

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

**“Determinación de la Variación de la Resistencia a la  
Compresión del Cemento Tipo I con la Adición de 5%  
Limolita y Curado al Aire Mediante Métodos  
Experimentales y Matemáticos”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Edison Fernando Abata Yanchaguano

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, a mi familia, a todas las personas que de una u otra manera colaboraron en la realización del presente trabajo y especialmente a mi Director de Tesis el Ing. Mauricio Cornejo por su invaluable colaboración.

## **DEDICATORIA**

ESTE TRABAJO, ESTÁ  
DEDICADO A MIS  
PADRES, MI ESPOSA,  
MI HIJA, HERMANOS,  
FAMILIARES Y  
AMIGOS.

## **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

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

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Rodrigo Perugachi B.  
VOCAL

## **DECLARACION EXPRESA**

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

---

Edison Fernando Abata  
Yanchaguano

## RESUMEN

En el presente trabajo se identificó la aportación que realizó la adición de una puzolana natural (5% limolita) al cemento portland tipo I, en cuanto a la resistencia a la compresión uniaxial.

Se realizó un diseño de experimento, teniendo en consideración las normas ASTM C 595 y la norma ASTM C 109/C 109M. Tanto para la experimentación como la validación se mantuvo constante la relación agua/mezcla y la granulometría del material. El curado se lo realizó al aire.

Los ensayos respectivos se realizaron en el laboratorio a los 7, 14, 21 y 28 días de curado, para la validación de este modelo se lo hizo cambiando las variables independientes que son: tiempo de ensayo y proporción (7.5% de limolita) para lo cual se comenzará al cuarto día y de ahí en adelante cada siete días. Los resultados que obtuvimos fueron analizados estadísticamente para determinar su confiabilidad. Estos datos también fueron utilizados para ser codificados en un lenguaje de programación, con lo cual se logró realizar el modelo matemático que describe la resistencia a la compresión del cemento, mediante un análisis inelástico en el campo plástico de la curva esfuerzo-deformación.

Con los datos obtenidos, tanto para la experimentación como la validación se procedió a analizarlos estadísticamente mediante el uso del programa STATISTICA, para lo cual se usó el método de ANOVA, dando los siguientes resultados:

Con los datos obtenidos en la experimentación se tiene que estos no están normalizados para lo cual se procedió a normalizarlos, una vez normalizado los datos se realizó el análisis estadístico mediante ANOVA con lo que se tiene un  $P=0,00080392$  lo que este es menor a  $P=0.05$ , entonces se dice que mi hipótesis  $H_0$  es rechazada, es decir que al menos una de las medias no son iguales, por tanto se dice que entre las mezclas no existe una misma resistencia media a la compresión, es decir que conforme pasa los días por lo menos una varía su resistencia a la compresión.

Para la validación se obtuvo un  $P=0,04080724$  el análisis estadístico es similar al experimental ya que este es menor a  $P=0.05$ .

Una vez que se hizo el análisis individual se procedió a realizar el análisis grupal con el 5%, 10%, 15%, 20% y 25% y su correspondiente validación al 7.5%, 12.5%, 17.5%, 22.5% y 27.5%, para lo cual también nos valimos del

método de ANOVA, tanto para la experimentación como la validación los datos si estuvieron normalizados.

Para la experimentación obtuvimos un  $P < 0.05$ , por lo que concluimos que si existe diferencia significativa entre los porcentajes/días de limolita. Para saber qué diferencias significativas hay entre los diferentes porcentajes en relación con la resistencia mecánica a la compresión procedimos a analizarlo mediante el método de TUKEY, con el que se obtuvo que la mejor mezcla de es la del 10% a los 21 días.

Para la validación se procedió de manera similar a la experimentación. Aquí se obtuvo que la mejor mezcla es la del 12.5% a los 18 días.

Al comparar nuestra mejor mezcla con la del cemento portland tipo I y tipo IV se obtuvo que: el cemento tipo I es mejor que nuestra mezcla al 10 y 12.5%, pero nuestra mezcla es mejor al tipo IV. Estos análisis solo son para un rango de hasta los 28 días.

# INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
INDICE DE PLANOS.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.1.1 Justificación.....	5
1.2. Objetivos. ....	6
1.2.1 Objetivos Generales.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	7
1.3. Metodología.....	7
1.4. Estructura de Tesis .....	10

## CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. Generalidades del cemento.....	12
2.2. Tipos de cemento.....	13
2.3. Procesos de fabricación del cemento Portland tipo I.....	24
2.4. Puzolanas.....	27
2.4.1 Principales tipos de Puzolanas.....	28
2.5. Propiedades de la limolita.....	30
2.6. Curado del cemento en aire.....	31
2.7. Resistencia del concreto.....	32
2.7.1. Endurecimiento del Cemento Portland.....	32
2.7.2 Resistencia del hormigón a la compresión.....	35
2.8. Otras investigaciones relacionadas.....	40

## CAPITULO 3

3. ANALISIS METODOLÓGICO.....	45.
3.1 Equipos y materiales experimentales.....	45
3.1.1 Equipos.....	46
3.1.2 Materiales.....	49
3.2. Protocolo de ensayos .....	50

3.3. Temperatura y humedad .....	52
3.4. Diseño experimental.....	52

## CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS.....	90
4.1. Tabulación de datos y resultados .....	90
4.2. Análisis estadístico.....	113
4.3. Ajuste y verificación del modelo.....	144

## CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	158
5.1. Conclusiones.....	158
5.2. Recomendaciones.....	163

## APENDICE

## BIBLIGRAFÍA

## ABREVIATURAS

$\text{CaO}$	Caliza
$\text{SiO}_2$	Sílice
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alúmina
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de hierro
ASTM	American society for Testing and Materials
Lbf.	Unidad de fuerza (unidades americanas)
Kgf:	Unidad de fuerza (Unidad internacional)
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso
$\text{C}_3\text{S}$	Silicato tricálcico
Gr	Gramo
$\text{C}_2\text{S}$	Silicato dicálcico
$\text{H}_2\text{O}$	Agua

## SIMBOLOGIA

$^{\circ}\text{C}$	Grados centígrados
$^{\circ}\text{F}$	Grados Fahrenheit
F	Fuerza
A	Área
$\sigma$	Esfuerzo
HR	Humedad relativa
$\varepsilon$	Deformación

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1: METODOLOGÍA DE LA TESIS	8
FIGURA 2.1: DESARROLLO DE RESISTENCIA DE CONCRETOS CON 335 KG/M3 ELABORADOS CON CEMENTOS DE DISTINTOS TIPOS.	17
FIGURA 2.2: PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO	24
FIGURA 2.3: LIMOLITA	30
FIGURA 2.4: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE COMPONENTES DE CEMENTO PURO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CURADO	34
FIGURA 2.5: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGONES FABRICADOS CON DIFERENTES TIPOS DE ASTM DE CEMENTOS, EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CURADO.	36
FIGURA 2.6: CORRESPONDENCIA ENTRE LA RESISTENCIA Y LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO DEL CONCRETO.	37
FIGURA 2.7: EFECTO DE LA PROPORCIÓN EN PESO AGUA/CEMENTO SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN NORMAL	

Y HORMIGÓN CON AIRE OCLUIDO.	38
Figura 3.1: EJEMPLO DE UN EXPERIMENTO CON 2 RESULTADOS.	7
Figura 3.2: EJEMPLO DE UN EXPERIMENTO CON 3 RESULTADOS	8
Figura 3.3: INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS DE REGRESIÓN	62
Figura 3.4: INTERPRETACIÓN DE PARÁMETROS DE REGRESIÓN CUADRÁTICA SIMPLE	66
FIGURA 3.5: ILUSTRACIÓN DE UNA ITERACIÓN DEL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON.	69
FIGURA 3.6: BALANZA DE PRESICIÓN.	76
FIGURA 3.7: TRITURADORA DE MANDÍBULAS.	76
FIGURA 3.8: PRIMERA GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL.	77
FIGURA 3.9: TRITURADORA DE RODILLOS.	78
FIGURA 3.10: CUARTEADOR DE MATERIAL.	78
FIGURA 3.11: TAMICES	79
FIGURA 3.12: TAMIZADOR ELÉCTRICO.	80
FIGURA 3.13: TRITURADORA DE DISCOS.	81
FIGURA 3.14: MOLINO DE BOLAS.	81
FIGURA 3.15: PROCESO DE MEZCLADO.	85
FIGURA 3.16: MOLDEO DE MUESTRAS.	86
FIGURA 3.17: MUESTRAS PARA PRUEBAS	89
FIGURA 4.1: MÁQUINA DE ENSAYOS (Kgf).	93
FIGURA 4.2: MÁQUINA DE ENSAYOS (Lbf).	94
FIGURA 4.3: RESULTADOS CON EL 5% DE LIMOLITA.	111
FIGURA 4.4: RESULTADOS CON EL 7.5% DE LIMOLITA.	112
FIGURA 4.5: NO NORMALIZADO EXPERIMENTO	114
FIGURA 4.6: NORMALIZADO EXPERIMENTO	115
FIGURA 4.7: DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS EXPERIMENTALES	118
FIGURA 4.8: NORMALIZADO VALIDACIÓN.	119

FIGURA 4.9:	DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS (VALIDACIÓN)	121
FIGURA 4.10:	GRÁFICO NORMALIZADO (GRUPAL)	124
FIGURA 4.11:	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ANOVA	125
FIGURA 4.12:	DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS DEL EXPERIMENTO GRUPAL	126
FIGURA 4.13:	PRUEBA DE TUKEY	127
FIGURA 4.14:	PRUEBA DE TUKEY	128
FIGURA 4.15:	NORMALIZACIÓN DE LA VALIDACIÓN (GRUPAL)	130
FIGURA 4.16:	PRUEBA ANOVA VALIDACIÓN (GRUPAL)	130
FIGURA 4.17:	DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS VALIDACIÓN	131
FIGURA 4.18:	PRUEBA DE TUKEY	132
FIGURA 4.19:	PRUEBA DE TUKEY	132
FIGURA 4.20:	ANÁLISIS EN TERCERA DIMENCION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA	133
FIGURA 4.21:	ANÁLISIS EN TERCERA DIMENCION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA	134
FIGURA 4.22:	COMPARACIÓN NORMALIZADA	136
FIGURA 4.23:	ANÁLISIS MEDIANTE ANOVA (DUNNETT)	137
FIGURA 4.24:	ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO (TUKEY)	137
FIGURA 4.25:	DATOS NORMALIZADOS (VALIDACIÓN)	138
FIGURA 4.26:	ANÁLISIS VALIDACIÓN (DUNNETT)	139
FIGURA 4.27:	ANÁLISIS VALIDACIÓN (TUKEY)	140
FIGURA 4.28:	ANÁLISIS VALIDACIÓN tipo IV (TUKEY)	141
FIGURA 4.29:	ANÁLISIS VALIDACIÓN TIPO IV (DUNNETT)	141
FIGURA 4.30:	ANÁLISIS VALIDACIÓN TIPO IV (TUKEY)	142
FIGURA 4.31:	ANÁLISIS VALIDACIÓN TIPO (DUNNETT)	144
FIGURA 4.32:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 7 DÍAS	145
FIGURA 4.33:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 14 DÍAS	146
FIGURA 4.34:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 21 DÍAS	148

FIGURA 4.35:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 28 DÍAS	149
FIGURA 4.36:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 4 DÍAS	151
FIGURA 4.37:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 11 DÍAS	152
FIGURA 4.38:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 18 DÍAS	154
FIGURA 4.39:	MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 25 DÍAS	155
FIGURA 5.1:	RESULTADOS CON EL 5% DE LIMOLITA	159
FIGURA 5.2:	ANÁLISIS EN TERCERA DIMENCION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA	161
FIGURA 5.3:	ANÁLISIS EN TERCERA DIMENCION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA	161

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1: VALORES TÍPICOS DE COMPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DE CEMENTOS PORTLAND DE DIFERENTES TIPOS	14
TABLA 2: PRINCIPALES COPONENTES DEL CEMENTO PORTLAND	15
TABLA 3: PRINCIPALES TIPOS DE CEMENTO PORTLAND	15
TABLA 4: COMPOSICIONES DE COMPEUSTOS TÍPICOS DEL CEMENTO PORTLAND	16
TABLA 5: TOLERANCIAS PERMITIDAS EN LOS MOLDES DE LAS MUESTRAS.	47
TABLA 6: MODELO DE TOMA DE DATOS DE EXPERIMENTO	50
TABLA 7: MODELO DE TOMA DE DATOS VALIDACIÓN	51
TABLA 8: CANTIDAD DE MATERIAL EXPERIMENTO	83
TABLA 9: CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL MEZCLADO DEL EXPERIMENTO	84
TABLA 10: CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DESMOLDE	86

TABLA 11: DISTRIBUCIÓN DEL MATERIAL PARA LA VALIDACIÓN	87
TABLA 12: CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL MEZCLADO VALIDACIÓN	88
TABLA 13: CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DESMOLDE DE LA VALIDACIÓN	89
TABLA 14: CONDICIONES AMBIENTALES (EXPERIMENTO)	91
TABLA 15: CONDICIONES AMBIENTALES (VALIDACIÓN)	92
TABLA 16: DATOS DE PROBETA G3/5/7	93
TABLA 17: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/7)	94
TABLA 18: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/7)	95
TABLA 19: DATOS DE PROBETA G3/5/14	96
TABLA 20: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/14)	97
TABLA 21: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/14)	98
TABLA 22: DATOS DE PROBETA G3/5/21	98
TABLA 23: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/21)	99
TABLA 24: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/21)	99
TABLA 25: DATOS DE PROBETA G3/5/28	100
TABLA 26: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/28)	100
TABLA 27: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/28)	101

TABLA 28: ESFUERZOS ÚLTIMOS EXPERIMENTALES DE CADA DÍA CON EL 5% DE LIMOLITA	101
TABLA 29: DATOS DE PROBETA G3/7.5/4	102
TABLA 30: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/4)	103
TABLA 31: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/4)	104
TABLA 32: DATOS DE PROBETA G3/7.5/11	105
TABLA 33: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/11)	106
TABLA 34: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/11)	107
TABLA 35: DATOS DE PROBETA G3/7.5/18	108
TABLA 36: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/18)	108
TABLA 37: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/18)	109
TABLA 38: DATOS DE PROBETA G3/7.5/25	109
TABLA 39: CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/25)	110
TABLA 40: ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/25)	110
TABLA 41: ESFUERZOS ÚLTIMOS DE VALIDACIÓN DE CADA DÍA CON EL 7.5% DE LIMOLITA	111
TABLA 42: DATOS EXPERIMENTALES (NORMALIZADOS)	115

TABLA 43: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS	116
TABLA 44: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS	117
TABLA 45: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS	117
TABLA 46: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS (VALIDACIÓN)	120
TABLA 47: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS (VALIDACIÓN)	120
TABLA 48: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS (VALIDACIÓN)	120
TABLA 49: DATOS EXPERIMENTALES A DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMOLITA	122
TABLA 50: DATOS DE VALIDACIÓN A DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMOLITA	129
TABLA 51: DATOS EXPERIMENTALES DEL CEMENTO I, IV Y DE LA MEZCLA	135
TABLA 52: DATOS DE VALIDACIÓN DEL CEMENTO TIPO I, TIPO IV Y MEZCLA	136
TABLA 53: CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO A LOS 7DÍAS	144
TABLA 54: CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO A LOS 14DÍAS	146
TABLA 55: CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO A LOS 21DÍAS	147
TABLA 56: CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO	

A LOS 28DÍAS	149
TABLA 57: CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS 4DÍAS	150
TABLA 58: CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS 11DÍAS	152
TABLA 59: CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS 18DÍAS	153
TABLA 60: CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS 25DÍAS	155
TABLA 61: RESUMEN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES Y LOS ENCONTRADOS MEDIANTE ITERACIONES	156
TABLA 62: RESUMEN DE LOS VALORES DE VALIDACIÓN Y LOS ENCONTRADOS MEDIANTE ITERACIONES	157

## ÍNDICE DE PLANOS

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo trata de la “Determinación De La Variación De La Resistencia a La Compresión Del Cemento Tipo I Con La Adición De 5% Limolita y Curado Al Aire Mediante Métodos Experimentales y Matemáticos.”, este trabajo trata de determinar la variación de la resistencia uniaxial a la compresión mediante la adición del 5% de limolita al cemento tipo I, con un curado al aire, el cual tratará de determinar si este porcentaje supera o iguala a la propiedad mecánica de resistencia a la compresión del cemento tipo I.

Para la realización de este experimento trabajaremos siguiendo las normas ASTM C 595 - ASTM C 109/C 109M para lo cual se usará dos maquinas de ensayo la primera nos dará datos de prueba expresados en Kgf. Mientras que la segunda los datos serán dados en Lbf.

Una vez obtenido los datos se procederá a realizar el correspondiente análisis estadístico de forma individual y de forma grupal.

Posteriormente se procede a realizar la simulación mediante un modelo matemático.

Si se llega a determinar que nuestra mezcla superó o igualó la resistencia a la compresión del cemento tipo I, esto implicará que obtendremos un tipo de cemento más económico con la misma propiedad de resistencia a la compresión o mejor, que la del cemento tipo I. ya que se usó una puzolana natural extraídas de las cercanías de la ciudad de Guayaquil.

# CAPITULO 1

## 1. GENERALIDADES

### **1.1 Planteamiento del problema.**

Actualmente en la industria de la construcción el cemento Pórtland Tipo I (Pórtland ordinario) es el material más utilizado en la mayor parte del mundo, siendo este el principal elemento del hormigón, la cual es utilizado en la construcción de edificios e importantes infraestructuras a nivel mundial, por tal motivo día a día se vienen implementando mejoras importantes en el proceso de obtención y desarrollo de este tipo de cemento.

Gracias a innumerables investigaciones y con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas del cemento, hoy en día encontramos diferentes tipos de cementos Pórtland usados alrededor del mundo.

El cemento Portland usado en la actualidad debe soportar grandes fuerzas de compresión uniaxial, es por tal motivo que para su elaboración se ha usado materiales que tengan muy buenas propiedades mecánicas.

Los aditivos usados en la elaboración de este tipo de cemento mejoran las propiedades mecánicas del mismo, mientras que los materiales puzolánicos tienen la finalidad de alterar la dureza de este cemento.

Para tener una base de comparación nos valdremos de los datos obtenidos del cemento Portland tipo I sin aditivos y los compararemos con los datos que obtengamos al agregarle a esta mezcla Clinker – agua una cierta cantidad de material puzolánico que para este estudio corresponde al 5% de limolita y con un curado al aire.

Esta investigación estará enfocada en el uso de un solo tipo de material puzolánico que es la limolita, que debido a su estructura molecular y las propiedades químicas que este presenta, influye directamente en la dureza del cemento.

El análisis a realizarse dará evidencia real y confiable en el cambio de las propiedades mecánicas del cemento y se demostrara como con el uso de la limolita afecta la resistencia a la compresión uniaxial en la estructura del cemento a lo largo del periodo de investigación.

Para reducir en lo mas mínimo las variaciones en los resultados habrán variables que se mantendrán constantes a lo largo del experimento como son la relación agua –cemento y la granulometría del material usado

Si llegáramos a demostrar que con el uso de esta puzolana mejoraríamos las propiedades mecánicas del cemento Pórtland tipo I lograríamos tener un cemento de mejor calidad a un bajo costo de producción.

### **1.1.1 JUSTIFICACIÓN**

El estudio de los materiales de construcción y en particular la del cemento es de gran importancia debido a su influencia

en los ámbitos del progreso urbanísticos y el bienestar común es por eso que en cada momento se hacen estudios para mejorar la calidad de este producto.

Esta investigación se justificará si se verifica que los resultados obtenidos a lo largo del experimento aumentan la resistencia a la compresión uniaxial del cemento lo que hace que tengamos una clase de cemento tipo I con un 5% de limolita a un bajo costo de producción.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos Generales**

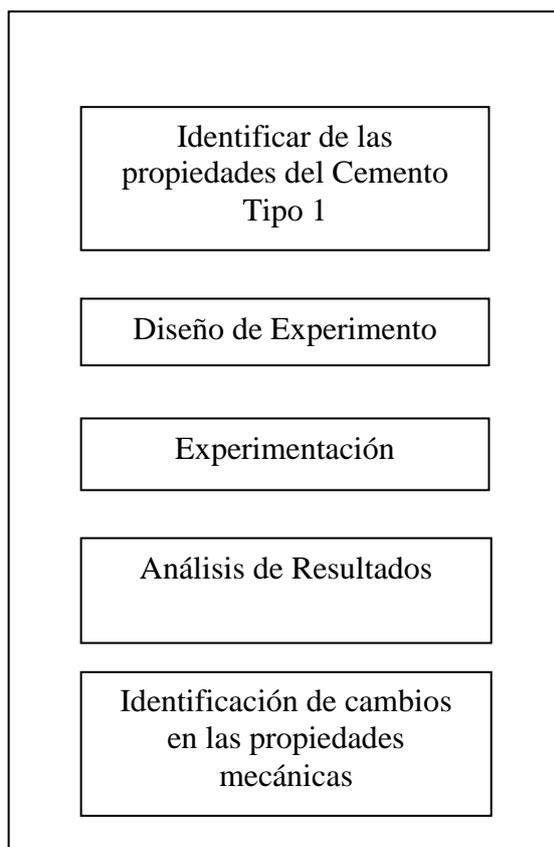
Identificar el efecto que tiene la introducción de un material puzolánico (5% de limolita) con un tiempo de curado (7, 14, 21, 28), al aire, en la propiedad mecánica de la resistencia a la compresión uniaxial del cemento, para lo cual nos valdremos de un modelo teórico mediante un análisis estadístico.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Diseñar un modelo de experimento teniendo como base otros estudios realizados.
- Realizar los ensayos de una forma metodológica adecuada de tal manera que estas cumplan con las normas internacionales vigentes.
- Analizar los resultados obtenidos del experimento mediante el uso de herramientas adecuadas como lo es el uso del software Matlab y Statistica.
- Establecer la respectiva comparación entre el cemento Pórtland tipo I (sin aditivo) y nuestra mezcla con un 5% de limonita.

### **1.3 Metodología**

La metodología planteada en el presente trabajo se detalla mediante el gráfico indicado en la figura 1.1. Siguiendo un esquema que detalla cada uno de los puntos a tratar en la elaboración de esta tesis.



**Figura 1.1 METODOLOGÍA DE LA TESIS**

Con la identificación de las propiedades mecánicas del cemento tipo I y en forma especial el de la capacidad de soportar grandes fuerzas de compresión uniaxial nos darán valores que nos permita al final de la investigación cuantificar como afecta en dichas propiedades la inclusión del 5% de limolita con un curado al aire en la dureza des cemento.

El diseño de experimento se realizará de la siguiente manera: manteniendo constante la granulometría del material así como también la relación agua-mezcla a lo largo de la investigación. El aditivo ocupara el 5% de la mezcla en el cual se efectuará un curado al aire.

La experimentación se desarrollara de la siguiente forma: se utilizará 3 probetas de 50 mm<sup>3</sup> a los cual se realizara un curado al aire, realizado esto, se efectuará un ensayo de dureza a las probetas a los 7, 14,21 y 28 días de la investigación, aquí también se procederá hacer la respectiva validación del experimento a los 4, 11, 18, 25 (se tendrá tres probetas más por cada día de la validación), días de la experimentación, por lo que por cada ensayo realizado obtendremos 3 resultados para analizar.

Para analizar los datos obtenidos haremos uso del Software STATISTICA el cual nos permitirá establecer si los resultados encontrados guardan o no una relación confiable entre ellos.

