV AGUA -95,00%	ESF. ULT. C IV AGUA +95,00%	N
1	7	49,01333	2,899944	42,32605	55,70062	3
2	14	61,08000	2,899944	54,39272	67,76728	3
3	21	75,40667	2,899944	68,71938	82,09395	3
4	28	65,66333	2,899944	58,97605	72,35062	3

En la figura 4.10 mostramos el esfuerzo último en función de los días de curado y podemos observar que en los 21 días se obtuvo un esfuerzo último promedio mayor que los demás días de curado.

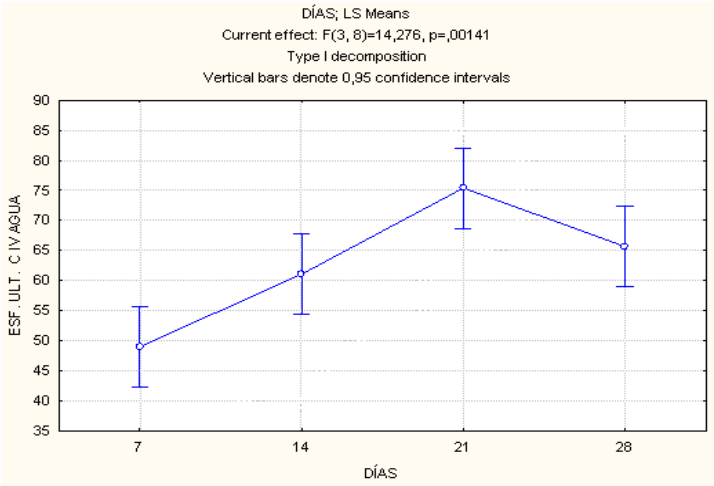

FIGURA 4.10 MODELO ESFUERZO ÚLTIMO C IV AGUA VS DÍAS

VALIDACIÓN DE LOS DATOS

En la tabla 28 mostramos todos los esfuerzos últimos de todas las probetas en los diferentes días de curado para validar nuestro modelo.

TABLA 28

DATOS VALIDACIÓN: ESFUERZOS ÚLTIMOS DE LOS CEMENTOS TIPO I – IV

	1 DÍAS	2 ESF. ULT. C I AIRE	3 ESF. ULT. C I AGUA	4 ESF. ULT. C IV AIRE	5 ESF. ULT. C IV AGUA
1	4	67,55	80,38	45,24	46,18
2	4	68,41	82,94	39,59	45,32
3	4	76,96	80,38	38,65	46,18
4	11	82,94	101,76	42,42	59,38
5	11	82,94	102,61	46,19	52,78
6	11	84,65	102,61	42,23	56,56
7	18	83,8	108,6	40,53	63,15
8	18	97,48	109,45	44,3	64,1
9	18	82,94	108,6	36,76	59,95
10	25	88,08	90,64	46,75	70,69
11	25	81,23	88,93	37,33	63,15
12	25	83,8	89,79	44,3	54,67

TABLA 29

DATOS GENERALES VALIDACIÓN

Variable	Descriptive Statistics (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV)						
	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.	Standard Error
ESF. ULT. C I AIRE	12	81,73167	67,55000	97,4800	64,6701	8,04177	2,321460
ESF. ULT. C I AGUA	12	95,55750	80,38000	109,4500	126,5860	11,25104	3,247896
ESF. ULT. C IV AIRE	12	42,02417	36,76000	46,7500	11,8070	3,43612	0,991924
ESF. ULT. C IV AGUA	12	56,84250	45,32000	70,6900	65,5944	8,09904	2,337991

ANÁLISIS VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

Procedemos a verificar si los datos obtenidos en curado al aire son normales.

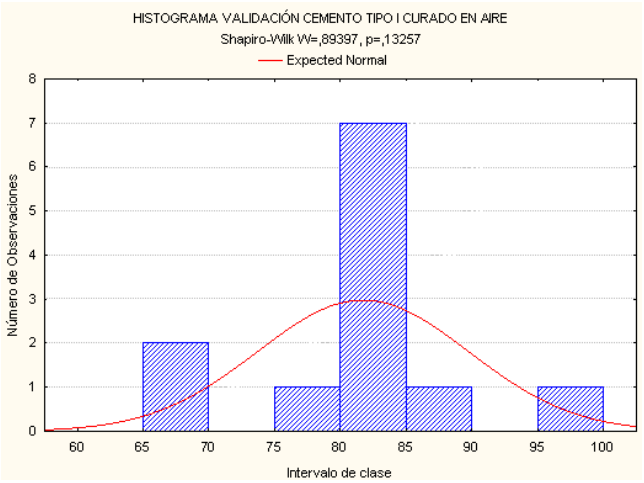

FIGURA 4.11 HISTOGRAMA VALIDACIÓN CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

De la figura 4.11 obtenemos:

$W_{gráfica}$=0.89

W_{tabla}=0.859, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.89 > 0.85$$

Por lo tanto nuestros datos son normales entonces podemos aplicar ANOVA

Aplicaremos one way anova para analizar una variable en función de los días de curado.

TABLA 30

VALIDACIÓN: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA ESFUERZO ÚLTIMO C I AIRE

Effect	Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C I AIRE (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	80160,78	1	80160,78	3008,955	0,000000
DÍAS	498,25	3	166,08	6,234	0,017280
Error	213,13	8	26,64		

Para que exista diferencias significativas, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

De la tabla 30 tenemos: $F_o = 6.234$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1, v2)} = F_{(3, 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

6.23 > 4.07

Por lo tanto concluimos que si existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 31

TABLA 31

MEDIAS DEL CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

Cell No.	DÍAS	ESF. ULT. C I AIRE Mean	ESF. ULT. C I AIRE Std.Err.	ESF. ULT. C I AIRE -95,00%	ESF. ULT. C I AIRE +95,00%	N
	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=6,2341, p=,01728 Type I decomposition					
1	4	70,97333	2,979974	64,10150	77,84517	3
2	11	83,51000	2,979974	76,63817	90,38183	3
3	18	88,07333	2,979974	81,20150	94,94517	3
4	25	84,37000	2,979974	77,49817	91,24183	3

En la figura 4.12 mostramos las medias y tenemos que a los 18 días obtenemos nuestro mayor esfuerzo

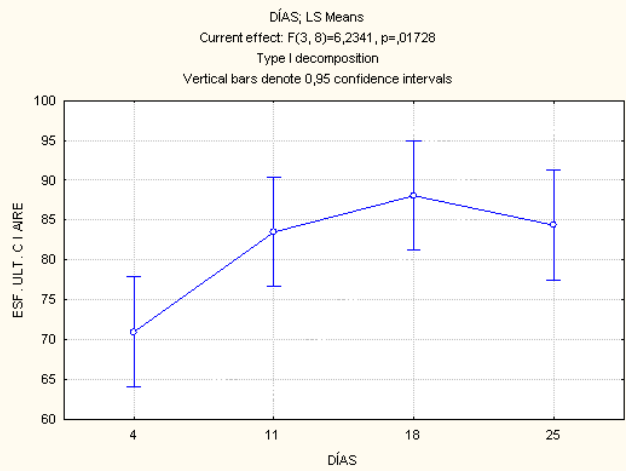

FIGURA 4.12 VALIDACIÓN: ESFUERZO ÚLTIMO C I AIRE VS DÍAS

ANÁLISIS VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

Verificamos si los datos obtenidos en curado al agua son normales.

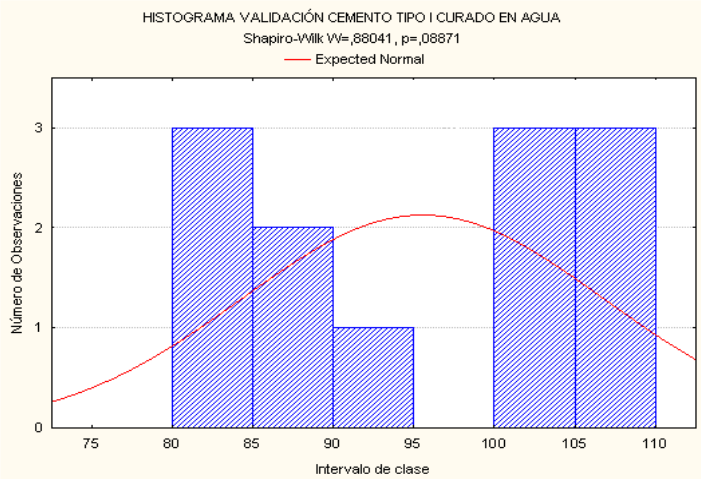

FIGURA 4.13 HISTOGRAMA VALIDACIÓN CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

De la figura 4.13 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.88$

$W_{tabla}=0.859$, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.88 > 0.85$$

Por lo tanto nuestros datos son normales entonces podemos aplicar ANOVA

Aplicaremos one way anova para analizar una variable en función de los días de curado.

TABLA 32

VALIDACIÓN: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA ESFUERZO ÚLTIMO C I AGUA

Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C I AGUA (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	109574,8	1	109574,8	129016,5	0,000000
DÍAS	1385,7	3	461,9	543,8	0,000000
Error	6,8	8	0,8		

Para que exista diferencias significativas, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1,\ v2)}$$

De la tabla 32 tenemos: $F_o = 543.8$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1,\ v2)} = F_{(3,\ 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1,\ v2)}$$

$$543.8 > 4.07$$

Por lo tanto concluimos que si existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 33

TABLA 33

VALIDACIÓN: MEDIAS DEL CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

Cell No.	DÍAS	ESF. ULT. C I AGUA Mean	ESF. ULT. C I AGUA Std.Err.	ESF. ULT. C I AGUA -95,00%	ESF. ULT. C I AGUA +95,00%	N
	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=543,84, p=,00000 Type I decomposition					
1	4	81,2333	0,532074	80,0064	82,4603	3
2	11	102,3267	0,532074	101,0997	103,5536	3
3	18	108,8833	0,532074	107,6564	110,1103	3
4	25	89,7867	0,532074	88,5597	91,0136	3

En la figura 4.14 mostramos las medias y tenemos que a los 18 días obtenemos nuestro mayor esfuerzo

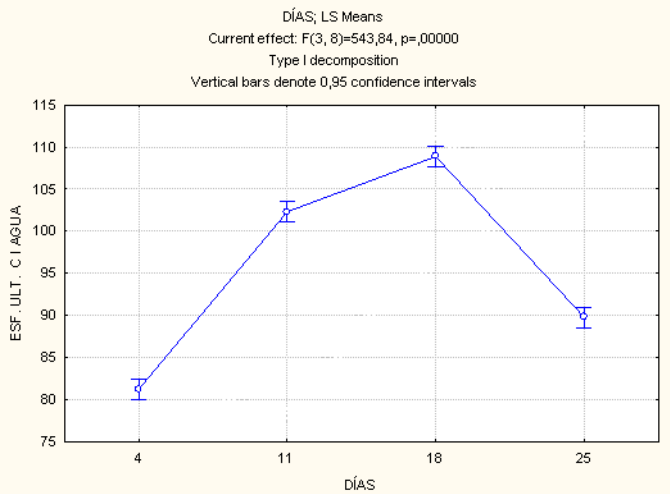

FIGURA 4.14 VALIDACIÓN ESFUERZO ÚLTIMO C I AGUA VS DÍAS

ANÁLISIS VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

Verificamos que los datos obtenidos sean normales

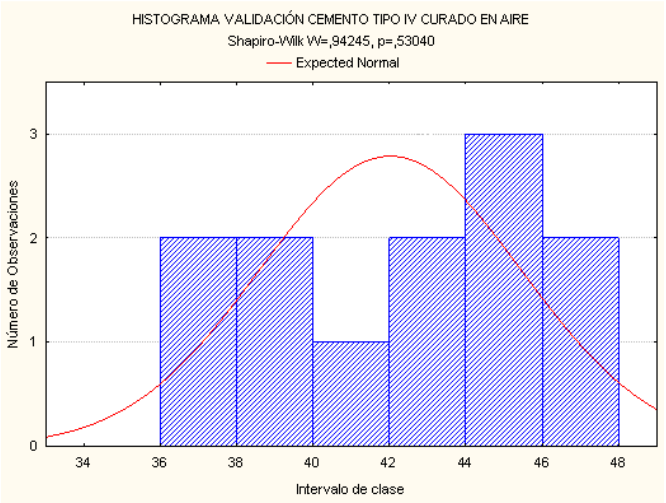

FIGURA 4.15 HISTOGRAMA VALIDACIÓN CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

De la figura 15 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.94$

$W_{tabla}=0.859$, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.94 > 0.85$$

Por lo tanto nuestros datos son normales entonces podemos aplicar ANOVA

Aplicaremos one way anova para analizar una variable en función de los días de curado.

TABLA 34

VALIDACIÓN: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA ESFUERZO ÚLTIMO C IV AIRE

Effect	Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C IV AIRE (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	21192,37	1	21192,37	1519,339	0,000000
DÍAS	18,29	3	6,10	0,437	0,732595
Error	111,59	8	13,95		

Para que exista diferencias significativas, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1,\ v2)}$$

De la tabla 34 tenemos: $F_o = 0.437$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1,\ v2)} = F_{(3,\ 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1,\ v2)}$$

$$0.437 > 4.07$$

Por lo tanto concluimos que no existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 35

TABLA 35

VALIDACIÓN: MEDIAS DEL CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

Cell No.	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=,43707, p=,73260 Type I decomposition DÍAS	ESF. ULT. C IV AIRE Mean	ESF. ULT. C IV AIRE Std.Err.	ESF. ULT. C IV AIRE -95,00%	ESF. ULT. C IV AIRE +95,00%	N
1	4	41,16000	2,156263	36,18765	46,13235	3
2	11	43,61333	2,156263	38,64098	48,58569	3
3	18	40,53000	2,156263	35,55765	45,50235	3
4	25	42,79333	2,156263	37,82098	47,76569	3

En la figura 4.16 mostramos las medias y podemos ver que no existen diferencias significativas entre las medias

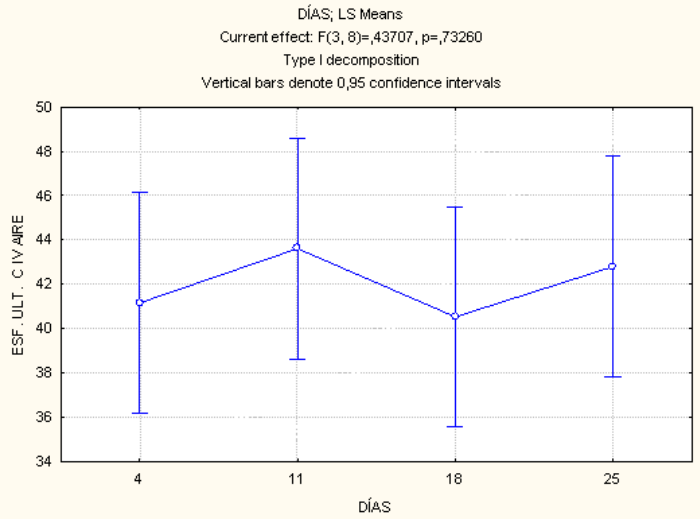

FIGURA 4.16 VALIDACIÓN: ESFUERZO ÚLTIMO C IV AIRE VS DÍAS

ANÁLISIS VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

Verificamos que los datos experimentales sean normales

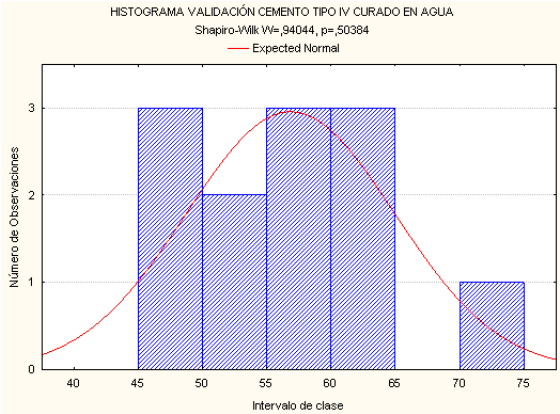

FIGURA 4.17 HISTOGRAMA VALIDACIÓN CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

De la figura 4.17 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.94$

$W_{tabla}=0.859$, para N=12 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.94 > 0.85$$

Por lo tanto nuestros datos son normales entonces podemos aplicar ANOVA

Aplicaremos one way anova para analizar una variable en función de los días de curado.

TABLA 36

VALIDACIÓN: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA ESFUERZO ÚLTIMO C IV AGUA

Effect	Univariate Tests of Significance for ESF. ULT. C IV AGUA (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	38772,84	1	38772,84	1934,421	0,000000
DÍAS	561,19	3	187,06	9,333	0,005441
Error	160,35	8	20,04		

Para que exista diferencias significativas entre las medias, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1,\ v2)}$$

De la tabla 36 tenemos: $F_o = 9.333$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1,\ v2)} = F_{(3,\ 8)} = 4.07$

Ahora procedemos a comparar:

$$F_o > F_{(v1,\ v2)}$$

$$9.333 > 4.07$$

Por lo tanto concluimos que si existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días de curado que se muestran en la tabla 37

TABLA 37

VALIDACIÓN: MEDIAS DEL CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

Cell No.	DÍAS	ESF. ULT. C IV AGUA Mean	ESF. ULT. C IV AGUA Std.Err.	ESF. ULT. C IV AGUA -95,00%	ESF. ULT. C IV AGUA +95,00%	N
	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS VAL. CEMENTO TIPO I - IV) Current effect: F(3, 8)=9,3328, p=,00544 Type I decomposition					
1	4	45,89333	2,584804	39,93276	51,85390	3
2	11	56,24000	2,584804	50,27943	62,20057	3
3	18	62,40000	2,584804	56,43943	68,36057	3
4	25	62,83667	2,584804	56,87610	68,79724	3

En la figura 4.18 mostramos las medias de los diferentes días de curado y tenemos que a los 18 y 25 días obtenemos nuestro mayor esfuerzo

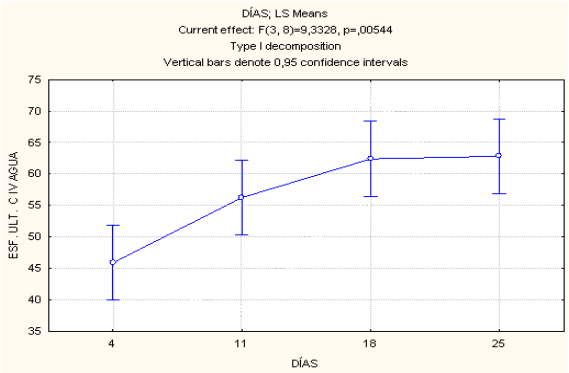

FIGURA 4.18 VALIDACIÓN: ESFUERZO ÚLTIMO C IV AGUA VS DÍAS

ANÁLISIS GRUPAL

Después de haber hecho un análisis del cemento tipo I y IV curado en aire y agua de manera individual, ahora realizaremos un análisis

grupal para determinar en que días de curados logramos nuestros mayores esfuerzos con los dos cementos.

Para realizar el análisis grupal seguiremos utilizando el programa Statistica.

La tabla con todos los datos grupales del cemento tipo I y IV curados en aire y agua se encuentra en el anexo I

La tabla 38 nos muestra la media grupal de todos los esfuerzos

TABLA 38

MODELO: MEDIA GRUPAL

	Descriptive Statistics (Sheet1 in DATOS MODELO GRUPAL)						
Variable	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.	Standard Error
ESFUERZO ÚLTIMO (MPa)	48	69,52440	40,53114	108,5975	380,1414	19,49721	2,814180

Verificaremos si nuestros datos grupales son normales.

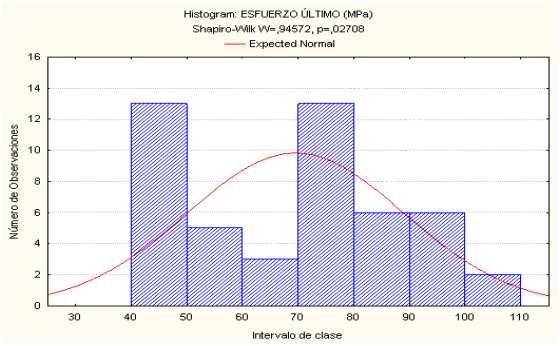

FIGURA 4.19 HISTOGRAMA MODELO GRUPAL CEMENTO TIPO I - IV

De la figura 4.19 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.9$

$W_{tabla}=0.9$, para N=48 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.9 > 0.9$$

Como son iguales podemos concluir que mis datos son aproximadamente normales y por lo tanto realizamos un análisis de varianzas.

Aplicaremos factorial anova porque tenemos al esfuerzo que depende de dos variables que son los días de curado y el tipo de cemento.

