

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Simulación del Comportamiento del Cemento Portland Tipo I con la
adición de Zeolita 2 al 10% y Curado en Agua”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Gabriel Darío Guerrero Flores

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron de este trabajo y especialmente al Ing. Juan Carlos Pindo Director de Tesis, por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI ENAMORADA

A MI FAMILIA

DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

Gabriel Darío Guerrero Flores

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Juan Carlos Pindo
DIRECTOR DE TESIS

Dra. Cecilia Paredes V.
VOCAL

Ing. Eduardo Orcés P.
VOCAL

ABREVIATURAS

Kg/hab.	Kilogramo por habitante
SiO ₂	Óxido de Silicio
SiO ₄	Tetraóxido de Silicio
AlO ₄	Tetraóxido de Aluminio
ACI	American Concrete Institute
MPa	Mega Pascales
Kg/cm ²	Kilogramo por Centímetro Cuadrado
SI	Sistema Internacional de medidas
ASTM	American Society for Testing and Materials
in	Pulgadas

SIMBOLOGÍA

A	Área
L	Longitud
r	Radio
Φ	Diámetro
F	Fuerza de Compresión
R	Resistencia a la Compresión
t	Tiempo (días)

RESUMEN

El presente trabajo muestra las variaciones de las propiedades mecánicas del cemento Portland tipo I con la inclusión de 10% de Zeolita 2. Realizando pruebas de laboratorio se obtienen datos experimentales los cuales se los analiza mediante métodos estadísticos para su respectiva aceptación o descarte y por consiguiente llegar a los resultados del estudio. Mediante la implementación de Análisis de Elementos Finitos simularemos el comportamiento del cemento Portland tipo I bajo esfuerzos de compresión.

En Ecuador la industria del cemento en su mayor parte es liderada por una sola empresa, a pesar de este monopolio el precio del cemento es inferior en relación con otros países de la región, siendo un cemento de alta calidad y garantizado. El precio comercial en Ecuador no lo hace accesible a todos en general por lo que invertir en pequeñas construcciones no está al alcance de todos, por esta razón consumidores buscan opciones mucho más baratas utilizando materiales que no poseen la misma resistencia, durabilidad y seguridad que nos brinda el cemento.

Nuestro objetivo es identificar el efecto que tiene la introducción de un reactivo y del curado bajo agua en las propiedades mecánicas del cemento Portland tipo I, mediante pruebas de laboratorio, toma y análisis de datos y resultados.

La metodología de la presente Tesis consiste en realizar ensayos de compresión a probetas de cemento Portland tipo I con adición de Zeolita 2 al 10% durante tiempos de curado en agua de 7, 14, 21 y 28 días, para la posterior recolección de datos, obtención de resultados y comparación con resultados de probetas con diferentes concentraciones de Zeolita 2 para así obtener una simulación del comportamiento del cemento Portland tipo I en base a estos resultados experimentales.

Dentro de nuestras expectativas para los resultados que obtengamos en nuestra experimentación es de aumentar la resistencia al esfuerzo de compresión del cemento agregándole el porcentaje idóneo de Zeolita 2 sin disminuir o descompensar sus otras propiedades y con esto lograr sustituir agregados naturales por estos aditivos en beneficio de nuestro medio ambiente.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.1.1 Justificación.....	4
1.2 Hipótesis.....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6

1.4 Metodología.....	6
1.5 Estructura de la Tesis.....	8
CAPÍTULO 2	
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Características del cemento Portland tipo I.....	11
2.2 Características de la Zeolita 2.....	15
2.3 Métodos de curado del cemento.....	17
2.4 Diseño Factorial.....	21
2.5 El estado del arte de la simulación del cemento Portland tipo I.....	25
2.5.1 Uso óptimo de la puzolana natural para la resistencia máxima compresiva del concreto.....	25
2.5.2 Uso de un modelo matemático en la composición de un material compuesto.....	27
CAPÍTULO 3	
3. EXPERIMENTACIÓN.....	29
3.1 Recolección de datos.....	29
3.2 Diseño del experimento.....	30

3.2.1 Norma ASTM C 595 – 03.....	30
3.2.2 Norma ASTM C 109/C 109M – 02.....	32
3.2.3 Materiales, Herramientas y Equipos.....	36
3.3 Protocolo Experimental.....	37
3.3.1 Molienda.....	37
3.3.2 Preparación de las mezclas.....	39
3.3.3 Pruebas de Laboratorio.....	40
CAPÍTULO 4	
4. COMPARACIÓN DE CAMBIOS DE PROPIEDADES.....	42
4.1 Tabulación de datos y resultados.....	42
4.2 Análisis de resultados.....	47
4.3 Identificación de cambios de propiedades.....	49
4.3.1 Comparación Individual (Zeolita 2 al 10%).....	49
4.3.2 Comparación Grupal (Porcentajes de Zeolita 2).....	52
CAPÍTULO 5	
5. SIMULACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I.....	54

5.1 Simulación por Matlab.....	54
5.2 Análisis estadístico.....	58
5.2.1 Análisis específico – Zeolita 2 al 10%.....	59
5.2.2 Análisis Grupal – Porcentajes de Zeolita 2.....	62
CAPÍTULO 6	
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
6.1 Conclusiones.....	67
6.2 Recomendaciones.....	68
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Metodología de la Tesis.....	8
Figura 2.1 Proceso de Fabricación del Cemento.....	13
Figura 2.2 Influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión del concreto (Gonnerman y Shuman en 1928).....	20
Figura 4.1 Esfuerzo vs Deformación probeta 1 curado 7 días en agua.....	43
Figura 4.2 Esfuerzo vs Deformación linealizado, probeta 1 curado 7 días en agua.....	43
Figura 4.3 Esfuerzo vs Deformación probeta 2 curado 7 días en agua.....	45
Figura 4.4 Esfuerzo vs Deformación linealizado, probeta 2 curado 7 días en agua.....	45
Figura 4.5 Esfuerzo vs Deformación probeta 3 curado 7 días en agua.....	46
Figura 4.6 Esfuerzo vs Deformación linealizado, probeta 3 curado 7 días en agua.....	47
Figura 4.7 Esfuerzo Máximo vs Días de curado.....	48
Figura 4.8 Esfuerzo vs Deformación unitaria en los tipos de cemento a los 7 días de curado.....	50
Figura 4.9 Esfuerzo vs Días de curado en los tipos de cemento.....	51

Figura 4.10 Esfuerzo Máximos vs Días de curado en los tipos de cemento.....	53
Figura 5.1 Simulación del comportamiento del cemento I con Zeolita 2 al 10% con 7 días de curado.....	56
Figura 5.2 Simulación del comportamiento del cemento I con Zeolita 2 al 10% con 14 días de curado.....	57
Figura 5.3 Simulación del comportamiento del cemento I con Zeolita 2 al 10% con 21 días de curado.....	57
Figura 5.4 Simulación del comportamiento del cemento I con Zeolita 2 al 10% con 28 días de curado.....	58
Figura 5.5 Histograma del Modulo de Elasticidad (E) para los días de curado, distribución normal.....	59
Figura 5.6 Modulo de Elasticidad en los respectivos días de curado.....	62
Figura 5.7 Esfuerzo de Compresión con los respectivas concentraciones de Zeolita 2.....	65
Figura 5.8 Esfuerzo de Compresión en los días de curado.....	66

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Propiedades del Cemento y la Puzolana Natural.....	25
Tabla 3.1 Requerimientos Químicos del cemento.....	31
Tabla 3.2 Requerimientos Físicos del cemento.....	32
Tabla 3.3 Variaciones Permisibles de los Especímenes.....	35
Tabla 3.4 Cantidades de Materiales.....	35
Tabla 3.5 Precisión.....	36
Tabla 3.6 Tiempo de molienda por proceso.....	38
Tabla 3.7 Granulometría de los tamizados.....	38
Tabla 3.8 Proporciones de Zeolita 2, cemento y agua en la preparación de las probetas.....	40
Tabla 4.1 Datos probeta 1 curado 7 días.....	42
Tabla 4.2 Datos probeta 2 curado 7 días.....	44

Tabla 4.3 Datos probeta 3 curado 7 días.....	46
Tabla 4.4 Esfuerzos Máximos.....	48
Tabla 4.5 Comparación de Esfuerzos a los 7 días de curado.....	49
Tabla 4.6 Comparación de Esfuerzos Máximos en los tipos de cemento.....	51
Tabla 4.7 Modulo de Elasticidad (E) por cada probeta y día de curado respectivo.....	52
Tabla 4.8 Datos probeta 1 curado 14 días.....	53
Tabla 5.1 Datos promedios de las probetas para la simulación.....	55
Tabla 5.2 Datos experimentales y tabulados de W y p.....	60
Tabla 5.3 Análisis de varianza simple.....	61
Tabla 5.4 Intervalos de confianza para el modulo de elasticidad en los días de curado.....	61
Tabla 5.5 Datos ingresados al Estadística.....	61
Tabla 5.6 Análisis de varianza factorial.....	64
Tabla 5.7 Intervalos de confianza para el esfuerzo de compresión en los porcentajes de Zeolita 2.....	65
Tabla 5.8 Intervalos de confianza para el esfuerzo de compresión en los días de curado.....	66

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata de la “Simulación del Comportamiento del Cemento Portland Tipo I con adición de Zeolita 2 al 10% y Curado en Agua”, enfocado a la obtención de la máxima resistencia a la compresión del concreto resultado de la mezcla de cemento, aditivos y agua, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas, abaratar costos de producción y reducir el impacto ambiental producido al planeta por el consumo de arena de río como aditivo.