Para la identificación de los cambios en las propiedades del cemento, se tomara como referencia los datos obtenidos del cemento Portland tipo I sin aditivos y lo compararemos con los resultados que obtengamos de

nuestra investigación, de esta forma se podrá establecer como nuestro aditivo afecta la dureza del material.

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

El primer capítulo se llama Generalidades, en esta parte expondremos la información preliminar para sustentar el desarrollo de esta tesis. Aquí se hace referencia al planteamiento del problema y a la justificación que son los puntos principales para explicar la importancia de esta investigación para la conveniencia de la sociedad.

Los objetivos tanto específicos como generales también se incluyen en el capítulo 1 así como también su metodología que es la forma como se llevara a cabo esta investigación. Finalmente se menciona la estructura la cual describe las diferentes partes en la cual esta dividida esta tesis.

El capítulo 2 se llama Marco Teórico, aquí se describen los diferentes temas concernientes a esta investigación. Cada sección de este capítulo nos ayudara a interpretar de mejor manera los resultados de esta investigación para que de esta forma poder tener un buen criterio al momento de analizarlos e interpretarlos.

El capítulo tres se llama Análisis Metodológico, aquí se detallan los materiales, equipos y herramientas utilizados en nuestro experimento así como también se explica el diseño de experimento. En este capítulo se hace referencia al protocolo de ensayos y los modelos matemáticos y simulación.

El capítulo cuatro se llama Resultados, en este capítulo se realizará la respectiva tabulación de los datos y resultados obtenidos en nuestro experimento para que de esta forma se pueda analizar estadísticamente con los datos de nuestra referencia que es el cemento tipo I sin aditivos, en este capítulo también se procede a realizar el respectivo ajuste y verificación del modelo.

El capítulo 5 se llama Conclusiones y recomendaciones, Aquí se exponen las respectivas conclusiones a la que hemos llegado después de hacer el respectivo análisis, también se exponen las recomendaciones para futuras investigaciones.

# **CAPITULO 2**

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 Generalidades del cemento.**

En sentido general el cemento se puede describir como un material tanto adhesivas como cohesivo, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. [1].

Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cemento son de compuestos de cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos.

Los cementos que se utilizan en la fabricación de concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua en virtud de que experimentan una reacción química con ella y por lo tanto se denominan cementos hidráulicos.

Los cementos hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de cal y pueden clasificarse, en general, como cementos naturales, cementos Pórtland, y cementos Aluminosos.

En este trabajo trataremos solo con el cemento Pórtland tipo 1, su estructura y el análisis de sus propiedades mecánicas en especial la capacidad que tiene este tipo de cemento en soportar grandes fuerzas de compresión uniaxial.

## **2.2 Tipo de Cementos**

Comercialmente se ofrecen varios tipos de cementos Pórtland, en las cuales se describirán en este capítulo.

Según la norma ASTM se han citado los límites en la composición química para algunos de estos cementos cuyos valores se dan en la siguiente tabla. [1].

**TABLA 1**

**VALORES TÍPICOS DE COMPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DE CEMENTOS PORTLAND DE DIFERENTES TIPOS**

Composición de compuestos, en porciento										
Cemento	Valor	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>	CaO libre	MgO	Pérdida por ignición	Núm. de muestras
Tipo I	Max.	67	31	14	12	3.4	1.5	3.8	2.3	21
	Min.	42	8	5	6	2.6	0.0	0.7	0.6	
	Medio	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4	1.2	
Tipo II	Max.	55	39	8	16	3.4	1.8	4.4	2.0	28
	Min.	37	19	4	6	2.1	0.1	1.5	0.5	
	Medio	46	29	6	12	2.8	0.6	3.0	1.0	
Tipo III	Max.	70	38	17	10	4.6	4.2	4.8	2.7	5
	Min.	34	0	7	6	2.2	0.1	1.0	1.1	
	Medio	56	15	12	8	3.9	1.3	2.6	1.9	
Tipo IV	Max.	44	57	7	18	3.5	0.9	4.1	1.9	16
	Min.	21	34	3	6	2.6	0.0	1.0	0.6	
	Medio	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7	1.0	
Tipo V	Max.	54	49	5	15	3.9	0.6	2.3	1.2	22
	Min.	35	24	1	6	2.4	0.1	0.7	0.8	
	Medio	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6	1.0	

(A.M. Neville, *Tecnología del concreto*, Instituto Mexicano del cemento y del concreto, Tomo I, pag. 70).

Desde un punto de vista práctico se puede considerar que el cemento Portland consta de cuatro principales componentes que son:

**TABLA 2**  
**PRINCIPALES COPONENTES DEL CEMENTO PORTLAND**

Componente	Fórmula química	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

(William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Mc Graw Hill, Tercera Edición Pag.662)

Con la variación en las cantidades de estos componentes se pueden enumerar los diferentes tipos de cementos Portland, junto con su equivalencia o nombre según normas americanas. [1].

**TABLA 3**  
**PRINCIPALES TIPOS DE CEMENTO PORTLAND**

Descripción inglesa	Descripción ASTM
Portland ordinario	tipo I
Portland de endurecimiento rápido	tipo III
Portland de endurecimiento extra-rápido	
Portland de ultra-alta resistencia rápida	
Portland de bajo calor	tipo IV
Cemento modificado	tipo II
Portland resistente a los sulfatos	tipo V
Portland de escoria de alto horno	tipo IS
Portland blanco	
Portland puzolana	tipo IP - P
Cemento con escoria	tipo S

Entre los más principales y comúnmente utilizados encontramos cinco tipos de cemento Portland que se describen en la siguiente tabla. [2].

**TABLA 4**  
**COMPOSICIONES DE COMPEUSTOS TÍPICOS DEL CEMENTO**  
**PORTLAND**

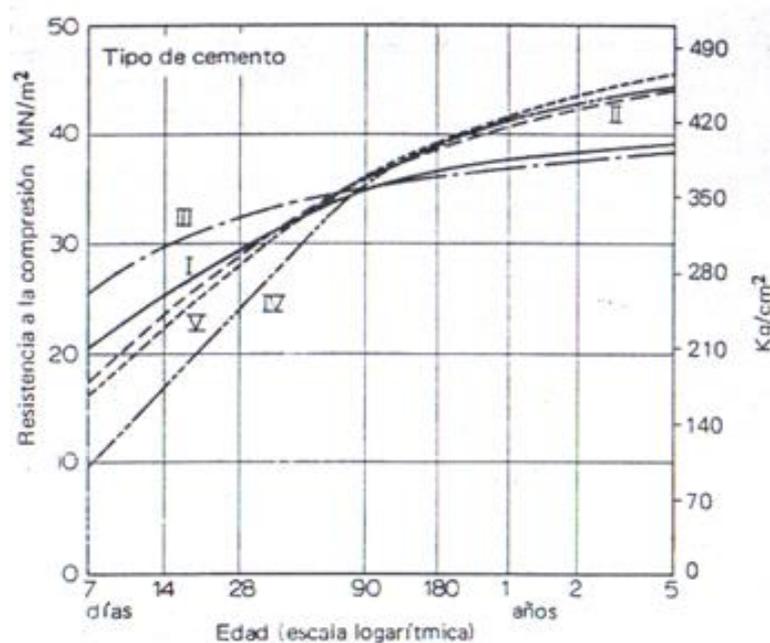
Tipo de cemento	Designación ASTM C150	Composiciones, % peso*			
		C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Ordinario	I†	55	20	12	9
Moderado calor de hidratación y moderada resistencia al sulfato	II	45	30	7	12
Endurecimiento rápido	III	65	10	12	8
Bajo calor de hidratación	IV	25	50	5	13
Resistente a sulfato	V	40	35	3	14

(William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Mc Graw Hill, Tercera Edición Pag.663).

Muchos de los cementos se han desarrollado para asegurar una buena duración del concreto sometido a una variedad de condiciones severas. Sin embargo, no ha sido posible encontrar en la constitución del cemento una respuesta completa al problema de durabilidad del concreto: Las principales mecánicas del concreto endurecido, como resistencia, contracción, permeabilidad, resistencia al intemperie y fluencia se ven afectados también por factores distintos de la

constitución del cemento, aunque este último determina en gran parte la rapidez del aumento en la resistencia. [1].

En la siguiente figura se puede observar como se va desarrollando la resistencia de concretos elaborados con cementos de diferentes tipos, mientras que las tasas de crecimiento de resistencia varían considerablemente, a los 90 días la resistencia es muy similar.



**FIGURA 2.1 DESARROLLO DE RESISTENCIA DE CONCRETOS CON 335 KG/M<sup>3</sup> ELABORADOS CON CEMENTOS DE DISTINTOS TIPOS.**

La tendencia general es que los cementos con baja rapidez del endurecimiento tengan una resistencia final un poco mayor. Por ejemplo, en la figura se muestra que el cemento tipo IV tiene la menor resistencia a los 28 días, pero se coloca como el segundo en resistencia a la edad de 5 años.

La pauta que liga la resistencia baja a temprana edad con la alta edad avanzada va de acuerdo con la influencia de la masa inicial del cemento endurecido con el desarrollo de la resistencia final.

A medida que la estructura se establece con mayor lentitud el gel es más denso y la resistencia última más elevada. Sin embargo las diferencias significativas en las propiedades importantes físicas de elementos de diferentes tipos, se encuentran solo en la primera etapa de hidratación, en una pasta bien hidratada las diferencias son menores.

**Cemento Portland Ordinario:** también llamado cemento tipo I, es el cemento que más comúnmente es utilizado para construcciones de concreto en general, no expuestas al sulfato del suelo o del agua o

cuando no va a producirse un incremento importante de temperatura por el calor generado en el proceso de hidratación del cemento.[1].

La especificación para este cemento esta dada en la norma B.S.12:1958.

Con el paso de los años, a habido algunos cambios en las características del cemento Portland ordinario. En particular los cementos modernos tienen un contenido mas alto de  $C_3S$  y mas finura que hace 40 años; sin embargo, no ha habido ningún cambio notable en la calidad del cemento durante varios años. En consecuencia, los cementos actuales tienen una resistencia mayor a los 28 días, pero el aumento en resistencia entre 28 días y 10 años es el mismo aproximadamente  $20 \text{ MN/m}^2$  para concreto con curado continuo en agua, con una relación agua/cemento de aproximadamente 0.53

Las aplicaciones características de este tipo de hormigón son:

- En aceras.
- En edificios.
- Puentes.
- Tanques.

- Embalses. [2].

**Cemento Portland De Endurecimiento Rápido:** también llamado cemento tipo 3, este cemento se asemeja al cemento portland ordinario y se incluye también en la norma B.S. 12:1958. [1].

El cemento Portland de endurecimiento rápido desarrollo resistencia mas rápidamente; por lo tanto, debería describirse como un cemento de alta resistencia a temprana edad.

La rapidez de endurecimiento no debe confundirse con la rapidez de fraguado: de hecho, los dos tipos de cemento tienen tiempo de fraguado parecido.

La resistencia desarrollada a la edad de 3 días es el mismo orden que a la resistencia a los 7 días del cemento portland ordinario, con la misma relación agua/cemento. Esta mayor rapidez de adquisición de resistencia del cemento de endurecimiento rápido se debe a un contenido más alto de  $C_3S$  y a un molido mas fino de clinker del cemento.

Este tipo de cemento es empleado cuando las piezas de hormigón se deban retirar rápidamente de una estructura que pronto tengan que ponerse en uso.

**Cemento portland de bajo calor:** Este cemento con bajo desarrollo de calor fue producido por primera vez para grandes presas en los Estados Unidos, donde el calor generado por el endurecimiento del cemento es un factor crítico. A este cemento se lo conoce como cemento portland de bajo calor (tipo IV).

Este tipo de cemento portland es de baja hidratación que es utilizado cuando la cantidad de calor es mínima.

La norma BS 1370:1958 limita el calor de hidratación de este cemento a 251J/g a la edad de 7 Días, y 293J/g a la edad de 28 días.

Existe cemento Portland de bajo calor hecho con escoria de alto horno el cual está incluido en la norma B.S. 4246:1968.

**Cemento modificado:** Este tipo de cemento También llamado cemento portland tipo II es utilizado en lugares en que las concentraciones de sulfato son elevadas como en las estructuras de desagüe o donde la concentración de sulfato en las aguas residuales son mayores de lo normal.

Este cemento modificado combina adecuadamente una proporción mayor de desarrollo de calor que aquella de cemento de bajo calor con un aumento de resistencia similar a la del cemento portland ordinario.

El cemento modificado se recomienda para estructuras donde se desea un calor de hidratación moderadamente bajo, o cuando se temen ataques moderados de sulfatos. Este cemento se usa mucho en Estado Unidos.

El cemento modificado, con el nombre de cemento tipo II, y el cemento de bajo calor (tipo IV), se incluyen en las normas ASTM C 150-72.

**Cemento resistente a sulfato.** A este cemento también se lo conoce con el nombre de cemento tipo V. Al referirse a la hidratación del

cemento, y en particular del proceso de fraguado, se hizo mención de la reacción entre  $C_3A$  y el yeso ( $CaSO_4 \cdot H_2O$ ), y de la consecuente formación de sulfoaluminato de calcio. En el cemento endurecido, el aluminato de calcio hidratado puede reaccionar de manera parecida con alguna sal de sulfato que venga de fuera del concreto; el producto de la adición es un sulfoaluminato de calcio, Ya se forma dentro de la masa de la pasta del cemento hidratado. Ya que el incremento del volumen de la fase sólida es de 227%, sobre viene una gradual desintegración del concreto. Un segundo tipo de reacción se produce al intercambiar bases entre el hidróxido de calcio y los sulfatos, que resulta en la formación del yeso con un incremento de volumen en la fase sólida del 124%.

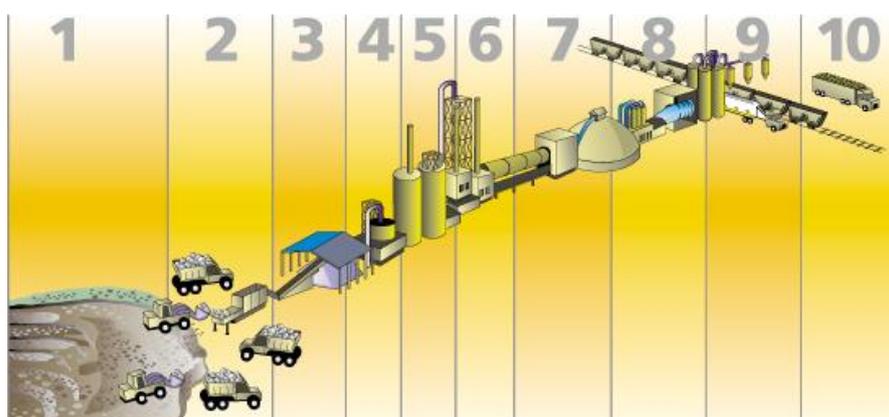
Estas reacciones son conocidas como ataque de sulfatos. Las sales particularmente activas con el sulfato de sodio y de magnesio. El ataque de los sulfatos se acelera si va acompañado por una sucesión de estados recíprocos mojados y secos, como es el caso de una estructura marina situada es en la zona de mareas. El remedio consiste en usar cemento con bajo contenido de  $C_3A$ .

Este tipo de cemento portland es muy resistente a los sulfatos que se utiliza cuando el hormigón va a estar expuestos a severos ataques de sulfatos de suelos o de aguas residuales de alto contenido en sulfatos.

### 2.3 Proceso de Fabricación del cemento portland tipo I

Las materias primas básicas para la elaboración del cemento Pórtland son: Caliza ( $\text{CaO}$ ), Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Estos componentes se combinan apropiadamente para producir los diversos tipos de cemento Portland. [2].

Para la elaboración del cemento se siguen varios pasos en la cual se detalla a continuación. [3].



**FIGURA 2.2 PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO**

**CANTERA**

Extracción de materias primas.

**TRITURACION**

Reducción de caliza y arcilla a un tamaño final de 0/46 mm.

**MATERIAS PRIMAS**

Almacenaje y prehomogenización.

**MOLIENDA DE CRUDO**

Se realiza en un molino de bolas y allí se controla la salida con analizadores (fluorescencia rayos X o rayos gamma) para la corrección química de las materias primas.

**HOMOGENEIZACION**

El material molido es homogeneizado en silos.

**INTERCAMBIO DE CALOR**

La sustancia cruda es introducida a un intercambiador de calor, que precalcina la mezcla, previo a la entrada al horno rotativo donde se forma el clinker.

### **HORNO / ENFRIADOR / CLINKER**

La mezcla se tiene en un horno rotatorio a temperaturas de 1.400 a 1.650 °c (2.600 a 2.900 °F). Durante el proceso, la mezcla se convierte químicamente en Clinker de cemento que posteriormente es enfriado y pulverizado.

Este clinker es almacenado.

### **ADICIONES / MOLIENDA**

El clinker es conducido a la molienda de cemento, donde con el agregado de adiciones se obtienen los distintos tipos de cemento.

Se le adiciona una pequeña cantidad de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para controlar el tiempo de fraguado del hormigón.

### **SILOS / CARGA A GRANEL**

El producto terminado es controlado por análisis químicos y ensayos físicos, y enviado a silos de depósito previo al despacho.

### **EMBOLSADORA / DESPACHO**

Mediante rotativas automáticas se procede a la carga paletizada de las

bolsas, y a granel se carga en forma automática en camiones o vagones tolva.

#### **2.4 Puzolanas.**

La puzolana es un material natural o artificial amorfo, silicoso, capaz de reaccionar con la cal que libera el cemento durante su hidratación para mejorar las propiedades del concreto. La puzolana más popular es la piedra pómez. [1].

Una definición más formal de la norma ASTM, norma C 618-72, describe la puzolana como un material silicoso o silicoaluminoso, el cual tiene poco o nulo valor cementante, pero en forma muy dividida y en presencia de humedad reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas hordinarias para formar un compuesto con propiedades cementantes.

Los materiales puzolánicos que más a menudo encontramos son:  
Cenizas volcánicas (puzolana original), pumicita, esquistos de opalina, tierras diateomáceas calcinadas, arcilla quemada ceniza volante etc.

## 2.4.1 Principales tipos de puzolanas

### Puzolanas naturales

- Rocas volcánicas, en las que el constituyente amorfo es vidrio producido por enfriamiento brusco de la lava. Por ejemplo las cenizas volcánicas, la piedra pómez, las tobas, la escoria y obsidiana. [4].
- Rocas o suelos en las que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por la precipitación de la sílice de una solución o de los residuos de organismos de lo cual son ejemplos las tierras de diatomeas, o las arcillas calcinadas por vía natural a partir de calor o de un flujo de lava.
- Ladrillos de bloque sólido combustible siendo incinerados para producir ceniza con característica puzolánicas

## **Puzolanas artificiales**

- Cenizas volantes: las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito), fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.
- Arcillas activadas o calcinadas artificialmente: por ejemplo residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.
- Escorias de fundición: principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

- Cenizas de residuos agrícolas: la ceniza de cascarilla de arroz, ceniza del bagazo y la paja de la caña de azúcar. Cuando son quemados convenientemente, se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión.

### **2.5 Propiedades de la Limolita.**

Es una roca sedimentaria constituida por un tamaño de partícula correspondiente al limo (20-2 micras). [5].



**FIGURA 2.3 LIMOLITA**

#### **Etimología**

Del latín, limus, limo

#### **Clasificación**

Roca clástica (detrítica) arcillosa.

### **Componentes**

Limo, minerales de arcilla, cuarzo coloidal y muscovita.

### **Características y Diagnóstico**

Roca friable, calcárea, microlaminar, pastosa y salobre al gusto. El color meteorizado es ocre. El color fresco es crema parduzco claro. Presenta manchas de color gris negruzco dispuestas en líneas de 2 a 5 mm. Efervese súbitamente en contacto con el ácido clorhídrico diluido al frío. [6].

#### **2.6 Curado del cemento en aire.**

Este tipo de curado “**curado al aire**”, es el más cercano a lo que se realiza en la actualidad en las diferentes obras civiles a base de

cemento. Este método, consiste en colocar las muestras de pasta de cemento compuesto en un lugar seco (al ambiente), y serán rociadas una o dos veces al día con agua de la llave.

## 2.7 Resistencia del Concreto.

### 2.7.1 Endurecimiento del cemento portland.

La resistencia del concreto es considerada como la propiedad más valiosa por que ofrece un panorama general de la calidad del concreto por estar relacionado directamente con la estructura de la pasta de cemento endurecido. [2].

El cemento portland se endurece al reaccionar con agua por las denominadas reacciones de hidratación, estas reacciones son:

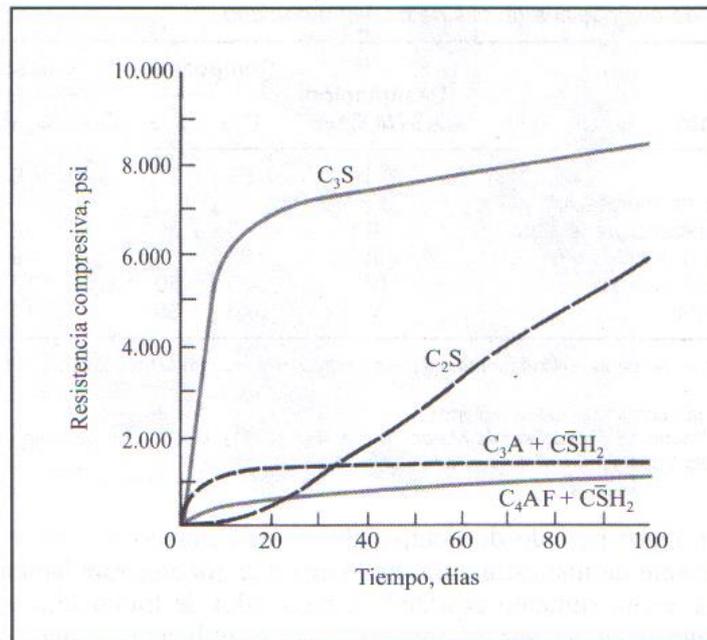


En donde el silicato dicálcico y el silicato tricálcico constituye aproximadamente un 75% en peso del cemento portland.

Cuando estos dos componentes reaccionan con el agua durante el proceso de endurecimiento del cemento se produce como principal producto de hidratación el Silicato tricálcico hidratado el cual está formado por partículas muy pequeñas (de menos de  $1\mu\text{m}$ ) es de un gel coloidal. Por hidratación del silicato tricálcico y silicato dicálcico se produce también hidróxido cálcico el cual es un material cristalino.

El silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) endurece rápidamente y es el principal responsable de la temprana resistencia del cemento portland como se indica en la figura.

El silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) tiene una lenta reacción de hidratación con agua y es el principal responsable del incremento de la resistencia de la cemento al cabo de una semana como se indica en la figura.



**FIGURA 2.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE COMPONENTES DE CEMENTO PURO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CURADO.** (William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, McGraw Hill, Tercera Edición Pag.664).

La extensión en que se completan las reacciones de hidratación determina la resistencia y la durabilidad del hormigón. La hidratación es relativamente rápida durante los primeros días una vez que el hormigón fresco se ha situado en su lugar.