TABLA 39

MODELO: PRUEBA DE SIGNIFICANCIA GRUPAL ESFUERZO ÚLTIMO CEMENTO TIPO I - IV

Effect	Univariate Tests of Significance for ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) (Sheet1 in DATOS MODELO GRUPAL) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	232014,8	1	232014,8	8157,291	0,000000
DÍAS	279,5	3	93,2	3,276	0,033555
CURADO Y CEMENTO	15114,2	3	5038,1	177,130	0,000000
DÍAS*CURADO Y CEMENTO	1562,8	9	173,6	6,105	0,000057
Error	910,2	32	28,4		

Para que exista diferencias significativas entre las medias, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1, v2)} = F_{(3, 32)} = 2.904$

De la tabla 39 podemos observar que el estadístico de prueba de Fisher F_o es superior al valor de la tabla del anexo E, por lo tanto podemos decir que si existen diferencias significativas entre las medias de los diferentes días, curado y el tipo de cemento.

A continuación mostraremos tres tablas de medias que están en función de los días, tipo de curado - cemento y una combinación de ambas.

TABLA 40

MODELO: MEDIA GRUPAL EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO Y CURADO

Cell No.	CURADO Y CEMENTO; LS Means (Sheet1 in DATOS MODELO GRUPAL) Current effect: F(3, 32)=177,13, p=0,0000 Type I decomposition CURADO Y CEMENTO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Mean	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Std.Err.	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) -95,00%	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) +95,00%	N
1	AIRE I	75,56828	1,539552	72,43232	78,70424	12
2	AGUA I	94,13208	1,539552	90,99612	97,26805	12
3	AIRE IV	45,60538	1,539552	42,46942	48,74135	12
4	AGUA IV	62,79184	1,539552	59,65588	65,92781	12

TABLA 41

MODELO: MEDIA GRUPAL EN FUNCIÓN DE LOS DÍAS

Cell No.	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS MODELO GRUPAL) Current effect: F(3, 32)=3,2762, p=,03356 Type I decomposition DÍAS	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Mean	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Std.Err.	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) -95,00%	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) +95,00%	N
1	7	65,95031	1,539552	62,81435	69,08627	12
2	14	72,72304	1,539552	69,58708	75,85901	12
3	21	70,04356	1,539552	66,90760	73,17953	12
4	28	69,38068	1,539552	66,24471	72,51664	12

TABLA 42

MODELO: MEDIA GRUPAL EN FUNCIÓN DE LOS DÍAS, CURADO Y CEMENTO

Cell No.	DÍAS*CURADO Y CEMENTO; LS Means (Sheet1 in DATOS MODELO GRUPAL) Current effect: F(9, 32)=6,1050, p=,00006 Type I decomposition DÍAS	CURADO Y CEMENTO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Mean	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Std.Err.	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) -95,00%	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) +95,00%	N
1	7	AIRE I	77,81396	3,079103	71,54203	84,0859	3
2	7	AGUA I	89,21527	3,079103	82,94334	95,4872	3
3	7	AIRE IV	47,75762	3,079103	41,48569	54,0295	3
4	7	AGUA IV	49,01440	3,079103	42,74247	55,2863	3
5	14	AIRE I	84,36971	3,079103	78,09778	90,6416	3
6	14	AGUA I	95,48599	3,079103	89,21406	101,7579	3
7	14	AIRE IV	49,95698	3,079103	43,68505	56,2289	3
8	14	AGUA IV	61,07948	3,079103	54,80755	67,3514	3
9	21	AIRE I	65,98092	3,079103	59,70899	72,2528	3
10	21	AGUA I	96,05606	3,079103	89,78413	102,3280	3
11	21	AIRE IV	42,73050	3,079103	36,45857	49,0024	3
12	21	AGUA IV	75,40677	3,079103	69,13484	81,6787	3
13	28	AIRE I	74,10853	3,079103	67,83660	80,3805	3
14	28	AGUA I	95,77102	3,079103	89,49910	102,0430	3
15	28	AIRE IV	41,97643	3,079103	35,70451	48,2484	3
16	28	AGUA IV	65,66673	3,079103	59,39480	71,9387	3

En las siguiente figuras se realizará una comparación entre los diferente tipos de curados y cementos para poder observar y concluir con cual cemento y en que días obtendremos nuestros mayores esfuerzos.

En la figura 4.20 podemos observar que realizar un curado en agua es mejor que realizarlo en aire porque obtenemos esfuerzos mayores.

También se puede ver que con el cemento tipo I curado en agua obtenemos un esfuerzo promedio superior que el cemento tipo I curado en aire y el cemento tipo IV curado en aire y agua.

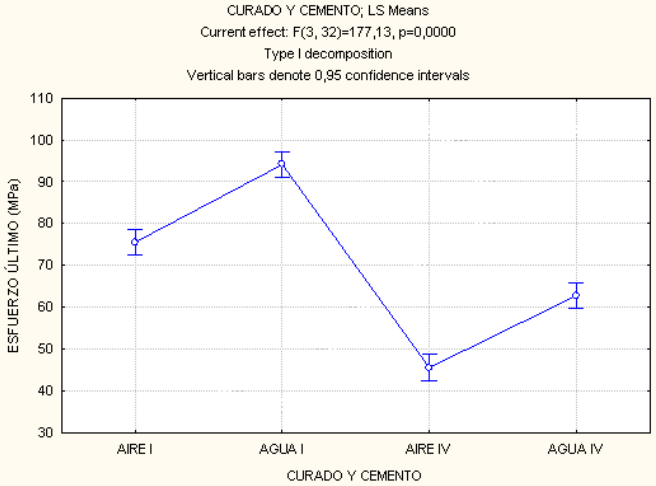

FIGURA 4.20 MODELO GRUPAL: ESFUERZO ÚLTIMO VS CURADO Y CEMENTO

En la figura 4.21 podemos observar lo siguiente:

En el cemento tipo I curado en aire a los 14 días se obtuvo un esfuerzo promedio mayor que los demás días.

En el cemento tipo I curado en agua no hay diferencias significativas entre sus medias, por lo tanto se tiene un esfuerzo promedio mayor muy similar a los 14,21 y 28 días.

En el cemento tipo IV curado en aire se obtiene un esfuerzo promedio mayor en el día 14.

En el cemento tipo IV curado en agua se obtiene un esfuerzo promedio mayor en el día 21.

Podemos concluir de esta figura que para el cemento tipo I y IV curados en agua a los 21 días se obtiene un esfuerzo promedio mayor, mientras que para el curado en aire a los 14 días se obtiene el esfuerzo promedio mayor que los diferentes días.

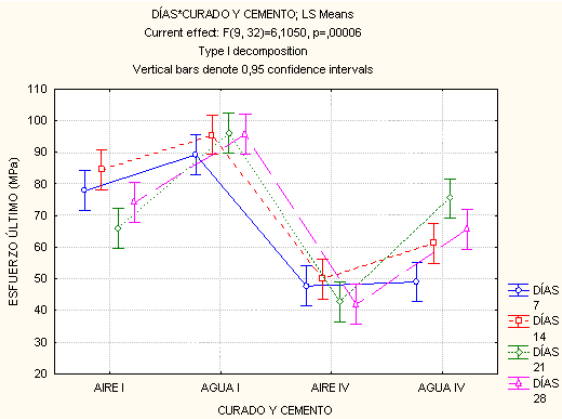

FIGURA 4.21 MODELO GRUPAL: ESFUERZO ÚLTIMO VS CURADO Y CEMENTO

En la figura 4.22 se puede observar que los curados en agua tanto para el cemento tipo I y IV son mejores que los curados en aire.

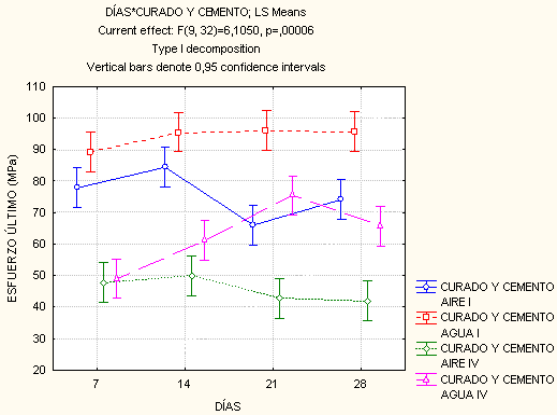

FIGURA 4.22 MODELO GRUPAL: ESFUERZO ÚLTIMO VS DÍAS

En el anexo G se muestra una tabla de Tukey calculada con los datos grupales de nuestro modelo, esta tabla nos indica si hay o no diferencias significativas entre las medias de los diferentes días, cemento y curado.

Del anexo G podemos concluirlo lo siguiente:

- No existen diferencias significativas de las medias entre 28 días aire I con 7 días aire I, 7 días agua I, 14 días aire I, 14 días agua IV, 21 días aire I y 21 días agua IV.
- No existen diferencias significativas de las medias entre 28 días agua I con 7 días agua I, 14 días aire I, 14 días agua I y 21 días agua I.
- No existen diferencias significativas de las medias entre 28 días aire IV con 7 días aire IV, 7 días agua IV, 14 días aire IV, 21 días aire IV.

- No existen diferencias significativas de las medias entre 28 días agua IV con 7 días aire I, 14 días aire IV, 14 días agua IV, 21 días aire I, 21 días agua IV, 28 días aire I

ANÁLISIS GRUPAL PARA VALIDACIÓN

Ahora realizaremos la validación grupal del cemento tipo I y IV curado en aire y agua. La tabla con todos los datos se encuentra en el anexo J

La tabla 43 nos muestra la media grupal de todos los esfuerzos

TABLA 43

VALIDACIÓN: MEDIA GRUPAL

	Descriptive Statistics (Sheet1 in DATOS VALIDACIÓN GRUPAL)						
Variable	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Variance	Std.Dev.	Standard Error
ESFUERZO ÚLTIMO (MPa)	48	69,03907	36,76080	109,4526	507,8932	22,53649	3,252862

Verificaremos si nuestros datos grupales son normales o aproximadamente iguales.

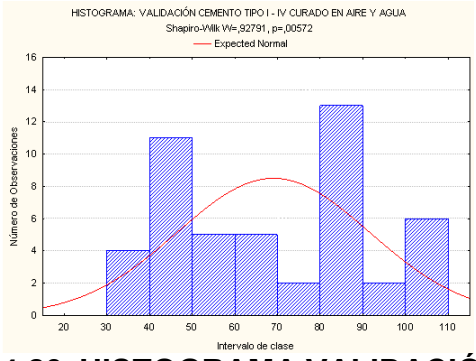

FIGURA 4.23 HISTOGRAMA VALIDACIÓN GRUPAL

CEMENTO TIPO I - IV

De la figura 4.23 obtenemos:

$W_{gráfica}=0.9$

$W_{tabla}=0.9$, para N=48 y α=0.05 del anexo D

Si $W_{gráfica} > W_{tabla}$; entonces nuestros datos son normales

Realizando la comparación:

$$W_{gráfica} > W_{tabla}$$

$$0.9 > 0.9$$

Como son iguales podemos concluir que mis datos son aproximadamente normales y por lo tanto realizamos un análisis de varianzas.

Aplicaremos un análisis de varianza factorial porque tenemos al esfuerzo que depende de dos variables que son los días de curado y el tipo de cemento.

TABLA 44

VALIDACIÓN: PRUEBA DE SIGNICANCIA GRUPAL

ESFUERZO ÚLTIMO CEMENTO TIPO I - IV

Effect	Univariate Tests of Significance for ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) (Sheet1 in DATOS VALIDACIÓN GRUPAL) Sigma-restricted parameterization Type I decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	228786,9	1	228786,9	14882,18	0,000000
DÍAS	1521,6	3	507,2	32,99	0,000000
TIPO DE CURADO	20915,4	3	6971,8	453,50	0,000000
DÍAS*TIPO DE CURADO	942,0	9	104,7	6,81	0,000021
Error	491,9	32	15,4		

Para que exista diferencias significativas entre las medias, debe cumplirse entonces que:

$$F_o > F_{(v1, v2)}$$

Del anexo E tenemos: $F_{(v1, v2)} = F_{(3, 32)} = 2.904$

De la tabla 44 podemos concluir que el estadístico de prueba de Fisher F_o es superior al valor de la tabla del anexo E, por lo tanto podemos decir que si existen diferencias significativas entre las medias de los esfuerzos últimos de los diferentes días, curado y el tipo de cemento.

A continuación se muestran tres tablas de medias que están en función de los días, tipo de curado - cemento y una combinación de ambas.

TABLA 45

VALIDACIÓN: MEDIA GRUPAL EN FUNCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO Y CURADO

Cell No.	TIPO DE CURADO; LS Means (Sheet1 in DATOS VALIDACIÓN GRUPAL) Current effect: F(3, 32)=453,50, p=0,0000 Type I decomposition TIPO DE CURADO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Mean	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Std.Err.	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) -95,00%	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) +95,00%	N
1	AIRE I	81,73316	1,131857	79,42764	84,03868	12
2	AGUA I	95,55725	1,131857	93,25173	97,86277	12
3	AIRE IV	42,02356	1,131857	39,71804	44,32908	12
4	AGUA IV	56,84231	1,131857	54,53679	59,14783	12

TABLA 46

VALIDACIÓN: MEDIA GRUPAL EN FUNCIÓN DE LOS DÍAS

Cell No.	DÍAS; LS Means (Sheet1 in DATOS VALIDACIÓN GRUPAL) Current effect: F(3, 32)=32,993, p=,00000 Type I decomposition DÍAS	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Mean	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Std.Err.	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) -95,00%	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) +95,00%	N
1	4	59,81433	1,131857	57,50881	62,11985	12
2	11	71,42313	1,131857	69,11761	73,72865	12
3	18	74,97198	1,131857	72,66646	77,27749	12
4	25	69,94684	1,131857	67,64132	72,25236	12

TABLA 47

VALIDACIÓN: MEDIA GRUPAL EN FUNCIÓN DE LOS DÍAS, CURADO Y CEMENTO

Cell No.	DÍAS*TIPO DE CURADO; LS Means (Sheet1 in DATOS VALIDACIÓN GRUPAL) Current effect: F(9, 32)=6,8082, p=,00002 Type I decomposition DÍAS	TIPO DE CURADO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Mean	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) Std.Err.	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) -95,00%	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) +95,00%	N
1	4	AIRE I	70,9732	2,263715	66,3621	75,5842	3
2	4	AGUA I	81,2344	2,263715	76,6233	85,8454	3
3	4	AIRE IV	41,1595	2,263715	36,5485	45,7706	3
4	4	AGUA IV	45,8903	2,263715	41,2792	50,5013	3
5	11	AIRE I	83,5146	2,263715	78,9036	88,1256	3
6	11	AGUA I	102,3268	2,263715	97,7157	106,9378	3
7	11	AIRE IV	43,6102	2,263715	38,9992	48,2213	3
8	11	AGUA IV	56,2409	2,263715	51,6298	60,8519	3
9	18	AIRE I	88,0751	2,263715	83,4641	92,6862	3
10	18	AGUA I	108,8825	2,263715	104,2715	113,4936	3
11	18	AIRE IV	40,5311	2,263715	35,9201	45,1422	3
12	18	AGUA IV	62,3991	2,263715	57,7881	67,0101	3
13	25	AIRE I	84,3697	2,263715	79,7587	88,9807	3
14	25	AGUA I	89,7853	2,263715	85,1743	94,3964	3
15	25	AIRE IV	42,7933	2,263715	38,1823	47,4044	3
16	25	AGUA IV	62,8390	2,263715	58,2279	67,4500	3

En la tabla 47 nos muestran las medias de los esfuerzos promedios para cada día de curado de los cementos tipo I y IV curados en aire y agua.

Por ejemplo en el día 18, curado en agua y cemento tipo I obtenemos el máximo esfuerzo promedio.

En las siguiente figuras se realizará una comparación entre los diferente tipos de curados y cementos para poder observar y concluir con cual cemento y en que días obtendremos nuestros mayores esfuerzos promedios.

En la figura 4.24 de nuestra validación ocurre lo mismo que pasó en la figura 4.20 de nuestro modelo.

Se puede observar que realizar un curado en agua es mejor que realizarlo en aire porque obtenemos esfuerzos mayores.

También se puede ver que con el cemento tipo I curado en agua obtenemos un esfuerzo promedio superior que el cemento tipo I curado en aire y el cemento tipo IV curado en aire y agua.

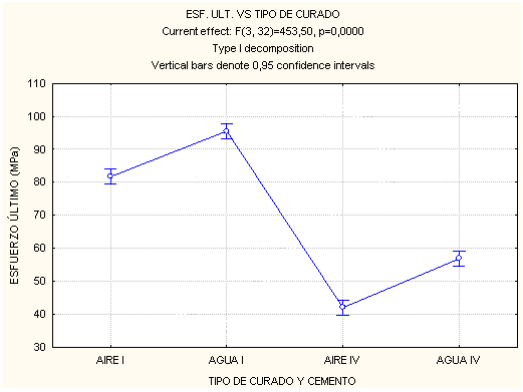

FIGURA 4.24 VALIDACIÓN GRUPAL: ESFUERZO ÚLTIMO VS TIPO DE CURADO Y CEMENTO

En la figura 4.25 podemos observar lo siguiente:

En el cemento tipo I curado en aire a los 18 días se obtuvo un esfuerzo promedio mayor que los demás días.

En el cemento tipo I curado en agua comparando todos los días de curados, obtuvimos un esfuerzo promedio mayor a los 18 días

En el cemento tipo IV curado en aire no existen diferencias significativas entre las medias de los esfuerzos promedios.

En el cemento tipo IV curado en agua se obtiene un esfuerzo promedio mayor en el día 18 y 25.

Podemos concluir de esta figura que para el cemento tipo I curados en aire y agua a los 18 días se obtiene un esfuerzo promedio mayor, mientras que para el cemento tipo IV ocurre a los 11 y 25 días respectivamente.

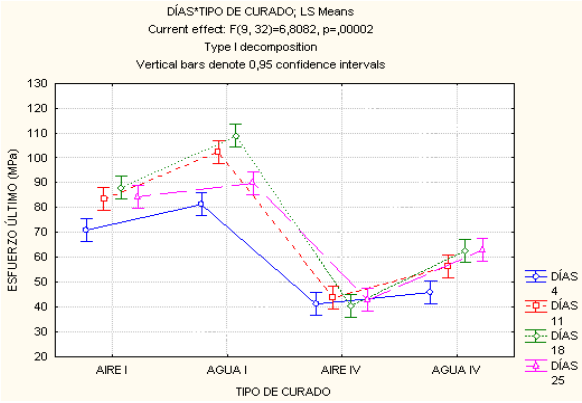

FIGURA 4.25 VALIDACIÓN GRUPAL: ESFUERZO ÚLTIMO VS CURADO Y CEMENTO

En la figura 4.26 se puede observar que los curados en agua tanto para el cemento tipo I y IV son mejores que los curados en aire.

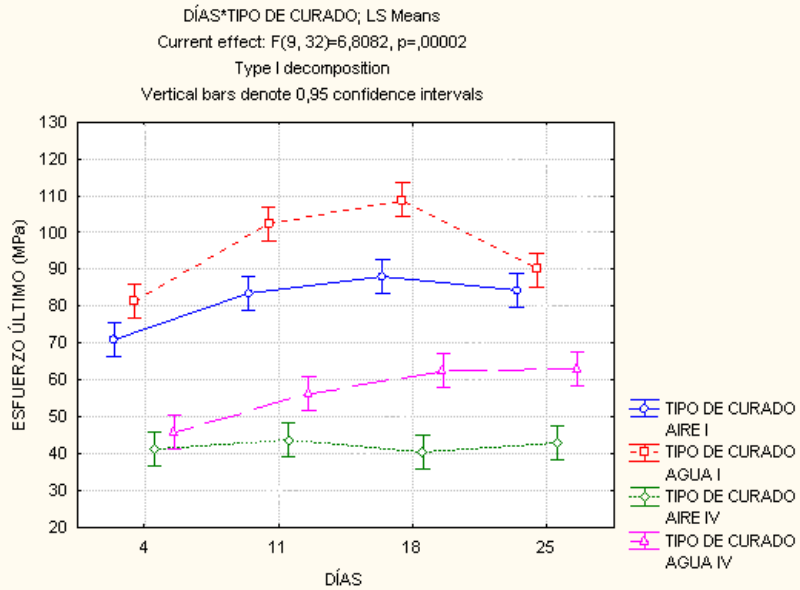

FIGURA 4.26 VALIDACIÓN GRUPAL: ESFUERZO ÚLTIMO VS DÍAS

En el anexo H se muestra una tabla de Tukey, esta tabla nos indica si hay o no diferencias significativas entre las medias de los esfuerzos promedios de los diferentes días, cemento y curado.