En Ecuador poseemos dos tipos de Zeolita que son ideales para este fin, es decir que poseemos la materia prima a nuestro alcance para producir un cemento de mejor calidad y durabilidad.

En este estudio se analiza morteros de concreto con adición de 10% de Zeolita 2, con un tiempo de curado en agua de 3, 7,14, 28 días, sometiéndolos a ensayos de compresión y estos resultados compararlos con un mortero de control sin existencia de Zeolita 2 y con morteros de diferentes porcentajes de Zeolita 2, para su respectiva aprobación o descarte. Esto se realiza para obtener el porcentaje idóneo de Zeolita 2 que incremente la resistencia a la compresión del concreto al máximo.

Para realizar la experimentación nos basamos en la norma estándar para los cementos hidráulicos mezclados ASTM C595 – 03 y los morteros se los elabora según la norma estándar para la prueba de la fuerza compresiva de los morteros de cemento hidráulico ASTM C 109/C 109M – 02.

La recolección de datos se efectúa a los 3, 7, 14, y 28 días, que son los tiempos de curado respectivos del concreto. Los datos obtenidos de la experimentación se analizarán en el software Statistica adquiriendo nuestro modelo estadístico. El modelo matemático resulta del análisis por Elementos Finitos teniendo como datos las dimensiones de los morteros y los esfuerzos a los que son sometidos en los ensayos.

Los resultados obtenidos de nuestros modelos servirán como un simulador del comportamiento del concreto cuando es sometido a esfuerzos de compresión y nos indicará el porcentaje óptimo de Zeolita 2 que se le agrega al Cemento Portland tipo I para lograr una resistencia a la compresión máxima.

CAPÍTULO 1

C1 Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

El cemento es un conglomerado hidráulico con propiedades adhesivas y cohesivas que le dan capacidad de unir fragmentos sólidos. Su principal uso a nivel mundial es para la construcción siendo un material de gran resistencia y de fácil manejo. El consumo mundial de cemento en el 2006 se eleva a 1200 millones de toneladas siendo China, India y Estados Unidos los mayores consumidores. A nivel de Sudamérica Brasil es el mayor consumidor de cemento por año [1].

Para el 2006 el crecimiento de consumo de cemento en Latino América fue del 4.8% siendo de esta manera la tercera región con mayor crecimiento en el consumo de cemento a nivel mundial por detrás de Asia y del Este de Europa. Los países pequeños como Ecuador tienen un consumo de cemento mucho menor, para el 2004 el consumo del Ecuador fue de 220 Kg/hab., que es aproximadamente 2 millones de toneladas anuales.

En nuestro país existen tres clases de cemento comerciales: el cemento blanco, el cemento gris y el cemento Portland tipo I. El

cemento blanco generalmente se lo usa para monumentos y detalles ornamentales ya que posee menor contenido de óxidos de hierro. El cemento gris y Portland tipo I son de de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas por calor de hidratación. Entre los usos donde se emplea este tipo de cemento están: pisos, pavimentos, casas, edificios, estructuras, elementos prefabricados, etc.

El presente estudio se basa en mejorar la resistencia a la compresión del hormigón (Cemento+Aditivo+Agua) con la adición de Zeolita 2, material puzolánico disponible en nuestro país, y analizar el tiempo de fraguado óptimo para alcanzar una resistencia máxima.

1.1.1 Justificación

Para el presente análisis se ha elegido el cemento Portland tipo I dado que es un cemento comercial en el medio y se lo utiliza para construcciones de casas, edificios y estructuras en general. Su resistencia debe cumplir con las normas de seguridad ya que se lo utiliza para estructuras donde se involucran vidas humanas y esto es el factor más importante de una estructura precautelar la seguridad de las personas.

Se busca estudiar el comportamiento del cemento una vez que se ha añadido un aditivo y determinar la modificación de una de sus propiedades que es la resistencia a la compresión.

Determinando la variación de esta propiedad del cemento se obtendrá un incremento en la demanda del mismo dando como resultado la cristalización de muchos proyectos populares como de vivienda, educación, salud, etc.

1.2 Hipótesis

La adición de Zeolita 2 en un 10% de concentración al cemento Portland tipo I y curado en agua, incrementará la resistencia uniaxial a la compresión de la mezcla de cemento, zeolita y agua.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar el efecto que tiene la adición de Zeolita 2 y del curado en agua, en la resistencia uniaxial a la compresión del hormigón a base de cemento Portland tipo I, mediante pruebas de laboratorio, toma y análisis de datos y resultados.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener la resistencia a la compresión del cemento Portland tipo I comercial para utilizarla como control en la modelación.
- Diseñar el procedimiento experimental a seguir para las pruebas de laboratorio según las normas ASTM C 595 – 03 y ASTM C 109/C 109M – 02.
- Obtener datos experimentales de la fuerza de compresión que resiste el hormigón a base de cemento Portland tipo I con adición de Zeolita 2 y curado en agua.
- Analizar los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio para obtener resultados de la experimentación.
- Comparar e identificar los cambios o variaciones producidos en el cemento Portland tipo I por la adición de Zeolita 2 en relación con el control, el cemento Portland tipo I comercial.

1.4 Metodología

La metodología de la presente Tesis está generalizada en la figura 1.1 y se detalla a continuación:

El paso 1 es obtener la resistencia a la compresión que posee el cemento Portland tipo I. Este dato ya sea teórico o experimental se lo

utilizará como control para la modelación del comportamiento del Cemento Portland tipo I sometido a fuerzas uniaxial de compresión.

El paso 2 nos indica la estructura del proceso de experimentación que debemos llevar a cabo en la toma de datos, análisis de los mismos y obtención de resultados. Este paso es indispensable para que la experimentación sea exitosa y el error experimental sea el mínimo posible, para obtener datos confiables para nuestras conclusiones.

El paso 3 es donde se realizan las pruebas de laboratorio: trituración, molienda, probetas y los ensayos de compresión a diferentes muestras de cemento Portland tipo I con Zeolita 2. El ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión.

El análisis de los datos se lo realizará en el software Statistica donde comprobaremos si los datos obtenidos en la experimentación son válidos para nuestro modelo y así validar o descartar nuestra hipótesis y por consiguiente llegar a los resultados.

En el último paso se realizará la comparación con el control y la mezcla de cemento y aditivo, se determinara las variaciones en la resistencia a la compresión y si los cambios favorecen en el comportamiento del cemento para uso estructural.