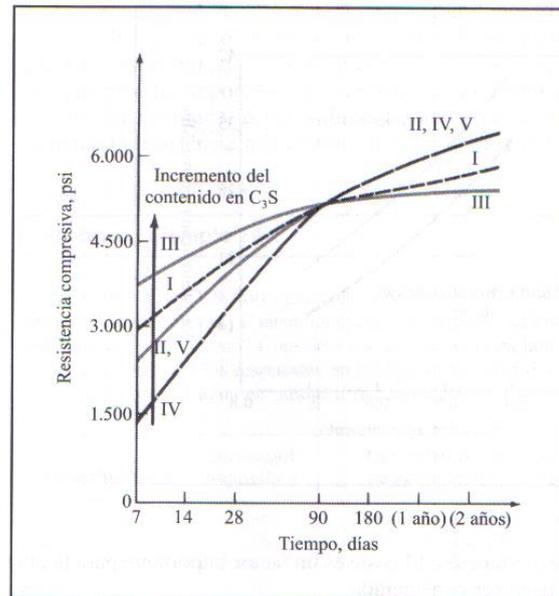
Es importante que el agua se retenga durante el comienzo del periodo de curado y que se prevenga o reduzca la evaporación

### 2.7.2 Resistencia del hormigón a la compresión.

El hormigón es básicamente un material compuesto de base cerámica, tiene mayor resistencia a la compresión que a la tracción.

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{Kg/cm}^2$ ) a una edad de 28 días se le designe con el símbolo  $f' c$ . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas de mortero o de concreto los ensayos a compresión de mortero se realizan sobre cubos de 5 cm. [5].

Como se muestra en la figura la resistencia del hormigón depende del **tiempo**, puesto que su resistencia se genera como consecuencia de reacciones de hidratación. [2].

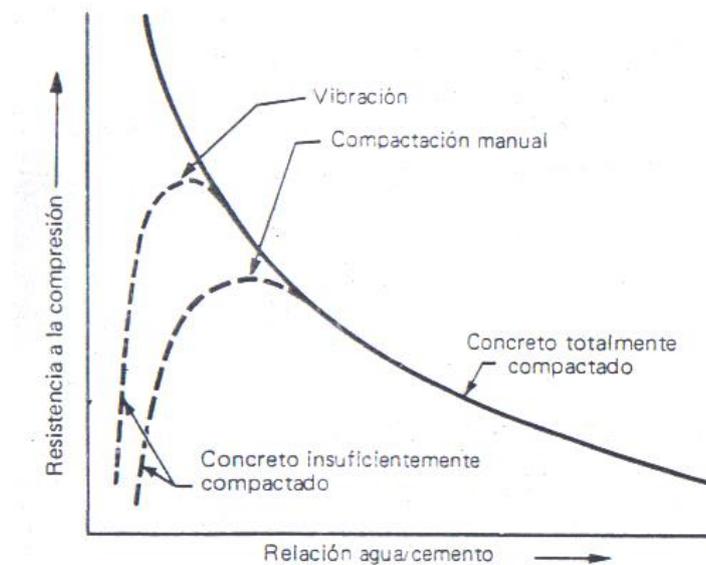


**FIGURA 2.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGONES FABRICADOS CON DIFERENTES TIPOS DE ASTM DE CEMENTOS, EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CURADO.** (William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Mc Graw Hill, Tercera Edición .Pag.665):

La resistencia a la compresión del hormigón depende también de la **relación agua/cemento**. Con grandes proporciones agua/cemento se produce hormigón de baja resistencia

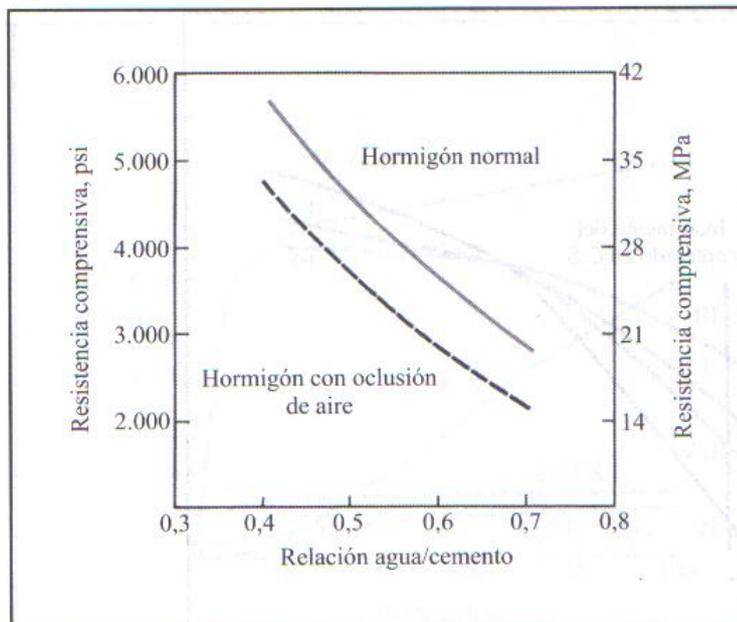
La relación agua/cemento determina la porosidad de la pasta de cemento endurecido en cualquier etapa de hidratación. De ahí

que la relación agua/cemento afecta el volumen de huecos del concreto. [1].



**FIGURA 2.6 CORRESPONDENCIA ENTRE LA RESISTENCIA Y LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO DEL CONCRETO (A.M. Neville ,*Tecnología del concreto*, Instituto Mexicano del cemento y del concreto, Tomo I, pag. 270).**

En un sentido estricto la resistencia del concreto probablemente está influenciada por el volumen de todos los huecos del concreto, aire atrapado, poros capilares, poros de gel y aire incluido, si lo hay.



**FIGURA 2.7 EFECTO DE LA PROPORCIÓN EN PESO AGUA/CEMENTO SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN NORMAL Y HORMIGÓN CON AIRE OCLUIDO** (William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Mc Graw Hill, Tercera Edición Pag.666):

Las mezclas con una relación agua/cemento muy baja y un contenido de cemento extremadamente alto (470 a 530 Kg/m<sup>3</sup>) exhiben un retroceso de resistencia, particularmente cuando se usa agregado de gran tamaño.

Por lo tanto a edades posteriores, con este tipo de mezclas, una relación agua/cemento menor no conducirá a una resistencia superior.

Este comportamiento puede deberse a los esfuerzos inducidos por la contracción, que al ser obstruida por las partículas de agregado, causa el agrietamiento de la pasta de cemento o una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado.

Para un cemento dado y agregados aceptables, la resistencia que puede desarrollarse por medio de una mezcla trabajable y bien colocada de cemento, agregado y agua (en las mismas condiciones de mezclado curado y prueba) está bajo la influencia de:

1. La relación del cemento al agua de mezclado.
2. La relación del cemento al agregado.
3. La granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez de las partículas del agregado.
4. El tamaño máximo del agregado.

El factor (a) es de gran importancia cuando se usan agregados con un tamaño máximo hasta de 40 mm.

La resistencia del concreto resulta de: (1) La resistencia del mortero; (2) La adherencia entre el mortero y el agregado grueso; y (3) la resistencia de las partículas del agregado grueso, es decir su capacidad para resistir los esfuerzos aplicados.

## **2.8 Otras investigaciones relacionadas.**

La resistencia mecánica a la compresión es afectada por muchos factores ya sean estos por su granulometría, relación agua/cemento, edad de curado, temperatura, humedad y algunos otros factores externos.

Muchos investigadores han realizado varios estudios con la finalidad de analizar estos factores que afectan a la resistencia a la compresión del cemento entre las cuales se destacan las siguientes:

Se han realizado un estudio computarizado de simulación de procesos de fractura que utiliza modelos de mesonivel de estructuras reticulares. Este estudio consiste en un algoritmo heurístico que se genera por la composición del concreto en el espacio en 3D produciendo especímenes con alto contenido de agregado y distribución realista. [11].

Este modelo mecánico del concreto se distingue por tres niveles:

El nivel macroscópico del material, la cual es considerada como homogénea, por lo que no toma en consideración la composición del material.

En nivel microscópico, en la cual la estructura de la pasta de cemento se modela en medios porosos.

El nivel intermedio, en la cual se considera como un material bifásico, ya sea este como pequeños agregados rodeados por pasta de cemento endurecido o como partículas agregada gruesas dispersas en una matriz de mortero.

Este modelo de mesonivel es una herramienta que permite pronosticar los efectos cualitativos y cuantitativos de propiedades mecánicas independientes de diferentes componentes de material en las propiedades mecánicas globales del material compuesto.

Un estudio realizado nos permite calcular la resistencia a la compresión de materiales heterogéneos utilizando un algoritmo. Este algoritmo consiste en la discretización de elementos finitos la cual se aplica a imágenes digitales. Este algoritmo esta enfocado en una representación realista de la microestructura de los materiales, la cual prueba la determinación de la compresión mediante el algoritmo de una mezcla de cemento compuesto con su real microestructura almacenada en una imagen digital. [13].

Se realizó un estudio para analizar los efectos de los materiales puzolánicos y los métodos de curado en el modulo elástico HPC (Concreto de alto rendimiento). [12].

Este estudio evalúa el efecto de la puzolana sea este ceniza, humo de sílice, escoria de alto horno y el efecto de curado en el modulo elástico HPC y su variación con el tiempo.

El modulo elástico y la resistencia a la compresión son propiedades que deben conocerse y en particular se debe de tener conocimiento de cómo cambia con el tiempo el modulo de elasticidad a edad temprana, con lo cual podemos predecir los efectos a largo plazo así como su durabilidad en estructuras de concreto.

Se han realizado muchas mezclas de concreto las cuales fueron aprobadas para evaluar el modulo de elasticidad.

Las pruebas de resistencia a la compresión se desarrollaron de acuerdo a la norma ASTM C-39, las cuales se usaron tres probetas de 100 mm x 200 mm con las cuales se probaron la 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 esta investigación es de que, el módulo de elasticidad es mayor con el curado húmedo que en el curado al aire y el curado combinado.

También se ha realizado un estudio del uso óptimo de una puzolana natural para la máxima resistencia a la compresión del hormigón. [8]. En el estudio realizado se analizó el efecto que tiene el introducir una puzolana natural sobre las propiedades mecánicas del concreto, para aquello se realizaron 15 mezclas de concreto en 3 series con el control de mezclas, teniendo 300, 350, y 400 Kg de contenido de cemento. Para los controles de mezclas estos valores se modificaron a 250, 300, 350 Kg de cemento y el contenido de 40, 50, 75 y 100 Kg. De puzolana además de  $1\text{m}^3$  de hormigón.

La eficiencia de la puzolana mediante la ecuación de Feret y Bolomey a los 28 días transcurridos de los hormigones.

Este estudio muestra que las eficiencias obtenidas en cada ecuación de fuerza son similares y la disminución de estos valores se da con el aumento de la proporción puzolana/cemento.

# **CAPITULO 3**

## **3. ANÁLISIS METODOLOGICO.**

### **3.1 Equipos y materiales experimentales.**

La norma ASTM C 595 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements” nos da las especificaciones que deben cumplir los materiales y equipos que se usarán en esta investigación.

La norma ASTM C 109/C 109M “Standard Test for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), analiza el esfuerzo a la compresión en morteros de cementos hidráulicos, usando cubos de 2 pulgadas o 50mm.

### 3.1.1 Equipos

**Vasos Graduados**, deben de ser de una capacidad adecuada (Lo suficientemente largo para medir el agua a utilizar en la mezcla) para entregar el volumen indicado a 20 ° C. La variación admisible será de  $\pm 2$  ml. Las graduaciones deben de ser subdivididas por lo menos 5mm. Las principales líneas de graduación deberán ser circulares y estarán numerados.

**Moldes para muestras**, para cubos de 2-in. (50 mm) tendrán que ser de un ajuste apropiado. Los moldes no tendrán más de tres compartimentos para los cubos y podrán separarse en no más de dos partes. Los moldes deben de ser de un metal muy

duro para que no sean atacados por los morteros de cemento. Para moldes nuevos el número de dureza Rockwell del metal no debe ser inferior a 55 HRB. Los lados de los moldes deben de ser lo suficientemente rígido para impedir las deformaciones o rupturas. El interior de las caras de los moldes serán superficies planas y se ajustarán a las tolerancias mostradas en la siguiente tabla.

**TABLA 5**  
**TOLERANCIAS PERMITIDAS EN LOS MOLDES DE LAS**  
**MUESTRAS.**

<b>Parámetros</b>	<b>Moldes de los cubos.</b>	
	<b>Nuevos</b>	<b>Usados</b>
Superficies de los lados	<0,025mm	<0,05mm
Dist. entre lados opuestos	50 ± 0,13mm	50 ± 0,50mm
Altura de los compartimientos	50 + 0,25mm - 0,13mm	50 + 0,25mm - 0,38mm
Angulo entre caras adyacentes	90 ± 0,5°	90 ± 0,5°

**Mezclador, Tazón y Paleta,** Se usará un mezclador de tipo mecánico el cual funcionará con corriente eléctrica equipado con paleta y un tazón para el mezclado de los materiales de la muestra.

**Paleta,** debe de ser de una hoja de acero de aproximadamente 100 a 150 mm de longitud el cual debe tener sus filos rectos.

**Tabla de flujo y caudal del Molde,** de conformidad con los requerimientos especificados en la norma ASTM de C 230.

**Apisonador,** Este debe de ser de un material no frágil (un compuesto de goma con una dureza de  $80 \pm 10$  el cual es medido con un durómetro Shore A), no absorbente y abrasivo. Este apisonador tendrá una sección transversal de aproximadamente 1/2 por 1 pulgadas (13 por 25 mm) y una longitud de unos 5 a 6 pulgadas (120 a 150mm).

**Cuarto o Cabina de Humedad**, este cuarto debe de ser conforme a los requerimientos de la norma ASTM C 511.

**Máquina de ensayo**, esta máquina ya sea esta hidráulico o de tornillo, es una máquina de ensayos de compresión universal, la cual debe contar con la suficiente apertura entre las caras de las superficie superior e inferior de la máquina para permitir el uso de verificación de los aparatos.

### **3.1.2 Materiales.**

El material que utilizare para la preparación de la pasta de cemento compuesto se detalla continuación:

- Cemento Portland Tipo I sin aditivos.
- Limolita a un 5%.
- Agua.

### 3.2 Protocolo de ensayos.

Cada día de los ensayos se tomará tres datos de la resistencia a la compresión a los cuales se los procederá a realizar el respectivo análisis estadístico y su respectiva modelación para cada día del experimento. En la siguiente tabla se indica la forma en la que procederemos a recolectar los datos de la resistencia a la compresión uniaxial así como también el tiempo de curado para nuestra mezcla (Cemento Portland tipo I sin aditivos + limolita 5%).

**TABLA 6**

**MODELO DE TOMA DE DATOS DE EXPERIMENTO**

5%	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	7 Días	14 Días	21 Días	28 Días
Muestra 1	r1	r4	r7	r10
Muestra 2	r2	r5	r8	r11
Muestra 3	r3	r6	r9	r12

A continuación también se procederá a realizar la correspondiente validación de la forma como se indica en la siguiente tabla.

TABLA 7

## MODELO DE TOMA DE DATOS VALIDACIÓN

8%	Resistencia a la Compresión (MPa)			
	4 Días	11 Días	18 Días	25 Días
Muestra 1	r1	r4	r7	r10
Muestra 2	r2	r5	r8	r11
Muestra 3	r3	r6	r9	r12

Durante la toma de los datos de la resistencia a la compresión también debemos de tomar datos adicionales como: La temperatura al momento que se realizo la toma de los datos, la humedad relativa. Estas datos pueden afectar a los resultados por lo tanto se deben de considerar.

Para el análisis de estos datos debemos de tener una tabla similar del cemento Portland tipo I sin aditivos para poder comparar como la adición de limolita al 5% efecto a la compresión uniaxial de este cemento.

### 3.3 Temperatura y humedad

- La **temperatura** del lugar en donde se va a proceder a realizar la mezcla del material, moldes, embases y del tazón deberán mantenerse entre los  $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  la temperatura del agua a mezclarse será de  $23.0^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
- La **humedad relativa** del laboratorio en la cual se ve a realizar el experimento deberá de ser no menos del 50%

### 3.4 Diseño experimental.

Con la finalidad de reducir en lo más mínimo los errores experimentales se deben de hacer una buena planificación de los experimentos, para de esta

forma poder abaratar costos y reducir a lo máximo los tiempos durante la experimentación. Con una muy buena planificación podremos desarrollar un buen plan de trabajo para nuestra experimentación.

Para la realización de un excelente plan de trabajo se debe de seguir los siguientes pasos:

- Análisis del problema.
- Planificación del experimento.
- Ejecución de los experimentos.
- Análisis estadístico de los datos.
- Análisis de los resultados estadísticos.
- Revisión del análisis del problema.

**Análisis del problema:**

En esta etapa vamos a establecer nuestra función de respuesta y los factores así como también los vínculos existentes entre la función de respuesta y dichos factores.

Para el presente trabajo la función de respuesta a obtener es La resistencia de nuestra mezcla a la compresión uniaxial con respecto al tiempo de ensayo.

Se mantendrá constante la relación agua/mezcla así como también su granulometría. La variable independiente será el porcentaje de aditivo que se utilizará que para este caso es de 5% de limolita, al cual se le hará un curado al aire.

Nuestra mezcla (cemento+ 5% de limolita) lo analizaremos mediante un ensayo mecánico (ensayo a la compresión) a los 7, 14, 21 y 28 días (de aquí se obtiene el tiempo de curado y estos días en los que se realizarán los

ensayos son los niveles de este factor). A este experimento se procederá hacer una validación con el uso de una nueva mezcla (cemento + 8% de limolita) al cual se procederá a realizar el mismo ensayo mecánico a los días 4, 11, 18 y 25 días, para de esta forma tener datos suficientes para realizar un buen análisis estadístico y de modelación. De esta forma se podrá estudiar como la adición de 5% de limolita afecta a las propiedades mecánicas del cemento Portland tipo I (material de referencia) sin aditivos y en especial al de la resistencia de la compresión uniaxial por cada tiempo de ensayo.

### **Planificación del experimento.**

Este experimento lo realizaremos en la máquina de ensayos de compresión que se encuentra en la Facultad de ciencias de la tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), siguiendo la norma que se especifica en la ASTM C109/C 109M.

La forma como se planificara el experimento esta explicada en el protocolo de ensayos descrito en la sección 3.2

### **Ejecución de los experimentos.**

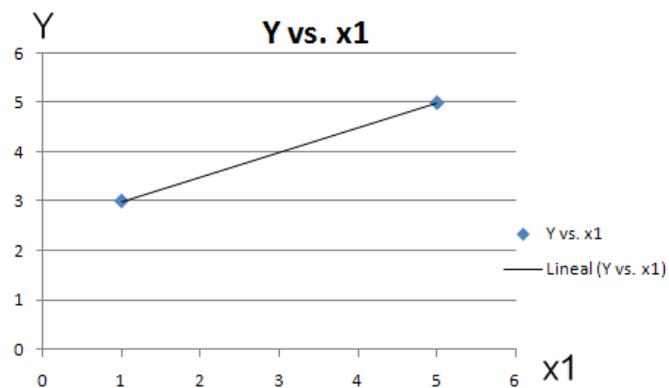
Los ensayos de la resistencia a la compresión se realizaran en el área de materiales de la Facultad de Ingeniería en ciencias de la tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) siguiendo las normas establecidas por la norma ASTM C109/C 109M. Las probetas para la pasta de cemento se fabricaran en el mismo laboratorio siguiendo las normas antes mencionas.

### **Análisis estadístico de los datos**

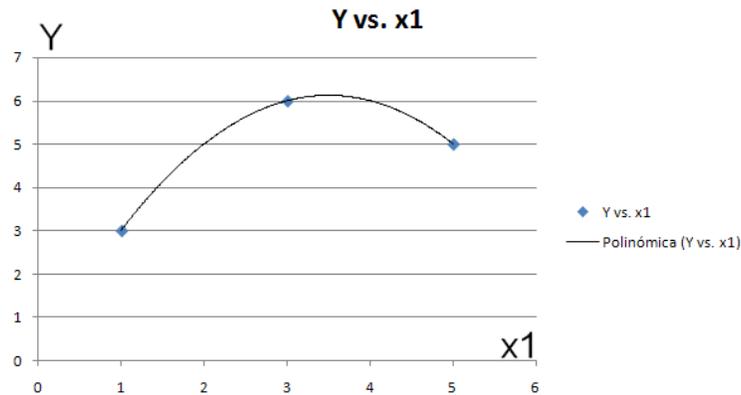
Para realizar un correcto análisis estadístico primero debemos de armar una matriz de diseño de los experimentos "Design Matriz", en esta matriz las

filas corresponden a los experimentos a efectuarse y las columnas corresponderán a las variables codificadas. [9].

Los experimento que se realizan se debe de hacer de una forma planificada para de esta manera tener una muy buena aproximación entra la relación de respuesta y los factores en una región de interés. En los siguientes gráficos se puede observar los resultados erróneos que se podrían presentar al no realizar una buena planificación experimental.



**Figura 3.1. Ejemplo de un experimento con 2 resultados.**



**Figura 3.2. Ejemplo de un experimento con 3 resultados.**

El primer gráfico nos dice o nos puede hacer pensar que el comportamiento de la variable “Y” con respecto a la función de entrada es lineal, pero si se analiza nuevamente este experimento pero en este caso lo hacemos con tres puntos podemos fácilmente ver que la función de respuesta no se comporta de forma lineal sino de forma polinomial.

Una vez que se ha obtenido la matriz de diseño procedemos a encontrar la media correspondiente a cada uno de los días de curado (7, 14, 21, 28) ya que en cada día que se va a realizar los ensayos a la compresión vamos a obtener 3 datos. Estos valores de las medias nos van a servir para poder graficar la resistencia a la compresión uniaxial versus el tiempo de curado

de la pasta de cemento compuesto. Los valores de las medias lo vamos a encontrar de la siguiente manera:

$$\bar{r}_j = \frac{\sum_{i=1}^3 r_i}{3}$$

Adicionalmente a más de los valores de las medias a encontrarse, se procederá también a encontrar los valores de los errores que se producen al realizar la experimentación. Estos errores se deben de tratar de reducirlos a lo mínimo para de esta manera tener mejores modelos de análisis. Los errores de muestreo pueden ser obtenidos de las siguientes formas: Colinealidad, clusterización, deshomogeneidad.

Una vez que se a logrado obtener todos los datos experimentales se procede a graficar los valores de la resistencia a la compresión versus el tiempo de curado para de esta manera poder determinar el modelo matemático que sigue la resistencia a la compresión de nuestro cemento

compuesto (cemento portland tipo I sin aditivo + 5% de limolita) con un curado al aire.

El modelo estadístico que encontraremos nos dirá cual va hacer la forma de distribución probabilística que tiene la resistencia a la compresión de las muestras. Para especificar esta distribución es necesario realizar lo siguiente:

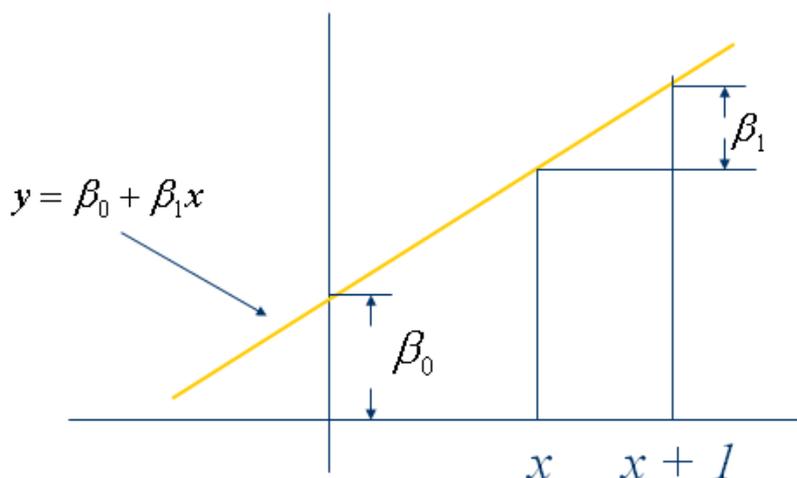
Se procederá a relacionar la variable aleatoria “Y” (resistencia a la compresión uniaxial del cemento), a la variable independiente del experimento (Tiempo de curado).