Del anexo H podemos concluirlo lo siguiente:

- No existen diferencias significativas de las medias entre 25 días aire I con 4 días agua I, 11 días aire I, 18 días aire I.

- No existen diferencias significativas de las medias entre 25 días agua I con 4 días agua I, 11 días aire I, 18 días aire I y 25 días aire I.
- No existen diferencias significativas de las medias entre 25 días aire IV con 4 días aire IV, 4 días agua IV, 11 días aire IV, 18 días aire IV.
- No existen diferencias significativas de las medias entre 25 días agua IV con 4 días aire I, 11 días agua IV, 18 días agua IV.

A continuación mostramos una tabla con valores de las medias de los esfuerzos últimos promedios de nuestro modelo y validación que obtuvimos a través del análisis estadístico.

TABLA 48

COMPARACIÓN DE LOS ESFUERZOS ÚLTIMOS PROMEDIOS ENTRE: MODELO Y VALIDACIÓN

	DÍAS	CEMENTO TIPO I		CEMENTO TIPO IV	
MODELO		AIRE	AGUA	AIRE	AGUA
	7	77,814	89,215	47,758	49,014
	14	84,369	95,485	49,957	61,079
	21	65,981	96,056	42,731	75,407
	28	74,108	95,771	41,976	65,667
VALIDACIÓN	DÍAS	CEMENTO TIPO I		CEMENTO TIPO IV	
		AIRE	AGUA	AIRE	AGUA
	4	70,973	81,234	41,16	45,89
	11	83,515	102,33	43,61	56,241
	18	88,075	108,88	40,531	62,399
	25	84,37	89,785	42,793	62,839

En el cemento tipo I curado en aire tenemos la media del esfuerzo promedio mayor a los 14 días en nuestro modelo, mientras que en la validación a los 11 días tenemos un valor muy similar, pero la media del esfuerzo promedio mayor ocurre a los 18 días.

En el cemento tipo I curado en agua tenemos la media del esfuerzo promedio mayor a los 21 días en nuestro modelo, mientras que en la validación ocurre a los 18 días

En el cemento tipo IV curado en aire tenemos la media del esfuerzo promedio mayor a los 14 días en nuestro modelo, mientras que en la validación sucede a los 11 días

Y por último en el cemento tipo IV curado en agua tenemos la media del esfuerzo promedio mayor a los 21 días en nuestro modelo, mientras que en la validación tenemos un valor similar a los 18 días, pero la media del esfuerzo promedio mayor ocurre a los 25 días sin existir una diferencia significativa entre sus medias.

4.3. Modelación de los resultados obtenidos

Mediante la herramienta matemática MatLab graficaremos las curvas experimentales de esfuerzo versus deformación de los diferentes días de curados mostrados en las tablas 10 y 11. Estas gráficas experimentales nos permiten saber como es el comportamiento del

material y también observar la zona elástica y zona plástica o inelástica.

El módulo de Young (E) lo determinaremos mediante la pendiente de la curva en la zona elástica de nuestra curva, debido a que el material en esta zona se comporta de manera lineal

Debido a que el cemento tiene una deformación inelástica muy pequeña, entonces tomamos el límite de ruptura como el valor de deformación máximo.

El esfuerzo de fluencia para nuestro análisis lo hemos tomado como el esfuerzo antepenúltimo de nuestro esfuerzo de ruptura.

Después de haber graficado las curvas experimentales, procedemos a graficar las curvas modelos y para esto necesitamos determinar las constantes del material “m” y “a”.

Estas constantes del material se las obtiene de los valores experimentales.

La constante “m” se la puede determinar trazando una paralela a la parte elástica de la curva experimental que corte con el eje x.

Este corrector plástico también se lo puede determinar mediante la siguiente fórmula:

$$m = \varepsilon - \left(\frac{\sigma_u}{E_{prom}}\right)$$

Donde ε es la deformación unitaria última, σ_u es el esfuerzo promedio último y E_{prom} es el módulo de elasticidad promedio.

La constante "a" se lo determina también con los datos experimentales:

$$a = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right) - 1$$

Donde σ_u es el esfuerzo promedio último, σ_y es el esfuerzo de fluencia promedio

Después de haber determinados estas constantes, procedemos a ejecutar el algoritmo de simulación, el cual nos dará como resultado una curva modelo. Esta curva modelo será diferente para cada día de curado y nos servirá para determinar el error de nuestro modelo y para analizar si tenemos un buen ajuste.

A continuación mostramos las curvas obtenidas de manera experimental y teórica o simulada