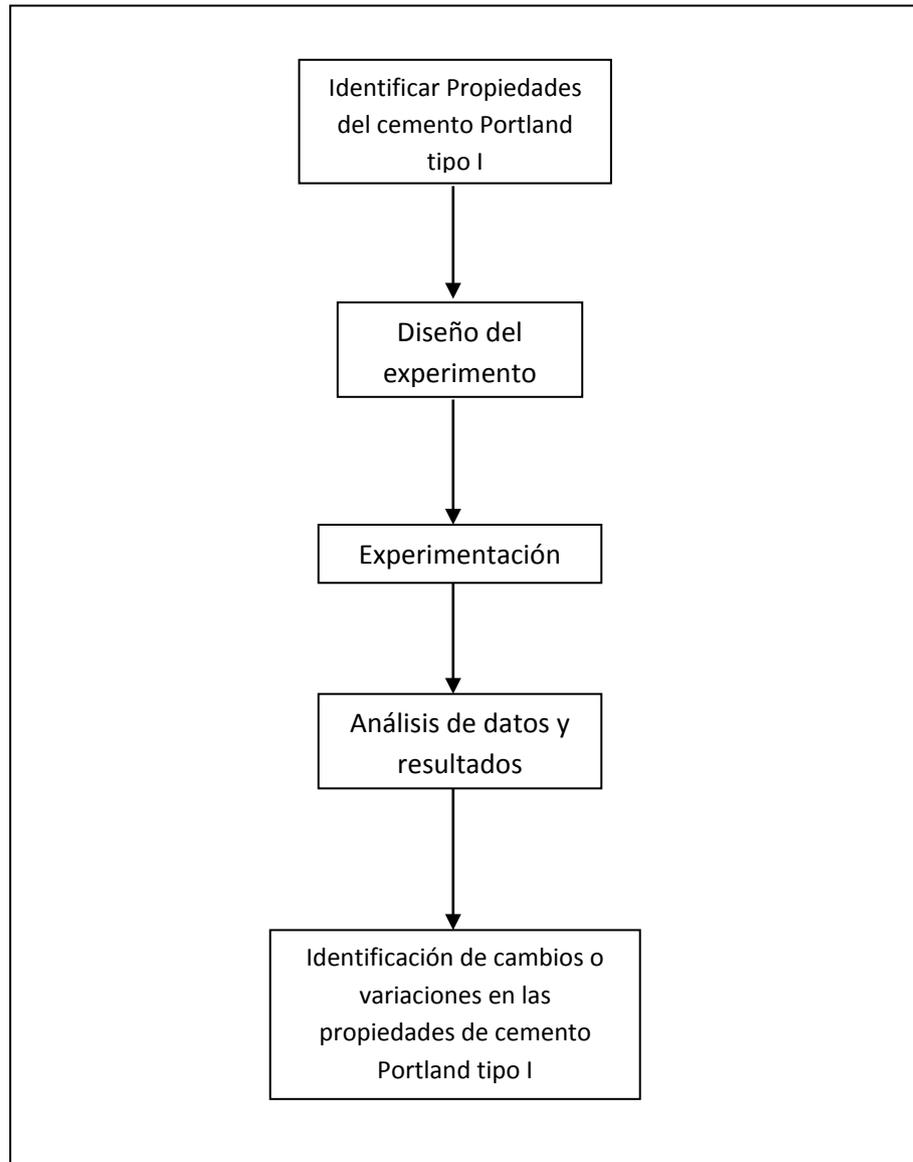


FIGURA 1.1 – METODOLOGÍA DE LA TESIS

1.5 Estructura de la Tesis

El capítulo 1 se llama Generalidades y describe la Tesis en su totalidad, la razón de ser del Tema planteando el problema y las justificaciones respectivas, el planteamiento de la hipótesis, los objetivos a cumplir

siguiendo la metodología que se propone. Detalla capítulo por capítulo la Tesis a manera de resumen.

El capítulo 2 se llama Marco Teórico y se constituye por la descripción general y específica acerca del cemento Portland tipo I, sus características, como las características del aditivo a implementar, la Zeolita 2, métodos de curado, diseño factorial y el estado del arte de la simulación del cemento Portland tipo I.

El capítulo 3 se llama Experimentación y se refiere a la adquisición de datos experimentales en el laboratorio, los que nos permiten obtener resultados de los esfuerzos que resiste cada probeta, los cuales son analizados, consiguiendo los datos necesarios para nuestro modelo.

El capítulo 4 se llama Comparación de Cambios de Propiedades y relaciona la muestra de control que es el Cemento Portland tipo I sin aditivo, el Cemento Portland tipo IV y la muestra de cemento con aditivo, las variaciones en sus resistencias a la compresión.

El capítulo 5 se llama Simulación de la Resistencia a la Compresión del Cemento Portland tipo I y nos muestran a partir de los datos experimentales la simulación del comportamiento del Cemento Portland tipo I sometido a fuerzas de compresión uniaxiales, y la valoración de los resultados obtenidos en la experimentación.

El capítulo 6 se llama Conclusiones y Recomendaciones y nos muestra el resultado final de la experimentación, si se cumplieron nuestros objetivos propuestos en el inicio del estudio y nos explica en forma resumida lo que hemos obtenido. Las recomendaciones están dirigidas a proporcionar sugerencias a la luz de los resultados, que hacer en un futuro para mejorar el método de experimentación y acciones específicas en base a las consecuencias de la experimentación.

CAPÍTULO 2

C2 Marco Teórico

2.1 Características del cemento Portland tipo I

Los cementos son conglomerantes hidráulicos, esto es, productos que mezclados con agua forman pastas que fraguan y endurecen, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto en el aire, como bajo agua. La clasificación de un cemento puede realizarse en función de:

- La naturaleza de sus componentes.
- Su categoría resistente.
- O, en su caso, por sus características especiales [1].

El cemento de Portland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto. Fue inventado en 1824 en Inglaterra por el constructor Joseph Aspdin. El nombre se debe a la semejanza en su aspecto con las rocas encontradas en la isla de Portland, una isla del condado de Dorset.

El proceso de fabricación del cemento Portland comprende cuatro etapas principales:

1. Extracción y molienda de la materia prima
2. Homogeneización de la materia prima

3. Producción del Clinker

4. Molienda de cemento.

La extracción de estos minerales se hace en canteras, que preferiblemente deben estar próximas a la fábrica, con frecuencia los minerales ya tienen la composición deseada, sin embargo en algunos casos es necesario agregar arcilla o calcáreo, o bien minerales de hierro, bauxita, u otros minerales residuales de fundiciones.

Para mejorar las características del producto final al Clinker se le agrega aproximadamente el 2 % de yeso y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

El cemento obtenido tiene una composición del tipo:

- 64% óxido de calcio
- 21% óxido de silicio
- 5,5% óxido de aluminio
- 4,5% óxido de hierro
- 2,4% óxido de magnesio
- 1,6% sulfatos
- 1% otros materiales, entre los cuales principalmente agua.

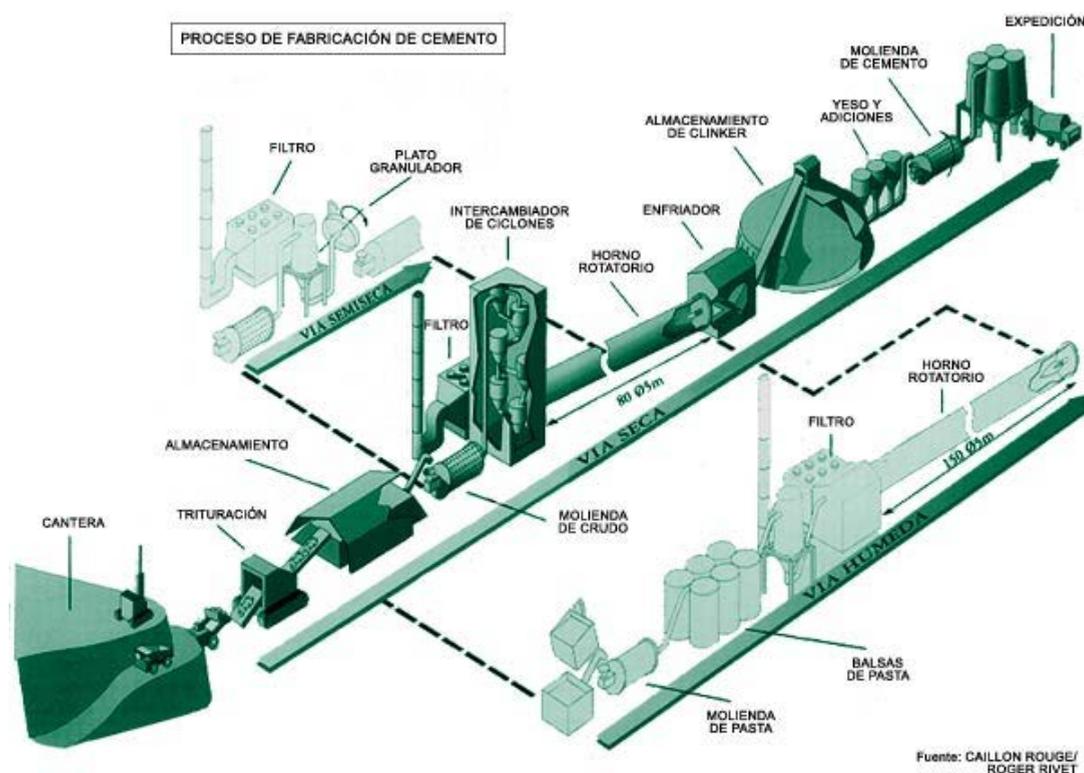


FIGURA 2.1 – PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO

Fuente: www.oficemen.com/eventos/verinformes.php?ver=6

Cuando el cemento de Portland es mezclado con el agua, el producto solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, estringita y monosulfato. El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato de tricalcio formando una estructura amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales

presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de silicio (SiO_2). Las tres reacciones generan calor [3].