Para el presente trabajo utilizaremos el modelo de regresión (lineal o cuadrático) el cual nos va a permitir relacionar la resistencia a la compresión uniaxial de nuestro cemento compuesto (cemento Pórtland tipo I + 5% de limolita), al tiempo de curado.

Mediante el modelo de regresión lineal simple procederemos a relacionar la variable dependiente “Y”, con la variable independiente “X” siempre y cuando supongamos que ambas variables son cuantitativas.

Si la función matemática  $\mu(X)$  (función de regresión) denota la media de la distribución condicional de Y dado que  $X=x$ , la función de regresión tiene la forma:  $\mu(X)=\beta_0+\beta_1X$ , donde  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son constantes a los cuales se los denominan como parámetros de regresión. En este análisis de regresión simple esta función de regresión lineal especifica una relación descrita por una línea recta entre las variables dependientes e independientes.

En la siguiente figura se indica la interpretación gráfica de la función de regresión lineal simple.



**Figura 3.3. Interpretación de los parámetros de regresión.**

En donde  $\beta_0$  es la respuesta esperada cuando la variable independiente es cero. Si se examina el cambio en la respuesta esperada que es el resultante de incrementar en una unidad ( $X \rightarrow X+1$ ) el valor de la variable independiente, se puede encontrar que  $\beta_1$  es el cambio en la media poblacional correspondiente a una unidad de incremento en el valor de la variable independiente, aquí podemos darnos cuenta que esta es la pendiente de la función regresión.

Para lograr obtener un modelo de regresión es necesario inferir en los valores de las medias, obtenidas de la resistencia a la compresión uniaxial de nuestra mezcla, las cuales se obtienen experimentalmente. Estas inferencias que se basan en los modelos de regresión lineal simple requieren de la estimación de tres parámetros que son:

- La varianza de error ( $\sigma^2$ )
- Los parámetros de regresión. ( $\beta_0$  y  $\beta_1$ )

Los valores que se obtendrán por la inferencia de los datos en la resistencia a la compresión al ingresar el valor de tiempo de curado serán de la siguiente manera.

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i$$

En donde  $b_0$  y  $b_1$  son valores estimados de los parámetros de regresión.

Por lo que  $\mu(X)$ , que es la respuesta que esperamos de la resistencia a la compresión de nuestra mezcla cuando  $X$  sea igual a  $X_i$  será:  $\mu(X_i) = \beta_0 + \beta_1 X_i$ , entonces el valor de  $\hat{y}_i$  es un estimado de  $\mu(X_i)$ .

La ecuación se la conoce también como ecuación de predicción. La línea representada por la ecuación de predicción se la conoce como **línea de predicción** o **línea estimada de regresión**.

Línea de predicción: el cual es un estimador de la línea verdadera de regresión, la cual describe la supuesta relación en línea recta entre la media de los esfuerzos de compresión y el tiempo de curado (de nuestro experimento).

La diferencia entre los valores pronosticados y observados se lo conoce como residual, el cual se lo determina de la siguiente manera.

$$e_i = y_i - (b_0 + b_1x_i)$$

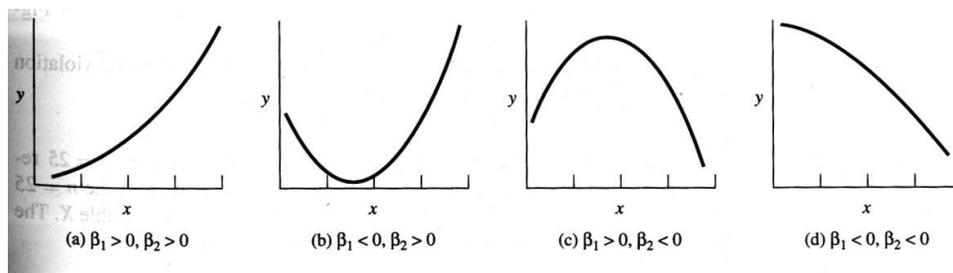
Si los valores de las medias de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado no siguen un patrón lineal, esto quiere decir que el método que se utilizará para determinar la función que nos permita conectar la variable de la respuesta esperada a la independiente, será el modelo de **regresión cuadrática simple**, el cual será de la forma:

$$\mu(X) = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2$$

Donde  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son conocidos como **parámetros de regresión**.

La función de regresión lineal simple es una extensión de de la función cuadrática de regresión, donde  $\beta_2 = 0$ .

En la siguiente figura se indica como la localización y la forma del gráfico de una función de regresión cuadrática simple depende de los valores que tomen los parámetros de regresión.



**Figura 3.4. Interpretación de los parámetros de regresión cuadrática simple.**

Caso a:  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son positivos, la función aumenta cuando X aumenta

Caso b:  $\beta_1$  es negativo mientras que  $\beta_2$  es positivo, decrece y luego aumenta.

Caso c:  $\beta_1$  es positivo y  $\beta_2$  es negativo, aumenta y luego decrece.

Caso d:  $\beta_1$  y  $\beta_2$  ambas son negativas, función decrece con el aumento de X.

Con este modelo estadístico podremos estimar los valores de los parámetros de la regresión y la varianza del error tanto en progresiones lineales como cuadráticas simples.

**ANOVA:** Para realizar el análisis estadístico de las muestras se usará el método de la varianza (ANOVA) para lo cual suponemos que:

Las K poblaciones son independientes y normalmente distribuidas con medias  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ , y varianza común  $\sigma^2$ . [10].

Para este análisis se hace la siguiente hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

$H_1$ : Al menos una de las medias no son iguales

Mediante este método se analizará si hay o no diferencias significativa entre las medias de las muestras.

### **Análisis de los resultados.**

Cuando ya se haya conseguido determinar la curva de regresión y la función estimada de regresión podremos determinar la función que relaciona las medias de la resistencia de compresión uniaxial en función del tiempo de curado

Antes de comenzar hacer el respectivo análisis (previo a la toma de datos) nos planteamos la siguiente hipótesis. “En nuestra mezcla, la forma como se comporta la resistencia a la compresión uniaxial en función del tiempo de curado, será siguiendo un modelo de regresión lineal simple”. Con la hipótesis ya planteada se comienza hacer el respectivo análisis de los datos. Si se comprueba que verdaderamente nuestro modelo es lineal se aceptará la hipótesis casi contrario se rechaza la hipótesis inicial a favor de la hipótesis experimental encontrada.

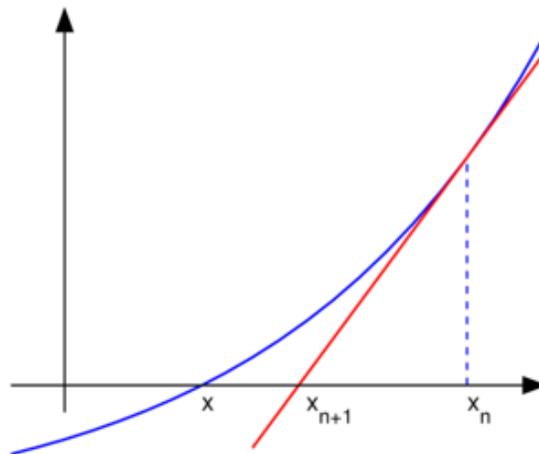
### **Revisión del análisis del problema**

Una vez que se haya analizado los resultados obtenidos de la experimentación se comenzará a verificar si las suposiciones hechas inicialmente son las únicas que afectan al experimento o si hay algunos otros factores que pueden influir en la resistencia a la compresión de las muestras que deberían tomarse en cuenta durante el análisis del problema.

**Modelación:** Con la finalidad de Hacer una comparación de nuestro experimento este se procederá a realizarlo mediante el uso de un modelo matemático para lo cual nos valemos de un algoritmo que nos aproxime a las raíces de la función esfuerzo-deformación, llamado Newton-Raphson

**Newton-Raphson** es un método iterativo, es uno de los más usados y efectivos. Este método no trabaja sobre un intervalo sino que basa su fórmula en un proceso iterativo.[8]

Supongamos que tenemos la aproximación  $x_n$  a la raíz  $x$  de  $f(x)$ .



**FIGURA 3.5 ILUSTRACIÓN DE UNA ITERACIÓN DEL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON**

Trazamos una recta tangente a la curva en el punto  $(X_n, f(x_n))$ , la cual cruza al eje x en el punto  $X_{n+1}$  la cual será nuestra siguiente aproximación a la raíz X.

Para calcular el punto  $X_{n+1}$ , calculamos primero la ecuación de la recta tangente.

La recta tiene una pendiente  $m=f'(X_n)$  por lo que la ecuación de la recta tangente es:

$$y - f(X_n) = f'(X_n)(X - X_n)$$

Haciendo  $y=0$ :

$$-f(X_n) = f'(X_n)(X - X_n)$$

Despejando X tenemos:

$$X = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)}$$

La cual es la fórmula de Newton-Raphson, que para calcular la siguiente aproximación usaremos:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

$f'(X_n)$  no tiene que ser cero. En caso de que  $f'(X_n)$  este método no se puede aplicar, ya que esto significa que la recta tangente es horizontal por lo que no intersecta al eje X en ningún punto

Para realizar las iteraciones se necesita una función que me almacene los cambios que sufre Delta en el campo plástico, para cada intervalo.

Una vez creada la función, corremos el programa llamando a la función respectiva New Rap para calcular los valores de a y m.

```
% G3/7,5/4
```

```
clc;
```

```
clear all;
```

```
E=2283.28; % DEL GRAFICO VARIA
```

```
sigmayo=54.936; % DEL GRAFICO VARIA
```

```
m=0.000404821; % DEL GRAFICO INICIALMENTE 0.0013 Y SE VARIA HASTA  
ENCONTRAR GRAFICA SIMILAR A EXPERIMENTAL
```

```
a=0.25; % DEL GRAFICO INICIALMENTE 0.08 Y SE VARIA HASTA ENCONTRAR  
GRAFICA SIMILAR A EXPERIMENTAL
```

```

deltae=0.00254; %DELTA DEFORMACION es fijo

et=0.031; % DEL GRAFICO MAXIMA DEFORMACION

sigman(1,1)=0;

sigmayn(1,1)=sigmayo;

eps=0:deltae:et;

eps=eps';

d=size(eps);

e=d(1,1);

lampdao=10^-8;

lampda(1,1)=0;

for k=1:e-1

    sigmatrn1=sigman(k,1)+E*deltae

    Fntrn1=abs(sigmatrn1)-sigmayn(k,1)

    if Fntrn1>0

        deltampda(1,1)=3; %se asume este valor inicial

        Fo=Fntrn1-deltampda(1,1)*(E+a*sigmayo*(m/(deltampda(1,1)+lampdao)^0.5)*(m-
        deltampda(1,1)-lampdao)/(m+deltampda(1,1)+lampdao)^2);

        Fn1=Fo;

```

```

i=1;

Tol=10^-10;

lim=30;

lampda1=deltalampda(i,1)+lampdao;

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

syms deltaepsilon;

Rn1=Fnrn1-deltaepsilon*(E+a*sigmayo*((m/(deltaepsilon+lampdao))^0.5)*(m-deltaepsilon-
lampdao)/(m+deltaepsilon+lampdao)^2);

Fn(i,1)=Fnrn1-deltalampda(i,1)*(E+a*sigmayo*((m/(deltalampda(i,1)+lampdao))^0.5)*(m-
deltalampda(i,1)-lampdao)/(m+deltalampda(i,1)+lampdao)^2);

deldellampda=-(subs(diff(Rn1,deltaepsilon),deltaepsilon,deltalampda(i,1)))^-1*Fn(i,1);

deltalampda(i+1,1)=deltalampda(i,1)+deldellampda;

Fn(i+1,1)=Fnrn1-
deltalampda(i+1,1)*(E+a*sigmayo*((m/(deltalampda(i+1,1)+lampdao))^0.5)*(m-
deltalampda(i+1,1)-lampdao)/(m+deltalampda(i+1,1)+lampdao)^2);

l(1,1)=1;

F(1,1)=log10(abs(Fn(1,1))/abs(Fo));

Fn1=Fn(i+1,1);

```

```

l(i+1,1)=i+1;

F(i+1,1)=log10(abs(Fn(i+1,1))/abs(Fo));

i=i+1;

end

delta=deltalampda(i,1);

lampda1=delta + lampdao;

Hp=a*sigmayo*((m/lampda1)^0.5)*(m-lampda1)/(m+lampda1)^2;

sigman(k+1,1)=sigmatrn1-E*delta*sign(sigmatrn1);

sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1)+Hp*delta;

lampdao=lampda1;

lampda(k+1,1)=lampdao;

else

    sigman(k+1,1)=sigmatrn1;

    sigmayn(k+1,1)=sigmayn(k,1);

end

end

size(sigman)

```

```
size(eps)
```

```
hold on
```

```
plot(eps,sigman, 'g')
```

**Experimentación:** Se realizó la molienda de la limolita, para obtener una granulometría igual a la del cemento, que es de 45 micras.

El proceso de experimentación comenzó con la molienda de la limolita la cual se lo realizó de la siguiente manera:

Se pesaron 12 Kg de limolita en su estado natural, para lo cual usamos una balanza de precisión.



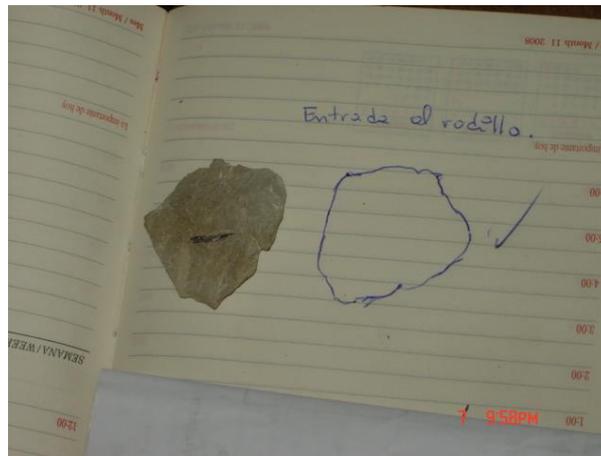
**FIGURA 3.6 BALANZA DE PRECISION**

Una vez que se ha pesó la limolita, se hizo pasar por la trituradora de mandíbulas por dos veces.



**FIGURA 3.7 TRITURADORA DE MANDÍBULAS**

Concluida la segunda pasada, obtuvimos una granulometría.



**FIGURA 3.8 PRIMERA GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL**

Una vez que el material se lo pasó por la trituradora de mandíbulas se lo llevo al siguiente molino llamado trituradora de rodillos, con lo cual el material se lo paso por dos veces



**FIGURA 3.9 TRITURADORA DE RODILLOS**

Pasado este proceso se procedió a cuartear el material.



**FIGURA 3.10 CUARTEADOR DE MATERIAL**

Luego de esto homogenizamos una de las muestras para que esta sea representativa, con lo cual se procedió a tomar 100 gr. Para realizar el respectivo tamizado con las mallas # 14, 18, 40, 50-fondo.



**FIGURA 3.11. TAMICES**

Para el tamizado se usó un tamizador eléctrico.



**FIGURA 3.12 TAMIZADOR ELÉCTRICO**

Una vez que se realizó el tamizado se obtuvo un porcentaje granulométrico bueno de la muestra, luego de esto hicimos pasar todo el material ahora por el siguiente molino llamado **trituradora de discos**. Una vez pasado todo el material a través de este molino, se analiza nuevamente su granulometría usando los mismos tamices



**FIGURA 3.13 TRITURADORA DE DISCOS**

Luego de haber realizado los pasos anteriores se procedió a llevar este material a otro molino llamado **molino de bolas** para de esta manera llevar este material a una granulometría igual al del cemento que es de 45 micras.



**FIGURA 3.14 MOLINO DE BOLAS**

Luego de pasar por el **molino de bolas**, por un tiempo, se verifica la granulometría con los tamices # 50, 100, 200, 325 y un fondo, con lo cual se obtuvo el 80 por ciento de material en el fondo, entonces se aceptó este material.

### **Proceso de mezclado**

**Experimento:** Para esta parte de prueba se procedió a realizar la primera mezcla bajo las siguientes condiciones.

La mezcla a utilizarse fue de 3000gr. entre el cemento y la limolita para lo cual se procedió a calcular el porcentaje de puzolana que debemos utilizar, como para mi caso la fracción de prueba de la limolita es del 5 % se procedió a calcular la cantidad requerida de la siguiente manera:

Se tomo como referencia una mezcla de 250 gr. A esto se lo saco el 5% de puzolana (limolita) que se requiere para la mezcla la cual nos dio un

resultado de 12.5 gr. lo restante de la mezcla es la de cemento que se utilizará que para este caso es de 237.5 gr. pero como estos análisis se realizaron en 12 probetas a estos valores se debió multiplicar por 12, quedando finalmente dividida las cantidades de la mezcla de la siguiente manera.

**TABLA 8**

**CANTIDAD DE MATERIAL EXPERIMENTO**

<b>Fracción de puzolana (%)</b>	<b>Puzolana (gr.)</b>	<b>Cemento (gr.)</b>
<b>5</b>	<b>150</b>	<b>2850</b>

La cantidad de agua/mezcla que se utilizó se la obtuvo de la siguiente manera:

Relación Agua/mezcla =  $0.3 \cdot (3000)$ . La cual nos dio que la cantidad de agua que se requiere para el análisis es de 900gr.

El total de la mezcla que se utilizó fue de 3900gr.

Con la cantidad de mezcla requerida se comenzó a realizar la respectiva preparación de los moldes para las pruebas de resistencia a la compresión bajo las siguientes condiciones físicas.

**TABLA 9**  
**CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL MEZCLADO DEL**  
**EXPERIMENTO**

Temperatura (°C)	Humedad relativa (HR)
25.7	72

**Mezclado:**

La preparación de los moldes se realizó el día miércoles 13 de agosto del 2008 de la siguiente manera:

12:30 comenzamos a trabajar con la mezcla.



**FIGURA 3.15 PROCESO DE MEZCLADO**

12:44 Se procedió a verter el agua en la mezcla.

12:45 Se cambio la velocidad de mezclado.

12:47 Termino el proceso de mezclado.

12:50 Se comenzó a realizar el respectivo moldeo.

1:20 Termino el moldeo.



**FIGURA 3.16 MOLDEO DE MUESTRAS**

**Desmolde:** El desmolde de las muestras se lo realizo bajo las siguientes condiciones del día jueves 14 de agosto del 2008:

**TABLA 10**

**CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DESMOLDE**

Temperatura (°C)	Humedad relativa (HR)
26.7	74.3

El desmolde se lo realizo desde las 9:45 hasta 9:52 am.

**Validación:** Para hacer la validación del experimento se procedió de manera similar a la de la experimentación. Para los cuales se obtuvo los siguientes datos:

**TABLA 11**

**DISTRIBUCIÓN DEL MATERIAL PARA LA VALIDACIÓN**

<b>Fracción de puzolana</b>	<b>Puzolana (gr.)</b>	<b>Cemento (gr.)</b>
<b>7,5</b>	<b>225</b>	<b>2775</b>

La cantidad de agua/mezcla que se utilizó se la obtuvo de de manera similar a la de la experimentación.

Relación Agua/mezcla = $0.3 \cdot (3000)$ . La cual nos dio que la cantidad de agua que se requiere para el análisis es de 900gr.

**Mezclado:**

El proceso de mezclado de la validación es similar a lo realizado en la experimentación bajo las siguientes condiciones del día jueves 14 de agosto del 2008:

**TABLA12****CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL MEZCLADO VALIDACIÓN**

Temperatura (°C)	Humedad relativa (HR)
26.7	74.2

12:52 Mezcla sin agua.

12:54 Mezcla con agua.

12:56 Sacamos la mezcla.

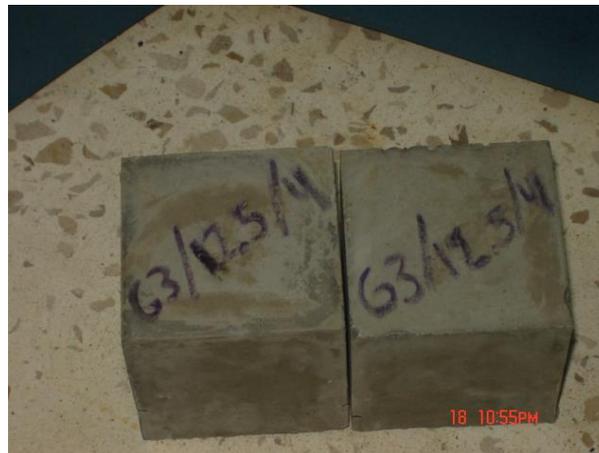
1:00 Comenzamos a poner los moldes la mezcla.

**Desmolde:** El desmolde de las muestras se lo realizó bajo las siguientes condiciones del día viernes 15 de agosto del 2008:

**TABLA 13**  
**CONDICIONES AMBIENTALES PARA EL DESMOLDE DE LA**  
**VALIDACIÓN**

Temperatura (°C)	Humedad relativa (HR)
26.6	67.5

El desmolde se lo realizo desde las 10:40 hasta 10:57 am.



**FIGURA 3.17 MUESTRAS PARA PRUEBAS**

Con estos moldes se procedió a realizar las respectivas toma de datos para lo cual nos valimos de las máquinas de ensayos ya sean estas las que nos da valores en L<sub>bf</sub>. o las que nos dan valores en K<sub>gf</sub>.

# CAPITULO 4

## 4. RESULTADOS.

### 4.1 Tabulación de datos y resultados.

**Identificación de probetas:** Debido que para realizar el análisis de laboratorio se cuentan con 24 probetas es necesario tener un código que los identifique unos de otros, para lo que nos valemos del siguiente formato de código:

**G3/5/7**

**G3:** Representa el grupo del experimento que para este caso corresponde al grupo 3.

**5:** Corresponde al porcentaje de limolita presente en la mezcla.

**7:** Corresponde al día en que se realizó la prueba de ensayo.

Para identificación de los otros días se procede de manera similar.

Para esta prueba se trabajó con los siguientes datos de humedad relativa y temperatura para los correspondientes días de ensayo

**TABLA 14**

**CONDICIONES AMBIENTALES (EXPERIMENTO)**

<b>PROBETA</b>	<b>Temperatura(°C)</b>	<b>Humedad relativa (HR)</b>
<b>G3/5/7</b>	<b>26</b>	<b>74,2</b>
<b>G3/5/14</b>	<b>25,6</b>	<b>66,4</b>
<b>G3/5/21</b>	<b>25,1</b>	<b>72,7</b>
<b>G3/5/28</b>	<b>27,3</b>	<b>65,4</b>

Al sacar el promedio de estos datos vemos que en general se trabajo a una temperatura de 26°C y una humedad relativa de 68.2 que para el caso estos datos si cumplen con lo establecido en la norma.

**TABLA 15**

**CONDICIONES AMBIENTALES (VALIDACIÓN)**

<b>PROBETA</b>	<b>Temperatura(°C)</b>	<b>Humedad relativa (HR)</b>
<b>G3/7,5/4</b>	<b>25,6</b>	<b>75,7</b>
<b>G3/7,5/11</b>	<b>24,6</b>	<b>69,4</b>
<b>G3/7,5/18</b>	<b>24,9</b>	<b>72,7</b>
<b>G3/7,5/25</b>	<b>26,7</b>	<b>73,5</b>

Al sacar el promedio de la validación se tiene que se trabajó a una temperatura de 25.45 y un humedad relativa de 72.8 las cuales cumplen con la norma.