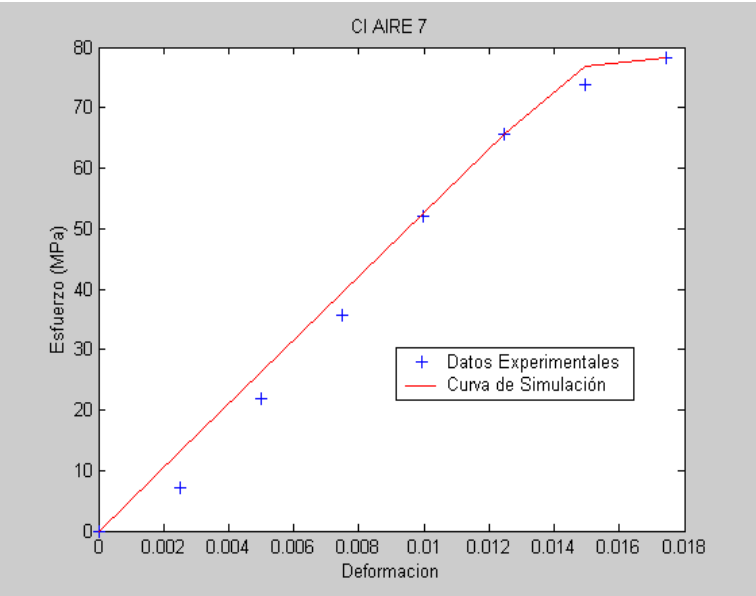

FIGURA 4.27 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 7 DÍAS

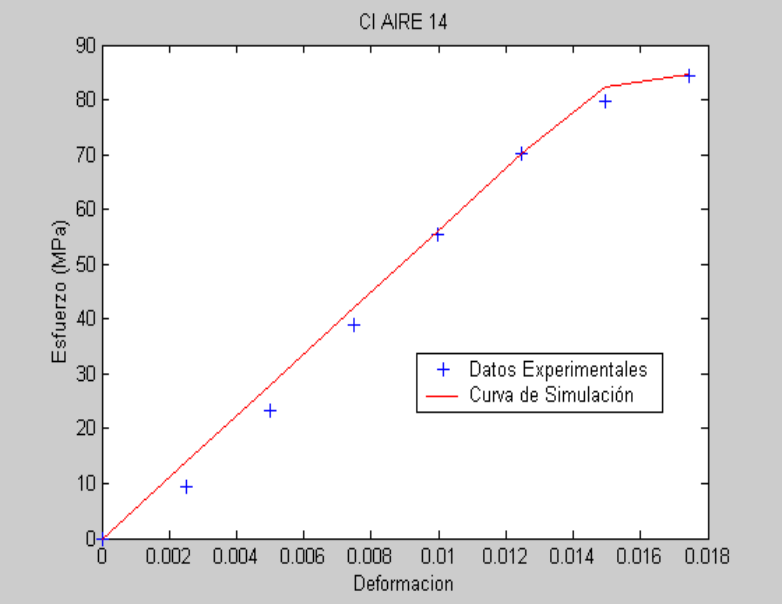

FIGURA 4.28 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 14 DÍAS

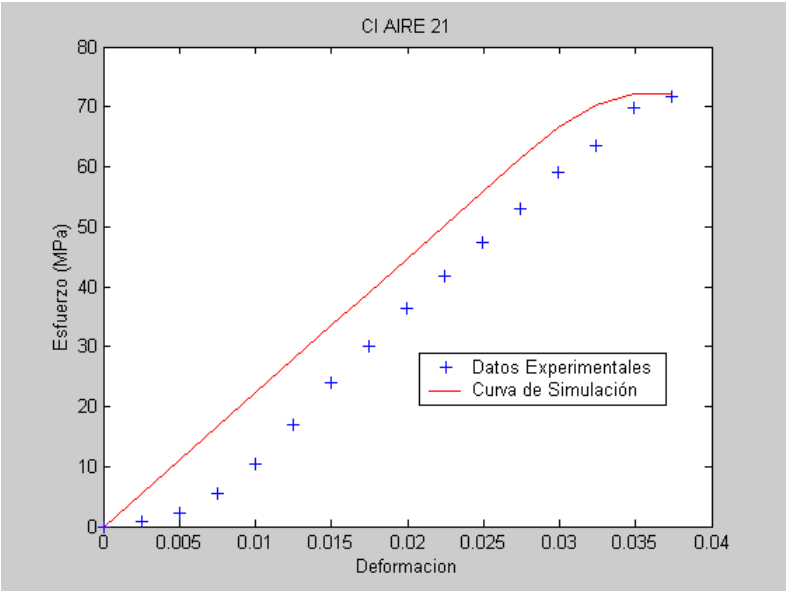

FIGURA 4.29 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 21 DÍAS

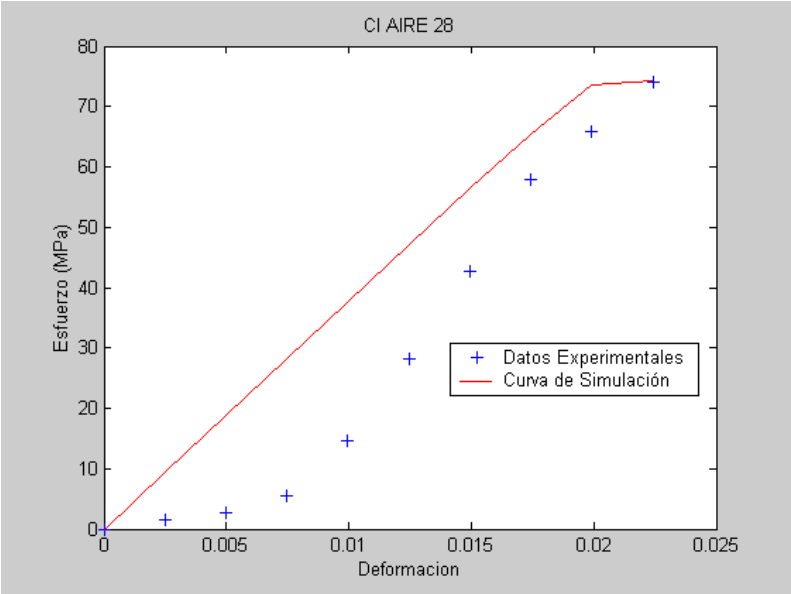

FIGURA 4.30 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 28 DÍAS

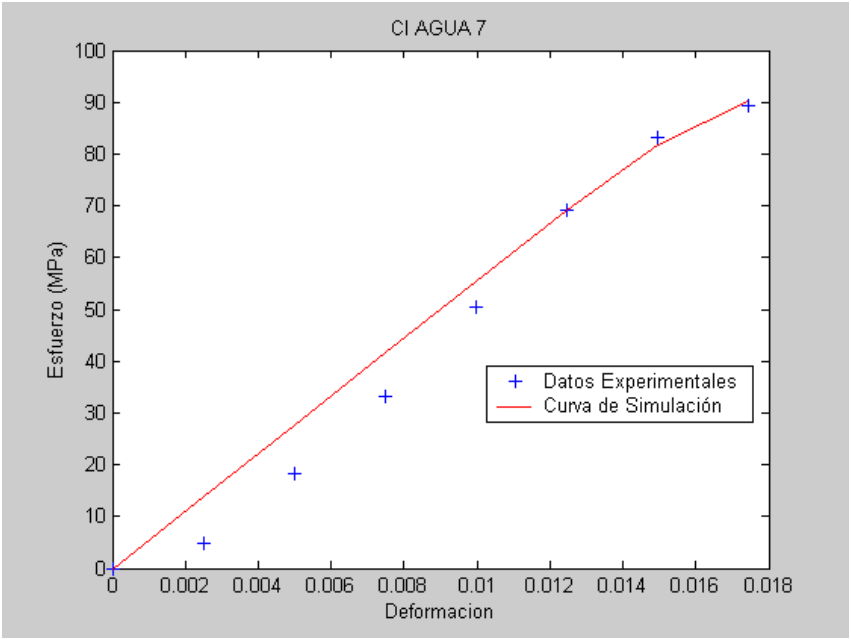

FIGURA 4.31 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 7 DÍAS

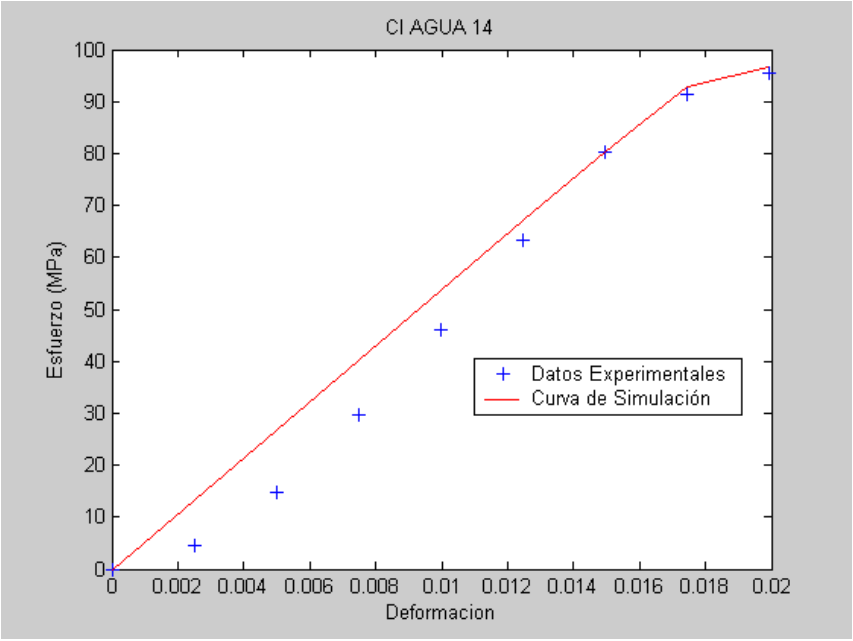

FIGURA 4.32 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 14 DÍAS

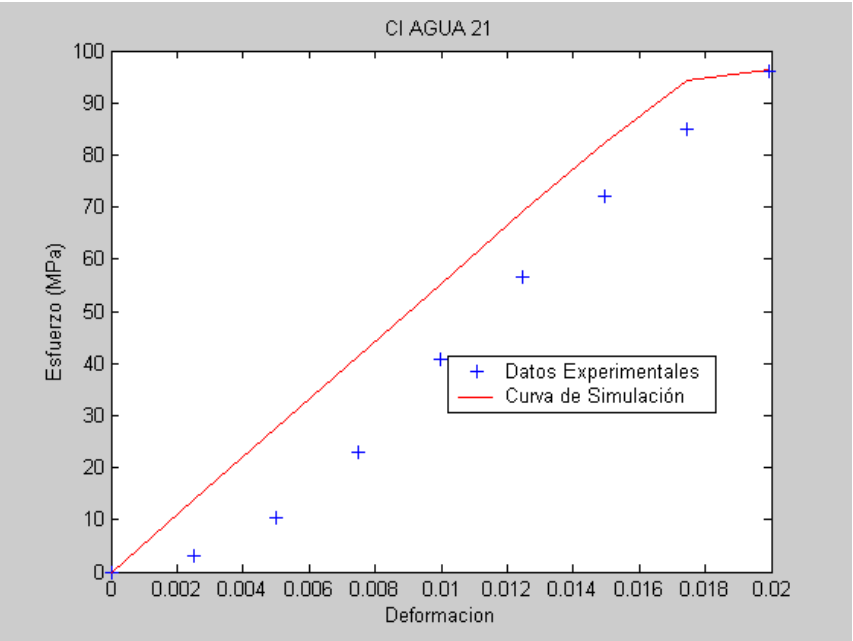

FIGURA 4.33 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 21 DÍAS

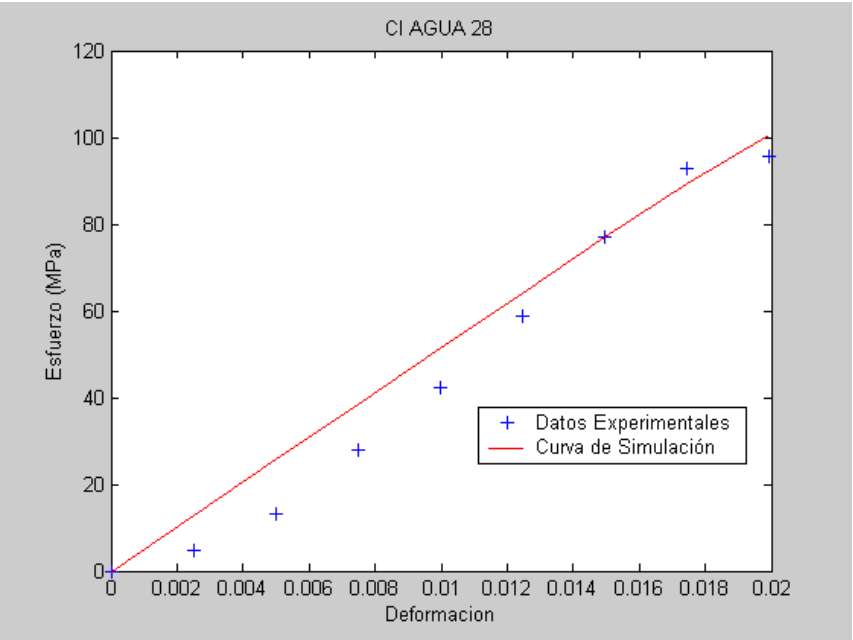

FIGURA 4.34 MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 28 DÍAS

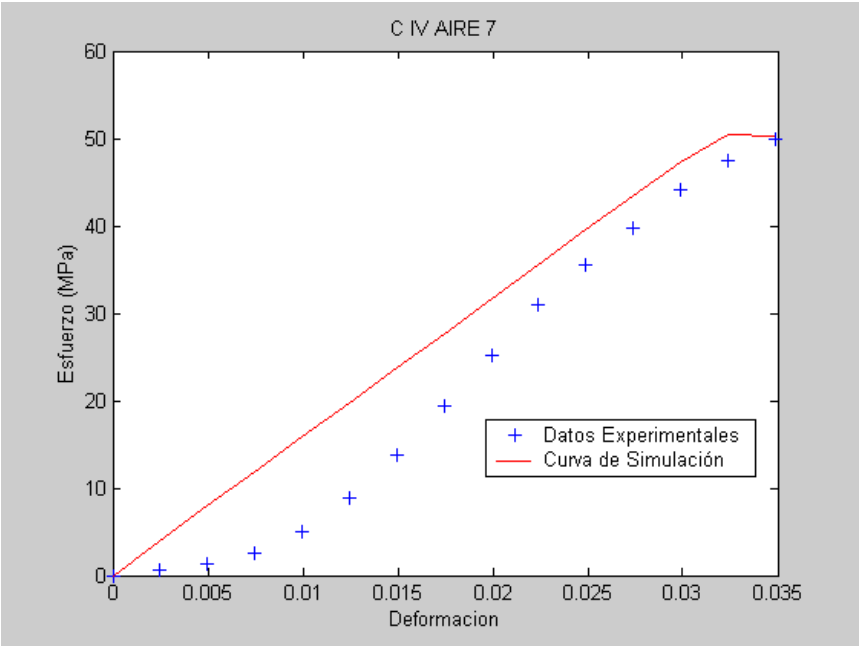

FIGURA 4.35 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 7 DÍAS

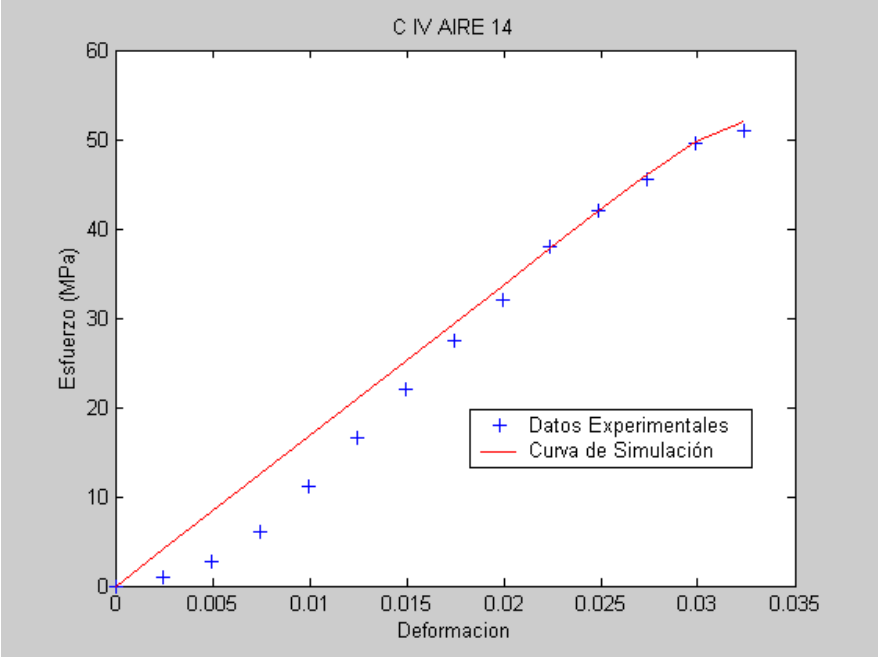

FIGURA 4.36 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 14 DÍAS

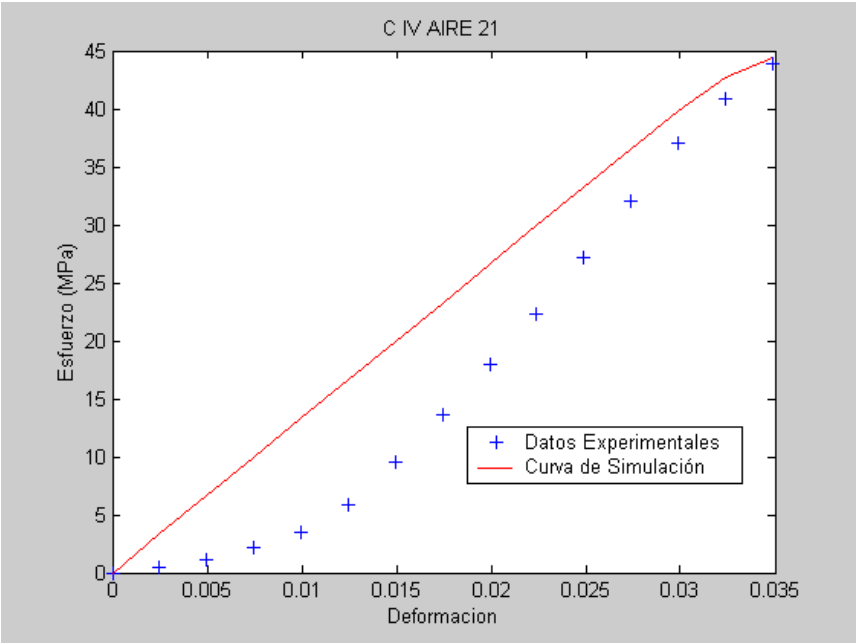

FIGURA 4.37 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 21 DÍAS

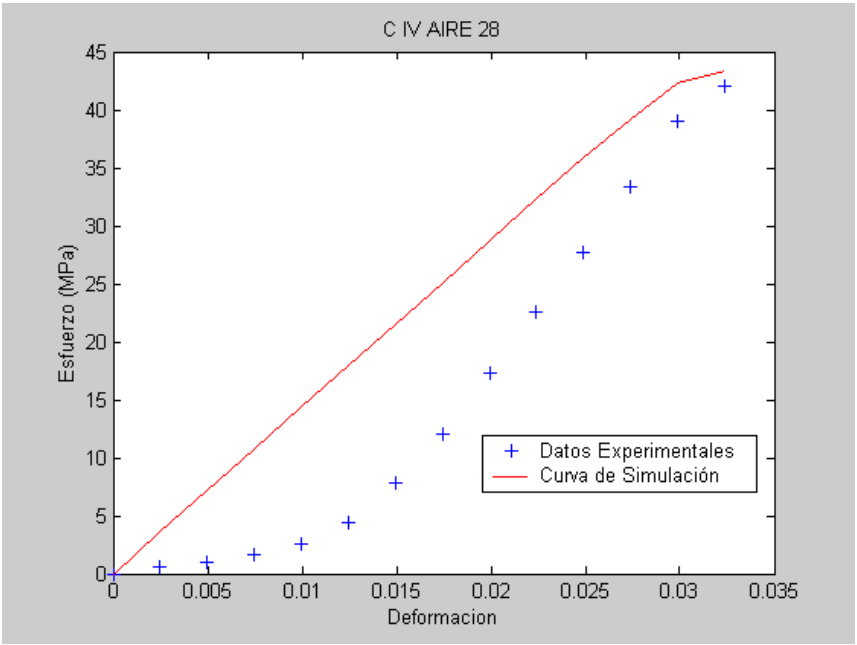

FIGURA 4.38 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 28 DÍAS

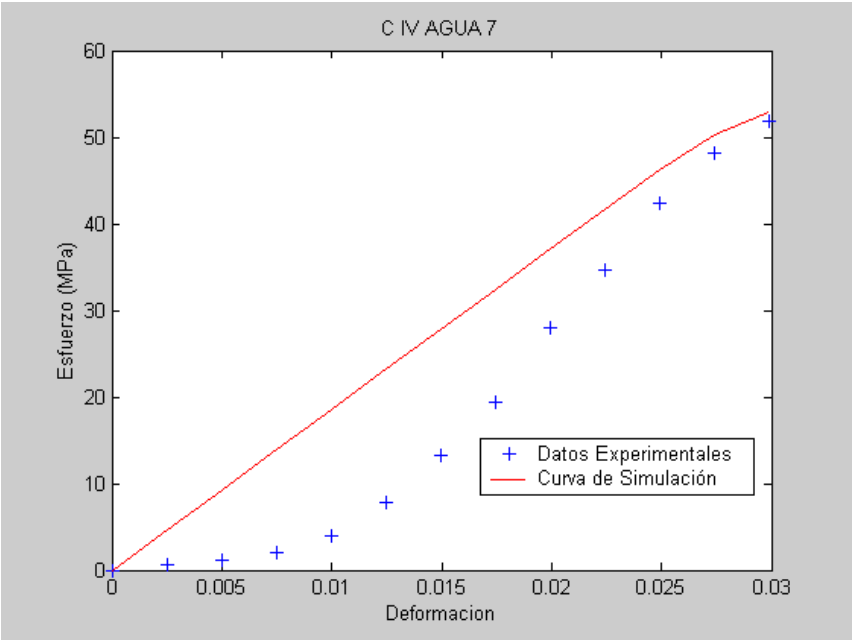

FIGURA 4.39 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 7 DÍAS

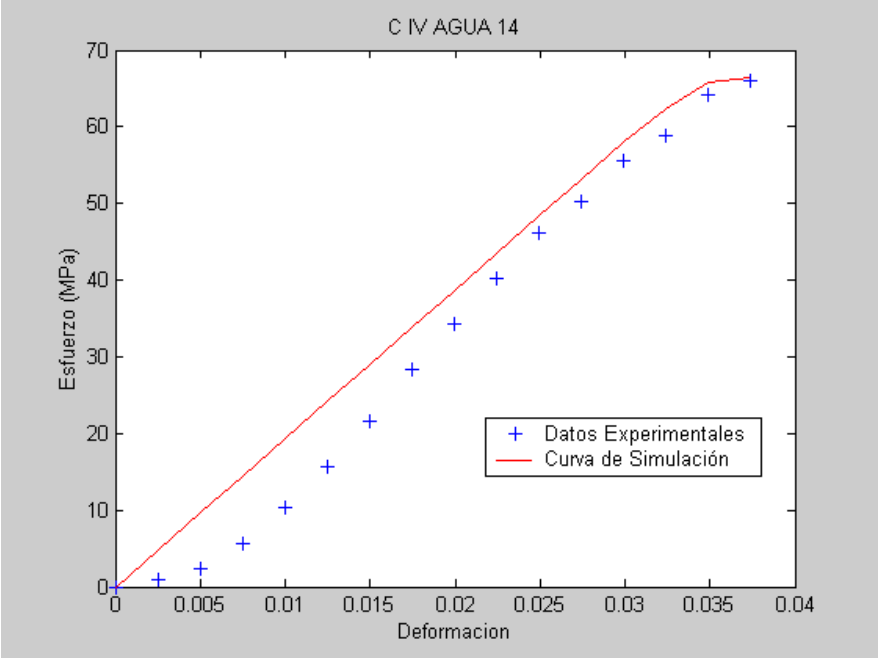

FIGURA 4.40 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 14 DÍAS

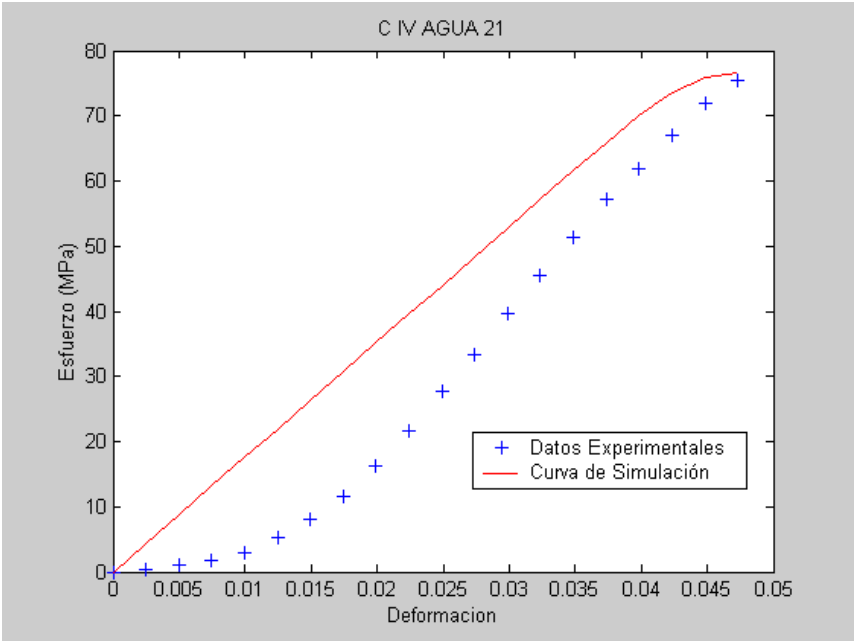

FIGURA 4.41 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 21 DÍAS

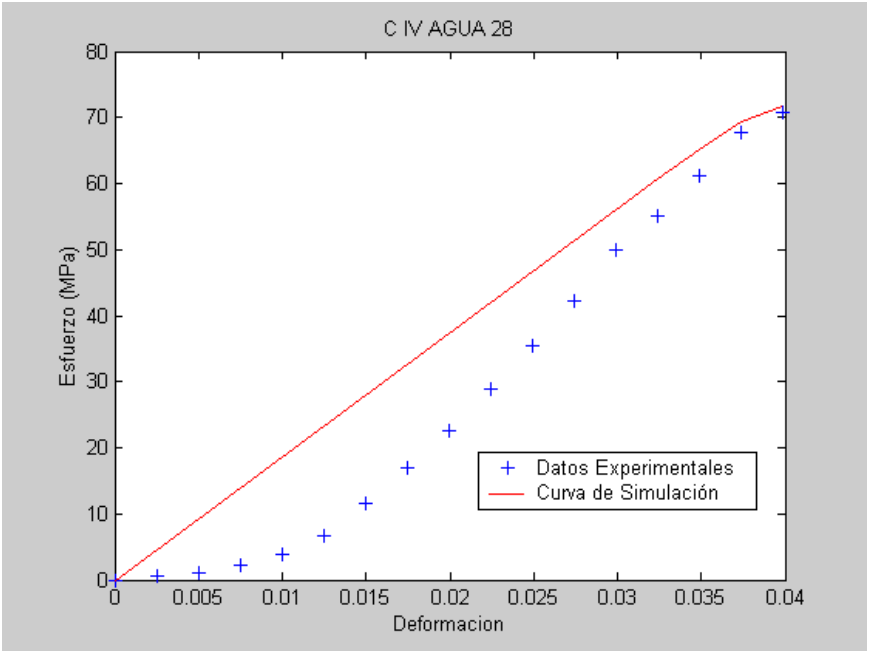

FIGURA 4.42 MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 28 DÍAS

4.4. Validación de los resultados obtenidos

Siguiendo el mismo procedimiento que utilizamos en el modelo, encontraremos una curva experimental y una teórica para los datos de las tablas 14 y 15