El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudara a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación. Sin embargo, el calor puede ser en estructuras masivas, tales como presas, porque puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de endurecer. El cemento Portland tipo 1 un poco más de la mitad de su calor total de hidratación en tres días.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque la velocidad de terminada el tiempo de fraguado y de endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. Sin embargo, una vez que el concreto ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido. El yeso, que es adicionado en el molino de cemento durante la molienda del Clinker, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento Portland. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

La hidrólisis y la hidratación son los factores importantes en el endurecimiento del cemento, ya que los productos que resultan de la

hidratación tienen muy baja solubilidad en el agua. Si esto no fuera cierto, el concreto sería atacado rápidamente al contacto con el agua [4].

El cemento es una sustancia particularmente sensible a la acción del agua y de la humedad, por lo tanto para salvaguardar sus propiedades, se deben tener algunas precauciones muy importantes, entre otras: Inmediatamente después de que el cemento se reciba en el área de las obras si es cemento a granel, deberá almacenarse en depósitos secos, diseñados a prueba de agua, adecuadamente ventilados y con instalaciones apropiadas para evitar la absorción de humedad. Si es cemento en sacos, deberá almacenarse sobre parrillas de madera o piso de tablas; no se apilará en hileras superpuestas de más de 14 sacos de altura para almacenamiento de 30 días, ni de más de 7 sacos de altura para almacenamientos hasta de 2 meses. Para evitar que el cemento envejezca indebidamente, después de llegar al área de las obras, el Contratista deberá utilizarlo en la misma secuencia cronológica de su llegada. No se utilizará bolsa alguna de cemento que tenga más de dos meses de almacenamiento en el área de las obras, salvo que nuevos ensayos demuestren que está en condiciones satisfactorias [3].

2.2 Características de la Zeolita 2

Las zeolitas son una familia de minerales aluminosilicatos cristalinos. La primera zeolita se describió en 1756, por Cronstedt, un mineralogista sueco, que les dio el nombre de origen griego “piedras hirviendo”, refiriéndose a la evolución del vapor de agua cuando la roca se calienta. Actualmente se

conocen unas cincuenta zeolitas naturales y más de ciento cincuenta se sintetizan para aplicaciones específicas como la catálisis industrial o como carga en la fabricación de detergentes. La clinoptilolita es una zeolita natural formada por la desvitrificación de ceniza volcánica en lagos o aguas marinas hace millones de años. Este tipo es la más estudiada y considerada la de mayor utilidad.

La clinoptilolita, como otras zeolitas, tiene una estructura similar a una jaula, consistiendo en tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos de oxígeno compartidos. Las cargas negativas de las unidades de AlO_4 se equilibran con la presencia de cationes intercambiables, notablemente calcio, magnesio, sodio, potasio y hierro. Estos iones pueden ser desplazados por otras sustancias, por ejemplo metales pesados e iones de amoníaco. Este fenómeno se le conoce como intercambio catiónico, y es esta capacidad de la clinoptilolita lo que le da las útiles propiedades. La clinoptilolita se conoce también como adsorbente de ciertos gases, como el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de azufre.

Las zeolitas naturales pueden utilizarse en la preparación de hormigón ligero para la construcción. Su estructura de silicato poroso hace que sean mucho más ligeros que la arena y dan más volumen por tonelada de producto con una dureza y resistencia similares. La zeolita no contiene barro que disminuye la resistencia del hormigón y su estructura porosa retiene la humedad lo que facilita que el hormigón cure más rápidamente [5].

2.3 Métodos de Curado del Cemento

El término curado se utiliza tanto para describir el proceso natural por medio del cual el concreto de cemento hidráulico madura y desarrolla sus propiedades mecánicas típicas del material en estado endurecido, como para describir las acciones tomadas por el constructor para mantener el concreto húmedo y dentro de un rango de temperatura adecuada, de tal manera que se promueva la hidratación del cemento.

En el primer sentido, el tiempo de curado del concreto se refiere al lapso en el cual se desarrollan las reacciones químicas del cemento con el agua, sin que se realice acción alguna; mientras que en el segundo sentido, se refiere al tiempo durante el cual se ejecutan acciones específicas para mantener el concreto en las condiciones favorables de humedad y temperatura, como pueden ser aplicarle agua, cubrirlo del medio ambiente, calentarlo, etc.

Debido a que se ha comprobado que las reacciones de hidratación del cemento sólo se dan en un ambiente interno de saturación (Mather, 1987), los investigadores de la tecnología del concreto han recomendado, desde hace aproximadamente un siglo, realizar acciones de curado en los elementos de concreto –principalmente suministrando humedad– como una parte esencial de los procedimientos constructivos tendientes a obtener un material con el mejor desempeño posible; y tratando, también, de alcanzar el mayor beneficio posible del alto costo del cemento.

En forma general el ACI (American Concrete Institute) distingue dos tipos diferentes de climas extremos que pueden provocar problemas durante el mezclado, transporte y colocación del concreto: el clima frío y el clima cálido. En el primer caso, la principal preocupación es que los compuestos del cemento no reaccionen con el agua (o que lo hagan a una tasa muy lenta), o que incluso, ésta se congele.

Mientras que en el segundo caso, la principal preocupación es que el agua del concreto se evapore rápidamente y que una parte significativa del cemento no se hidrate, y por lo tanto no aporte resistencia al material y éste sea muy poroso [6].

Hoy en día existen diversos métodos, procedimientos y materiales para el curado, sin embargo, el principio es el mismo: garantizar un contenido satisfactorio de humedad y temperatura para que se desarrollen las propiedades deseadas en el hormigón. Los sistemas de curado se pueden dividir en dos grandes grupos:

- a) **Curado con agua:** Continua o frecuente aplicación de agua por inundación, nebulización, vapor o materiales saturados (como sacos de arpillera, arena húmeda, etc.).
- b) **Materiales sellantes:** Evitan la pérdida excesiva de agua superficial mediante películas protectoras como polietileno o papel, o bien, mediante la aplicación de compuestos de curado formadores de membrana sobre el hormigón recién colocado [7].

El experimento reportado por Gonnerman y Shuman en 1928 ha sido citado como referencia por muchos autores para comprobar la influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión en el concreto, parámetro universalmente aceptado para evaluar la calidad del material.

Al respecto, los resultados de su trabajo sobre la influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión del concreto se han presentado tradicionalmente en forma gráfica (Figura 2.1). Las pruebas fueron realizadas utilizando concreto con una relación agua/cemento (a/c) de 0,50 y especímenes cilíndricos de 15cm de diámetro y 30cm de altura. En esta gráfica se muestran concretos que tuvieron como factor variable el tiempo que pasaron en condiciones de saturación antes de ser expuestos al aire (e iniciar su proceso de secado); con fines didácticos esta gráfica es impactante, ya que muestra un contraste notable entre las resistencias que se obtuvieron al variar el tiempo del curado húmedo.

Actualmente se reconoce que la parte superficial del concreto es la que se ve más afectada por la falta de curado, de tal manera que ésta sería la zona más sensible, y por tanto, la que se verá más afectada en sus propiedades físicas y químicas por la ausencia de humedad. Mediciones realizadas por diferentes investigadores han mostrado que el movimiento de humedad sólo afecta una zona que va entre 3 y 5 centímetros de la superficie del elemento [6].

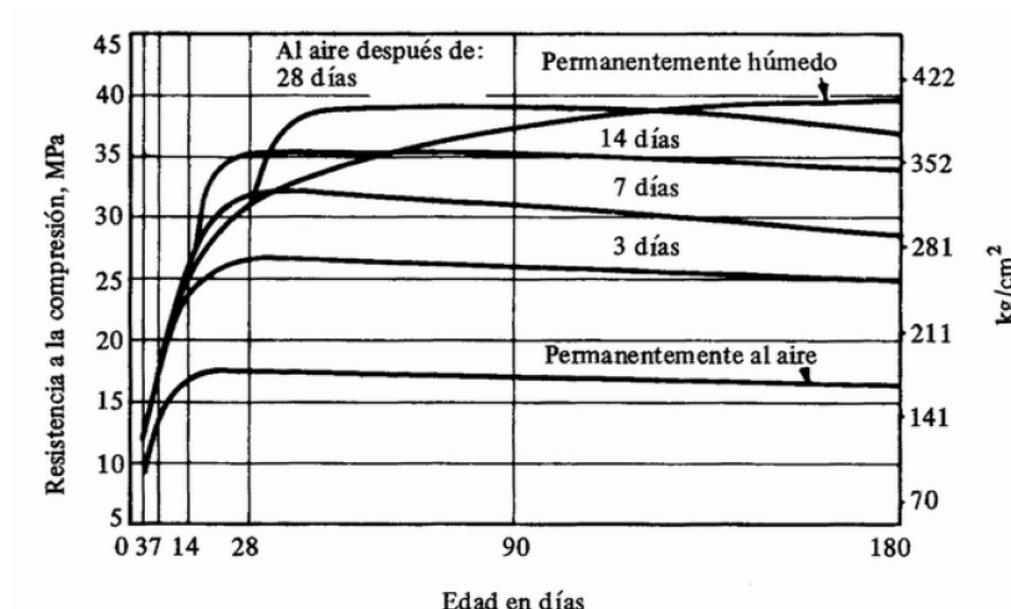


FIGURA 2.2 – INFLUENCIA DEL CURADO HÚMEDO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO (GONNERMAN Y SHUMAN EN 1928).