Para la toma de datos se procedió a ensayar en la maquina de ensayo universal.



**FIGURA 4.1 MÁQUINA DE ENSAYOS (Kgf)**

Esta máquina fue utilizada solo para tres días de experimentación que fueron las probetas G3/7.5/4, G3/5/7 y G3/7.5/11.

Esta máquina nos proporciona los siguientes datos en unidades de Kgf

**TABLA 16**

**DATOS DE PROBETA G3/5/7**

DEFORMACIÓN (xE-3plg)	PROBETA1 (Kgf)	PROBETA2 (Kgf)	PROBETA3 (Kgf)
0	0	0	0
0,005	1500	1450	550
0,01	2450	2560	1350
0,015	3550	3630	2300
0,02	4450	5250	3450

<b>0,025</b>	<b>5550</b>	<b>6750</b>	<b>4540</b>
<b>0,03</b>	<b>7000</b>	<b>8250</b>	<b>6000</b>
<b>0,035</b>	<b>8250</b>	<b>10000</b>	<b>7500</b>
<b>0,04</b>	<b>8550</b>	<b>10850</b>	<b>8750</b>

A estos datos de fuerza son necesarios pasarlos a unidades de Newton (N) para los cuales se los debe multiplicar por (9.80665). Realizando esto obtenemos la siguiente tabla

**TABLA 17**

**CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/7)**

<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>14715</b>	<b>14224,5</b>	<b>5395,5</b>
<b>24034,5</b>	<b>25113,6</b>	<b>13243,5</b>
<b>34825,5</b>	<b>35610,3</b>	<b>22563</b>
<b>43654,5</b>	<b>51502,5</b>	<b>33844,5</b>
<b>54445,5</b>	<b>66217,5</b>	<b>44537,4</b>
<b>68670</b>	<b>80932,5</b>	<b>58860</b>
<b>80932,5</b>	<b>98100</b>	<b>73575</b>
<b>83875,5</b>	<b>106438,5</b>	<b>85837,5</b>

Realizado esto se procedió a determinar el esfuerzo para cada uno de estos datos, sabiendo que tenemos un área de ensayo (muestras o probetas) de 2500 mm<sup>2</sup>, mediante la siguiente formula:

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

La deformación la obtuvimos al multiplicarlo por 25.4 para tenerlo en unidades de mm.

**TABLA 18**  
**ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/7)**

PROBETA G3/5/7			
DEFORMACIÓN (mm)	ESFUERZO1 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO2 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO3 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
0,127	5,886	5,6898	2,1582
0,254	9,6138	10,04544	5,2974
0,381	13,9302	14,24412	9,0252
0,508	17,4618	20,601	13,5378
0,635	21,7782	26,487	17,81496
0,762	27,468	32,373	23,544
0,889	32,373	39,24	29,43
1,016	33,5502	42,5754	34,335

Para los siguientes ensayos de la experimentación se procede a realizarlo en otro tipo de máquina de ensayo la cual nos das valores de lbf.



**FIGURA 4.2 MÁQUINA DE ENSAYOS (Lbf)**

En esta máquina se obtuvieron los siguientes resultados en Lbf.

**TABLA 19**

**DATOS DE PROBETA G3/5/14**

DEFORMACIÓN	PROBETA1	PROBETA2	PROBETA3
-------------	----------	----------	----------

(xE-3plg)	(L <sub>bf</sub> )	(L <sub>bf</sub> )	(L <sub>bf</sub> )
0	0	0	0
0,005	2200	2700	1500
0,01	12300	8000	12500
0,015	23500	15600	22000
0,02	25000	27500	32500
0,025	30000	37000	38500
0,03	36000		41500
0,035	47000		

Como estos datos se los necesita que estén en unidades de Newton se los procede a multiplicarlos por el siguiente factor 4.4482.

**TABLA 20**

**CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/14)**

FUERZA(N)	FUERZA(N)	FUERZA(N)
0	0	0
9785,6	12009,6	6672
54710,4	35584	55600
104528	69388,8	97856
111200	122320	144560
133440	164576	171248
160128	0	184592
209056	0	0

Para el caculo del esfuerzo se procede de forma similar a la realizada con la otra maquina de ensayos.

TABLA 21

## ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/14)

DEFORMACIÓN (mm)	ESFUERZO1 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO2 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO3 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
0,127	3,91424	4,80384	2,6688
0,254	21,88416	14,2336	22,24
0,381	41,8112	27,75552	39,1424
0,508	44,48	48,928	57,824
0,635	53,376	65,8304	68,4992
0,762	64,0512	0	73,8368
0,889	83,6224	0	0

Para el siguiente día de ensayo se lo realizo de la misma manera como se procedió anteriormente con la máquina de Lbf.

Obteniendo de esta manera los siguientes resultados:

TABLA 22

## DATOS DE PROBETA G3/5/21

DEFORMACIÓN	PROBETA1 (L <sub>bf</sub> )	PROBETA2 (L <sub>bf</sub> )	PROBETA3 (L <sub>bf</sub> )
0	0	0	0
0,005	4000	1800	4800

0,01	12200	5800	13800
0,015	16600	13700	22300
0,02	23500	22800	31500
0,025	30500	29500	36000
0,03	37000	36000	37500
0,035	38500	39000	
0,04		42000	

TABLA 23

## CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/21)

FUERZA(N)	FUERZA(N)	FUERZA(N)
0	0	0
17792	8006,4	21350,4
54265,6	25798,4	61382,4
73836,8	60937,6	99190,4
104528	101414,4	140112
135664	131216	160128
164576	160128	166800
171248	173472	0
	186816	

TABLA 24

## ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/21)

DEFORMACIÓN (mm)	ESFUERZO1 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO2 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO3 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
0,127	7,1168	3,20256	8,54016
0,254	21,70624	10,31936	24,55296
0,381	29,53472	24,37504	39,67616
0,508	41,8112	40,56576	56,0448
0,635	54,2656	52,4864	64,0512
0,762	65,8304	64,0512	66,72
0,889	68,4992	69,3888	0

<b>1,016</b>	<b>74,7264</b>
--------------	----------------

Para el día 28 de ensayo se lo realizo de la misma manera como se procedió anteriormente con la máquina de Lbf.

De lo cual se obtuvo los siguientes resultados:

**TABLA 25**

**DATOS DE PROBETA G3/5/28**

<b>DEFORMACIÓN</b>	<b>PROBETA1 (L<sub>bf</sub>)</b>	<b>PROBETA2 (L<sub>bf</sub>)</b>	<b>PROBETA3 (L<sub>bf</sub>)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0,005</b>	<b>1000</b>	<b>2300</b>	<b>1500</b>
<b>0,01</b>	<b>2400</b>	<b>8100</b>	<b>4800</b>
<b>0,015</b>	<b>6200</b>	<b>17300</b>	<b>12800</b>
<b>0,02</b>	<b>16600</b>	<b>28000</b>	<b>21100</b>
<b>0,025</b>	<b>27500</b>	<b>39000</b>	<b>32500</b>
<b>0,03</b>	<b>34500</b>	<b>43500</b>	<b>37500</b>
<b>0,035</b>	<b>38500</b>		<b>41000</b>
<b>0,04</b>			<b>44000</b>

**TABLA 26**

**CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/5/28)**

<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>4448</b>	<b>10230,4</b>	<b>6672</b>

10675,2	36028,8	21350,4
27577,6	76950,4	56934,4
73836,8	124544	93852,8
122320	173472	144560
153456	193488	166800
171248	0	182368
		195712

TABLA 27

## ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/5/28)

DEFORMACIÓN (mm)	ESFUERZO1 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO2 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO3 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
0,127	1,7792	4,09216	2,6688
0,254	4,27008	14,41152	8,54016
0,381	11,03104	30,78016	22,77376
0,508	29,53472	49,8176	37,54112
0,635	48,928	69,3888	57,824
0,762	61,3824	77,3952	66,72
0,889	68,49	0	72,9472
1,016			78,2848

Con el análisis ya desarrollado tenemos los siguientes datos de esfuerzos últimos a la ruptura

TABLA 28

**ESFUERZOS ÚLTIMOS EXPERIMENTALES DE CADA DÍA CON EL  
5% DE LIMOLITA**

<b>DÍAS</b>	<b>7</b>	<b>14</b>	<b>21</b>	<b>28</b>
<b>Muestra 1</b>	33,5502	83,6224	68,4992	68,4992
<b>Muestra 2</b>	42,5754	65,8304	74,7264	77,3952
<b>Muestra 3</b>	34,335	73,8368	66,72	78,2848

Para la validación se procedió a realizarlo desde el día 4 para lo cual se usó la máquina de ensayos de Kgf con lo que se obtuvo los siguientes resultados.

**TABLA 29**

**DATOS DE PROBETA G3/7.5/4**

<b>DEFORMACIÓN</b>	<b>PROBETA1 K<sub>gf</sub></b>	<b>PROBETA2 K<sub>gf</sub></b>	<b>PROBETA3 K<sub>gf</sub></b>
0	0	0	0
0,005	1050	470	350
0,01	2300	1050	800
0,015	3580	2200	1850
0,02	5000	3600	3250
0,025	7100	5150	4500
0,03	8750	7000	6250
0,035	10900	8650	8000
0,04	12150	10750	9950
0,045		12600	11750
0,05		14500	13350
0,055		16400	15250
0,06		17500	

El procedimiento para obtener la fuerza en N en la validación es el mismo que se detallo anteriormente para la maquina de ensayo de Kgf para la experimentación.

**TABLA 30**

**CONVERCIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/4)**

<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>10300,5</b>	<b>4610,7</b>	<b>3433,5</b>
<b>22563</b>	<b>10300,5</b>	<b>7848</b>
<b>35119,8</b>	<b>21582</b>	<b>18148,5</b>
<b>49050</b>	<b>35316</b>	<b>31882,5</b>
<b>69651</b>	<b>50521,5</b>	<b>44145</b>
<b>85837,5</b>	<b>68670</b>	<b>61312,5</b>
<b>106929</b>	<b>84856,5</b>	<b>78480</b>
<b>119191,5</b>	<b>105457,5</b>	<b>97609,5</b>
	<b>123606</b>	<b>115267,5</b>
	<b>142245</b>	<b>130963,5</b>
	<b>160884</b>	<b>149602,5</b>
	<b>171675</b>	<b>0</b>

Para el cálculo del esfuerzo es de la misma manera que se detallo anteriormente en la experimentación.

**TABLA 31**

**ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/4)**

<b>DEFORMACIÓN (mm)</b>	<b>ESFUERZO1 (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>ESFUERZO2 (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>ESFUERZO3 (N/mm<sup>2</sup>)</b>
0	0	0	0
0,127	4,1202	1,84428	1,3734
0,254	9,0252	4,1202	3,1392
0,381	14,04792	8,6328	7,2594
0,508	19,62	14,1264	12,753
0,635	27,8604	20,2086	17,658
0,762	34,335	27,468	24,525
0,889	42,7716	33,9426	31,392
1,016	47,6766	42,183	39,0438
1,143	0	49,4424	46,107
1,27	0	56,898	52,3854
1,397	0	64,3536	59,841
1,524	0	68,67	0

Para el día 11 de la validación se procedió a realizarlo con la misma máquina de Kgf dando los siguientes resultados.

**TABLA 32**

**DATOS DE PROBETA G3/7.5/11**

<b>DEFORMACIÓN</b>	<b>PROBETA1 K<sub>gf</sub></b>	<b>PROBETA2 K<sub>gf</sub></b>	<b>PROBETA3 K<sub>gf</sub></b>
0	0	0	0
0,005	200	300	200
0,01	400	900	350
0,015	850	1800	750
0,02	1500	3100	1450
0,025	2700	4750	2250
0,03	3800	6500	3500
0,035	5250	7900	4800
0,04	6650	9500	6000
0,045	8150	11500	7500
0,05	10000	13650	8750
0,055	11500	15750	10150
0,06	13000	18500	11400
0,065	14500	19250	12750
0,07	16000		14150
0,075	17000		15150
0,08			16100

Las fuerzas y los esfuerzos se obtienen de manera similar a la detallada anteriormente en la experimentación.

**TABLA 33**

**CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/11)**

<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>	<b>FUERZA(N)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>1962</b>	<b>2943</b>	<b>1962</b>
<b>3924</b>	<b>8829</b>	<b>3433,5</b>
<b>8338,5</b>	<b>17658</b>	<b>7357,5</b>
<b>14715</b>	<b>30411</b>	<b>14224,5</b>
<b>26487</b>	<b>46597,5</b>	<b>22072,5</b>
<b>37278</b>	<b>63765</b>	<b>34335</b>
<b>51502,5</b>	<b>77499</b>	<b>47088</b>
<b>65236,5</b>	<b>93195</b>	<b>58860</b>
<b>79951,5</b>	<b>112815</b>	<b>73575</b>
<b>98100</b>	<b>133906,5</b>	<b>85837,5</b>
<b>112815</b>	<b>154507,5</b>	<b>99571,5</b>
<b>127530</b>	<b>181485</b>	<b>111834</b>
<b>142245</b>	<b>188842,5</b>	<b>125077,5</b>
<b>156960</b>	<b>0</b>	<b>138811,5</b>

166770	0	148621,5
0	0	157941

TABLA 34

## ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/11)

DEFORMACIÓN (mm)	ESFUERZO1 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO2 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO3 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
0,127	0,7848	1,1772	0,7848
0,254	1,5696	3,5316	1,3734
0,381	3,3354	7,0632	2,943
0,508	5,886	12,1644	5,6898
0,635	10,5948	18,639	8,829
0,762	14,9112	25,506	13,734
0,889	20,601	30,9996	18,8352
1,016	26,0946	37,278	23,544
1,143	31,9806	45,126	29,43
1,27	39,24	53,5626	34,335
1,397	45,126	61,803	39,8286
1,524	51,012	72,594	44,7336
1,651	56,898	75,537	50,031
1,778	62,784	0	55,5246

<b>1,905</b>	<b>66,708</b>	<b>0</b>	<b>59,4486</b>
<b>2,032</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>63,1764</b>

Para el día 18 de la validación se procedió a realizarlo con la máquina de Lbf.

Dando los siguientes resultados:

**TABLA 35**

**DATOS DE PROBETA G3/7.5/18**

<b>DEFORMACIÓN</b>	<b>PROBETA1 L<sub>bf</sub></b>	<b>PROBETA2 L<sub>bf</sub></b>	<b>PROBETA3 L<sub>bf</sub></b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>0,005</b>	<b>4700</b>	<b>600</b>	<b>1900</b>
<b>0,01</b>	<b>16400</b>	<b>2300</b>	<b>7700</b>
<b>0,015</b>	<b>22800</b>	<b>10300</b>	<b>18800</b>
<b>0,02</b>	<b>33000</b>	<b>22600</b>	<b>27000</b>
<b>0,025</b>	<b>40000</b>	<b>32500</b>	<b>34000</b>
<b>0,03</b>	<b>44500</b>	<b>42500</b>	<b>39000</b>
<b>0,035</b>		<b>51000</b>	

El cálculo de la fuerza y del esfuerzo se lo realiza de manera similar a la de la experimentación

TABLA 36

## CONVERSIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/18)

FUERZA(N)	FUERZA(N)	FUERZA(N)
0	0	0
20905,6	2668,8	8451,2
72947,2	10230,4	34249,6
101414,4	45814,4	83622,4
146784	100524,8	120096
177920	144560	151232
197936	189040	173472
	226848	

TABLA 37

## ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/18)

DEFORMACIÓN (mm)	ESFUERZO1 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO2 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO3 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
0,127	8,36224	1,06752	3,38048
0,254	29,17888	4,09216	13,69984
0,381	40,56576	18,32576	33,44896
0,508	58,7136	40,20992	48,0384
0,635	71,168	57,824	60,4928
0,762	79,1744	75,616	69,3888
0,889		90,7392	

Para el día 25 de la validación se procedió a realizarlo con la máquina de Lbf.

Dando los siguientes resultados

TABLA 38

## DATOS DE PROBETA G3/7.5/25

DEFORMACIÓN	PROBETA G3/7,5/25		
	PROBETA1 L <sub>bf</sub>	PROBETA2 L <sub>bf</sub>	PROBETA3 L <sub>bf</sub>
0	0	0	0
0,005	2000	4100	7900
0,01	8300	17200	19500
0,015	16700	26500	32000
0,02	26000	36500	42500
0,025	34000	44000	43500
0,03	41000	46500	
0,035	44000		

El cálculo de la fuerza y del esfuerzo se lo realiza de manera similar a la de la experimentación con la maquina de Lbf.

TABLA 39

## CONVERCIÓN DE FUERZAS A NEWTON (MUESTRAS G3/7.5/25)

FUERZA(N)	FUERZA(N)	FUERZA(N)
0	0	0
8896	18236,8	35139,2
36918,4	76505,6	86736
74281,6	117872	142336
115648	162352	189040
151232	195712	193488
182368	206832	0
195712	0	0

TABLA 40

### ESFUERZOS OBTENIDOS (MUESTRAS G3/7.5/25)

DEFORMACIÓN (mm)	ESFUERZO1 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO2 (N/mm <sup>2</sup> )	ESFUERZO3 (N/mm <sup>2</sup> )
0	0	0	0
0,127	3,5584	7,29472	14,05568
0,254	14,76736	30,60224	34,6944
0,381	29,71264	47,1488	56,9344
0,508	46,2592	64,9408	75,616
0,635	60,4928	78,2848	77,3952
0,762	72,9472	82,7328	0
0,889	78,2848	0	0

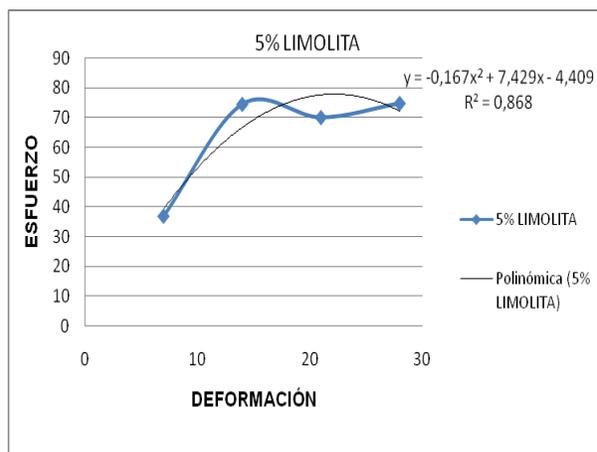
Con el análisis ya desarrollado tenemos los siguientes datos de esfuerzos últimos a la ruptura

**TABLA 41**

### ESFUERZOS ÚLTIMOS DE VALIDACIÓN DE CADA DÍA CON EL 7.5% DE LIMOLITA

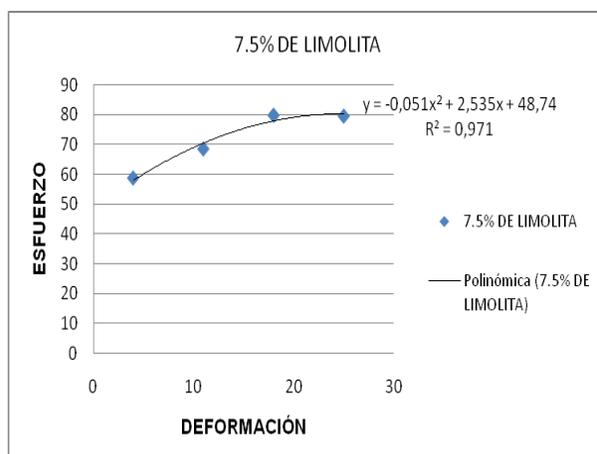
DÍAS	4	11	18	25
Muestra 1	47,6766	66,708	79,1744	78,2848
Muestra 2	68,67	75,537	90,7392	82,7328
Muestra 3	59,841	63,1764	69,3888	77,3952

Para predecir los esfuerzos que tenderemos en determinado día nos valdremos de la siguiente ecuación que proviene del siguiente gráfico:



**FIGURA 4.3 RESULTADOS CON EL 5% DE LIMOLITA**

Con la ecuación que se indica en la figura se puede predecir el esfuerzo que tendrá en un determinado día del experimento para un 5% de limolita, esta ecuación es válida solo hasta el día 28.



**FIGURA 4.4 RESULTADOS CON EL 7.5% DE LIMOLITA**

Con la ecuación que se indica en la figura se puede predecir el esfuerzo que se obtiene en un determinado día con el 7.5% de limolita. Esta ecuación es valida solo hasta el día 25

## 4.2 Análisis estadístico

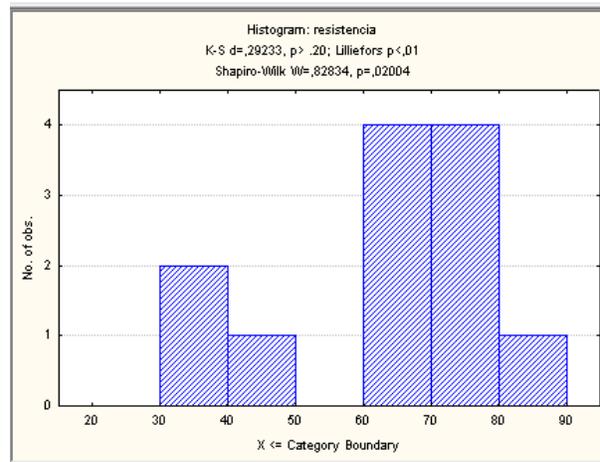
Para el análisis individual vamos a analizarlo por el método de la varianza (ANOVA) para lo cual suponemos que:

Las K poblaciones son independientes y normalmente distribuidas con medias  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ , y varianza común  $\sigma^2$ .

Para este análisis se hace la siguiente hipótesis:

- $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$
- $H_1$ : Al menos una de las medias no son iguales

**Análisis experimental** Para saber si los datos están normalizados usamos el programa estadística el cual nos da el siguiente resultado para los datos experimentales.



**FIGURA 4.5 NO NORMALIZADO EXPERIMENTO**

Como se puede observar en el recuadro anterior de la distribución normal vemos que los datos no están normalizados ya que tenemos un  $p=0.020$  y este es menor que  $P=0.05$ .

Por lo tanto procedemos a normalizar estos datos para aquello usamos un artificio matemático que es de elevar todos los datos a cualquier potencia de tal forma que los nuevos datos si estén normalizados.

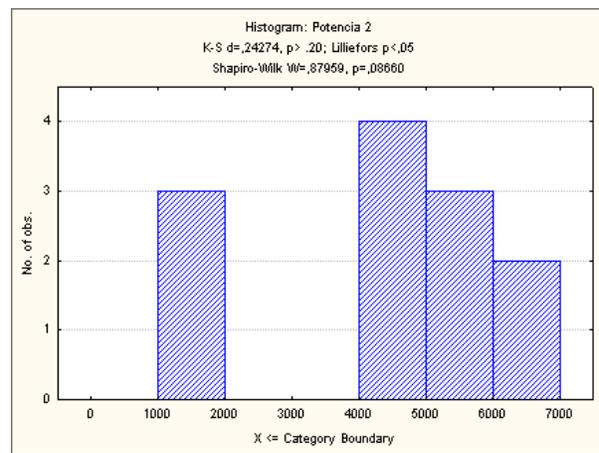
Al proceder a elevar a una potencia los datos y analizarlos con estadística vemos que estos datos se normalizan al elevarlo a la segunda potencia.