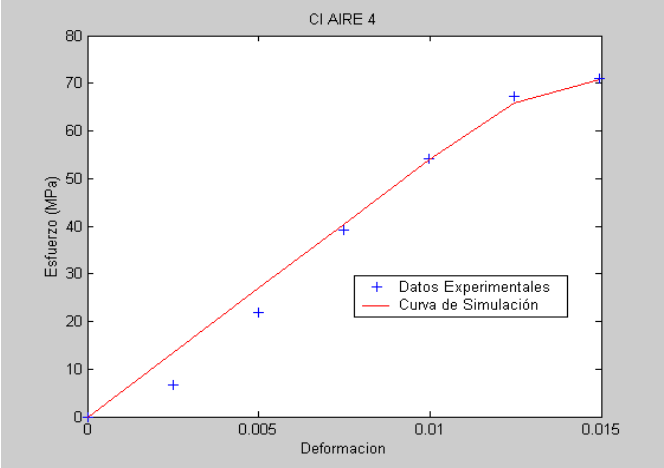

FIGURA 4.43 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 4 DÍAS

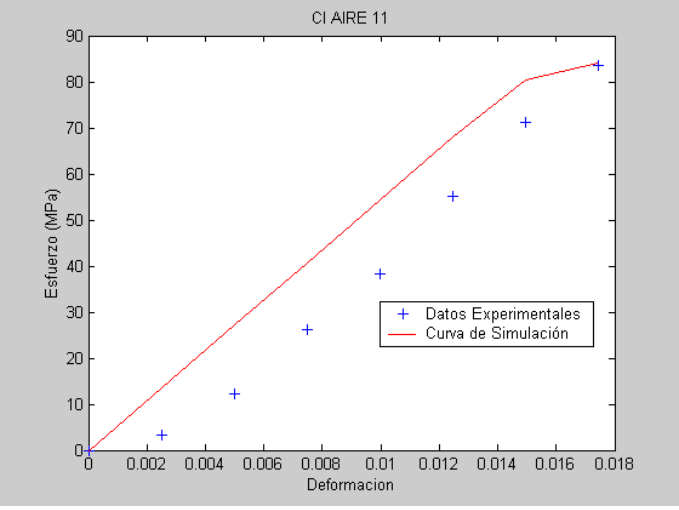

FIGURA 4.44 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 11 DÍAS

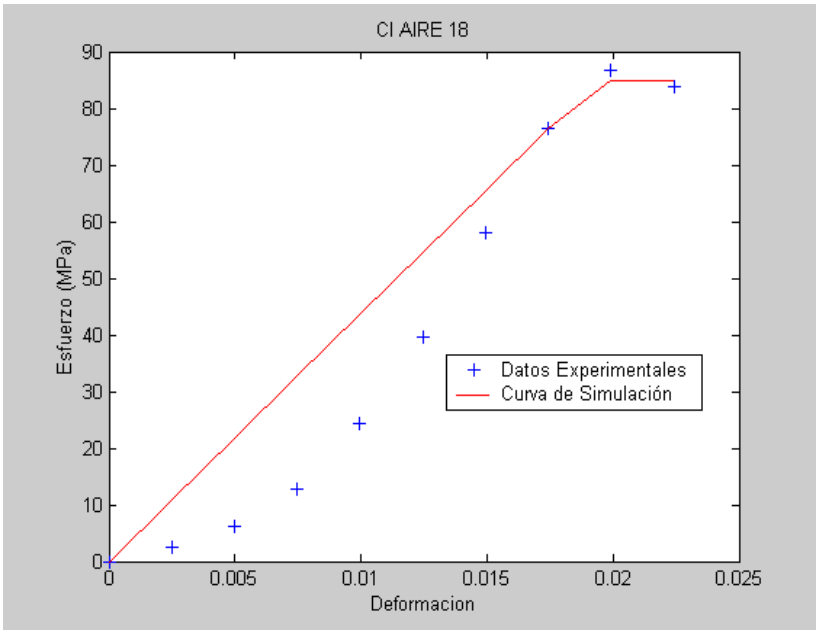

FIGURA 4.45 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 18 DÍAS

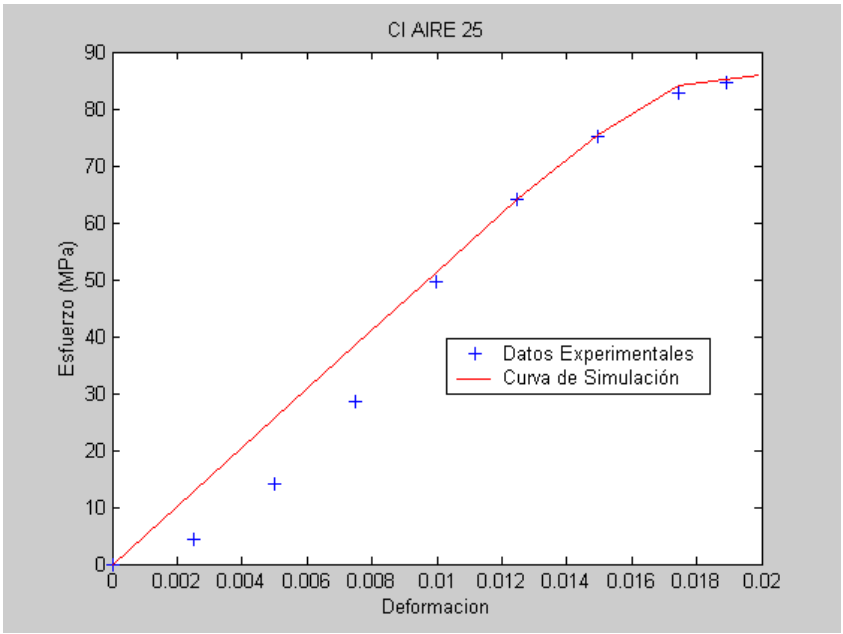

FIGURA 4.46 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 25 DÍAS

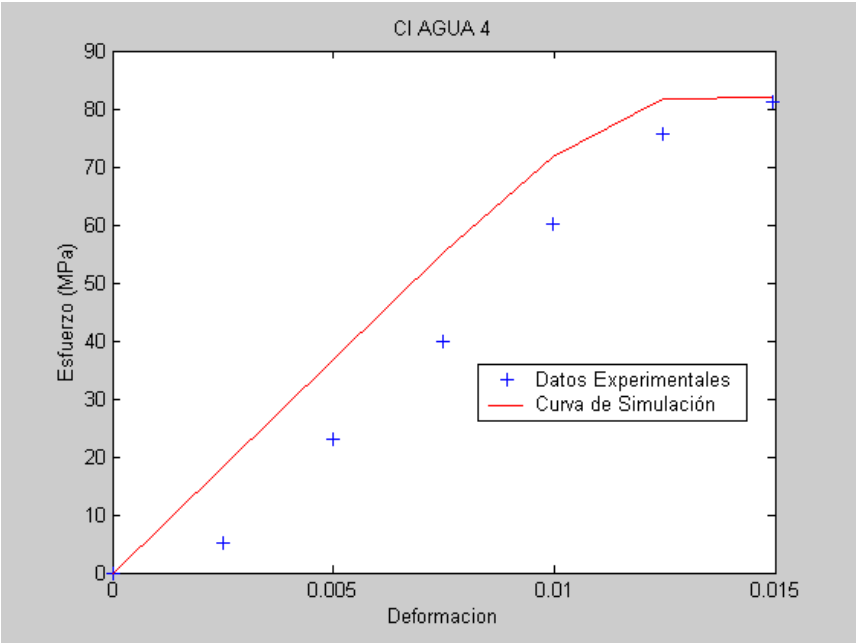

FIGURA 4.47 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 4 DÍAS

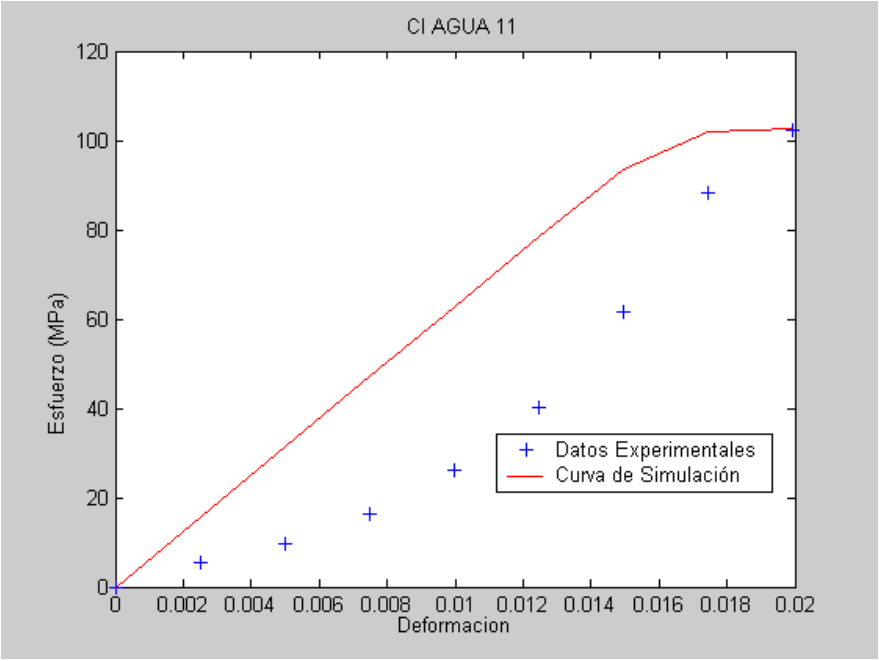

FIGURA 4.48 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 11 DÍAS

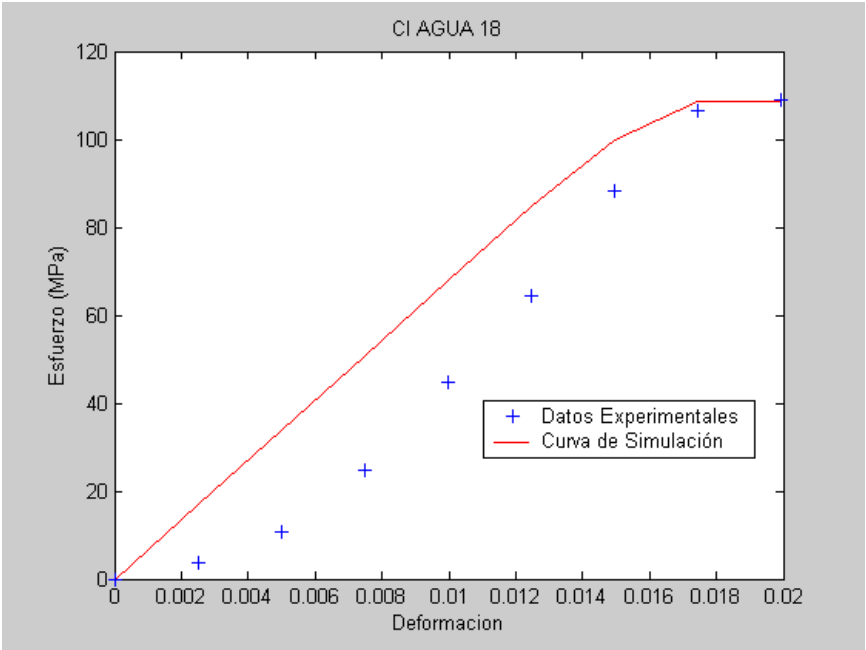

FIGURA 4.49 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 18 DÍAS

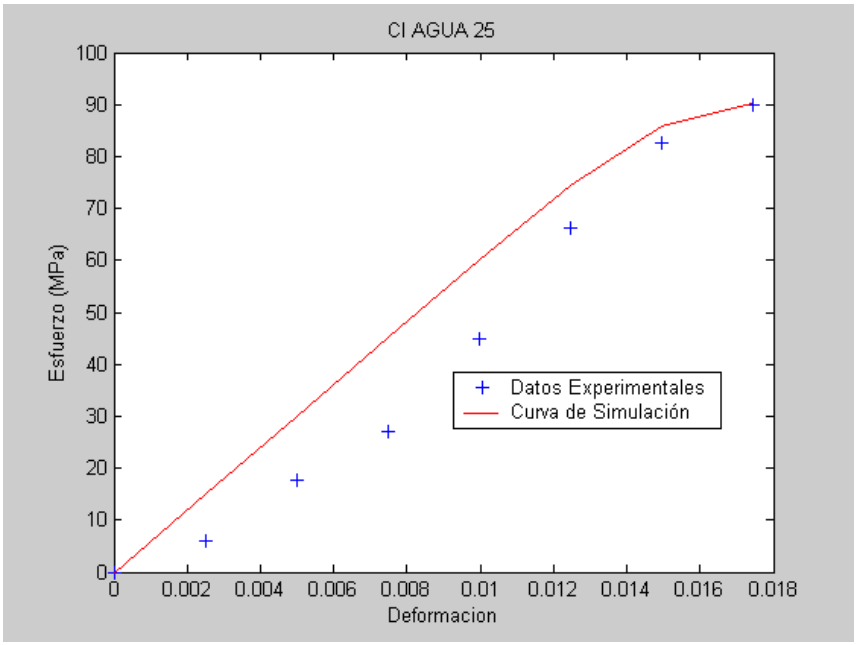

FIGURA 4.50 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 25 DÍAS

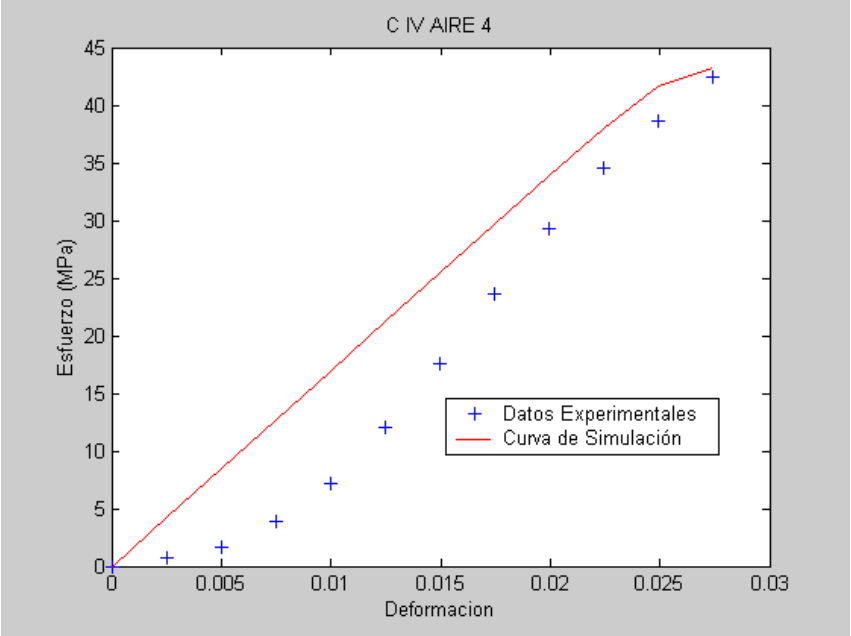

FIGURA 4.51 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 4 DÍAS

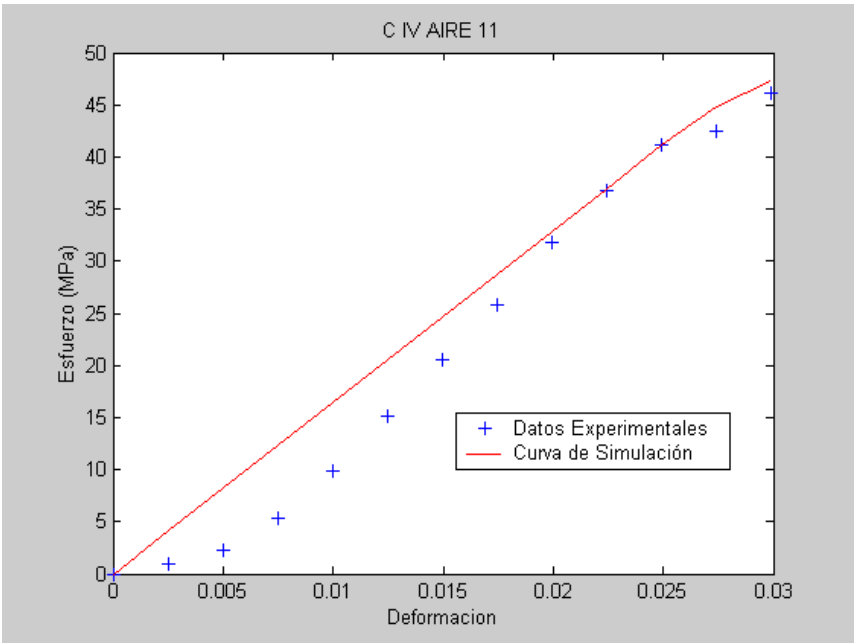

FIGURA 4.52 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 11 DÍAS

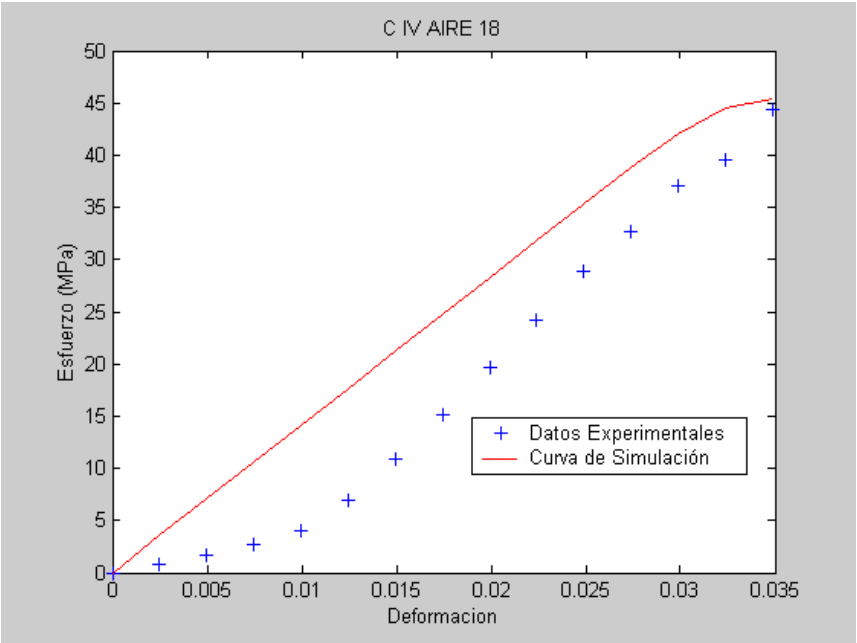

FIGURA 4.53 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 18 DÍAS

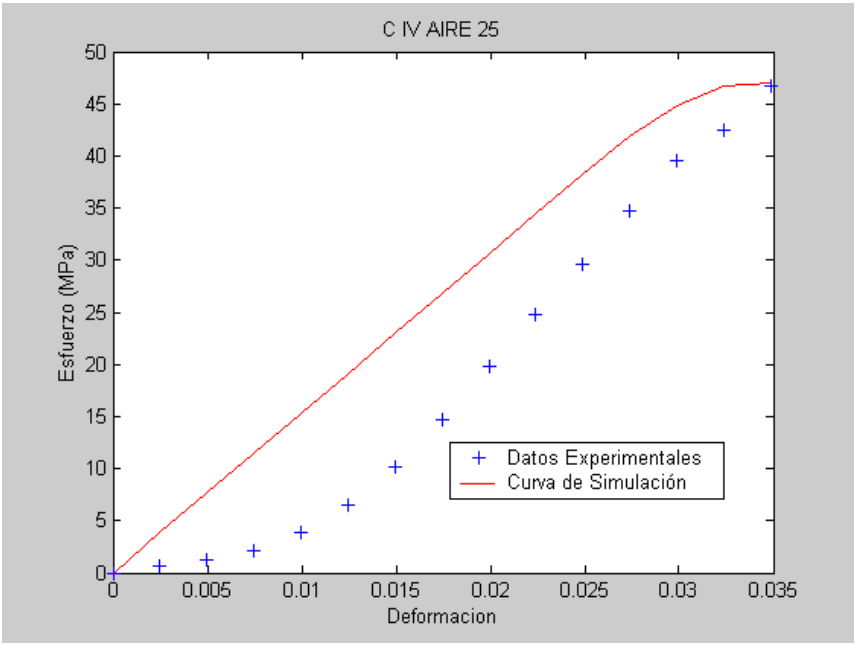

FIGURA 4.54 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 25 DÍAS

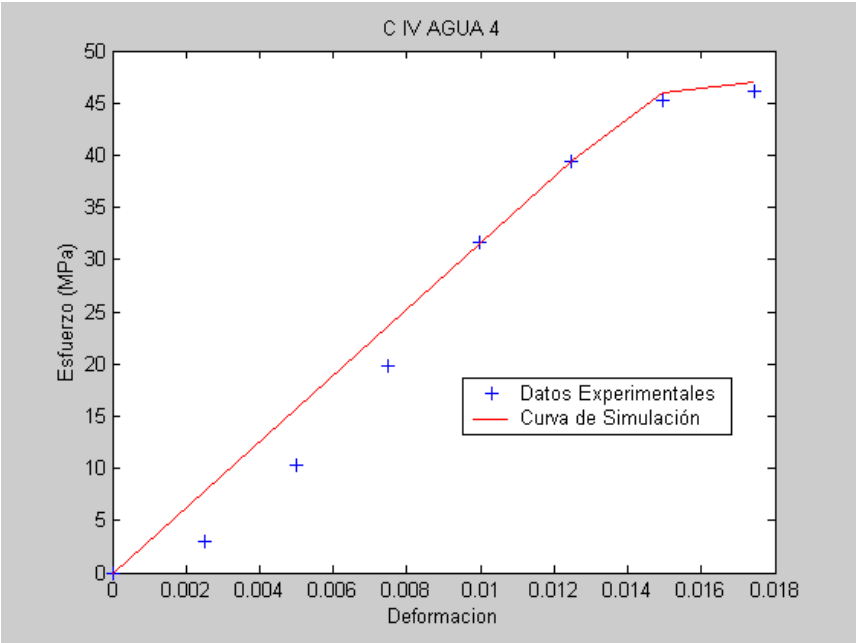

FIGURA 4.55 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 4 DÍAS

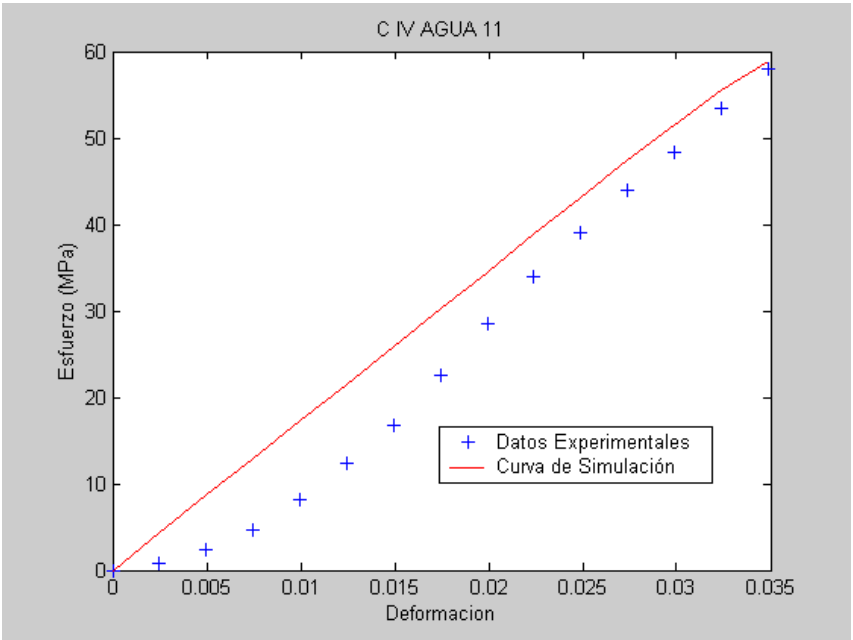

FIGURA 4.56 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 11 DÍAS

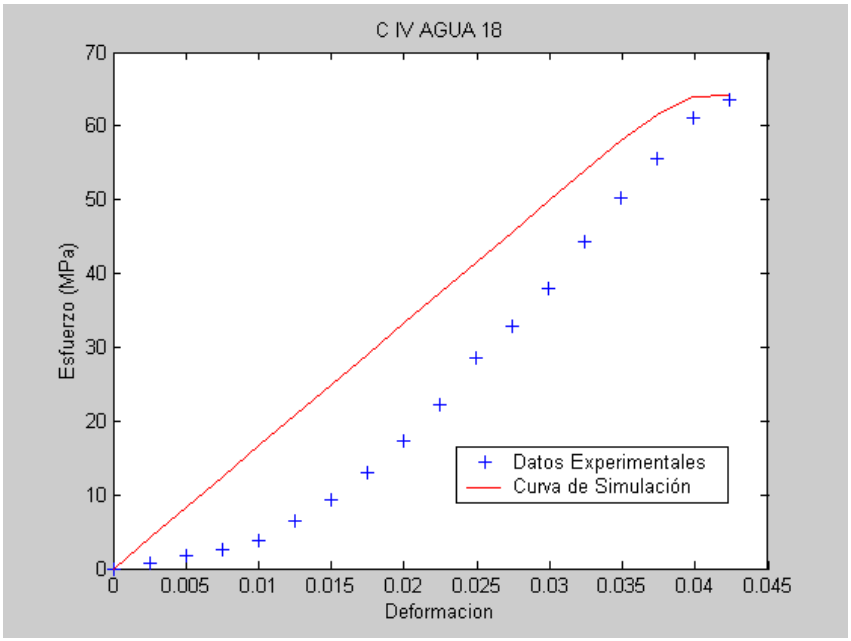

FIGURA 4.57 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 18 DÍAS

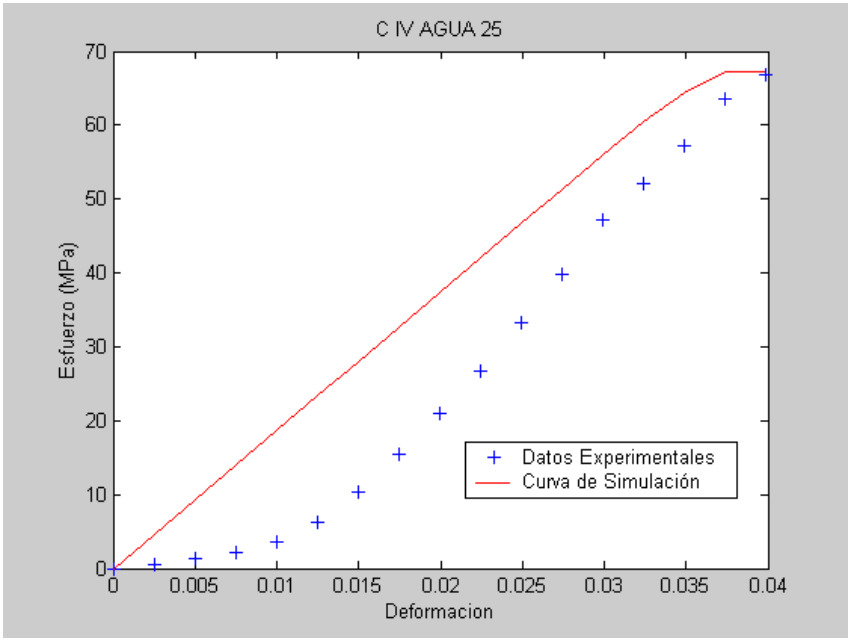

FIGURA 4.58 VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 25 DÍAS

Después de haber graficado las curvas observadas y esperadas, ahora vamos a verificar si todas las curvas tienen un buen ajuste mediante un estadístico de prueba ji cuadrada

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i}$$

Donde o_i son los datos observados que se obtuvieron experimentalmente en el laboratorio, mientras que e_i son los valores esperados que se obtuvieron a través de un algoritmo en matlab, k es el número de datos, v = k - 1 son los grados de libertad y el χ^2_α que se lo obtiene del anexo F con un nivel de confianza del 95% α = 0.05.

Para tener un buen ajuste se debe cumplir lo siguiente:

$$\chi^2 < \chi^2_\alpha$$

El motivo por el cual tenemos un mal ajuste es porque al momento de realizar la prueba de compresión, a la muestra se le colocaba una precarga, y estos valores provocan que no tengamos un buen ajuste.

Pero al quitar los datos de precarga o realizar los ensayos destructivos en otra máquina de mayor precisión y sin necesidad de utilizar acoples para asegurar a la probeta, entonces no existirán estos valores erróneos al comenzar las lecturas.