La duración del curado dependerá directamente del tipo de cemento usado. En la mayoría de las aplicaciones, y a menos que las especificaciones técnicas indiquen lo contrario, un criterio adecuado para determinar el período mínimo de curado es el plazo necesario para alcanzar un 70% de la resistencia especificada. En la mayoría de los casos este plazo será de 7 días para el cemento Especial (grado resistencia corriente) y 5 días para el cemento Extra (grado alta resistencia). En ningún caso, exceptuando curado a vapor, estos plazos deben ser inferiores a 5 y 3 días, respectivamente.

El curado a vapor se utiliza en elementos de hormigón donde se desea un desarrollo temprano de resistencia a través de un curado acelerado, con el

fin de obtener una reutilización económica de moldajes, espacios de fabricación u otras consideraciones de operación [7].

2.4 Diseño Factorial

Se entiende por diseño experimental la realización de una serie de experimentos previamente diseñados donde se varían los valores de las variables de entrada de un proceso o sistema y se miden los valores de la respuesta de salida.

Generalizando, podemos aplicar el diseño de experimentos para:

- Determinar que variables tienen mayor influencia en los valores de respuesta y.
- Determinar el mejor valor de las variables x para tener un valor cercano al valor de respuesta deseado.
- Determina el mejor valor de las variables para que el valor de la respuesta tenga la menor variabilidad.

El diseño experimental es utilizado ampliamente para la mejora de rendimiento de los procesos industriales como para el desarrollo de nuevos procesos, ahorrando tiempos y costos de desarrollo. Aporta además el conocimiento profundo de los procesos, generando herramientas eficaces de manejo de los mismos.

Dice Douglas Montgomery en el primer capítulo de su libro titulado Diseño y Análisis de Experimentos lo siguiente “Para que un experimento se

realice en la forma más eficiente, es necesario emplear métodos científicos en su planeación. El diseño estadístico de experimentos es el proceso de planear un experimento para obtener datos apropiados que puedan ser analizados mediante métodos estadísticos, con objeto de producir conclusiones válidas y objetivas. Se requiere de un enfoque estadístico del diseño de experimentos para obtener conclusiones significativas a partir de los datos. La metodología estadística es el único enfoque objetivo para analizar un problema que involucre datos sujetos a errores experimentales. Así que hay dos aspectos en cualquier problema experimental: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos”

A efectos de poder dar un enfoque estadístico al diseño se deberán respetar tres principios básicos en el diseño de experimentos:

- Replicación, o repetición de ensayos
- Aleatorización de experimentos
- Análisis por bloques.

El problema más importante para la aplicación del diseño experimental en la industria es que la enorme mayoría de los técnicos no conoce en profundidad sobre estadística, y consecuentemente menos sobre su aplicación al diseño experimental. Sin embargo, esto ha dejado de ser un problema con el acceso generalizado a la computación, que nos provee de herramientas altamente eficientes en el tema y nos permite dedicarnos prácticamente con exclusividad al análisis de resultados, como veremos

más adelante, abriendo las puertas masivamente a este tipo de tecnologías.

Para poder realizar un programa de experimentos, es necesario previamente comprender el problema que se desea estudiar, elegir las variables más apropiadas y sus niveles de uso, elegir la o las salidas de respuesta a evaluar, el modelo de diseño experimental a utilizar, realizar el experimento, analizar los datos y sacar las conclusiones correspondientes.

Respecto de las variables a utilizar durante el experimento, juegan un papel de gran importancia la experiencia previa del experimentador como su nivel de conocimientos tecnológicos específicos. La elección inapropiada de los niveles de las variables se traduce en la obtención de respuestas fuera de los niveles esperados.

En relación al modelo de diseño experimental a utilizar, existe una gran variedad desarrollados en base al uso de las técnicas estadísticas y su aplicación de cálculos en forma manual, o histórica, como pueden verse en la lista siguiente:

- Diseños por bloques aleatorizados
- Cuadrados latinos
- Diseños por bloques incompletos
- Diseño factorial 2K
- Diseños fraccionarios de 2 niveles
- Diseños factoriales 3K

- Diseños factoriales 3k fraccionarios
- Diseños Jerárquicos
- Análisis de regresión lineal
- Superficie de Respuesta

Todas estas técnicas han dado un significativo aporte a la historia de la investigación. Sin embargo casi todas ellas, salvo el estudio de superficies de respuesta adolecen del error de simplificación que implica suponer que las variaciones de respuesta son lineales con las de las variables. Esto significa que se supone que las respuestas no tienen curvatura y pueden ser representadas por ecuaciones de primer grado **[8]**.

El Diseño Factorial permite el estudio simultáneo de los efectos de varios factores que puede haber en una respuesta. Cuando se mejora un experimento guía el nivel de todos los factores simultáneamente permitiendo uno a la vez para el estudio o interacción entre los factores.

- En el gráfico se puede observar como cada punto represente una combinación única de niveles de factor.
- También se puede hacer una corrida de diseño de factores completos (todas las combinaciones de los niveles del factor experimental) ó una fracción del diseño factorial (medidas de respuesta a un subgrupo fracción de todas las combinaciones de los niveles del factor experimental) **[9]**.

2.5 El estado del arte de la simulación del cemento Portland tipo I

2.5.1 Uso óptimo de la puzolana natural para la resistencia máxima compresiva del concreto

Las puzolanas proveen una posibilidad económica de producción y mejorar las propiedades del concreto. Los efectos sobre el concreto varían con el tipo de puzolana y el volumen.

En este estudio, fue investigado el efecto de la puzolana natural sobre las propiedades del concreto. Quince mezclas de concreto fueron producidas en tres series con mezclas de control. La eficiencia de la puzolana fue obtenida mediante el uso de las ecuaciones de esfuerzo de Bolomey y Feret con 28 días de curado del concreto. Este estudio nos muestra que las eficiencias obtenidas para cada ecuación de esfuerzo son similares y estos valores decrecen con el incremento de la tasa puzolana/cemento.

TABLA 2.1

PROPIEDADES DEL CEMENTO Y LA PUZOLANA NATURAL

	Cemento	Puzolana Natural
Área específica de Blaine (cm ² /g)	3420	4350
Gravedad específica (g/cm ³)	3,15	2,25
Material insoluble (%)	0,39	47,8
Pérdida de encendido (%)	1,13	11
Actividad Puzolánica	--	92
SiO ₂ (%)	20,45	63,96

Al ₂ O ₃ (%)	5,3	12,5
Fe ₂ O ₃ (%)	2,65	4
CaO (%)	63,36	3,4
MgO (%)	2,99	2,45
K ₂ O (%)	0,64	--
SO ₃ (%)	3,29	0,2
C ₃ A	9,6	--
C ₃ S	51,6	--
C ₂ S	18,1	--
7-días esfuerzo compresivo (N/mm ²)	37,5	--
28-días esfuerzo compresivo (N/mm ²)	48,3	--

Fuente: Paper – Uso óptimo de la puzolana natural para la resistencia máxima compresiva del concreto

La puzolana usada para este estudio se la obtuvo en Uzuntarla-Turquía y es clase N de acuerdo a la norma estándar ASTM C618-03. La norma para la prueba de la actividad del esfuerzo es ASTM C311.

Como conclusiones de este estudio se encontró que existe un máximo de puzolana que se debe usar la optimizar la productividad y eficiencia para alcanzar el esfuerzo máximo. La tasa óptima de puzolana/cemento obtenida para el esfuerzo máximo es aproximadamente 0.28 [10].

2.5.2 Uso de un modelo matemático en la composición de un material compuesto

Este estudio trata del modelado de las mezclas proporcionando un nuevo material compuesto en base a la combinación de productos industriales secundarios.

La existencia de un ambiente sostenible y ecológicamente limpio depende del uso racional de productos provenientes de la industria. Muchas de las propiedades del concreto pueden ser mejoradas por la adición en su composición de varios tipos de desechos industriales.

La composición de los morteros fue preparada con una tasa de cemento/agregado 1:3 y una tasa de agua/cemento de 0.50. El cemento usado es proveniente de Bulgaria.