**TABLA 42**

**DATOS EXPERIMENTALES (NORMALIZADOS)**

DÍAS	7	14	21	28
0	1125,61592	6992,70578	4692,1404	4692,1404
0	1812,66469	4333,64156	5584,03486	5990,01698
0	1178,89223	5451,87303	4451,5584	6128,50991

Estos datos al analizarlo usando el programa estadístico nos da el siguiente gráfico:



**FIGURA 4.6 NORMALIZADO EXPERIMENTO**

En este análisis obtenemos un  $P= 0.08660$  con lo cual podemos decir que nuestros datos ahora si están normalizados ya que este es mayor a 0.05.

Sabiendo esto procedemos a realizar el siguiente análisis en una hoja de cálculo de EXCEL dado como resultado lo siguiente:

**TABLA 43**

**ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS**

<b>Análisis de varianza de un factor</b>				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
<b>Columna 1</b>	<b>3</b>	<b>4117,17283</b>	<b>1372,39094</b>	<b>146090,317</b>
<b>Columna 2</b>	<b>3</b>	<b>16778,2204</b>	<b>5592,74013</b>	<b>1782538,28</b>
<b>Columna 3</b>	<b>3</b>	<b>14727,7337</b>	<b>4909,24455</b>	<b>355976,391</b>
<b>Columna 4</b>	<b>3</b>	<b>16810,6673</b>	<b>5603,55576</b>	<b>627803,547</b>

TABLA 44

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS

ANÁLISIS DE VARIANZA			
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>
Entre grupos	36879590,7	3	12293196,9
Dentro de los grupos	5824817,07	8	728102,134
Total	42704407,8	11	

TABLA 45

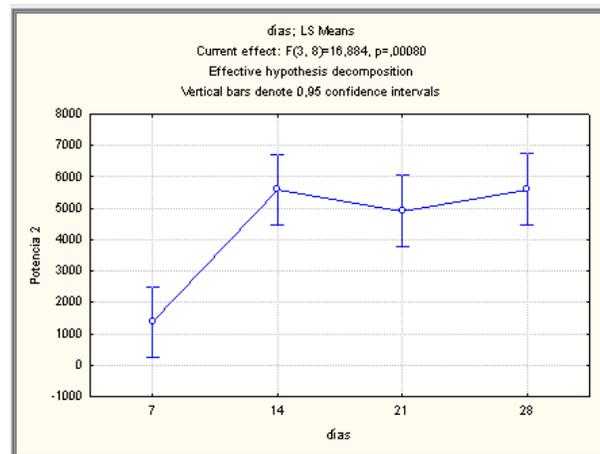
## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS

ANÁLISIS DE VARIANZA			
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	16,8838908	0,00080392	4,06618056
Dentro de los grupos			

Tomando en cuenta la distribución F la cual calculamos teóricamente de la tabla A6 con (3,8) grados de libertad obtenemos el siguiente valor de F teórico es igual a 4.07.

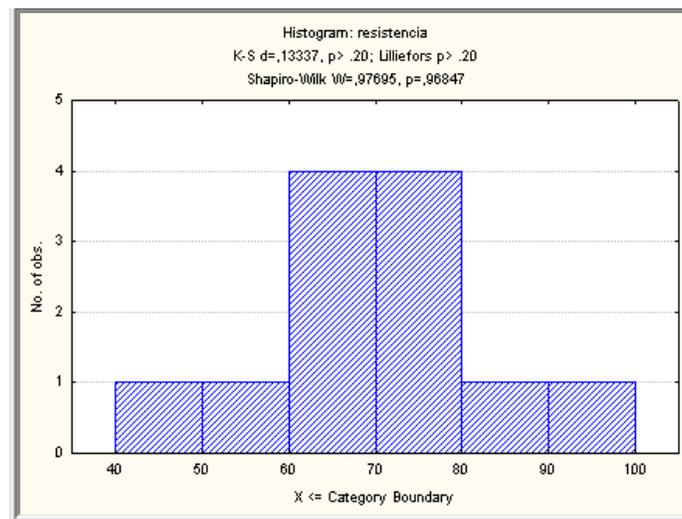
Como el F calculado (16.8838908) es mayor para el F teórico y además  $P < 0.05$  entonces se dice que mi hipótesis  $H_0$  Es rechazada. Por lo tanto se dice que al menos una de las medias no son iguales. Es decir que entre las mezclas no existe una misma resistencia media a la compresión, por lo tanto se dice que conforme pasa los días por lo menos una varía su resistencia a la compresión.

Lo dicho anteriormente también se lo puede visualizar mediante el grafico que se obtiene con el uso del programa statistica la cual se indica a continuación:



**FIGURA 4.7 DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS EXPERIMENTALES**

**Validación:** Para el análisis de validación realizamos el mismo procedimiento ya antes detallado en la experimentación siendo los resultados los siguientes:



**FIGURA 4.8 NORMALIZADO VALIDACIÓN**

En el grafico de normalización se observa que el P obtenido es igual a 0.9684 por lo tanto decimos que nuestros datos si están normalizados.

Realizando el análisis de varianza en una hoja de EXCEL se obtiene los siguientes resultados:

TABLA 46

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS (VALIDACIÓN)

Análisis de varianza de un factor				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Columna 1	3	176,1876	58,7292	111,107785
Columna 2	3	205,4214	68,4738	40,5346453
Columna 3	3	239,3024	79,7674667	114,223691
Columna 4	3	238,4128	79,4709333	8,17767765

TABLA 47

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS (VALIDACIÓN)

ANÁLISIS DE VARIANZA			
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>
Entre grupos	912,267882	3	304,089294
Dentro de los grupos	548,087599	8	68,5109498
Total	1460,35548	11	

TABLA 48

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MUESTRAS (VALIDACIÓN)

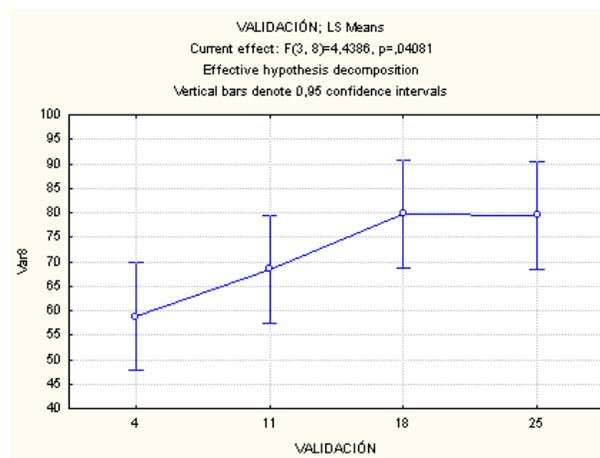
ANÁLISIS DE VARIANZA			
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	4,43855025	0,04080724	4,06618056
Dentro de los grupos			

Tomando en cuenta la distribución F la cual calculamos teóricamente de la tabla A6 con (3,8) grados de libertad obtenemos el siguiente valor.

F teórico es igual a 4.07.

Como el F calculado es mayor para el F teórico y además  $P < 0.05$  entonces se dice que mi hipótesis  $H_0$  Es rechazada. Por lo tanto se dice que al menos una de las medias no son iguales. Es decir que entre las mezclas no existe una misma resistencia media a la compresión.

Lo dicho anteriormente también se puede ver gráficamente:



**FIGURA 4.9 DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS (VALIDACIÓN)**

**Análisis grupal:** Para el análisis grupal necesitaremos de los esfuerzos últimos a la compresión (Esfuerzos de ruptura) para diferentes porcentajes de limolita, con este análisis estadístico podremos determinar si existe o no diferencias significativas entre estas muestras.

Los esfuerzos últimos a la compresión para los diferentes porcentajes de limolita se detallan en la siguiente tabla.

**TABLA 49**

**DATOS EXPERIMENTALES A DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMOLITA**

	Esfuerzos Ultimo a la compresión (MPa)				
	5%	10%	15%	20%	25%
7 días	35,55	57,94	49,05	48,02	49
	42,58	43,51	52,19	40,57	45,668
	34,34	46,06	55,13	40,18	56,84
14 días	83,62	45,08	50,42	43,51	50,96
	65,83	66,64	49,05	60,17	51,94
	73,83	52,92	49,44	47,04	47,824
21 días	68,49	85,23	66,7	64,9	70,23
	74,72	83,75	51,01	68,45	71,12
	66,72	92,65	48,07	68,45	79,184
28 días	68,49	70,38	54,94	60,45	39,984
	77,39	75,73	44,15	66,67	47,04
	78,28	71,26	51,01	60,45	54,88

Para analizarlo estadísticamente se utilizara ANOVA con lo cual podremos también mostrar cual de los porcentajes es el mejor tratamiento.

Para un análisis estadístico con ANOVA se debe hacer las siguientes suposiciones:

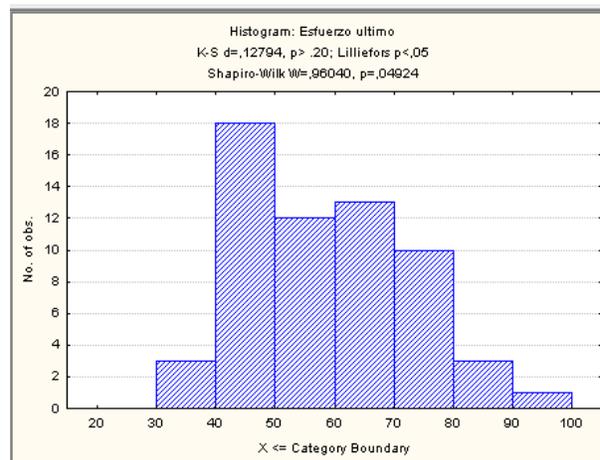
- Los datos deben de ser obtenidos aleatoriamente: Para este caso son los datos que se obtuvo en cada porcentaje.
- Se asume que las varianzas son iguales.
- Que los datos obtenidos tiene que tener una distribución NORMAL.

En todos los tratamientos tendremos el mismo número de unidades experimentales.

Aplicamos el método ANOVA factorial, ya que tenemos mas de dos factores, las variables independientes, son los días y el porcentaje, la variable independiente es el esfuerzo último.

Para comprobar que los datos tienen una distribución normal usamos el software STATISTICA, en caso de comprobarse que los datos no estén normalizados debemos de proceder a realizar algún artificio matemático con la finalidad de que los datos cumplan una distribución NORMAL.

Una vez echo estas asunciones procedemos a ingresar los datos al programa statistica, para luego proceder a hacer el respectivo análisis estadístico de los datos.



**FIGURA 4.10 GRÁFICO NORMALIZADO (GRUPAL)**

En el gráfico se puede ver que tenemos un  $P=0.04924$  por lo que nos lleva a concluir que los datos de resistencia últimos obtenidos de todas las muestras si están normalizados.

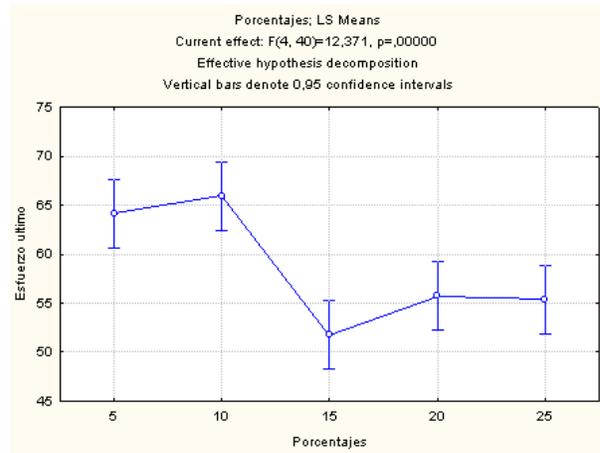
Teniendo la certeza de que mis datos ahora si están normalizados procederemos a realizar el análisis estadístico para lo cual nos valdremos del método de ANOVA, con lo que obtenemos los siguientes resultados.

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

#### FIGURA 4.11 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ANOVA

El gráfico nos dice que hay diferencias significativas entre los días, porcentajes y porcentajes/días con un  $P<0.05$ .

Esto también se lo puede determinar visualmente mediante el siguiente gráfico.



**FIGURA 4.12 DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS DEL  
 EXPERIMENTO GRUPAL**

Según el gráfico vemos que tenemos un  $P=0000$ , por lo que concluimos que si existe diferencia significativa entre los porcentajes/días de limolita. Para saber que diferencias significativas hay entre los diferentes porcentajes en relación con la resistencia mecánica a la compresión procedemos a analizarlo mediante una prueba estadística.

Una prueba, consiste en comparar al primer grupo, contra los otros restantes (suponemos que el primer grupo es el control), para esto usaremos la prueba denominada TUKEY la cual compara las medias de

cada grupo con respecto a la de control con los correspondientes intervalos de confianza.

Los datos de la prueba de TUKEY se detallan a continuación

Tukey HSD test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Administrador\Mis documentos\para análisis )														
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests														
Error: Between MS = 36,324, df = 40,000														
Cell No.	Porcentajes	Días	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
			37,487	74,427	69,977	74,720	49,170	54,980	87,210	72,457	52,124	49,638	55,260	50,000
1	5	7		0,000179	0,000186	0,000179	0,675493	0,092353	0,000179	0,000180	0,293143	0,611498	0,077061	0,556917
2	5	14	0,000179		0,999990	1,000000	0,001265	0,031340	0,523873	1,000000	0,006779	0,001632	0,038250	0,000229
3	5	21	0,000186	0,999990		0,999974	0,015789	0,247200	0,099586	1,000000	0,074135	0,020446	0,284774	0,0229
4	5	28	0,000179	1,000000	0,999974		0,001084	0,026788	0,564457	1,000000	0,005728	0,001390	0,032802	0,000229
5	10	7	0,675493	0,001265	0,015789	0,001084		0,999628	0,000179	0,003842	1,000000	1,000000	0,999131	1,000000
6	10	14	0,092353	0,031340	0,247200	0,026788	0,999628		0,000187	0,000187	0,084668	1,000000	0,999886	1,000000
7	10	21	0,000179	0,523873	0,099586	0,564457	0,000179	0,000187		0,281025	0,000180	0,000179	0,000189	0,000229
8	10	28	0,000180	1,000000	1,000000	1,000000	0,003842	0,084668	0,281025		0,020511	0,005031	0,101279	0,000229
9	15	7	0,293143	0,006779	0,074135	0,005728	1,000000	1,000000	0,000180	0,020511		1,000000	1,000000	1,000000
10	15	14	0,611498	0,001632	0,020446	0,001390	1,000000	0,999886	0,000179	0,005031	1,000000		0,999699	1,000000
11	15	21	0,077061	0,038250	0,284774	0,032802	0,999131	1,000000	0,000189	0,101279	1,000000	0,999699		0,999699
12	15	28	0,556917	0,002037	0,025309	0,001725	1,000000	0,999963	0,000179	0,006319	1,000000	1,000000	0,999890	
13	20	7	0,999810	0,000193	0,000523	0,000191	0,998796	0,638413	0,000179	0,000239	0,930374	0,997054	0,585897	0,999699
14	20	14	0,527820	0,002294	0,028329	0,001944	1,000000	0,999981	0,000179	0,007131	1,000000	1,000000	0,999939	1,000000
15	20	21	0,000229	0,993805	1,000000	0,990377	0,065813	0,578811	0,025341	0,999901	0,242860	0,082585	0,631403	0,099699
16	20	28	0,001424	0,645634	0,990377	0,605190	0,446778	0,987454	0,001731	0,875891	0,831173	0,509850	0,992730	0,566917
17	25	7	0,492076	0,002662	0,032566	0,002253	1,000000	0,999992	0,000179	0,008278	1,000000	1,000000	0,999972	1,000000
18	25	14	0,527820	0,002294	0,028329	0,001944	1,000000	0,999981	0,000179	0,007131	1,000000	1,000000	0,999939	1,000000
19	25	21	0,000180	1,000000	1,000000	1,000000	0,002100	0,050374	0,402278	1,000000	0,011408	0,002740	0,060951	0,000229
20	25	28	0,886043	0,000508	0,005467	0,000442	1,000000	0,988519	0,000179	0,001336	0,999966	1,000000	0,981083	1,000000

FIGURA 4.13 PRUEBA DE TUKEY

Tukey HSD test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Administrador\Mis documentos\para anal													
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests													
Error: Between MS = 36,324, df = 40,000													
Cell No.	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}	{13}	{14}	{15}	{16}	{17}	{18}	{19}	{20}
1	0,000180	0,293143	0,611498	0,077061	0,556917	0,999810	0,527820	0,000229	0,001424	0,492076	0,527820	0,000180	0,886043
2	1,000000	0,006779	0,001632	0,038250	0,002037	0,000193	0,002294	0,993805	0,645634	0,002662	0,002294	1,000000	0,000508
3	1,000000	0,074135	0,020446	0,284774	0,025309	0,000523	0,028329	1,000000	0,990377	0,032566	0,028329	1,000000	0,005467
4	1,000000	0,005728	0,001390	0,032802	0,001725	0,000191	0,001944	0,990377	0,605190	0,002253	0,001944	1,000000	0,000442
5	0,003842	1,000000	1,000000	0,999131	1,000000	0,998796	1,000000	0,065813	0,446778	1,000000	1,000000	0,002100	1,000000
6	0,084668	1,000000	0,999886	1,000000	0,999963	0,638413	0,999981	0,578811	0,987454	0,999992	0,999981	0,050374	0,988519
7	0,281025	0,000180	0,000179	0,000189	0,000179	0,000179	0,000179	0,025341	0,001731	0,000179	0,000179	0,402278	0,000179
8		0,020511	0,005031	0,101279	0,006319	0,000239	0,007131	0,999901	0,875891	0,008278	0,007131	1,000000	0,001336
9	0,020511		1,000000	1,000000	1,000000	0,930374	1,000000	0,242860	0,831173	1,000000	1,000000	0,011408	0,999966
10	0,005031	1,000000		0,999699	1,000000	0,997054	1,000000	0,082585	0,509850	1,000000	1,000000	0,002740	1,000000
11	0,101279	1,000000	0,999699		0,999890	0,585897	0,999939	0,631403	0,992730	0,999972	0,999939	0,060951	0,981083
12	0,006319	1,000000	1,000000	0,999890		0,994299	1,000000	0,099478	0,564133	1,000000	1,000000	0,003437	1,000000
13	0,000239	0,930374	0,997054	0,585897	0,994299		0,992120	0,002099	0,030478	0,988519	0,992120	0,000207	0,999992
14	0,007131	1,000000	1,000000	0,999939	1,000000	0,992120		0,109614	0,593350	1,000000	1,000000	0,003879	1,000000
15	0,999901	0,242860	0,082585	0,631403	0,099478	0,002099	0,109614		0,999974	0,123406	0,109614	0,998799	0,025043
16	0,875891	0,831173	0,509850	0,992730	0,564133	0,030478	0,593350	0,999974		0,629518	0,593350	0,764798	0,235576
17	0,008278	1,000000	1,000000	0,999972	1,000000	0,988519	1,000000	0,123406	0,629518		1,000000	0,004509	1,000000
18	0,007131	1,000000	1,000000	0,999939	1,000000	0,992120	1,000000	0,109614	0,593350	1,000000		0,003879	1,000000
19	1,000000	0,011408	0,002740	0,060951	0,003437	0,000207	0,003879	0,998799	0,764798	0,004509	0,003879		0,000772
20	0,001336	0,999966	1,000000	0,981083	1,000000	0,999992	1,000000	0,025043	0,235576	1,000000	1,000000	0,000772	

**FIGURA 4.14 PRUEBA DE TUKEY**

Según la comparación que se hace mediante esta prueba de tukey nos podemos dar cuenta que la mayor diferencia significativa entre el esfuerzo promedio de las muestras se dan entre el 15% de limolita con la del 10% a los 21 días de prueba, dándonos un  $P = 0.000179$  entre el 15% a los 14 días con la del 10% a los 21 días por tanto para el experimento se obtienen mejores resultados con el 10% de limolita.

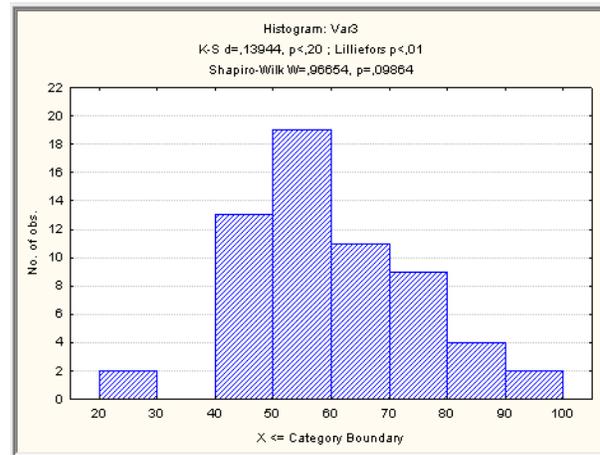
## VALIDACIÓN

Como ya se explico anteriormente, comenzamos con conocer si los datos obtenidos cumplen o no una distribución NORMAL.

**TABLA 50**

**DATOS DE VALIDACIÓN A DIFERENTES PORCENTAJES DE LIMOLITA**

		Esfuerzos Ultimo a la compresión (MPa)				
		7,5%	12,5%	17,5%	22,5%	27,5%
4 días		47,6766	64,68	44,15	44,296	51,156
		68,67	61,94	41,59	44,1	45,08
		59,841	71,93	48,07	51,94	56,84
11 días		66,708	50,96	53,37	61,74	50,96
		75,537	65,66	52,39	49,98	54,88
		63,1764	52,92	45,32	52,92	50,96
18 días		79,1744	81,07	54,15	70,23	29,008
		90,7392	91,76	53,96	66,67	29,4
		69,3888	84,64	53,96	75,57	43,12
25 días		78,2848	75,73	48,07	64,9	51,5648952
		82,7328	77,51	47,09	59,56	65,7897128
		77,3952	85,53	59,84	47,12	53,3430072



**FIGURA 4.15 NORMALIZACIÓN DE LA VALIDACIÓN (GRUPAL)**

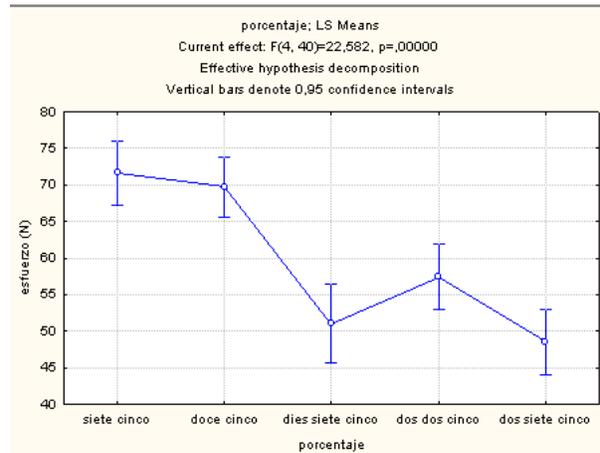
En el grafico se puede observar que tenemos un  $P=0.9864$  por lo tanto se puede decir con toda seguridad que los datos si están normalizados ya que el P obtenido es mayor a 0.05.

Con esta verificación procedemos a analizar los datos con ANOVA con lo cual obtenemos el siguiente resultado.

Univariate Tests of Significance for esfuerzo (N) (Shee Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition)					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
<b>Intercept</b>	197691,8	1	197691,8	3456,828	0,000000
porcentaje	5165,8	4	1291,4	22,582	0,000000
días	1581,4	3	527,1	9,217	0,000093
porcentaje*días	3067,0	12	255,6	4,469	0,000162
Error	2287,6	40	57,2		

**FIGURA 4.16 PRUEBA ANOVA VALIDACIÓN (GRUPAL)**

Según el análisis hecho vemos que el P es menor que 0.05 por lo tanto hay diferencias significativas.