TABLA 49

RESUMEN AJUSTE CEMENTO TIPO I

CEMENTO TIPO I								
	DÍAS	CURADO	k	v	X^2	X^2 tabla	ERROR %	AJUSTE
MODELO	7	AIRE	7	6	3,992	12,592	10,97	BUENO
	14		7	6	2,752	12,592	9,03	BUENO
	21		15	14	41,131	23,685	31,10	MALO
	28		9	8	65,338	15,507	44,19	MALO
	7	AGUA	7	6	11,135	12,592	18,64	BUENO
	14		8	7	15,404	14,067	20,02	MALO
	21		8	7	35,710	14,067	31,47	MALO
	28		8	7	16,661	14,067	21,87	MALO
VALIDACIÓN	4	AIRE	6	5	4,375	11,07	12,51	BUENO
	11		7	6	29,466	12,592	32,43	MALO
	18		9	8	42,966	15,507	32,70	MALO
	25		8	7	13,419	14,067	17,90	BUENO
	4	AGUA	6	5	21,272	11,07	27,00	MALO
	11		8	7	94,607	14,067	44,38	MALO
	18		8	7	53,513	14,067	33,67	MALO
	25		7	6	23,066	12,592	26,25	MALO

TABLA 50

RESUMEN AJUSTE CEMENTO TIPO IV

CEMENTO TIPO IV								
	DÍAS	CURADO	k	v	X^2	X^2 tabla	ERROR %	AJUSTE
MODELO	7	AIRE	14	13	38,702	22,362	36,14	MALO
	14		13	12	13,242	21,026	21,55	BUENO
	21		14	13	43,309	22,362	41,35	MALO
	28		13	12	61,441	21,026	49,78	MALO
	7	AGUA	12	11	58,725	19,675	45,88	MALO
	14		15	14	25,552	23,685	25,61	MALO
	21		19	18	109,056	28,869	43,46	MALO
	28		16	15	77,079	24,996	41,20	MALO
VALIDACIÓN	4	AIRE	11	10	28,963	18,307	37,96	MALO
	11		12	11	16,109	19,675	26,11	BUENO
	18		14	13	42,445	22,362	40,12	MALO
	25		14	13	55,876	22,362	43,87	MALO
	4	AGUA	7	6	5,584	12,592	16,67	BUENO
	11		14	13	29,076	22,362	30,78	MALO
	18		17	16	81,783	26,296	42,53	MALO
	25		16	15	88,349	24,996	44,15	MALO

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El análisis estadístico de los datos experimentales nos dio como resultado las siguientes conclusiones:

- Mediante regresión encontramos la ecuación característica para los cementos tipo I y IV curados en aire y en agua. Estas ecuaciones encontradas fueron de tercer orden y son válidas en el intervalo de cero a veintiocho días.

- Los esfuerzos obtenidos de los cementos tipo I y IV curados en agua son superiores a los curados en aire por lo tanto se puede afirmar que realizando un curado en agua lograremos mejores resultados

- El cemento tipo I curado en aire y en agua tiene una resistencia a la compresión superior que el cemento tipo IV curado en aire y en agua respectivamente.

- En el cemento tipo I curado en aire se obtuvo el mayor esfuerzo a los 14 días, mientras que curado en agua no existió diferencias significativas entre las medias de los días 14, 21 y 28 de curados, lo que significa que en estos días el esfuerzo es casi igual.

- En el cemento tipo IV curado en aire y en agua el mayor esfuerzo se obtuvo a los 14 y 21 días de curado respectivamente

- En la validación de nuestro modelo se confirmó que mediante un curado en agua obtenemos los mayores esfuerzos.

- Mediante la creación de un algoritmo se encontró una curva característica para cada día de curado que representa el comportamiento del cemento tipo I y IV curados en aire y en agua de cero a veintiocho días.

- Las curvas simuladas son muy similares a las curvas obtenidas experimentalmente y son válidas de cero a veintiocho días.

- Mediante estas curvas simuladas se puede determinar un esfuerzo en cualquier día sin necesidad de volver a realizar pruebas de laboratorio.

5.2. Recomendaciones

Las recomendaciones del presente trabajo son las siguientes

- Para evitar tener diferentes errores en la toma de datos, los ensayos destructivos en futuros trabajos de investigación se deberán realizar en una sola máquina y no en diferentes máquinas como se lo realizó en esta investigación, además tenemos que evitar colocar precarga a la probeta.

- El procedimiento experimental hay que realizarlo según la norma ASTM C 109 para que los resultados obtenidos sean válidos

- Se debería realizar el curado de las diferentes probetas en un cuarto donde se pueda controlar la temperatura y humedad.

- En una futura investigación se debería verificar la relación agua – cemento tipo IV, debido a que con la proporción utilizada en esta investigación la pasta obtenida de esta mezcla se endurecía muy rápido.

ANEXO A 1

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 7 DÍAS

Fecha:	27 de Agosto de 2008			Hr: 17:22	T: 26ºC	HR: 70
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	6,1567	7,6959	7,3538	7,0688	2838,6575
2601	0,0050	19,4962	23,6007	22,4036	21,8335	5929,1315
2601	0,0075	33,8619	40,0186	32,8358	35,5721	5517,0683
2601	0,0100	48,7406	59,8569	47,8855	52,1610	6661,6882
2601	0,0125	64,1324	70,1181	62,4222	65,5575	5379,7139
2601	0,0149	69,2630	76,9589	75,2487	73,8235	3319,3979
2601	0,0174	76,9589		79,5242	78,2415	1774,1610

ANEXO A 2

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 14 DÍAS

Fecha:	3 de Septiembre de 2008			Hr: 16:00	T: 25,6ºC	HR: 69,1
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	11,2873	10,7742	5,8147	9,2921	3731,4611
2601	0,0050	27,5342	21,3775	20,6934	23,2017	5585,7455
2601	0,0075	42,4129	37,1113	37,2823	38,9355	6318,3023
2601	0,0100	57,2916	51,3059	57,2916	55,2964	6570,1186
2601	0,0125	70,9732	68,4079	70,9732	70,1181	5952,0239
2601	0,0149	79,5242	78,6691	81,2344	79,8092	3891,7079
2601	0,0174	83,7996	84,6547	84,6547	84,3697	1831,3920

ANEXO A 3

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 21 DÍAS

Fecha:	10 de Septiembre de 2008			Hr: 15:40	T: 27,4ºC	HR: 63,4
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,7541	0,9426	0,5656	0,7541	302,8146
2601	0,0050	2,2622	2,2622	1,8852	2,1365	555,1601
2601	0,0075	5,8440	5,6555	5,0900	5,5298	1362,6656
2601	0,0100	8,8603	11,6880	10,7455	10,4313	1968,2948
2601	0,0125	16,4010	17,9091	16,5895	16,9665	2624,3931
2601	0,0149	22,6220	24,5072	24,5072	23,8788	2775,8004
2601	0,0174	29,2201	31,1053	30,1627	30,1627	2523,4549
2601	0,0199	35,8182	37,7034	35,8182	36,4466	2523,4549
2601	0,0224	40,5311	42,4163	42,4163	41,7879	2144,9366
2601	0,0249	47,1292	46,1866	48,6374	47,3177	2220,6403
2601	0,0274	52,7847	52,7847	53,7273	53,0989	2321,5785
2601	0,0299	59,0058	59,3828	59,0058	59,1315	2422,5167
2601	0,0324	63,1532	63,1532	64,0958	63,4674	1741,1839
2601	0,0349			69,7513	69,7513	2523,4549
2601	0,0374			71,6364	71,6364	757,0365

ANEXO A 4

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 28 DÍAS

Fecha:	17 de Septiembre de 2008			Hr: 15:10	T: 26,8ºC	HR: 64,2
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	1,8812	1,3682	1,3682	1,5392	618,0948
2601	0,0050	3,5914	2,0522	2,2233	2,6223	434,9556
2601	0,0075	5,4726	5,4726	5,4726	5,4726	1144,6200
2601	0,0100	15,7338	13,8526	14,5367	14,7077	3708,5687
2601	0,0125	30,2705	26,8501	27,3631	28,1612	5402,6063
2601	0,0149	44,4651	41,8998	41,8998	42,7549	5860,4543
2601	0,0174	57,2916	59,0018	57,6336	57,9757	6112,2707
2601	0,0199	68,4079	64,1324	64,9875	65,8426	3159,1511
2601	0,0224	74,3936	73,5385	74,3936	74,1085	3319,3979

ANEXO A 5

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 7 DÍAS

Fecha:	27 de Agosto de 2008			Hr: 17:45	T: 26ºC	HR: 69,1
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	7,0118	5,9857	1,8812	4,9596	1991,6388
2601	0,0050	22,4036	22,4036	9,9191	18,2421	5333,9291
2601	0,0075	38,1374	36,4272	24,7979	33,1208	5974,9163
2601	0,0100	55,5814	55,5814	40,1896	50,4508	6959,2894
2601	0,0125	73,5385	74,3936	59,8569	69,2630	7554,4918
2601	0,0149	85,5098	87,2200	76,9589	83,2296	5608,6379
2601	0,0174	89,7853	90,6404	87,2200	89,2153	2403,7019

ANEXO A 6

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 14 DÍAS

Fecha:	3 de Septiembre de 2008			Hr: 18:10	T: 25,4ºC	HR: 68,9
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	6,1567	5,1306	1,8812	4,3895	1762,7148
2601	0,0050	17,9571	20,0093	6,6698	14,8787	4212,2015
2601	0,0075	35,2301	33,8619	20,0093	29,7004	5952,0239
2601	0,0100	48,7406	50,4508	38,8215	46,0043	6547,2262
2601	0,0125	66,6977	69,2630	53,8712	63,2773	6936,3970
2601	0,0149	81,2344	87,2200	72,6834	80,3793	6867,7198
2601	0,0174	95,7710	92,3506	86,3649	91,4955	4464,0179
2601	0,0199	99,1914	97,4812	89,7853	95,4860	1602,4680

ANEXO A 7

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 21 DÍAS

Fecha:	10 de Septiembre de 2008			Hr: 16:10	T: 27,4ºC	HR: 63,4
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	2,5653	3,9335	2,7363	3,0784	1236,1896
2601	0,0050	11,2873	11,4583	8,2089	10,3182	2907,3347
2601	0,0075	24,4558	26,3370	17,7860	22,8596	5036,3279
2601	0,0100	40,0186	45,3202	36,5982	40,6457	7142,4286
2601	0,0125	57,2916	62,4222	50,4508	56,7215	6455,6566
2601	0,0149	75,2487	76,9589	64,1324	72,1133	6180,9479
2601	0,0174	82,9445	100,0465	71,8283	84,9398	5150,7899
2601	0,0199	102,6118	108,5975	76,9589	96,0561	4464,0179

ANEXO A 8

MODELO: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 28 DÍAS

Fecha:	17 de Septiembre de 2008			Hr: 15:30	T: 26,8ºC	HR:64,2
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	3,4204	4,4465	5,9857	4,6175	1854,2844
2601	0,0050	9,2351	12,3134	18,1281	13,2255	3456,7523
2601	0,0075	22,2326	26,8501	34,2039	27,7622	5837,5619
2601	0,0100	41,2157	34,3750	51,3059	42,2989	5837,5619
2601	0,0125	55,5814	56,4365	64,1324	58,7168	6593,0110
2601	0,0149	74,3936	72,6834	83,7996	76,9589	7325,5678
2601	0,0174	92,3506	94,0608	91,4955	92,6357	6295,4099
2601	0,0199	95,7710	97,4812	94,0608	95,7710	1259,0820

ANEXO A 9

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 7 DÍAS

Fecha:	9 de Septiembre de 2008			Hr: 19:42	T: 26,9ºC	HR: 66,3
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,5656	0,5656	0,9426	0,6912	277,5800
2601	0,0050	1,1311	1,3196	1,3196	1,2568	227,1109
2601	0,0075	1,8852	2,6392	3,0163	2,5136	504,6910
2601	0,0100	4,1474	5,0900	5,6555	4,9643	984,1474
2601	0,0125	7,9177	9,2373	9,6144	8,9231	1589,7766
2601	0,0149	12,6306	14,1388	14,7043	13,8246	1968,2948
2601	0,0174	17,5321	19,7943	20,7369	19,3544	2220,6403
2601	0,0199	23,5646	25,4498	26,3924	25,1356	2321,5785
2601	0,0224	29,2201	30,7283	32,9905	30,9796	2346,8130
2601	0,0249	34,8756	35,8182	35,8182	35,5040	1816,8875
2601	0,0274	39,5886	40,1541	39,5886	39,7771	1715,9493
2601	0,0299	45,2441	43,9244	43,3589	44,1758	1766,4184
2601	0,0324	49,0144	45,2441	48,0718	47,4434	1312,1965
2601	0,0349	49,9570			49,9570	1009,3819

ANEXO A 10

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 14 DÍAS

Fecha:	16 de Septiembre de 2008			Hr: 15:25	T: 26,3ºC	HR: 68,8
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	1,1311	0,9426	0,7541	0,9426	378,5182
2601	0,0050	3,3933	2,4507	2,4507	2,7649	731,8019
2601	0,0075	6,9751	6,2211	5,0900	6,0954	1337,4311
2601	0,0100	11,8766	11,8766	9,8029	11,1853	2043,9984
2601	0,0125	16,9665	17,7206	15,0814	16,5895	2170,1712
2601	0,0149	22,6220	22,6220	20,7369	21,9936	2170,1712
2601	0,0174	29,2201	27,5235	25,4498	27,3978	2170,1712
2601	0,0199	32,9905	32,9905	30,1627	32,0479	1867,3566
2601	0,0224	38,6460	38,6460	36,7608	38,0176	2397,2821
2601	0,0249	42,4163	42,4163	41,4737	42,1021	1640,2457
2601	0,0274	46,1866	45,2441	45,2441	45,5583	1387,9002
2601	0,0299	49,9570	49,9570	49,0144	49,6428	1640,2457
2601	0,0324	50,8996			50,8996	504,6910

ANEXO A 11

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 21 DÍAS

Fecha:	23 de Septiembre de 2008			Hr: 16:15	T: 25,6ºC	HR: 70,8
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,3770	0,5656	0,5656	0,5027	201,8764
2601	0,0050	0,9426	1,1311	1,1311	1,0683	227,1109
2601	0,0075	1,6967	2,2622	2,6392	2,1994	454,2219
2601	0,0100	3,0163	3,2048	4,3359	3,5190	529,9255
2601	0,0125	5,4670	5,6555	6,5981	5,9069	958,9128
2601	0,0149	9,4258	8,8603	10,3684	9,5515	1463,6038
2601	0,0174	13,7617	13,0077	14,1388	13,6361	1640,2457
2601	0,0199	18,4747	17,1550	18,2861	17,9719	1741,1839
2601	0,0224	22,6220	22,6220	21,6794	22,3078	1741,1839
2601	0,0249	27,3350	27,3350	26,9579	27,2093	1968,2948
2601	0,0274	32,0479	32,9905	31,1053	32,0479	1943,0602
2601	0,0299	37,7034	37,7034	35,8182	37,0750	2018,7639
2601	0,0324	42,4163	40,5311	39,5886	40,8453	1514,0729
2601	0,0349	45,2441		42,4163	43,8302	1198,6411

ANEXO A 12

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 28 DÍAS

Fecha:	30 de Septiembre de 2008			Hr: 15:10	T: 24,4ºC	HR: 72,3
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,5656	0,5656	0,4901	0,5404	217,0171
2601	0,0050	0,9426	1,1311	0,9426	1,0054	186,7357
2601	0,0075	1,5081	1,8852	1,5081	1,6338	252,3455
2601	0,0100	2,3753	3,0163	2,4507	2,6141	393,6590
2601	0,0125	3,5818	5,2785	4,5244	4,4616	741,8957
2601	0,0149	6,0325	9,0488	8,2947	7,7920	1337,4311
2601	0,0174	9,6144	13,7617	12,6306	12,0022	1690,7148
2601	0,0199	14,5158	19,7943	17,7206	17,3436	2144,9366
2601	0,0224	19,7943	24,5072	23,5646	22,6220	2119,7021
2601	0,0249	25,4498	29,2201	28,2775	27,6491	2018,7639
2601	0,0274	31,1053	34,8756	33,9330	33,3047	2271,1094
2601	0,0299	36,7608	40,5311	39,5886	38,9602	2271,1094
2601	0,0324	40,5311	42,4163	42,9819	41,9764	1211,2583

ANEXO A 13

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 7 DÍAS

Fecha:	9 de Septiembre de 2008			Hr: 19:21	T: 26,9ºC	HR: 68,9
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,9426	0,5656	0,5656	0,6912	277,5800
2601	0,0050	1,1311	1,3196	1,1311	1,1939	201,8764
2601	0,0075	2,0737	2,4507	1,6967	2,0737	353,2837
2601	0,0100	3,5818	4,7129	3,7703	4,0217	782,2710
2601	0,0125	5,8440	9,8029	7,9177	7,8549	1539,3075
2601	0,0149	11,6880	15,0814	13,0077	13,2590	2170,1712
2601	0,0174	17,7206	20,7369	19,7943	19,4172	2472,9858
2601	0,0199	28,2775	28,2775	27,3350	27,9633	3431,8986
2601	0,0224	34,8756	34,8756	33,9330	34,5614	2649,6276
2601	0,0249	43,3589	42,4163	41,4737	42,4163	3154,3186
2601	0,0274	47,1292	48,0718	49,0144	48,0718	2271,1094
2601	0,0299			51,8422	51,8422	1514,0729

ANEXO A 14

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 14 DÍAS

Fecha:	16 de Septiembre de 2008			Hr: 15,45	T: 26,3ºC	HR: 68,8
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	1,1311	0,7541	0,7541	0,8797	353,2837
2601	0,0050	2,8278	2,4507	2,0737	2,4507	630,8637
2601	0,0075	5,8440	6,4096	4,3359	5,5298	1236,4929
2601	0,0100	11,3110	11,1225	8,4833	10,3056	1917,8257
2601	0,0125	16,0239	16,9665	13,7617	15,5841	2119,7021
2601	0,0149	22,6220	22,6220	19,7943	21,6794	2447,7512
2601	0,0174	28,2775	30,1627	26,3924	28,2775	2649,6276
2601	0,0199	33,9330	36,7608	32,0479	34,2472	2397,2821
2601	0,0224	39,5886	42,4163	38,6460	40,2169	2397,2821
2601	0,0249	45,2441	48,0718	44,8670	46,0610	2346,8130
2601	0,0274	49,9570	50,8996	49,9570	50,2712	1690,7148
2601	0,0299	54,6699	55,6125	56,5551	55,6125	2144,9366
2601	0,0324	59,3828	58,6288	58,6288	58,8801	1312,1965
2601	0,0349	64,0958			64,0958	2094,4675
2601	0,0374	65,9809			65,9809	757,0365

ANEXO A 15

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 21 DÍAS

Fecha:	23 de Septiembre de 2008			Hr: 15:40	T: 25,7ºC	HR: 71,2
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,5656	0,3770	0,3770	0,4399	176,6418
2601	0,0050	1,3196	0,7541	0,9426	1,0054	227,1109
2601	0,0075	2,0737	1,5081	1,5081	1,6967	277,5800
2601	0,0100	3,0163	2,8278	2,6392	2,8278	454,2219
2601	0,0125	6,0325	5,2785	4,7129	5,3413	1009,3819
2601	0,0149	8,1062	8,1062	7,9177	8,0434	1085,0856
2601	0,0174	11,3110	11,8766	11,8766	11,6880	1463,6038
2601	0,0199	16,7780	16,4010	15,8354	16,3381	1867,3566
2601	0,0224	22,6220	21,6794	20,7369	21,6794	2144,9366
2601	0,0249	29,2201	27,3350	26,3924	27,6491	2397,2821
2601	0,0274	34,8756	32,9905	32,0479	33,3047	2271,1094
2601	0,0299	41,4737	39,5886	37,7034	39,5886	2523,4549
2601	0,0324	47,1292	46,1866	43,3589	45,5583	2397,2821
2601	0,0349	52,7847	52,4077	49,0144	51,4023	2346,8130
2601	0,0374	57,4977	56,5551	57,4977	57,1835	2321,5785
2601	0,0398	62,2106	61,2680	62,2106	61,8964	1892,5912
2601	0,0423	67,8661	65,9809	66,9235	66,9235	2018,7639
2601	0,0448	71,6364	71,6364	72,5790	71,9506	2018,7639
2601	0,0473	76,3494	74,4642	75,4068	75,4068	1387,9002