Lo más importante en la formulación es la aplicación de dos escenarios tecnológicos en la producción de un nuevo material compuesto. El primer escenario incluye la preparación del agua en suspensión con actividad en mezcla. El segundo escenario incluye 30 minutos de mezcla mecánica de la arena granulada con el preparado en suspensión.

La ventaja de la tecnología consiste en la posibilidad del uso de la arena artificial y aditivo alcalino en la granulometría industrial sin dispersión.

Los resultados obtenidos confirman los efectos positivos de la activación mecánica – química preliminar de la arena granulada y el uso de un nuevo aditivo activo en las propiedades de esfuerzo del silicato compuesto [11].

CAPÍTULO 3

C3 EXPERIMENTACIÓN

3.1 Recolección de datos

Para llevar a cabo un trabajo de investigación el investigador cuenta con gran variedad de métodos para diseñar un plan de recolección de datos. Tales métodos varían de acuerdo con cuatro dimensiones importantes: estructura, confiabilidad, injerencia del investigador y objetividad. La presencia de estas dimensiones se reduce al mínimo en los estudios cualitativos, mientras que adquieren suma importancia en los trabajos cuantitativos, no obstante el investigador a menudo tiene la posibilidad de adaptar la estrategia a sus necesidades. Cuando la investigación está altamente estructurada, a menudo se utilizan instrumentos o herramientas para la recolección formal de datos.

Las tres principales técnicas de recolección de datos son:

- Los autoinformes o informes personalizados.
- La observación.
- Las mediciones biofisiológicas.

El procedimiento de toma de datos que utilizaremos será el de la observación y anotación de los mismos. En el análisis de los datos y resultados obtenidos se deberá dar lugar al cálculo del error que puede ocurrir al realizar este procedimiento.

La experimentación consiste en efectuar ensayos de compresión a los morteros de concreto y recolectar los datos de las resistencias obtenidas en los respectivos tiempos de curado del concreto que son 3, 7, 14, 28 días, contados luego de que estén listas la mezclas de los morteros.

3.2 Diseño del experimento

La experimentación que realizamos se basa en las normas ASTM C 595-03 y la ASTM C 109/C 109M-02 que a continuación se describen brevemente.

3.2.1 Norma ASTM C 595 – 03

Especificación Estándar para los Cementos Hidráulicos Mezclados

Alcance

Esta especificación pertenece a cinco clases de los cementos hidráulicos mezclados para los usos generales y especiales, usando la escoria o puzolana, o ambas, con la escoria o la escoria del cemento de Portland o del cemento de Portland con la cal.

El texto de este estándar refiere a las notas y a las notas al pie de la página que proporcionan el material explicativo. Estas notas y notas al pie de la página (excepto esos en tablas y figuras) no son requisitos del estándar.

Composición Química

El cemento del tipo especificado se conformará con los requisitos químicos aplicables prescritos en la tabla 3.1.

TABLA 3.1

REQUERIMIENTOS QUÍMICOS DEL CEMENTO

Cement Type	Applicable Test Method	I(SM), I(SM)-A, IS, IS-A	S,SA	I(PM), I(PM)-A, P, PA, IP, IP-A
Magnesium oxide (MgO), max, %	C 114	...	...	6.0
Sulfur reported as sulfate (SO ₃), max, % ^A	C 114	3.0	4.0	4.0
Sulfide sulfur (S), max, %	C 114	2.0	2.0	...
Insoluble residue, max, %	C 114	1.0	1.0	...
Loss on ignition, max, %	C 114	3.0	4.0	5.0

Fuente: Norma ASTM C 595 – 03

Propiedades Físicas

El cemento mezclado del tipo especificado se conformará con los requisitos físicos aplicables prescritos en la tabla 3.2.

Requisitos de prueba de Tiempo

Los períodos siguientes a partir de la época del muestreo serán permitidos para la terminación de la prueba: 3, 7, 14 y 28 días [13].

TABLA 3.2

REQUERIMIENTO FÍSICOS DEL CEMENTO

Cement Type	Applicable Test Method	I(SM), IS, I(PM), IP	I(SM)-A, IS-A, I(PM)-A, IP-A	IS(MS) IP(MS)	IS-A(MS) IP-A(MS)	S	SA	P	PA
Fineness	C 204, C 430	A	A	A	A	A	A	A	A
Autoclave expansion, max, %	C 151	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Autoclave contraction, max, % ^B	C 151	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Time of setting, Vicat test: ^C	C 191								
Set, minutes, not less than		45	45	45	45	45	45	45	45
Set, hours, not more than		7	7	7	7	7	7	7	7
Air content of mortar, volume %	C 185	12 max	19 ± 3	12 max	19 ± 3	12 max	19 ± 3	12 max	19 ± 3
Compressive strength, min, MPa (psi):	C 109/C 109M								
3 days		13.0 (1890)	10.0 (1450)	11.0 (1600)	9.0 (1310)	...	...	...	...
7 days		20.0 (2900)	16.0 (2320)	18.0 (2610)	14.0 (2030)	5.0 (720)	4.0 (580)	11.0 (1600)	9.0 (1310)
28 days		25.0 (3620)	20.0 (2900)	25.0 (3620)	20.0 (2900)	11.0 (1600)	9.0 (1310)	21.0 (3140)	18.0 (2610)
Heat of hydration: ^D	C 186								
7 days, max, kJ/kg (cal/g)		290 (70)	290 (70)	290 (70)	290 (70)	...	...	250 (60)	250 (60)
28 days, max, kJ/kg (cal/g)		330 (80)	330 (80)	330 (80)	330 (80)	...	...	290 (70)	290 (70)
Water requirement, max weight % of cement	C 109/C 109M	...	...	...	...	...	...	64	56
Drying shrinkage, max, %	C 157	...	...	...	...	...	...	0.15	0.15
Mortar expansion: ^E	C 227								
14 days, max, %		0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
8 weeks, max, %		0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060	0.060
Sulfate resistance	C 1012								
Expansion at 180 days, max, %		(0.10) ^F	(0.10) ^F	0.10	0.10			(0.10) ^F	(0.10) ^F

Fuente: Norma ASTM C 595 – 03

3.2.2 Norma ASTM C 109/C 109M – 02

Método estándar de la prueba para la fuerza compresiva de los morteros del cemento hidráulico (Usando especímenes cúbicos de 2 in. o 50 milímetros)

Alcance

Este método de prueba cubre la determinación de la fuerza compresiva de los morteros del cemento hidráulico, usando especímenes cúbicos de 2 in. o 50 milímetros.

Este método de prueba cubre el uso de la prueba usando libra-pulgada o unidades del SI. Los valores indicados en cualquier sistema serán mirados por separado como estándar. Dentro del texto, las unidades del SI se demuestran en soportes. Los valores indicados en cada sistema no son equivalentes exactos; por lo tanto, cada sistema será utilizado independientemente del otro. Combinar valores de los dos sistemas puede dar lugar a inconformidad con la especificación.

Los valores en unidades del SI serán obtenidos por la medida en unidades del SI o por la conversión apropiada, usando las reglas para la conversión y redondear dadas en IEEE/ASTM estándar SI 10, de las medidas hechas en otras unidades.

Este estándar no pretende tratar todas las preocupaciones de seguridad, si las hay, asociadas a su uso. Es la responsabilidad del usuario de este estándar establecer prácticas apropiadas de seguridad y de la salud y determinar la aplicabilidad de limitaciones reguladoras antes de uso.

Preparación de los moldes del espécimen

Aplica una capa fina de agente del fusor a las caras interiores del molde y de los embases no-absorbentes. Aplique los aceites y las grasas usando un paño impregnado u otros medios convenientes. Limpie las caras del molde y el embase con un paño cuanto sea necesario para quitar cualquier exceso de agente del fusor y para alcanzar un fino, incluso cubriendo en las superficies interiores. Al usar un lubricante del aerosol, rocíe el agente del fusor directamente sobre las caras del molde y el embase de una distancia de 6 a 8 pulg. o [150 a 200 milímetros] alcanzar cobertura completa. Después de rociar, limpie la superficie con un paño cuanto sea necesario para quitar cualquier exceso de lubricante del aerosol. La capa del residuo debe ser apenas suficiente permitir que una huella digital distinta siga siendo presión del dedo de la luz siguiente

Selle las superficies donde las mitades del molde ensamblan aplicando una capa de grasa ligera de la taza tal como petrolato. La cantidad debe ser suficiente sacar levemente cuando las dos mitades se aprietan juntas. Quite cualquier exceso de grasa con un paño.

Composición de morteros

Las proporciones de los materiales para el mortero estándar serán una porción de cemento a 2.75 porciones de la arena estándar calificada por peso. Utilice un cociente del agua-cemento de 0.485 para todos los cementos de Portland y 0.460 para todos los

cementos de Portland air-entraining. La cantidad de agua que se mezcla para con excepción de Portland y de cementos de Portland air-entraining será por ejemplo producir un flujo de 110 6 5 según lo determinado de acuerdo con 10.3 y será expresada como por ciento del peso de cemento.