**FIGURA 4.17 DIFERENCIA ENTRE LAS MEDIAS VALIDACIÓN  
(GRUPAL)**

Según estos resultados se dice que si hay diferencias significativas entre las muestras. Por lo que se procede a analizar cual de estos porcentajes guardan relación. Para saber que tan diferentes son los diferentes porcentajes/días en relación con la resistencia mecánica a la compresión procedemos a analizarlo mediante la prueba de tukey

Tukey HSD test; variable esfuerzo (N) (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Administrador\Mis documentos\análisi grupal vali													
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests													
Error: Between MS = 57,189, df = 40,000													
Cell No.	porcentaje	dias	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}	{9}	{10}	{11}
1	siete cinco	4	58,729	68,474	79,767	79,471	56,858	56,513	85,823	79,590	48,070	50,360	54,023
2	siete cinco	11	0,985213	0,985213	0,123245	0,136903	1,000000	1,000000	0,010158	0,131276	0,999272	0,997275	0,999999
3	siete cinco	18	0,123245	0,941784	0,123245	0,136903	1,000000	0,019629	0,052945	0,999966	1,000000	0,073780	0,003524
4	siete cinco	25	0,136903	0,953577	1,000000	1,000000	0,022669	0,059606	0,999931	1,000000	0,079978	0,004037	0,021101
5	doce cinco	4	1,000000	0,836277	0,019629	0,022669	1,000000	1,000000	0,000949	0,021400	0,999893	0,999552	1,000000
6	doce cinco	11	1,000000	0,908125	0,052945	0,059606	1,000000	1,000000	0,003685	0,056847	0,999972	0,999957	1,000000
7	doce cinco	18	0,010158	0,386262	0,999966	0,999931	0,000949	0,003685	1,000000	0,012149	0,000330	0,001208	0,0
8	doce cinco	25	0,131276	0,949065	1,000000	1,000000	0,021400	0,056847	0,999948	0,077437	0,003822	0,020036	0,0
9	dies siete cinco	4	0,999272	0,700104	0,073780	0,079978	0,999893	0,999972	0,012149	0,077437	1,000000	1,000000	1
10	dies siete cinco	11	0,997275	0,314826	0,003524	0,004037	0,999552	0,999957	0,000330	0,003822	1,000000	1,000000	1
11	dies siete cinco	18	0,999999	0,697708	0,018524	0,021101	1,000000	1,000000	0,001208	0,020036	1,000000	1,000000	1
12	dies siete cinco	25	0,999694	0,441333	0,006429	0,007365	0,999982	0,999999	0,000488	0,006975	1,000000	1,000000	1,000000
13	dos dos cinco	4	0,908701	0,096974	0,000743	0,000833	0,942835	0,985366	0,000198	0,000795	1,000000	1,000000	0,999568
14	dos dos cinco	11	1,000000	0,783144	0,026865	0,030495	1,000000	1,000000	0,001756	0,028973	0,999999	1,000000	1,000000
15	dos dos cinco	18	0,900144	1,000000	0,994105	0,995997	0,570889	0,712383	0,638609	0,995315	0,518489	0,150813	0,442078
16	dos dos cinco	25	1,000000	0,942349	0,069319	0,077747	1,000000	1,000000	0,005035	0,074261	0,999914	0,999905	1,000000
17	dos siete cinco	4	0,999035	0,376588	0,004783	0,005483	0,999899	0,999992	0,000393	0,005189	1,000000	1,000000	1,000000
18	dos siete cinco	11	0,999911	0,505600	0,008452	0,009666	0,999997	1,000000	0,000598	0,009159	1,000000	1,000000	1,000000
19	dos siete cinco	18	0,026876	0,000412	0,000179	0,000179	0,018624	0,066751	0,000179	0,000179	0,979644	0,472148	0,166063
20	dos siete cinco	25	1,000000	0,928844	0,061753	0,069384	1,000000	1,000000	0,004399	0,066227	0,999946	0,999895	1,000000

FIGURA 4.18 PRUEBA DE TUKEY

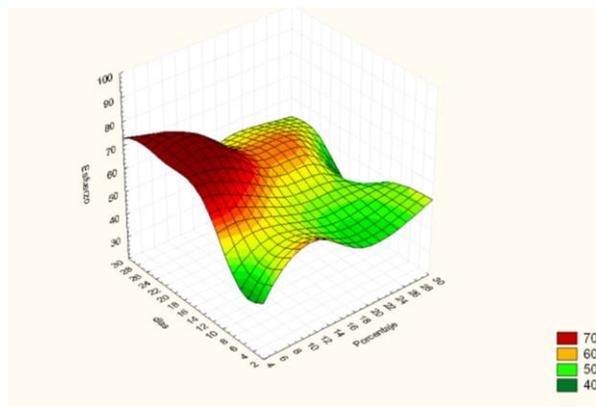
Tukey HSD test; variable esfuerzo (N) (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Administrador\Mis documentos\análisi grupal													
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests													
Error: Between MS = 57,189, df = 40,000													
Cell No.	{8}	{9}	{10}	{11}	{12}	{13}	{14}	{15}	{16}	{17}	{18}	{19}	{20}
1	0,131276	0,999272	0,997275	0,999999	0,999694	0,908701	1,000000	0,900144	1,000000	0,999035	0,999911	0,026876	1,000000
2	0,949065	0,700104	0,314826	0,697708	0,441333	0,096974	0,783144	1,000000	0,942349	0,376588	0,505600	0,000412	0,928844
3	1,000000	0,073780	0,003524	0,018524	0,006429	0,000743	0,026865	0,994105	0,069319	0,004783	0,008452	0,000179	0,061753
4	1,000000	0,079978	0,004037	0,021101	0,007365	0,000833	0,030495	0,995997	0,077747	0,005483	0,009666	0,000179	0,069384
5	0,021400	0,999893	0,999552	1,000000	0,999982	0,942835	1,000000	0,570889	1,000000	0,999899	0,999997	0,018624	1,000000
6	0,056847	0,999972	0,999957	1,000000	0,999999	0,985366	1,000000	0,712383	1,000000	0,999992	1,000000	0,066751	1,000000
7	0,999948	0,012149	0,000330	0,001208	0,000488	0,000198	0,001756	0,638609	0,005035	0,000393	0,000598	0,000179	0,004399
8	0,077437	0,077437	0,003822	0,020036	0,006975	0,000795	0,028973	0,995315	0,074261	0,005189	0,009159	0,000179	0,066227
9	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999999	0,518489	0,999914	1,000000	1,000000	0,979644	0,999946
10	0,003822	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,150813	0,999805	1,000000	1,000000	0,472148	0,999895
11	0,020036	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999568	1,000000	0,442078	1,000000	1,000000	1,000000	0,166063	1,000000
12	0,006975	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999999	1,000000	0,231471	0,999991	1,000000	1,000000	0,341046	0,999996
13	0,000795	1,000000	1,000000	0,999568	0,999999	1,000000	0,998175	0,038331	0,971616	1,000000	0,999992	0,840392	0,978413
14	0,028973	0,999999	1,000000	1,000000	1,000000	0,998175	1,000000	0,534478	1,000000	1,000000	1,000000	0,123286	1,000000
15	0,995315	0,518489	0,150813	0,442078	0,231471	0,038331	0,534478	1,000000	0,779758	0,188592	0,277362	0,000241	0,751443
16	0,074261	0,999914	0,999805	1,000000	0,999991	0,971616	1,000000	0,779758	1,000000	0,999955	0,999999	0,050926	1,000000
17	0,005189	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,188592	0,999955	1,000000	1,000000	0,402856	0,999978
18	0,009159	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999992	1,000000	0,277362	0,999999	1,000000	1,000000	0,288270	0,999999
19	0,000179	0,979644	0,472148	0,166063	0,341046	0,840392	0,123286	0,000241	0,050926	0,402856	0,288270	0,057306	0,0
20	0,066227	0,999946	0,999895	1,000000	0,999996	0,978413	1,000000	0,751443	1,000000	0,999978	0,999999	0,057306	0,0

FIGURA 4.19 PRUEBA DE TUKEY

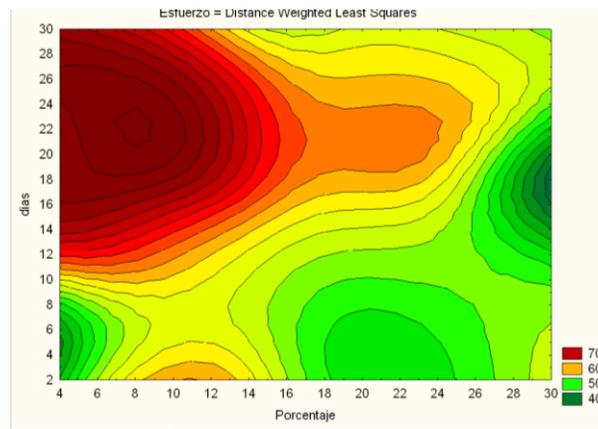
Al analizar los datos obtenidos en la validación vemos que los valores más significativos entre los porcentajes están entre el bloque del 27.5%

con el de 12.5 a los 18 días. Siendo la muestra del de 12.5% la mas significativa.

Al analizarlo con todos los porcentajes y días de experimentación se puede obtener una imagen representativa con el uso del programa statistica, cuya imagen es la siguiente.



**FIGURA 4.20 ANÁLISIS EN TERCERA DIMENSION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA**



**FIGURA 4.21 ANÁLISIS EN TERCERA DIMENSION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA**

Estas imágenes nos dicen que mientras mayor es el porcentaje de limlita, menor es el esfuerzo último a la compresión.

**Comparación del mejor porcentaje de limolita con la del cemento tipo I:**

Para proceder a realizar el análisis de comparación entre el cemento Portland tipo I con el mejor tratamiento de la mezcla de limolita que es del 10 al 12.5 %, con los datos obtenidos se procede de la siguiente manera:

TABLA 51

## DATOS EXPERIMENTALES DEL CEMENTO I, IV Y DE LA MEZCLA

Días	10%	Tipo1	Tipo4
7	57,94	76,9588581	49,9569829
7	43,51	76,9588581	45,24406
7	46,06	79,5241534	48,0718137
14	45,08	83,7996455	50,8995675
14	66,64	84,6547439	49,9569829
14	52,92	84,6547439	49,0143983
21	85,23	63,1531671	45,24406
21	83,75	63,1531671	40,5311371
21	92,65	71,6364283	42,4163062
28	70,38	74,3935629	40,5311371
28	75,73	73,5384644	42,4163062
28	71,26	74,3935629	42,981857
Promedios	65,9291667	75,5682796	45,6053841

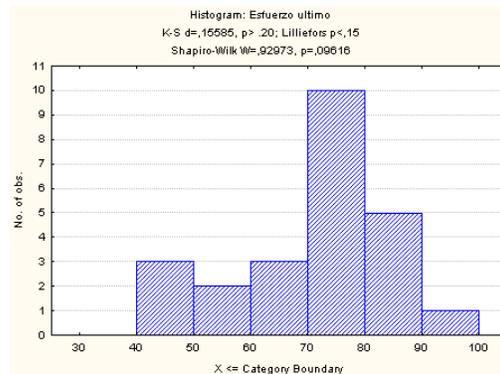
TABLA 52

## DATOS DE VALIDACIÓN DEL CEMENTO TIPO I, TIPO IV Y MEZCLA

Días	12,50%	Tipo I	Tipo 4
4	64,68	67,5527755	45,24406
4	61,94	68,4078739	39,5885525
4	71,93	76,9588581	38,6459679
11	50,96	82,9445471	42,4163062
11	65,66	82,9445471	46,1866446
11	52,92	84,6547439	42,2277893
18	81,07	83,7996455	40,5311371
18	91,76	97,4812203	44,3014754
18	84,64	82,9445471	36,7607987
25	75,73	88,0751376	46,7521953
25	77,51	81,2343502	37,3263495
25	85,53	83,7996455	44,3014754
Promedios	72,0275	81,7331577	42,0235627

Comprobamos que los datos obtenidos estén normalizados.

Como



**FIGURA 4.22 COMPARACIÓN NORMALIZADA**

Como los datos están normalizados procedemos a realizar el respectivo análisis estadístico mediante el método de ANOVA. En el cual se analizara mediante el método de Dunnett, con lo que se hará un análisis comparativo entre días: Dando los siguientes resultados.

Dunnett test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\...)  
 Probabilities for Post Hoc Tests (2-sided)  
 Error: Between MS = 29,505, df = 16,000

Cell No.	Días	Porcentaje	{1}
			77,814
1	7	0	
2	7	10	0,000055
3	14	0	0,544324
4	14	10	0,000561
5	21	0	0,081356
6	21	10	0,215207
7	28	0	0,927039
8	28	10	0,724855

**FIGURA 4.23 ANÁLISIS MEDIANTE ANOVA (DUNNETT)**

Aquí se puede observar que la mayor diferencia significativa entre las medias es en el día 7, seguido del día 14, por lo que la resistencia es superior en el cemento tipo 1 que la de la mezcla con el 10% de limolita

Tukey HSD test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Adminis...)  
 Approximate Probabilities for Post Hoc Tests  
 Error: Between MS = 29,505, df = 16,000

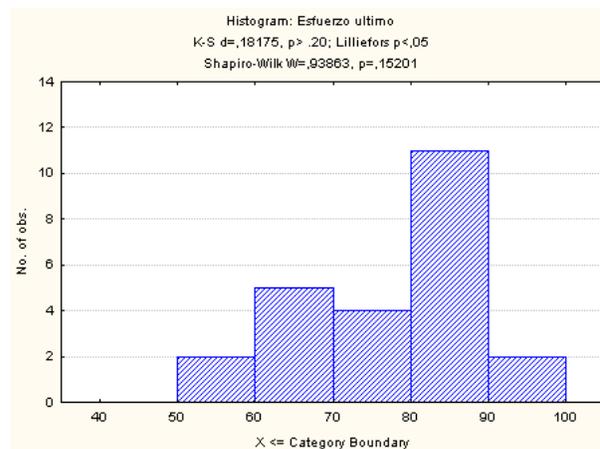
Cell No.	Porcentaje	Días	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
			77,814	84,370	65,981	74,109	49,170	54,880	87,210	72,457
1	0	7		0,807926	0,202084	0,988036	0,000320	0,001951	0,443866	0,918105
2	0	14	0,807926		0,013560	0,343733	0,000181	0,000272	0,997579	0,196314
3	0	21	0,202084	0,013560		0,609482	0,026886	0,261241	0,003970	0,816748
4	0	28	0,988036	0,343733	0,609482		0,000906	0,009394	0,125404	0,999930
5	10	7	0,000320	0,000181	0,026886	0,000906		0,890877	0,000176	0,001691
6	10	14	0,001951	0,000272	0,261241	0,009394	0,890877		0,000199	0,019299
7	10	21	0,443866	0,997579	0,003970	0,125404	0,000176	0,000199		0,064439
8	10	28	0,918105	0,196314	0,816748	0,999930	0,001691	0,019299	0,064439	

**FIGURA 4.24 ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO (TUKEY)**

Con el método de tukey se puede ver que el cemento tipo I tiene mejor resistencia que de la mezcla

Para el análisis de **validación** se procederá de manera similar a la explicada anteriormente

Comprobamos que los datos estén normalizados:



**FIGURA 4.25 DATOS NORMALIZADOS (VALIDACIÓN)**

En el gráfico se puede ver que los datos si están normalizados ya que el  $p=0.15$  que para el caso este es superior a 0.05.

Procedemos a analizarlo mediante el método de Dunnett, dando el siguiente resultado.

Dunnett test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\			
Probabilities for Post Hoc Tests (2-sided)			
Error: Between MS = 31,717, df = 16,000			
Cell No.	Dias	Porcentaje	{1}
1	4	0	70,973
2	4	doce cinco	0,828110
3	11	0	0,072778
4	11	doce cinco	0,032478
5	18	0	0,010259
6	18	doce cinco	0,027453
7	25	0	0,051026
8	25	doce cinco	0,317076

**FIGURA 4.26 ANÁLISIS VALIDACIÓN (DUNNETT)**

El gráfico nos dice que las mayores diferencias significativas entre las mezclas están en el día 18.

Tukey HSD test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Adminis										
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests										
Error: Between MS = 31,717, df = 16,000										
Cell No.	Porcentaje	Días	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	0	4	70,973	83,515	<b>88,075</b>	84,370	66,183	56,513	85,823	79,590
2	0	11	0,183613	0,183613	<b>0,030810</b>	0,134492	0,960256	0,089661	0,076935	0,584914
3	0	18	<b>0,030810</b>	0,969209	0,969209	0,999999	<b>0,028009</b>	<b>0,000622</b>	0,999492	0,986485
4	0	25	0,134492	0,999999	0,990283	0,990283	<b>0,004167</b>	<b>0,000240</b>	0,999568	0,601934
5	doce cinco	4	0,960256	<b>0,028009</b>	<b>0,004167</b>	<b>0,019602</b>		0,452462	0,999977	0,960684
6	doce cinco	11	0,089661	<b>0,000622</b>	<b>0,000240</b>	<b>0,000486</b>	0,452462		<b>0,010643</b>	0,133986
7	doce cinco	18	0,076935	0,999492	0,999568	0,999977	<b>0,010643</b>	<b>0,000345</b>		0,863979
8	doce cinco	25	0,584914	0,986485	0,601934	0,960684	0,133986	<b>0,002588</b>	0,863979	

**FIGURA 4.27 ANÁLISIS VALIDACIÓN (TUKEY)**

De acuerdo a la gráfica la mayor desviación entre las medias se originan en el día 11 teniendo la mejor resistencia el cemento tipo I.

#### **Análisis con el cemento portland tipo IV:**

Para realizar el análisis se procederá hacer mediante el método de tukey.

Tukey HSD test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Adminis										
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests										
Error: Between MS = 27,895, df = 16,000										
Cell No.	Porcentaje	Días	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
1	0	7	47,758	49,957	42,731	41,976	49,170	54,880	87,210	72,457
2	0	14	0,999438	0,999438	0,930668	0,870163	0,999970	0,715318	0,000175	0,000768
3	0	21	0,930668	0,701553	0,701553	0,598756	0,999999	0,937278	0,000176	0,001796
4	0	28	0,870163	0,598756	1,000000		1,000000	0,800413	0,158216	0,000175
5	10	7	0,999970	0,999999	0,800413	0,705922		0,117374	0,000175	0,000214
6	10	14	0,715318	0,937278	0,158216	0,117374	0,876809		0,876809	0,000175
7	10	21	0,000175	0,000176	0,000175	0,000175	0,000175	0,000191		0,054071
8	10	28	0,000768	0,001796	0,000237	0,000214	0,001305	0,015532	0,054071	

**FIGURA 4.28 ANÁLISIS VALIDACIÓN tipo IV (TUKEY)**

Aquí se indica que hay una diferencia significativa entre el 0% con el de 10% en los días 21 y 28 por tanto nos indica que nuestra mezcla es mejor en estos días.

Dunnnett test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\				
Probabilities for Post Hoc Tests (2-sided)				
Error: Between MS = 27,895, df = 16,000				
Cell No.	Días	Porcentaje	{1}	
1	7	0	47,758	
2	7	10	0,999604	
3	14	0	0,994013	
4	14	10	0,436105	
5	21	0	0,752306	
6	21	10	0,000007	
7	28	0	0,636032	
8	28	10	0,000196	

**FIGURA 4.29 ANÁLISIS VALIDACIÓN TIPO IV (DUNNETT)**

Mediante el método de dunnnett nos dice que el mejor porcentaje es el del 10%.

### Análisis con el cemento portland tipo IV (validación):

Para el proceso de validación se procede de manera similar a la ya detallada anteriormente.

Tukey HSD test, variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\Adminis  
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests  
Error: Between MS = 25.365, df = 16,000

Cell No.	Porcentaje	Días	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	0	4	41,160	43,610	40,531	42,793	66,183	56,513	85,623	79,590
2	0	11	0,998465	1,000000	0,999892	0,000471	0,030090	0,000175	0,000175	0,000175
3	0	18	0,998465	0,993704	0,999999	0,001128	0,090962	0,000175	0,000175	0,000175
4	0	25	0,999892	0,999999	0,999067	0,000396	0,022427	0,000175	0,000175	0,000175
5	doce cinco	4	0,000471	0,001128	0,000396	0,000822		0,063425	0,000175	0,000175
6	doce cinco	11	0,030090	0,090962	0,022427	0,063425	0,326426		0,004064	0,072920
7	doce cinco	18	0,000175	0,000175	0,000175	0,000175	0,004064	0,000209		0,000209
8	doce cinco	25	0,000175	0,000176	0,000175	0,000175	0,072920	0,000925	0,789271	

**FIGURA 4.30 ANÁLISIS VALIDACIÓN TIPO IV(TUKEY)**

Según la gráfica la mayor diferencia entre las medias se encuentra en los días 4 y 18.

Dunnnett test; variable Esfuerzo ultimo (Sheet1 in Imported from C:\  
 Probabilities for Post Hoc Tests (2-sided)  
 Error: Between MS = 25,385, df = 16,000

Cell No.	Días	Porcentaje	{1}				
1	4	0	41,160				
2	4	doce cinco	0,000104				
3	11	0	0,985840				
4	11	doce cinco	0,009990				
5	18	0	0,999999				
6	18	doce cinco	0,000007				
7	25	0	0,998654				
8	25	doce cinco	0,000007				

**FIGURA 4.31 ANÁLISIS VALIDACIÓN TIPO (DUNNETT)**

Según el análisis estadístico realizado tenemos que: la mayor diferencia significativa entre las medias se encuentran en los días 4, 18, y 25, con una probabilidad menor que 0.05, por tanto nuestra mezcla tiene mayor resistencia a la compresión que la del cemento portland tipo IV

### 4.3 Ajuste y verificación del modelo.

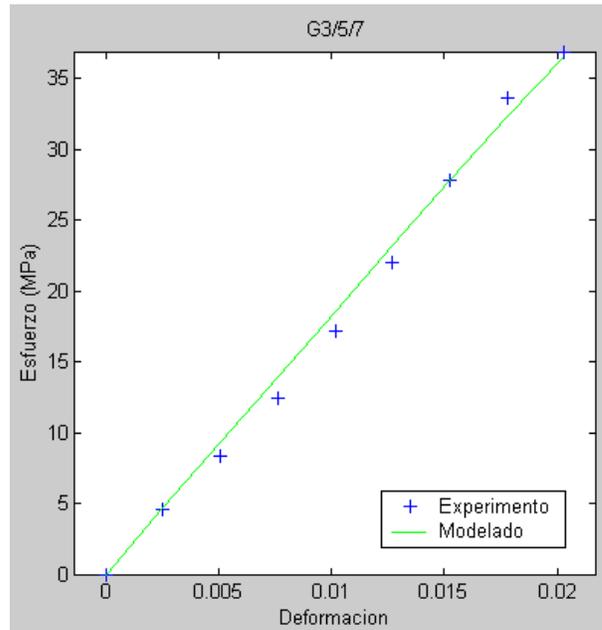
Para realizar el respectivo análisis de modelación nos valemos del programa ya desarrollado en MATLAB, dando de esta manera los siguientes datos para cada día de experimentación.