ANEXO A 16

MODELO: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 28 DÍAS

Fecha:	30 de Septiembre de 2008			Hr: 15:30	T: 24,4ºC	HR: 72,3
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,4901	0,6410	0,5656	0,5656	227,1109
2601	0,0050	0,9426	1,3196	1,1311	1,1311	227,1109
2601	0,0075	1,6212	2,0737	2,6392	2,1114	393,6590
2601	0,0100	3,2048	3,9589	4,7129	3,9589	741,8957
2601	0,0125	5,8440	6,9751	7,3522	6,7238	1110,3201
2601	0,0149	9,9914	12,4421	12,6306	11,6880	1993,5293
2601	0,0174	15,2699	17,5321	18,2861	17,0294	2144,9366
2601	0,0199	20,7369	23,5646	23,5646	22,6220	2245,8748
2601	0,0224	26,9579	29,7857	29,7857	28,8431	2498,2203
2601	0,0249	32,9905	36,7608	36,7608	35,5040	2674,8622
2601	0,0274	40,1541	43,3589	43,3589	42,2906	2725,3313
2601	0,0299	47,1292	49,9570	52,4077	49,8313	3028,1458
2601	0,0324	53,7273	56,1780	55,6125	55,1726	2144,9366
2601	0,0349	60,3254	62,2106		61,2680	2447,7512
2601	0,0374	66,9235	68,4316		67,6776	2573,9240
2601	0,0398	70,6938	70,6938		70,6938	1211,2583

ANEXO B 1

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 4 DÍAS

Fecha:	2 de Septiembre de 2008			Hr: 18:40	T: 25,2ºC	HR: 70
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	7,1828	4,7886	8,2089	6,7268	2701,3031
2601	0,0050	20,8644	16,5889	28,2182	21,8905	6089,3783
2601	0,0075	40,5317	34,0329	42,7549	39,1065	6913,5046
2601	0,0100	53,8712	48,7406	59,8569	54,1562	6043,5935
2601	0,0125	65,8426	64,1324	71,8283	67,2677	5265,2519
2601	0,0149	67,5528	68,4079	76,9589	70,9732	1488,0060

ANEXO B 2

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 11 DÍAS

Fecha:	9 de Septiembre de 2008			Hr: 18:45	T: 26,9	HR:68,7
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	2,3943	3,4204	4,1045	3,3064	1327,7592
2601	0,0050	10,9453	14,0236	11,8004	12,2564	3594,1067
2601	0,0075	23,4297	27,3631	27,5342	26,1090	5562,8531
2601	0,0100	38,8215	37,6243	38,6504	38,3654	4921,8659
2601	0,0125	54,7263	53,0161	57,2916	55,0113	6684,5806
2601	0,0149	72,6834	70,1181	70,9732	71,2582	6524,3338
2601	0,0174	82,9445	82,9445	84,6547	83,5146	4921,8659

ANEXO B 3

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 18 DÍAS

Fecha:	16 de Septiembre de 2008			Hr: 16:08	T: 26,3ºC	HR: 69
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	1,5392	3,4204	2,9073	2,6223	1053,0504
2601	0,0050	3,0784	9,4061	6,1567	6,2137	1442,2212
2601	0,0075	4,9596	18,8122	14,7077	12,8265	2655,5183
2601	0,0100	11,6293	33,8619	27,8762	24,4558	4670,0495
2601	0,0125	24,2848	52,1610	42,7549	39,7336	6135,1631
2601	0,0149	40,3606	67,5528	65,8426	57,9187	7302,6754
2601	0,0174	63,2773	85,5098	80,3793	76,3888	7417,1374
2601	0,0199	79,5242	97,4812	82,9445	86,6500	4120,6319
2601	0,0224	83,7996			83,7996	-1144,6200

ANEXO B 4

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE 25 DÍAS

Fecha:	23 de Septiembre de 2008			Hr: 15:10	T: 25,7ºC	HR: 70,9
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	4,9596	4,4465	3,7624	4,3895	1762,7148
2601	0,0050	15,3918	13,5106	13,1685	14,0236	3868,8155
2601	0,0075	29,0733	27,1921	29,7574	28,6743	5883,3467
2601	0,0100	48,7406	51,3059	48,7406	49,5957	8401,5106
2601	0,0125	64,9875	63,2773	64,1324	64,1324	5837,5619
2601	0,0149	75,2487	71,8283	78,6691	75,2487	4464,0179
2601	0,0174	85,5098	78,6691	83,7996	82,6595	2976,0119
2601	0,0189	88,0751	81,2344		84,6547	801,2340

ANEXO B 5

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 4 DÍAS

Fecha:	5 de Septiembre de 2008			Hr: 16:00	T: 25,8ºC	HR: 69,2
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	4,4465	4,4465	6,3277	5,0736	2037,4236
2601	0,0050	17,6150	22,9166	28,5603	23,0307	7211,1058
2601	0,0075	38,3084	39,3345	41,7288	39,7906	6730,3654
2601	0,0100	58,1467	62,4222	59,8569	60,1419	8172,5866
2601	0,0125	74,3936	76,9589	75,2487	75,5337	6180,9479
2601	0,0149	80,3793	82,9445	80,3793	81,2344	2289,2399

ANEXO B 6

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 11 DÍAS

Fecha:	12 de Septiembre de 2008			Hr: 18:15	T:25,7ºC	HR: 67,8
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	5,6436	5,1306	5,6436	5,4726	2197,6703
2601	0,0050	9,4061	9,5771	10,0902	9,6911	1694,0376
2601	0,0075	16,2469	16,2469	16,5889	16,3609	2678,4107
2601	0,0100	26,1660	25,9950	25,9950	26,0520	3891,7079
2601	0,0125	38,4794	38,1374	43,6100	40,0756	5631,5303
2601	0,0149	62,4222	59,8569	62,4222	61,5671	8630,4346
2601	0,0174	88,0751	88,9302	87,2200	88,0751	10644,9658
2601	0,0199	101,7567	102,6118	102,6118	102,3268	5723,0999

ANEXO B 7

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 18 DÍAS

Fecha:	19 de Septiembre de 2008			Hr: 14:50	T: 26,8ºC	HR: 64,1
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	3,4204	3,7624	3,7624	3,6484	1465,1136
2601	0,0050	9,4061	11,2873	11,8004	10,8312	2884,4423
2601	0,0075	23,2587	23,9428	26,8501	24,6838	5562,8531
2601	0,0100	46,1753	41,3868	47,0304	44,8642	8103,9094
2601	0,0125	64,9875	63,2773	64,9875	64,4174	7852,0930
2601	0,0149	88,0751	88,0751	88,9302	88,3602	9614,8078
2601	0,0174	106,0322	106,8873	106,0322	106,3172	7211,1058
2601	0,0199	108,5975	109,4526	108,5975	108,8825	1030,1580

ANEXO B 8

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA 25 DÍAS

Fecha:	26 de Septiembre de 2008			Hr: 12:20	T: 26,1ºC	HR: 65,3
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	6,6698	4,2755	6,8408	5,9287	2380,8095
2601	0,0050	18,8122	15,0497	18,8122	17,5580	4670,0495
2601	0,0075	30,4415	25,3109	25,1399	26,9641	3777,2459
2601	0,0100	45,3202	48,7406	40,5317	44,8642	7188,2134
2601	0,0125	66,6977	67,5528	64,1324	66,1276	8538,8650
2601	0,0149	82,9445	82,9445	82,0894	82,6595	6638,7958
2601	0,0174	90,6404	88,9302	89,7853	89,7853	2861,5499

ANEXO B 9

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 4 DÍAS

Fecha:	8 de Septiembre de 2008			Hr: 14:10	T: 26,7ºC	HR: 70,6
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,6033	0,6410	0,7541	0,6661	267,4862
2601	0,0050	1,6967	1,1688	2,2622	1,7092	418,8935
2601	0,0075	4,3359	2,6392	4,7129	3,8960	878,1623
2601	0,0100	8,1062	4,7129	8,6718	7,1636	1312,1965
2601	0,0125	12,6306	9,6144	13,9503	12,0651	1968,2948
2601	0,0149	18,8517	13,9503	19,7943	17,5321	2195,4057
2601	0,0174	24,5072	20,7369	25,4498	23,5646	2422,5167
2601	0,0199	30,1627	26,0153	31,6708	29,2830	2296,3439
2601	0,0224	34,8756	32,0479	36,7608	34,5614	2119,7021
2601	0,0249	40,5311	36,7608	38,6460	38,6460	1640,2457
2601	0,0274	45,2441	39,5886		42,4163	1514,0729

ANEXO B 10

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 11 DÍAS

Fecha:	15 de Septiembre de 2008			Hr: 16:20	T: 25ºC	HR: 68,9
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,9426	0,7541	0,9426	0,8797	353,2837
2601	0,0050	2,4507	1,8852	2,4507	2,2622	555,1601
2601	0,0075	6,2211	4,1474	5,6555	5,3413	1236,4929
2601	0,0100	10,7455	7,3522	11,3110	9,8029	1791,6530
2601	0,0125	16,0239	12,4421	16,9665	15,1442	2144,9366
2601	0,0149	21,6794	17,3436	22,6220	20,5483	2170,1712
2601	0,0174	26,3924	22,6220	28,2775	25,7640	2094,4675
2601	0,0199	33,9330	28,2775	32,9905	31,7337	2397,2821
2601	0,0224	39,5886	32,9905	37,7034	36,7608	2018,7639
2601	0,0249	42,4163	38,6460	42,2278	41,0967	1741,1839
2601	0,0274		42,4163		42,4163	529,9255
2601	0,0299		46,1866		46,1866	1514,0729

ANEXO B 11

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 18 DÍAS

Fecha:	22 de Septiembre de 2008			Hr: 18:10	T: 26,2ºC	HR: 64,6
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,7541	0,9426	0,7541	0,8169	328,0491
2601	0,0050	1,6967	1,8852	1,5081	1,6967	353,2837
2601	0,0075	2,8278	2,8278	2,2622	2,6392	378,5182
2601	0,0100	4,7129	4,1474	3,3933	4,0845	580,3946
2601	0,0125	7,9177	6,2211	6,7866	6,9751	1160,7892
2601	0,0149	12,4421	9,2373	10,9340	10,8711	1564,5420
2601	0,0174	16,9665	12,6306	15,8354	15,1442	1715,9493
2601	0,0199	21,6794	16,4010	20,7369	19,6058	1791,6530
2601	0,0224	26,3924	21,6794	24,5072	24,1930	1842,1221
2601	0,0249	31,1053	26,3924	29,2201	28,9059	1892,5912
2601	0,0274	34,8756	31,1053	32,0479	32,6763	1514,0729
2601	0,0299	39,5886	36,7608	34,8756	37,0750	1766,4184
2601	0,0324	40,5311	41,4737	36,7608	39,5886	1009,3819
2601	0,0349		44,3015		44,3015	1892,5912

ANEXO B 12

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE 25 DÍAS

Fecha:	29 de Septiembre de 2008			Hr: 11:45	T: 24,6ºC	HR: 77,6
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,7541	0,5656	0,6787	0,6661	267,4862
2601	0,0050	1,5081	0,9426	1,2442	1,2316	227,1109
2601	0,0075	2,5638	1,9983	1,9983	2,1868	383,5651
2601	0,0100	4,5244	3,6949	3,3933	3,8709	676,2859
2601	0,0125	6,7866	6,5981	6,0325	6,4724	1044,7103
2601	0,0149	10,5569	10,1799	9,8029	10,1799	1488,8384
2601	0,0174	14,8928	14,8928	14,1388	14,6415	1791,6530
2601	0,0199	20,3598	19,7943	19,2287	19,7943	2069,2330
2601	0,0224	25,4498	24,5072	24,5072	24,8214	2018,7639
2601	0,0249	30,1627	28,8431	29,7857	29,5972	1917,8257
2601	0,0274	35,4412	33,9330	34,8756	34,7500	2069,2330
2601	0,0299	41,0967	36,3838	41,0967	39,5257	1917,8257
2601	0,0324	45,8096	37,3263	44,3015	42,4791	1186,0238
2601	0,0349	46,7522			46,7522	1715,9493

ANEXO B 13

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 4 DÍAS

Fecha:	8 de Septiembre de 2008			Hr: 14:40	T: 26,7ºC	HR: 70,6
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	2,3943	3,9335	2,5653	2,9643	1190,4048
2601	0,0050	8,3800	11,1163	11,2873	10,2612	2930,2271
2601	0,0075	15,3918	21,8905	22,2326	19,8383	3845,9231
2601	0,0100	26,3370	32,8358	35,5721	31,5816	4715,8343
2601	0,0125	35,0590	40,1896	42,7549	39,3345	3113,3663
2601	0,0149	44,4651	45,3202	46,1753	45,3202	2403,7019
2601	0,0174	46,1753			46,1753	343,3860

ANEXO B 14

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 11 DÍAS

Fecha:	15 de Septiembre de 2008			Hr: 15:40	T: 25,1ºC	HR: 68,8
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,8672	0,9426	0,7541	0,8546	343,1899
2601	0,0050	2,4507	2,4507	2,0737	2,3250	590,4884
2601	0,0075	5,4670	4,5244	3,9589	4,6501	933,6783
2601	0,0100	8,8603	7,5407	7,9177	8,1062	1387,9002
2601	0,0125	12,2536	12,6306	12,2536	12,3793	1715,9493
2601	0,0149	15,4584	17,5321	17,5321	16,8408	1791,6530
2601	0,0174	20,7369	22,6220	24,5072	22,6220	2321,5785
2601	0,0199	26,3924	29,2201	30,1627	28,5917	2397,2821
2601	0,0224	32,0479	33,9330	35,8182	33,9330	2144,9366
2601	0,0249	37,7034	38,6460	40,5311	38,9602	2018,7639
2601	0,0274	42,4163	45,2441	44,3015	43,9873	2018,7639
2601	0,0299	46,1866	49,0144	49,5799	48,2603	1715,9493
2601	0,0324	53,7273	52,7847	53,7273	53,4131	2069,2330
2601	0,0349	59,3828		56,5551	57,9690	1829,5048

ANEXO B 15

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 18 DÍAS

Fecha:	22 de Septiembre de 2008			Hr: 17:15	T: 26,5ºC	HR: 67
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,7541	0,7541	0,5656	0,6912	277,5800
2601	0,0050	2,0737	1,5081	1,5081	1,6967	403,7528
2601	0,0075	2,6392	2,6392	2,4507	2,5764	353,2837
2601	0,0100	3,5818	4,1474	3,7703	3,8332	504,6910
2601	0,0125	5,8440	6,7866	6,5981	6,4096	1034,6165
2601	0,0149	9,6144	9,9914	8,4833	9,3630	1186,0238
2601	0,0174	13,7617	13,9503	11,1225	12,9448	1438,3693
2601	0,0199	18,4747	17,5321	15,6469	17,2179	1715,9493
2601	0,0224	23,5646	22,6220	20,7369	22,3078	2043,9984
2601	0,0249	30,1627	29,2201	26,3924	28,5917	2523,4549
2601	0,0274	32,9905	33,5560	32,0479	32,8648	1715,9493
2601	0,0299	36,7608	39,5886	37,3263	37,8919	2018,7639
2601	0,0324	43,3589	45,2441	44,3015	44,3015	2573,9240
2601	0,0349	49,9570	51,4651	49,5799	50,3340	2422,5167
2601	0,0374	56,5551	55,6125	54,6699	55,6125	2119,7021
2601	0,0398	61,2680	62,2106	59,9484	61,1423	2220,6403
2601	0,0423	63,1532	64,0958		63,6245	996,7647

ANEXO B 16

VALIDACIÓN: CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA 25 DÍAS

Fecha:	29 de Septiembre de 2008			Hr: 12:00	T: 24,7ºC	HR: 77,7
Área (mm^2)	**Deformación Unitaria**	**Probeta 1 (MPa)**	**Probeta 2 (MPa)**	**Probeta 3 (MPa)**	**σ_{prom} (MPa)**	**Eprom (MPa)**
2601	0	0	0	0	0	
2601	0,0025	0,6787	0,5656	0,5656	0,6033	242,2517
2601	0,0050	1,2442	1,2442	1,3196	1,2693	267,4862
2601	0,0075	1,9983	1,8852	2,2622	2,0486	312,9084
2601	0,0100	3,7703	3,1294	4,1474	3,6824	656,0983
2601	0,0125	7,5407	4,9014	6,2211	6,2211	1019,4758
2601	0,0149	12,0651	7,9177	11,1225	10,3684	1665,4802
2601	0,0174	17,5321	12,8192	16,0239	15,4584	2043,9984
2601	0,0199	23,5646	17,7206	21,6794	20,9882	2220,6403
2601	0,0224	29,2201	22,6220	28,2775	26,7066	2296,3439
2601	0,0249	35,8182	28,2775	35,4412	33,1790	2599,1585
2601	0,0274	42,4163	34,8756	42,4163	39,9027	2700,0967
2601	0,0299	49,0144	40,5311	51,8422	47,1292	2901,9731
2601	0,0324	54,6699	46,7522	54,6699	52,0307	1968,2948
2601	0,0349	61,2680	53,3503		57,3091	2119,7021
2601	0,0374	68,8087	58,4402		63,6245	2536,0721
2601	0,0398	70,6938	63,1532		66,9235	1324,8138

ANEXO C 1

COMPARACIONES DEL PESO INICIAL Y FINAL DEL MODELO Y

VALIDACIÓN DE CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE

CEMENTO TIPO I								
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍA	PESO INICIAL (gr)			PESO FINAL (gr)		
			PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		7	274	275,3	275,5	270	270,4	270,6
		14	276,5	274,4	276,6	268,7	266,8	268,8
		21	276,3	275,8	274,7	267,9	267,9	267
		28	277	279,8	275,9	267,8	270,7	266,8
	VALIDACIÓN	DÍA	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		4	277,7	279,5	279,4	275,9	277,7	277,7
		11	276,9	278,9	278,2	272,7	274,6	274,2
		18	274,6	276,4	275,3	269,5	270,9	270,2
		25	279,3	279,2	280,3	273,5	273	274,2

ANEXO C 2

COMPARACIONES DEL PESO INICIAL Y FINAL DEL MODELO Y

VALIDACIÓN DE CEMENTO TIPO I CURADO EN AGUA

CEMENTO TIPO I								
CURADO EN AGUA	MODELO	DÍA	PESO INICIAL (gr)			PESO FINAL (gr)		
			PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		7	272,6	275,6	272,7	279,5	280	280,4
		14	273,4	275,2	269,9	281,3	282,7	277,3
		21	273,1	277,6	276,4	281,4	285,5	284,3
		28	271,8	273,5	272,4	279,9	281,4	280,3
	VALIDACIÓN	DÍA	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		4	277,9	277,7	279,1	283,4	283	284,6
		11	279,6	280,1	278,7	285	285,5	283,6
		18	278,9	279,8	279	286,3	287,2	286,4
		25	277,4	277,7	277,2	284,9	285,2	284,9

ANEXO C 3

COMPARACIONES DEL PESO INICIAL Y FINAL DEL MODELO Y VALIDACIÓN DE CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE

CEMENTO TIPO IV								
CURADO AL AIRE	MODELO	DÍA	PESO INICIAL (gr)			PESO FINAL (gr)		
			PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		7	264,4	266,5	265,8	249,7	251,7	250,5
		14	262,9	264,9	262,9	245,9	248,8	246,4
		21	264,6	263,3	262,8	247	245,9	244,4
		28	262,5	267,4	266,8	243,4	248,2	246,7
	VALIDACIÓN	DÍA	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		4	257,7	259,7	258,6	253,1	251,6	253
		11	256,9	259,5	258,7	245,2	246,8	247,2
		18	259,2	262,3	259,4	241,2	242,2	240,8
		25	260,3	260,5	260,7	243,5	245,6	245

ANEXO C 4

COMPARACIONES DEL PESO INICIAL Y FINAL DEL MODELO Y VALIDACIÓN DE CEMENTO TIPO IV CURADO EN AGUA

CEMENTO TIPO IV								
CURADO EN AGUA	MODELO	DÍA	PESO INICIAL (gr)			PESO FINAL (gr)		
			PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		7	258,7	260,9	260,1	266	267,8	267,2
		14	257,5	257,2	259,1	266,2	265,3	267
		21	262,2	262,7	263,3	271,6	271,4	272,1
		28	263,2	267	266	272,9	277	275,6
	VALIDACIÓN	DÍA	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
		4	263,8	261,7	263,4	264,6	265,3	264,3
		11	260,6	262,9	263,3	263,8	266,4	265,7
		18	258,4	259,5	258,2	266,7	270,1	267,3
		25	262	264,1	263,2	268,8	268,9	269,3

ANEXO D

W TABULADA PARA LA PRUEBA DE SHAPIRO & WILK

Tabla 3: Valores de W tabulada para la prueba de Shapiro & Wilks

	nivel de significancia		
N	0.01	0.05	0.1
3	0.753	0.767	0.789
4	0.687	0.748	0.792
5	0.686	0.762	0.806
6	0.713	0.788	0.826
7	0.73	0.803	0.838
8	0.749	0.818	0.851
9	0.764	0.829	0.859
10	0.781	0.842	0.869
11	0.792	0.85	0.876
12	0.805	0.859	0.883
13	0.814	0.866	0.889
14	0.825	0.874	0.895
15	0.835	0.881	0.901
16	0.844	0.887	0.906
17	0.851	0.892	0.91
18	0.858	0.897	0.914
19	0.863	0.901	0.917
20	0.868	0.905	0.92
21	0.873	0.908	0.923
22	0.878	0.911	0.926
23	0.881	0.914	0.928
24	0.884	0.916	0.93
25	0.888	0.918	0.931
26	0.891	0.92	0.933
27	0.894	0.923	0.935
28	0.896	0.924	0.936
29	0.898	0.926	0.937
30	0.9	0.927	0.939
31	0.902	0.929	0.94
32	0.904	0.93	0.941
33	0.906	0.931	0.942
34	0.908	0.933	0.943
35	0.91	0.934	0.944
36	0.912	0.935	0.945
37	0.914	0.936	0.946
38	0.916	0.938	0.947
39	0.917	0.939	0.948
40	0.919	0.94	0.949
41	0.92	0.941	0.95
42	0.922	0.942	0.951
43	0.923	0.943	0.951
44	0.924	0.944	0.952
45	0.926	0.945	0.953
46	0.927	0.945	0.953
47	0.928	0.946	0.954
48	0.929	0.947	0.954
49	0.929	0.947	0.955
50	0.93	0.947	0.955

Valores obtenidos de S. S Shapiro y M. B. Wilk. Biométrika (1965), 52:605

ANEXO E

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F

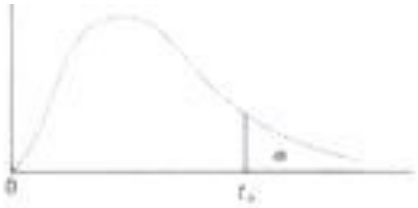

Tabla A.6 Valores críticos de la distribución F*

$f_{0.05}(v_1, v_2)$

v_2	v_1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88

*Reproducida de la tabla 18 de *Biometrika Tables for Statisticians*, vol. I, con permiso de E. S. Pearson y de los administradores de Biometrika.