TABLA 3.3

VARIACIONES PERMISIBLES DE LOS ESPECIMENES

Parameter	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
	New	In Use	New	In Use
Planeness of sides	<0.001 in.	<0.002 in.	[<0.025 mm]	[<0.05 mm]
Distance between opposite sides	2 in. \pm 0.005	2 in. \pm 0.02	[50 mm \pm 0.13 mm]	[50 mm \pm 0.50 mm]
Height of each compartment	2 in. + 0.01 in. to - 0.005 in.	2 in. + 0.01 in. to - 0.015 in.	[50 mm + 0.25 mm to - 0.13 mm]	[50 mm + 0.25 mm to - 0.38 mm]
Angle between adjacent faces ⁴	90 \pm 0.5°	90 \pm 0.5°	90 \pm 0.5°	90 \pm 0.5°

Fuente: Norma ASTM C 109/C 109M – 02

Las cantidades de materiales que se mezclarán contemporáneamente en la hornada del mortero para hacer seis y nueve especímenes de la prueba serán como sigue [13]:

TABLA 3.4

CANTIDADES DE MATERIALES

	Number of Specimens	
	6	9
Cement, g	500	740
Sand, g	1375	2035
Water, mL		
Portland (0.485)	242	359
Air-entraining portland (0.460)	230	340
Other (to flow of 110 \pm 5)	...	...

Fuente: Norma ASTM C 109/C 109M – 02

TABLA 3.5

PRECISIÓN

	Test Age, Days	Coefficient of Variation 1s % ⁴	Acceptable Range of Test Results d2s % ⁴
Portland Cements			
Constant water-cement ratio:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	<u>7</u>	<u>3.6</u>	<u>10.2</u>
Av		3.8	10.7
Multi-lab	3	6.8	19.2
	<u>7</u>	<u>6.4</u>	<u>18.1</u>
Av		6.6	18.7
Blended Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	<u>7</u>	<u>3.8</u>	<u>10.7</u>
	<u>28</u>	<u>3.4</u>	<u>9.6</u>
Av		3.8	10.7
Multi-lab	3	7.8	22.1
	<u>7</u>	<u>7.6</u>	<u>21.5</u>
	<u>28</u>	<u>7.4</u>	<u>20.9</u>
Av		7.6	21.5
Masonry Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	7	7.9	22.3
	<u>28</u>	<u>7.5</u>	<u>21.2</u>
Av		7.7	21.8
Multi-lab	7	11.8	33.4
	<u>28</u>	<u>12.0</u>	<u>33.9</u>
Av		11.9	33.7

Fuente: Norma ASTM C 109/C 109M – 02

3.2.3 Materiales, Herramientas y Equipos

Para nuestra experimentación utilizamos los materiales, herramientas y equipos descritos a continuación:

Materiales

- Cemento Pórtland tipo I
- Zeolita 2
- Agua

Herramientas

- Moldes. Utilizados para dar forma a las mezclas
- Envases. Utilizados para medir las proporciones de las mezclas

Equipos

- Balanza
- Mezcladora
- Vibrador Manual
- Maquina para ensayos de compresión

3.3 Protocolo Experimental

3.3.1 Molienda

El proceso de molienda consiste en la preparación del aditivo, en nuestro caso Zeolita 2, mediante un proceso para convertir la roca en polvo. Los pasos del proceso los describimos a continuación:

- 1) Reducción de Tamaño
- 2) Trituración
- 3) Molienda
- 4) Tamizado

TABLA 3.6

TIEMPO DE MOLIENDA POR PROCESO

Máquina	Tiempo
Trituradora de Mandíbulas	10 minutos
Trituradora de Rodillos	10 minutos
Tamizado	15 minutos
Molino de Discos	10 minutos
Tamizado	15 minutos
Molino de Bolas	55 minutos
Tamizado	15 minutos

TABLA 3.7

GRANULOMETRÍA DE LOS TAMIZADOS

Número de Malla	Primer Tamizado	Segundo Tamizado
14	58	19.5
(1.4 mm)		
18	10	15.5
(1 mm)		
40	14	27.5
(425 μm)		
50	3	7
(300 μm)		
Fondo	14	30
Peso Final (gr)	99	99.5

Para el tercer tamizado se utilizaron mallas adicionales de numeración 100 (150 μm), 200 (75 μm), 325 (45 μm) y el 75% del material quedó en el fondo.

3.3.2 Preparación de las mezclas

Para la preparación de las mezclas seguimos el siguiente proceso:

- 1) Limpiar los moldes
- 2) Secar los moldes
- 3) Engrasar los moldes
- 4) Calcular las proporciones de la pasta de cemento
- 5) Pesar las proporciones de la pasta de cemento
- 6) Homogenizar la mezcla
- 7) Agregar agua a la mezcla
- 8) Verter pasta de cemento al 50% de capacidad del molde
- 9) Compactar la pasta vertida en los moldes
- 10) Retiramos las burbujas del interior del molde con el vibrador manual
- 11) Verter pasta de cemento al 100% de la capacidad del molde
- 12) Retiramos las burbujas del interior del molde con el vibrador manual
- 13) Retirar el exceso de pasta de cemento en los moldes
- 14) Compactar la pasta vertida en los moldes
- 15) Cubrir los moldes con plástico
- 16) Retirar las mezclas de los moldes (24 horas después)

17) Marcar las mezclas con los códigos respectivos

TABLA 3.8

PROPORCIONES DE ZEOLITA 2, AGUA Y CEMENTO EN LA
PREPRACION DE LAS PROBETAS

Zeolita 2	Puzolana (g)	Cemento (g)	Agua (g)
5%	150	2850	900
10%	300	2700	900
15%	450	2550	900
20%	600	2400	900
25%	750	2250	900

3.3.3 Pruebas de Laboratorio

Las pruebas en el laboratorio consistieron en realizar ensayos de compresión a una total de 24 mezclas de Cemento, Zeolita 2 y Agua. Existían dos clases diferentes de mezclas diferenciándose por la concentración de Zeolita 2 que poseían en su composición, 12 mezclas con 10% de Zeolita 2 y las otras 12 mezclas con 12.5% de concentración. Los resultados de las probetas con 10% de concentración de Zeolita 2 se utilizaron para realizar el modelo y los resultados de las probetas con 12.5% de concentración para validarlo.

Los ensayos se llevaban a cabo con un intervalo de 7 días para cada porcentaje. La ruptura de las mezclas con 12.5% de concentración iniciaron al cuarto día de curado y las mezclas con

10% de concentración iniciaron la ruptura al séptimo día de curado. La culminación de los ensayos fue a los 28 días de curado para la concentración de 10% y a los 25 días de curado para las mezclas de 12.5% de concentración.

CAPÍTULO 4

C4 COMPARACIÓN DE CAMBIOS DE PROPIEDADES

4.1 Tabulación de datos y resultados

A continuación se presentan las tablas de datos y resultados con los gráficos esfuerzo vs deformación, correspondientes a las tres probetas por cada día de curado en agua del concreto. Los datos obtenidos en el laboratorio son la marca y la masa que soportan las probetas en compresión y fueron tomados con los siguientes parámetros:

Temperatura Promedio: 25.4° C

Humedad Relativa: 68.2

Probeta 1 a los 7 días de curado

TABLA 4.1

DATOS PROBETA 1 CURADO 7 DIAS

G4/10/7					
Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Área (mm²)	Esfuerzo (MPa)
0.127	0.003	480	4708.80	2500	1.88
0.254	0.005	1650	16186.50	2500	6.47
0.381	0.008	3700	36297.00	2500	14.52
0.508	0.010	8250	80932.50	2500	32.37
0.635	0.013	16400	160884.00	2500	64.35
0.762	0.015	18900	185409.00	2500	74.16
0.889	0.018	20250	198652.50	2500	79.46