Partiendo con los siguientes datos experimentales para el programa tenemos que:

**TABLA 53**

**CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO A LOS  
7DÍAS**

<b>m</b>	<b>0,00017887</b>
<b>a</b>	<b>0,25</b>
<b>E prom</b>	<b>1828,11</b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>29,45616</b>



**FIGURA 4.32 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 7 DÍAS**

Al realizar las respectivas iteraciones en  $a$  y en  $m$  para que de esta manera nuestro modelo se ajuste a nuestro experimento tenemos que ahora nuestros nuevos datos de  $a$  y  $m$  que son:

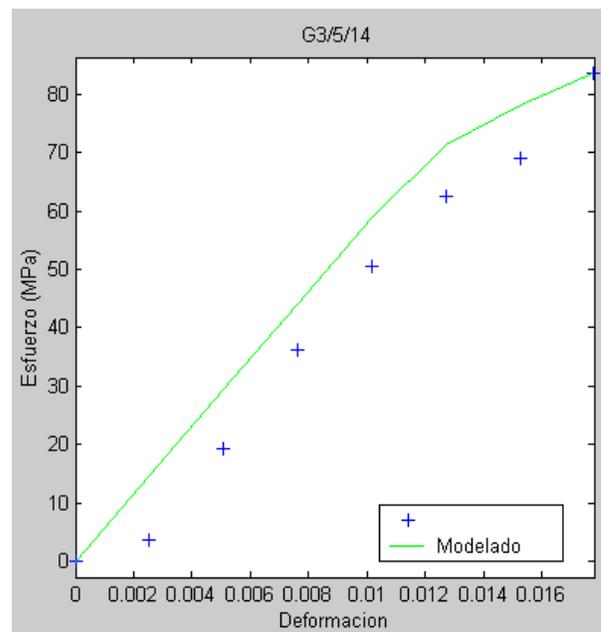
$$a=1.5$$

$$m=0.0168873$$

Para el día de experimentación 14 iniciamos con los siguientes datos:

**TABLA 54**  
**CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO A LOS**  
**14DÍAS**

m	0,0033243
a	0,25
E prom	5784,73
$\sigma_y$	66,89792



**FIGURA 4.33 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 14 DÍAS**

Haciendo las respectivas iteraciones tenemos que los nuevos  $a$  y  $m$  son:

$$a=0.99$$

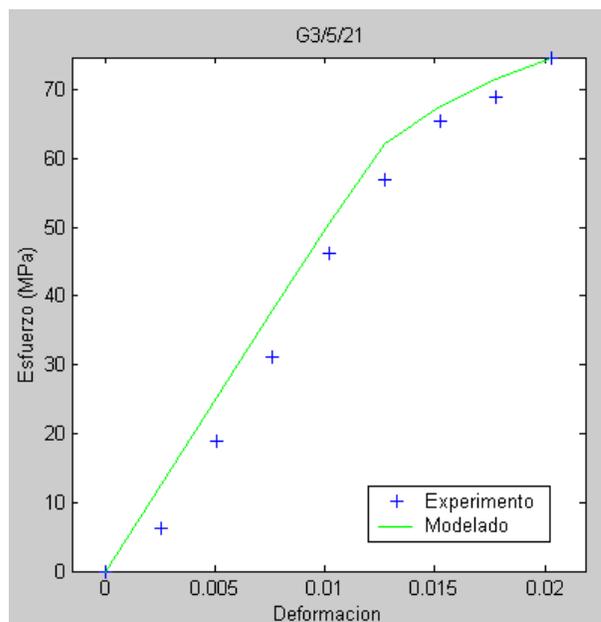
$$m=0.08824299$$

Para el día de experimentación 21 iniciamos con los siguientes datos:

**TABLA 55**

**CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO A LOS  
21DÍAS**

<b>m</b>	<b>0,00532984</b>
<b>a</b>	<b>0,25</b>
<b>E prom</b>	<b>4985,03</b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>59,78112</b>



**FIGURA 4.34 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 21 DÍAS**

Haciendo las respectivas iteraciones tenemos que los nuevos  $a$  y  $m$  son:

$$a=0.59$$

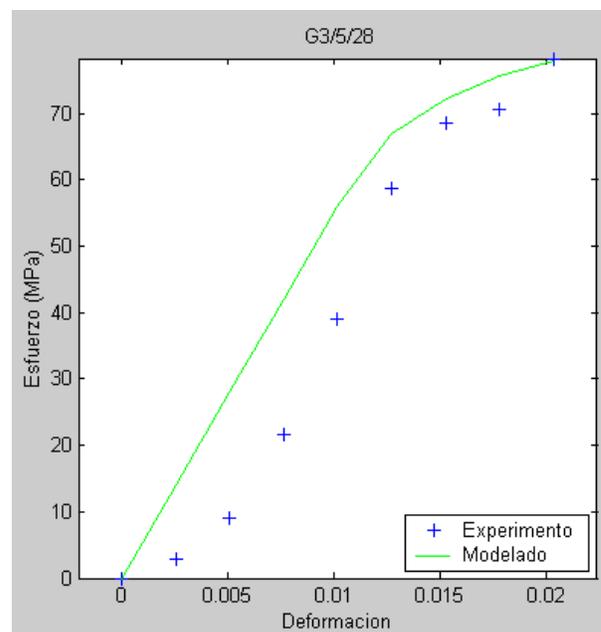
$$m=0.04329836$$

Para el día de experimentación 28 iniciamos con los siguientes datos:

TABLA 56

**CONDICIONES DE ENTRADA PARA EL EXPERIMENTO A LOS  
28DÍAS**

<b>m</b>	<b>0,00608306</b>
<b>a</b>	<b>0,25</b>
<b>E prom</b>	<b>5498,71</b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>62,62784</b>



**FIGURA 4.35 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 28 DÍAS**

Haciendo las respectivas iteraciones tenemos que los nuevos  $a$  y  $m$  son:

$$a=0.47$$

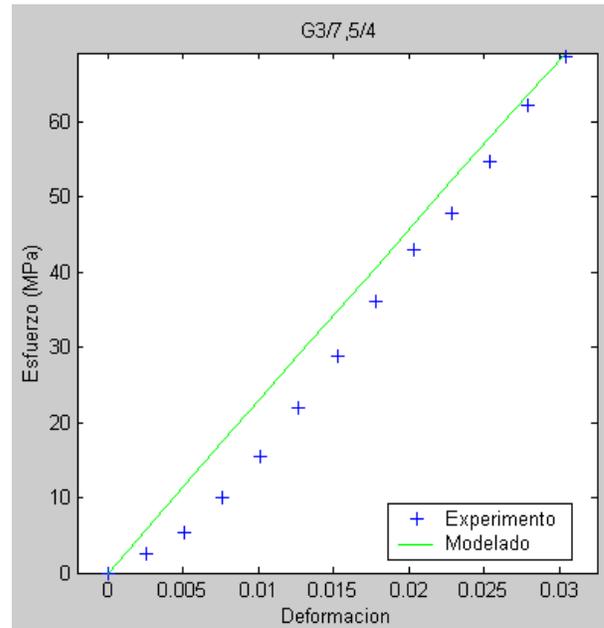
$$m=0.02083057$$

Para el día de validación 4 iniciamos con los siguientes datos:

#### **TABLA 57**

#### **CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS 4DÍAS**

<b>m</b>	<b>0,00040482</b>
<b>a</b>	<b>0,25</b>
<b>E prom</b>	<b>2283,28</b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>54,936</b>



**FIGURA 4.36 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 4 DÍAS**

Haciendo las respectivas iteraciones tenemos que los nuevos  $a$  y  $m$  son:

$$a=0.9$$

$$m=0.00404821$$

Para el día de validación 11 iniciamos con los siguientes datos:

TABLA 58

CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS  
11DÍAS

m	0,00721166
a	0,25
E prom	1889,91
$\sigma_y$	50,54112

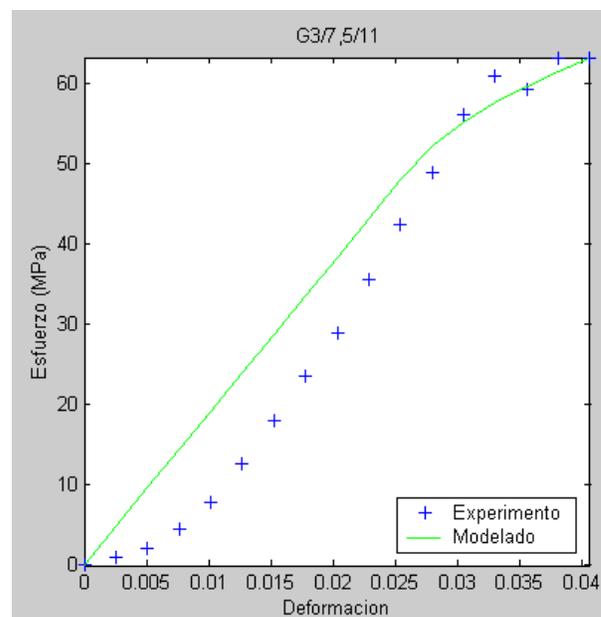


FIGURA 4.37 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 11 DÍAS

Haciendo las respectivas iteraciones tenemos que los nuevos  $a$  y  $m$  son:

$$a=0.57$$

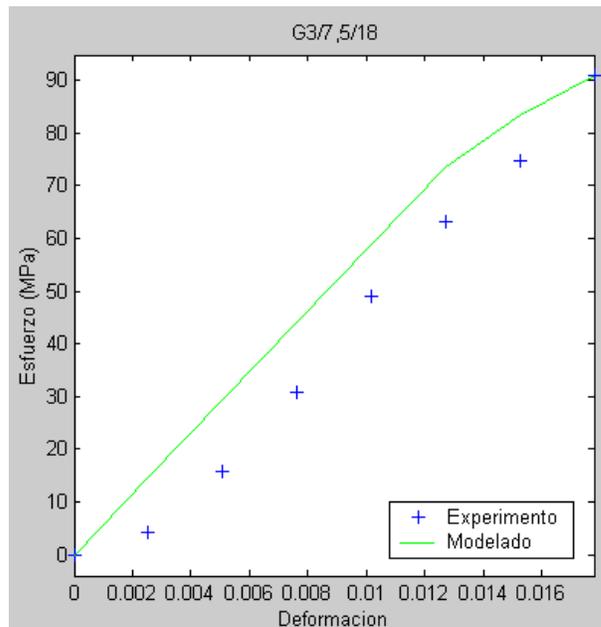
$$m=0.07211662$$

Para el día de validación 18 iniciamos con los siguientes datos:

**TABLA 59**

**CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS  
18DÍAS**

<b>m</b>	<b>0,00212562</b>
<b>a</b>	<b>0,25</b>
<b>E prom</b>	<b>5796,41</b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>72,59136</b>



**FIGURA 4.38 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 18 DÍAS**

Haciendo las respectivas iteraciones tenemos que los nuevos  $a$  y  $m$  son:

$$a=0.75$$

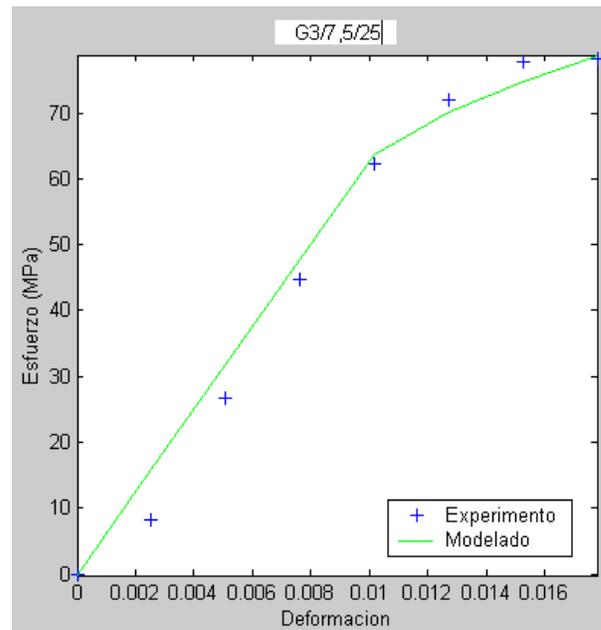
$$m=0.02125619$$

Para el día de validación 25 iniciamos con los siguientes datos:

TABLA 60

**CONDICIONES DE ENTRADA PARA LA VALIDACIÓN A LOS  
25DÍAS**

<b>m</b>	<b>0,00530447</b>
<b>a</b>	<b>0,25</b>
<b>E prom</b>	<b>6275,07</b>
<b><math>\sigma_y</math></b>	<b>62,62784</b>



**FIGURA 4.39 MODELACIÓN MATEMÁTICA A LOS 25 DÍAS**

Haciendo las respectivas iteraciones tenemos que los nuevos  $a$  y  $m$  son:

$$a=0.68$$

$$m=0.05304465$$

**TABLA 61**

**RESUMEN DE LOS VALORES EXPERIMENTALES Y LOS ENCONTRADOS MEDIANTE ITERACIONES**

EXPERIMENTO 5%LIMOLITA						
	m	a	E promedio	$\sigma_y$	mf	af
G3/5/7	0,00017887	0,25	1828,11	29,45616	0,0168873	1,5
G3/5/14	0,0033243	0,25	5784,73	66,89792	0,08824299	0,99
G3/5/21	0,00532984	0,25	4985,03	59,78112	0,04329836	0,59
G3/5/28	0,00608306	0,25	5498,71	62,62784	0,02083057	0,47
Prom.	0,00372902		4524,145	54,69076	0,04231481	0,8875

**TABLA 62**

**RESUMEN DE LOS VALORES DE VALIDACIÓN Y LOS ENCONTRADOS MEDIANTE ITERACIONES**

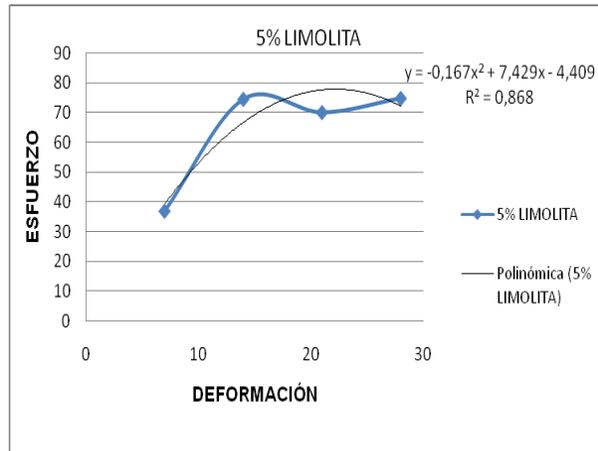
EXPERIMENTO 7,5%LIMOLITA						
	m	a	E promedio	$\sigma_y$	mf	af
G3/7,5/4	0,0004048	0,25	2283,28	54,936	0,00404821	0,9
G3/7,5/11	0,0072117	0,25	1889,91	50,54112	0,07211662	0,57
G3/7,5/18	0,0021256	0,25	5796,41	72,59136	0,02125619	0,75
G3/7,5/25	0,0053045	0,25	6275,07	62,62784	0,05304465	0,68
	0,0037616		4061,1675	60,17408	0,037616418	0,725



# CAPITULO 5

## 1. CONCLUSIONES

La mezcla a la cual realizamos el correspondiente análisis fue la del cemento portland tipo I con un determinado porcentaje de puzolana que fue limolita con lo cual se obtuvo diferentes resultados a los cuales se procedió a realizar el correspondiente análisis estadístico y de modelación que para el caso se analizaron de forma grupal e individual dando las siguientes conclusiones:



**FIGURA 5.1 RESULTADOS CON EL 5% DE LIMOLITA**

En la gráfica se puede apreciar que en los primeros días el esfuerzo a la compresión uniaxial aumenta pero conforme pasa los días este tiende a bajar esto se debe a varias causas que se detallan a continuación:

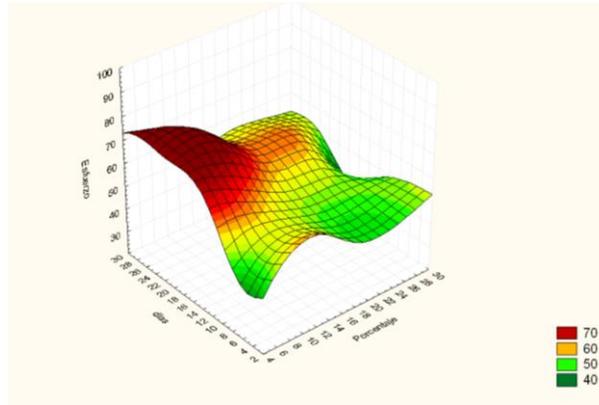
- La humedad relativa del ambiente en la cual se realizó la prueba variaba de experimento a experimento, pero al sacar los promedios vemos que tenemos 68.2 y 72.8 para el experimento y validación respectivamente, para los cuales vemos que estos datos si cumplen con la norma que dice que el experimento se debe de realizar a una HR > al 50%
- La temperatura en la cual se desarrolla la fase experimental variaban de prueba a prueba, que al sacar los promedios tenemos

26°C y 25.45°C para el experimento y la validación respectivamente, que son la temperatura ambiente del lugar de desarrollo de este trabajo que corresponde a la ciudad de Guayaquil. Esta temperatura está dentro de el rango de la norma que dice, el ensayo debe ser trabajado en un ambiente que este por los 23±3°C

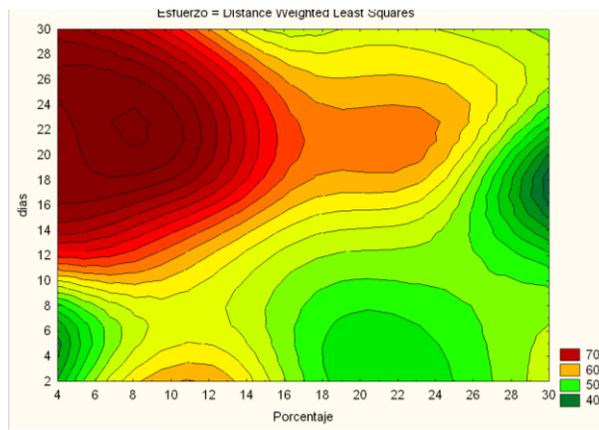
- No se conto con una máquina de compactación de las muestras.
- La toma de datos se desarrollo de manera visual con la cual se obtuvieron algunos errores al tratar los datos de las muestras.

Los resultados dados en este trabajo nos lleva a concluir que entre los diferentes porcentajes de Puzolana (Limolita) el rango de porcentaje que tiene las mejores características mecánicas de resistencia a la compresión estarán entre un rango del 10% al 12.5% de agregado de limolita al cemento portland Tipo I.

Para verlos mas detallado se usaremos el siguiente grafico:



**FIGURA 5.2 ANÁLISIS EN TERCERA DIMENCION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA**



**FIGURA 5.3 ANÁLISIS EN TERCERA DIMENCION DE TODAS LAS MUESTRAS Y PORCENTAJES DE LIMOLITA**

Este gráfico nos dice que mientras menor sea el porcentaje de limolita mayor será el esfuerzo conforme pasan los días, pero nuestro mejor

tratamiento se lo obtuvo con el rango del 10 al 12.5% de limolita en la mezcla.

El gráfico también muestra que a menor porcentaje de limolita mayor esfuerzo, esto se debe a que tenemos mayor porcentaje de cemento además nuestro análisis se lo realizo con un curado al aire por lo que a los primero días tendremos mayor porcentaje de agua y esto hace que el esfuerzo se incremente en estos días

Al realizar las respectivas comparaciones con el cemento tipo I se dedujo que este cemento tipo I (la cual se experimento con un curado al aire), tiene mejor propiedad de resistencia a la compresión que la mezcla del rango del 10 al 12.5% de limolita.

Este cemento tipo I es mejor a la de la mezcla en un 12.7575%, y para la validación en un 11.87481%.

Al analizar la mezcla con el 10% de limolita con el cemento tipoIV (la cual se realizo la experimentación con un curado al aire), vemos que nuestra

mezcla tiene mayor resistencia a la compresión. Nuestra mezcla es mejor en un 30% y para la validación en un 41.656%.

Estos datos analizados solo son validos hasta un rango de experimentación de 25 días y de validación de 28 días.

## **5.2 Recomendaciones:**

- Para que los datos obtenidos se acerquen mejor a los reales experimentales se debe de tener cuidado en el proceso de moldeo para evitar que estén presentes burbujas de aire en nuestras muestras.
- Se debe de usar algún dispositivo de compactación para eliminar tales burbujas.
- Es recomendable controlar la temperatura mediante el proceso de experimentación.
- Se obtienen errores experimentales si no se tiene cuidado con las diferentes etapas de análisis.
- Se recomienda usar equipo de seguridad durante las pruebas de compresión.

## Anexos

Aquí se adjunta los datos experimentales obtenidos en las pruebas de laboratorio para la compresión uniaxial del cemento portland tipo I y la del tipo IV, tanto datos experimentales como datos de validación.

CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE EXPERIMENTO				
DÍAS	7	14	21	28
0	76,9588581	83,7996455	63,1531671	74,3935629
0	76,9588581	84,6547439	63,1531671	73,5384644
0	79,5241534	84,6547439	71,6364283	74,3935629

CEMENTO TIPO I CURADO EN AIRE VALIDACIÓN				
DÍAS	4	11	18	25
0	67,5527755	82,9445471	83,7996455	88,0751376
0	68,4078739	82,9445471	97,4812203	81,2343502
0	76,9588581	84,6547439	82,9445471	83,7996455

CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE EXPERIMENTO				
DÍAS	7	14	21	28
0	49,9569829	50,8995675	45,24406	40,5311371
0	45,24406	49,9569829	40,5311371	42,4163062
0	48,0718137	49,0143983	42,4163062	42,981857

CEMENTO TIPO IV CURADO EN AIRE VALIDACIÓN				
DÍAS	4	11	18	25
0	45,24406	42,4163062	40,5311371	46,7521953
0	39,5885525	46,1866446	44,3014754	37,3263495
0	38,6459679	42,2277893	36,7607987	44,3014754

## BIBLIOGRAFÍA

[1](A.M. Neville , *Tecnología del concreto*, Instituto Mexicano del cemento y del concreto, Tomo I, pag. 1 - 70).

[2] (William F. Smith, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Mc Graw Hill, Tercera Edición Pag.662-665).

[3]([http://www."afcp.org.ar/anuario/proceso-cementohtm"](http://www.afcp.org.ar/anuario/proceso-cementohtm)).htm.Julio,2008).

[4]([http://"es.wikipedia.org/wiki/Puzolana"](http://es.wikipedia.org/wiki/Puzolana)).Julio.2008)

[5]([http://"katodos.com/doctos/81f459021729e3a6bf02db0430923c9b.doc"](http://katodos.com/doctos/81f459021729e3a6bf02db0430923c9b.doc) .Julio.2008) .

[6](<http://www.edafologia.ugr.es/rocas/limolita.htm>". Agosto,2008)

[7](<http://www.pdvsa.com/lexico/museo/rocas/rv-0005.htm>". Agosto,2008)

[8](<http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/moodle/mod/resource/view.php?inpopup=true&id=24504>", Octubre,2008)

[9](Irwin Miller, *Probabilidades y estadística para ingenieros*, cuarta edición, pag.353-356)

[10](Walpole Myers Mayers, *Probabilidades y Estadística para Ingenieros*, Pearson Prentice Hall. Sexta Edición pag.461-468)

[11] (J.P.B. Leitea,\* , V. Slowikb, H. Mihashia, *Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures*, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1025–1033.)

[12] ( Hani H. Nassif \*, Husam Najm, Nakin Suksawang, *Effect of pozzolanic materials and curing methods on the elastic modulus of HPC*, Cement & Concrete Composites 27 (2005) 661–670))

[13]( F.P. Ganneau a,1, F.-J. Ulm a,\* , J. Gondzio b, E.J. Garboczi c, *An algorithm for computing the compressive strength of heterogeneous cohesive-frictional materials – Application to cement paste*, Computers and Geotechnics 34 (2007) 254–266)