ANEXO F

VALORES CRÍTICOS DE LA JI CUADRADA

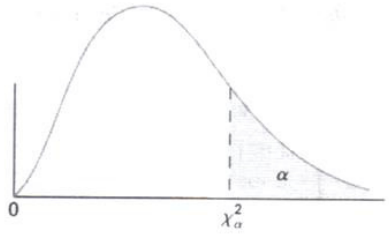

Tabla A.5 (continuación) Valores críticos de la distribución ji cuadrada

	α									
v	**0.30**	**0.25**	**0.20**	**0.10**	**0.05**	**0.25**	**0.02**	**0.01**	**0.005**	**0.001**
1	1.074	1.323	1.642	2.706	3.841	5.024	5.412	6.635	7.879	10.827
2	2.408	2.773	3.219	4.605	5.991	7.378	7.824	9.210	10.597	13.815
3	3.665	4.108	4.642	6.251	7.815	9.348	9.837	11.345	12.838	16.268
4	4.878	5.385	5.989	7.779	9.488	11.143	11.668	13.277	14.860	18.465
5	6.064	6.626	7.289	9.236	11.070	12.832	13.388	15.086	16.750	20.517
6	7.231	7.841	8.558	10.645	12.592	14.449	15.033	16.812	18.548	22.457
7	8.383	9.037	9.803	12.017	14.067	16.013	16.622	18.475	20.278	24.322
8	9.524	10.219	11.030	13.362	15.507	17.535	18.168	20.090	21.955	26.125
9	10.656	11.389	12.242	14.684	16.919	19.023	19.679	21.666	23.589	27.877
10	11.781	12.549	13.442	15.987	18.307	20.483	21.161	23.209	25.188	29.588
11	12.899	13.701	14.631	17.275	19.675	21.920	22.618	24.725	26.757	31.264
12	14.011	14.845	15.812	18.549	21.026	23.337	24.054	26.217	28.300	32.909
13	15.119	15.984	16.985	19.812	22.362	24.736	25.472	27.688	29.819	34.528
14	16.222	17.117	18.151	21.064	23.685	26.119	26.873	29.141	31.319	36.123
15	17.322	18.245	19.311	22.307	24.996	27.488	28.259	30.578	32.801	37.697
16	18.418	19.369	20.465	23.542	26.296	28.845	29.633	32.000	34.267	39.252
17	19.511	20.489	21.615	24.769	27.587	30.191	30.995	33.409	35.718	40.790
18	20.601	21.605	22.760	25.989	28.869	31.526	32.346	34.805	37.156	42.312
19	21.689	22.718	23.900	27.204	30.144	32.852	33.687	36.191	38.582	43.820
20	22.775	23.828	25.038	28.412	31.410	34.170	35.020	37.566	39.997	45.315
21	23.858	24.935	26.171	29.615	32.671	35.479	36.343	38.932	41.401	46.797
22	24.939	26.039	27.301	30.813	33.924	36.781	37.659	40.289	42.796	48.268
23	26.018	27.141	28.429	32.007	35.172	38.076	38.968	41.638	44.181	49.728
24	27.096	28.241	29.553	33.196	36.415	39.364	40.270	42.980	45.558	51.179
25	28.172	29.339	30.675	34.382	37.652	40.646	41.566	44.314	46.928	52.620
26	29.246	30.434	31.795	35.563	38.885	41.923	42.856	45.642	48.290	54.052
27	30.319	31.528	32.912	36.741	40.113	43.194	44.140	46.963	49.645	55.476
28	31.391	32.620	34.027	37.916	41.337	44.461	45.419	48.278	50.993	56.893
29	32.461	33.711	35.139	39.087	42.557	45.722	46.693	49.588	52.336	58.302
30	33.530	34.800	36.250	40.256	43.773	46.979	47.962	50.892	53.672	59.703

ANEXO G

MODELO GRUPAL: DIFERENCIA HONESTAMENTE SIGNIFICATIVA DE TUKEY

Tukey HSD test; variable ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) (Sheet1 in DATOS MODELO GRUPAL)
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests
Error: Between MS = 28,443, df = 32,000

Cell No.	DÍAS	CURADO Y CEMENTO	{1} 77,814	{2} 89,215	{3} 47,758	{4} 49,014	{5} 84,370	{6} 95,486	{7} 49,957	{8} 61,079	{9} 65,981	{10} 96,056	{11} 42,731	{12} 75,407	{13} 74,109	{14} 95,771	{15} 41,976	{16} 65,667
1	7	AIRE I		0,421111	0,000155	0,000162	0,973651	0,021359	0,000174	0,036305	0,363025	0,015348	0,000151	1,000000	0,999939	0,018119	0,000151	0,323655
2	7	AGUA I	0,421111		0,000151	0,000151	0,998612	0,982024	0,000151	0,000170	0,000790	0,962643	0,000151	0,161647	0,086328	0,973651	0,000151	0,000669
3	7	AIRE IV	0,000155	0,000151		1,000000	0,000151	0,000151	1,000000	0,200916	0,015517	0,000151	0,997925	0,000178	0,000222	0,000151	0,991465	0,018629
4	7	AGUA IV	0,000162	0,000151	1,000000		0,000151	0,000151	1,000000	0,333694	0,031904	0,000151	0,981689	0,000220	0,000334	0,000151	0,953295	0,037995
5	14	AIRE I	0,973651	0,998612	0,000151	0,000151		0,461598	0,000151	0,000767	0,014085	0,382276	0,000151	0,776264	0,589283	0,421111	0,000151	0,011687
6	14	AGUA I	0,021359	0,982024	0,000151	0,000151	0,461598		0,000151	0,000151	0,000157	1,000000	0,000151	0,005116	0,002327	1,000000	0,000151	0,000156
7	14	AIRE IV	0,000174	0,000151	1,000000	1,000000	0,000151	0,000151		0,460699	0,053485	0,000151	0,942930	0,000287	0,000496	0,000151	0,886229	0,063204
8	14	AGUA IV	0,036305	0,000170	0,200916	0,333694	0,000767	0,000151	0,460699		0,998421	0,000151	0,014417	0,126820	0,227721	0,000151	0,009214	0,999241
9	21	AIRE I	0,363025	0,000790	0,015517	0,031904	0,014085	0,000157	0,053485	0,998421		0,000155	0,000783	0,713084	0,872264	0,000156	0,000532	1,000000
10	21	AGUA I	0,015348	0,962643	0,000151	0,000151	0,382276	1,000000	0,000151	0,000151	0,000155		0,000151	0,003615	0,001657	1,000000	0,000151	0,000154
11	21	AIRE IV	0,000151	0,000151	0,997925	0,981689	0,000151	0,000151	0,942930	0,014417	0,000783	0,000151		0,000151	0,000152	0,000151	1,000000	0,000934
12	21	AGUA IV	1,000000	0,161647	0,000178	0,000220	0,776264	0,005116	0,000287	0,126820	0,713084	0,003615	0,000151		1,000000	0,004305	0,000151	0,667487
13	28	AIRE I	0,999939	0,086328	0,000222	0,000334	0,589283	0,002327	0,000496	0,227721	0,872264	0,001657	0,000152	1,000000		0,001962	0,000152	0,839328
14	28	AGUA I	0,018119	0,973651	0,000151	0,000151	0,421111	1,000000	0,000151	0,000151	0,000156	1,000000	0,000151	0,004305	0,001962		0,000151	0,000155
15	28	AIRE IV	0,000151	0,000151	0,991465	0,953295	0,000151	0,000151	0,886229	0,009214	0,000532	0,000151	1,000000	0,000151	0,000152	0,000151		0,000622
16	28	AGUA IV	0,323655	0,000669	0,018629	0,037995	0,011687	0,000156	0,063204	0,999241	1,000000	0,000154	0,000934	0,667487	0,839328	0,000155	0,000622	

ANEXO H

VALIDACIÓN GRUPAL: DIFERENCIA HONESTAMENTE SIGNIFICATIVA DE TUKEY

Tukey HSD test; variable ESFUERZO ÚLTIMO (MPa) (Sheet1 in DATOS VALIDACIÓN GRUPAL)
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests
Error: Between MS = 15,373, df = 32,000

Cell No.	DÍAS	TIPO DE CURADO	{1} 70,973	{2} 81,234	{3} 41,160	{4} 45,890	{5} 83,515	{6} 102,33	{7} 43,610	{8} 56,241	{9} 88,075	{10} 108,88	{11} 40,531	{12} 62,399	{13} 84,370	{14} 89,785	{15} 42,793	{16} 62,839
1	4	AIRE I		0,150953	0,000151	0,000151	0,030295	0,000151	0,000151	0,005243	0,000779	0,000151	0,000151	0,385463	0,015529	0,000274	0,000151	0,469157
2	4	AGUA I	0,150953		0,000151	0,000151	0,999994	0,000163	0,000151	0,000151	0,730132	0,000151	0,000151	0,000272	0,999670	0,389668	0,000151	0,000343
3	4	AIRE IV	0,000151	0,000151		0,977499	0,000151	0,000151	0,999984	0,003934	0,000151	0,000151	1,000000	0,000161	0,000151	0,000151	1,000000	0,000158
4	4	AGUA IV	0,000151	0,000151	0,977499		0,000151	0,000151	0,999994	0,142640	0,000151	0,000151	0,939138	0,001230	0,000151	0,000151	0,999714	0,000876
5	11	AIRE I	0,030295	0,999994	0,000151	0,000151		0,000274	0,000151	0,000151	0,983671	0,000151	0,000151	0,000163	1,000000	0,829428	0,000151	0,000170
6	11	AGUA I	0,000151	0,000163	0,000151	0,000151	0,000274		0,000151	0,000151	0,007786	0,782186	0,000151	0,000151	0,000438	0,030295	0,000151	0,000151
7	11	AIRE IV	0,000151	0,000151	0,999984	0,999994	0,000151	0,000151		0,028296	0,000151	0,000151	0,999733	0,000277	0,000151	0,000151	1,000000	0,000233
8	11	AGUA IV	0,005243	0,000151	0,003934	0,142640	0,000151	0,000151	0,028296		0,000151	0,000151	0,002340	0,846523	0,000151	0,000151	0,014912	0,774731
9	18	AIRE I	0,000779	0,730132	0,000151	0,000151	0,983671	0,007786	0,000151	0,000151		0,000167	0,000151	0,000151	0,997868	1,000000	0,000151	0,000151
10	18	AGUA I	0,000151	0,000151	0,000151	0,000151	0,000151	0,782186	0,000151	0,000151	0,000167		0,000151	0,000151	0,000151	0,000244	0,000151	0,000151
11	18	AIRE IV	0,000151	0,000151	1,000000	0,939138	0,000151	0,000151	0,999733	0,002340	0,000151	0,000151		0,000156	0,000151	0,000151	0,999994	0,000154
12	18	AGUA IV	0,385463	0,000272	0,000161	0,001230	0,000163	0,000151	0,000277	0,846523	0,000151	0,000151	0,000156		0,000156	0,000151	0,000207	1,000000
13	25	AIRE I	0,015529	0,999670	0,000151	0,000151	1,000000	0,000438	0,000151	0,000151	0,997868	0,000151	0,000151	0,000156		0,934290	0,000151	0,000159
14	25	AGUA I	0,000274	0,389668	0,000151	0,000151	0,829428	0,030295	0,000151	0,000151	1,000000	0,000244	0,000151	0,000151	0,934290		0,000151	0,000151
15	25	AIRE IV	0,000151	0,000151	1,000000	0,999714	0,000151	0,000151	1,000000	0,014912	0,000151	0,000151	0,999994	0,000207	0,000151	0,000151		0,000187
16	25	AGUA IV	0,469157	0,000343	0,000158	0,000876	0,000170	0,000151	0,000233	0,774731	0,000151	0,000151	0,000154	1,000000	0,000159	0,000151	0,000187	

ANEXO I

MODELO: DATOS GRUPALES CEMENTO I - IV

N Datos	DÍAS	CURADO Y CEMENTO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa)
1	7	AIRE I	76,96
2	7	AIRE I	76,96
3	7	AIRE I	79,52
4	7	AGUA I	89,79
5	7	AGUA I	90,64
6	7	AGUA I	87,22
7	14	AIRE I	83,80
8	14	AIRE I	84,65
9	14	AIRE I	84,65
10	14	AGUA I	99,19
11	14	AGUA I	97,48
12	14	AGUA I	89,79
13	21	AIRE I	63,15
14	21	AIRE I	63,15
15	21	AIRE I	71,64
16	21	AGUA I	102,61
17	21	AGUA I	108,60
18	21	AGUA I	76,96
19	28	AIRE I	74,39
20	28	AIRE I	73,54
21	28	AIRE I	74,39
22	28	AGUA I	95,77
23	28	AGUA I	97,48
24	28	AGUA I	94,06
25	7	AIRE IV	49,96
26	7	AIRE IV	45,24
27	7	AIRE IV	48,07
28	7	AGUA IV	47,13
29	7	AGUA IV	48,07
30	7	AGUA IV	51,84
31	14	AIRE IV	50,90
32	14	AIRE IV	49,96
33	14	AIRE IV	49,01
34	14	AGUA IV	65,98
35	14	AGUA IV	58,63
36	14	AGUA IV	58,63

CONTINUACIÓN ANEXO I

N Datos	DÍAS	CURADO Y CEMENTO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa)
37	21	AIRE IV	45,24
38	21	AIRE IV	40,53
39	21	AIRE IV	42,42
40	21	AGUA IV	76,35
41	21	AGUA IV	74,46
42	21	AGUA IV	75,41
43	28	AIRE IV	40,53
44	28	AIRE IV	42,42
45	28	AIRE IV	42,98
46	28	AGUA IV	70,69
47	28	AGUA IV	70,69
48	28	AGUA IV	55,61

ANEXO J

VALIDACIÓN: DATOS GRUPALES CEMENTO I – IV

N DATOS	DÍAS	TIPO DE CURADO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa)
1	4	AIRE I	67,55
2	4	AIRE I	68,41
3	4	AIRE I	76,96
4	4	AGUA I	80,38
5	4	AGUA I	82,94
6	4	AGUA I	80,38
7	11	AIRE I	82,94
8	11	AIRE I	82,94
9	11	AIRE I	84,65
10	11	AGUA I	101,76
11	11	AGUA I	102,61
12	11	AGUA I	102,61
13	18	AIRE I	83,80
14	18	AIRE I	97,48
15	18	AIRE I	82,94
16	18	AGUA I	108,60
17	18	AGUA I	109,45
18	18	AGUA I	108,60

CONTINUACIÓN ANEXO J

N DATOS	DÍAS	TIPO DE CURADO	ESFUERZO ÚLTIMO (MPa)
19	25	AIRE I	88,08
20	25	AIRE I	81,23
21	25	AIRE I	83,80
22	25	AGUA I	90,64
23	25	AGUA I	88,93
24	25	AGUA I	89,79
25	4	AIRE IV	45,24
26	4	AIRE IV	39,59
27	4	AIRE IV	38,65
28	4	AGUA IV	46,18
29	4	AGUA IV	45,32
30	4	AGUA IV	46,18
31	11	AIRE IV	42,42
32	11	AIRE IV	46,19
33	11	AIRE IV	42,23
34	11	AGUA IV	59,38
35	11	AGUA IV	52,78
36	11	AGUA IV	56,56
37	18	AIRE IV	40,53
38	18	AIRE IV	44,30
39	18	AIRE IV	36,76
40	18	AGUA IV	63,15
41	18	AGUA IV	64,10
42	18	AGUA IV	59,95
43	25	AIRE IV	46,75
44	25	AIRE IV	37,33
45	25	AIRE IV	44,30
46	25	AGUA IV	70,69
47	25	AGUA IV	63,15
48	25	AGUA IV	54,67

ANEXO K

DATOS DE EQUIPOS UTILIZADOS

Prensa de Compresión de Cubos Morteros	
Marca	Soiltest
Modelo:	CT - 900
Ingreso:	1970
Observación:	Norma de ensayo ASTM C-39; AASHTO T-22
Prensa de Compresión de Cubos Morteros	
Marca	Soiltest
Modelo:	Versa Tester AP 1020
Balanza Sartorius	
Modelo:	CP 4201
Máxima carga (gr):	4200
d (gr):	0,1
Serie:	16150079
Medidor de T y HR	
Equipo:	Dickson FII - 125
Serie No.:	O6034157
Fecha/Cal.:	21/11/2007
Mezcladora Hobart	
Modelo:	N - 50
Serie No.:	14025428
ML:	16472 - A
Volts:	115
Hz:	60
RPM:	1725
HP:	1/6
AMP:	2,85
PH:	1
Temp. (ºC):	50

BIBLIOGRAFÍA

[1] Neville Adam. *Tecnología del Concreto,* Instituto Mexicano del Cemento y Del Concreto, Tomo 1, paginas 2, 12, México, 1977

[2] William F. Smith. *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*, McGraw – Hill, Concepción Fernández Madrid, Tercera edición, páginas 662, 663, 664, 665, Madrid, España.

[3] Walpole, R. *Probabilidad y Estadística para Ingeniero,* sexta edición. Prentice – Hall Hispanoamérica, S.A, páginas 358, 145, 232, 233, 481, 341, México, 1999]

[4] Notas de la materia Teoría de Inelasticidad. Ph. D. José Andrade. Profesor de la universidad de Northwestern. R.I. Borja

[5] Zelic , J. *Cement and Concrete Research 34 (2004) 2319–2328*. A mathematical model for prediction of compressive strength in cement–silica fume blends, April, 2004

[6] Principallo, A. *Cement and Concrete Research 33 (2003) 1013–1020*. A Early development of properties in a cement paste: A numerical and experimental study, December, 2002

[7] Turanli, L. *Cement and Concrete Research 34 (2004) 2277–2282*. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural, April, 2004

[8] Pekmezci, B. *Cement and Concrete Research 34 (2004) 2175–2179* Optimum usage of a natural pozzolan for the maximun compressive strength of concrete, February, 2004

[9] Nassif, H. *Cement and Concrete Research 27 (2005) 661–670* Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC, December, 2004

[10] Leitea, J. *Cement and Concrete Research 34 (2004) 1025–1033* Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures, November, 2003

[11] Ganneau, F. *Cement and Concrete Research 34 (2007) 254–266* An algorithm for computing the compressive strength of heterogeneous cohesive-frictional materials – Application to cement paste, March, 2007

[12] Norma ASTM C 109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Designation: C 109/C 109M – 02)