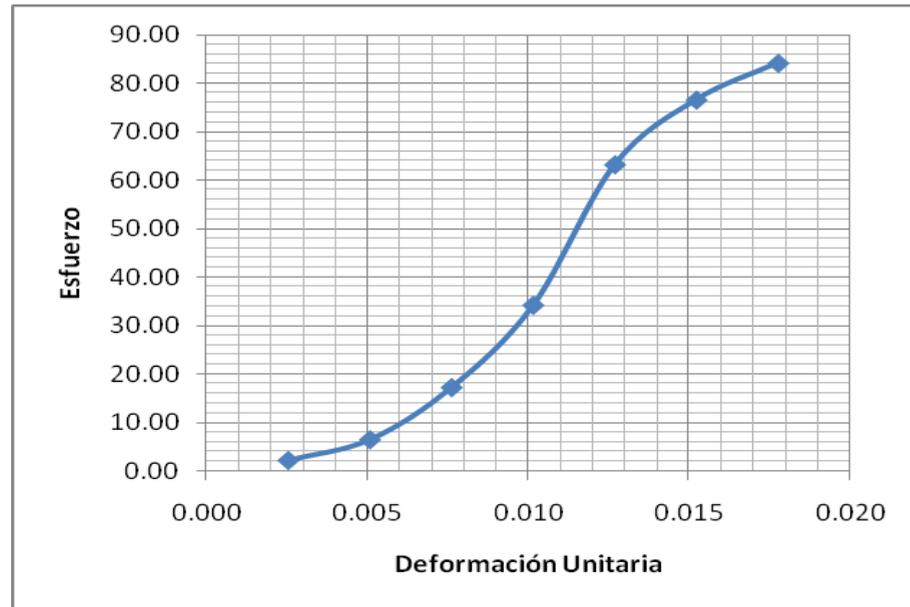


FIGURA 4.1 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 1 CURADO 7 DIAS EN AGUA

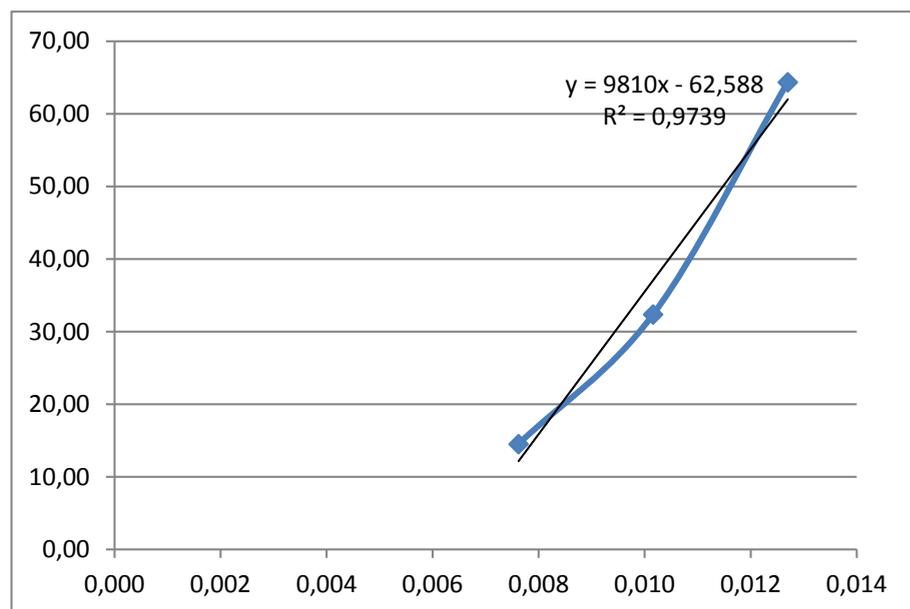


FIGURA 4.2 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 1 CURADO 7 DIAS EN AGUA

La Figura 4.2 muestra la linealización del gráfico Esfuerzo vs Deformación Unitaria permitiendo obtener el valor del Módulo de Elasticidad (E) del concreto a base de Cemento Portland tipo I con adición de Zeolita 2 al 10% de concentración. El Módulo de Elasticidad es igual a la pendiente del gráfico lineal Esfuerzo vs Deformación Unitaria.

$$E = 9810 \text{ N/m}^2$$

Probeta 2 a los 7 días de curado

TABLA 4.2

DATOS PROBETA 2 CURADO 7 DIAS

G4/10/7					
Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Área (mm ²)	Esfuerzo (MPa)
0.127	0.003	453.59	4449.74	2500	1.78
0.254	0.005	1224.70	12014.30	2500	4.81
0.381	0.008	4717.36	46277.31	2500	18.51
0.508	0.010	8527.54	83655.13	2500	33.46
0.635	0.013	16556.12	162415.55	2500	64.97
0.762	0.015	21545.64	211362.70	2500	84.55
0.889	0.018	22679.62	222487.06	2500	88.99

Para la probeta 2 a los 7 días de curado en agua, se obtuvo con la linealización del gráfico una pendiente cuyo valor es el Módulo de Elasticidad del concreto a base de Cemento Portland tipo I con adición de Zeolita 2, el siguiente resultado:

$$E = 9144 \text{ N/m}^2$$

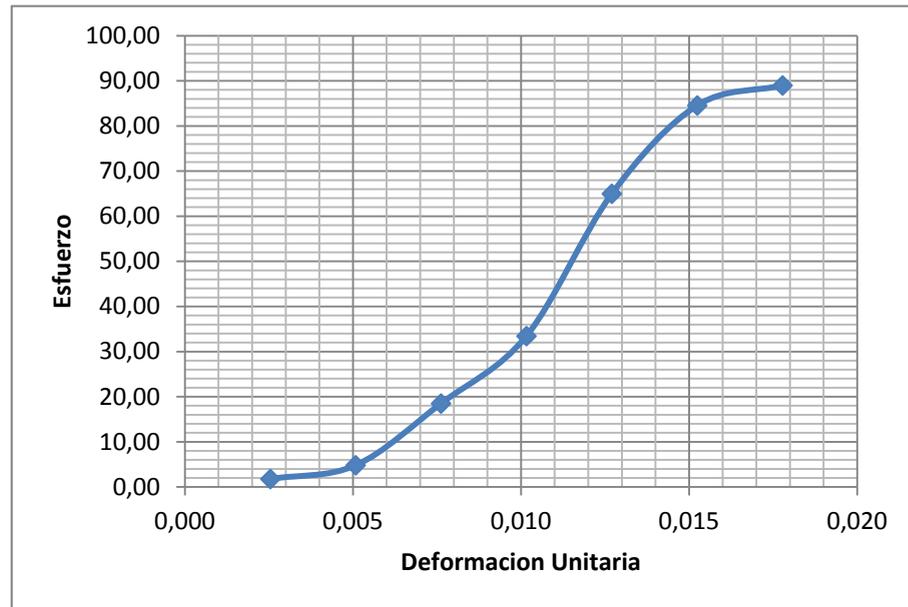


FIGURA 4.3 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 2 CURADO 7 DIAS EN AGUA

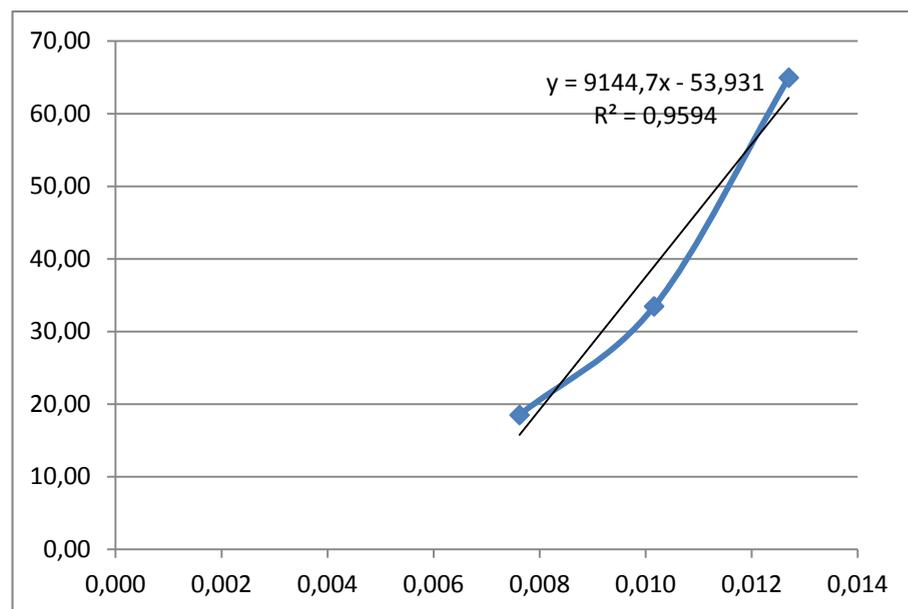


FIGURA 4.4 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 1 CURADO 7 DIAS EN AGUA

Probeta 3 a los 7 días de curado

TABLA 4.3

DATOS PROBETA 3 CURADO 7 DIAS

G4/10/7					
Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Área (mm ²)	Esfuerzo (MPa)
0.127	0.003	725.75	7119.59	2500	2.85
0.254	0.005	2063.85	20246.32	2500	8.10
0.381	0.008	4762.72	46722.28	2500	18.69
0.508	0.010	9389.36	92109.64	2500	36.84
0.635	0.013	15422.14	151291.20	2500	60.52
0.762	0.015	18143.69	177989.65	2500	71.20
0.889	0.018	0.00	0.00	2500	0.00

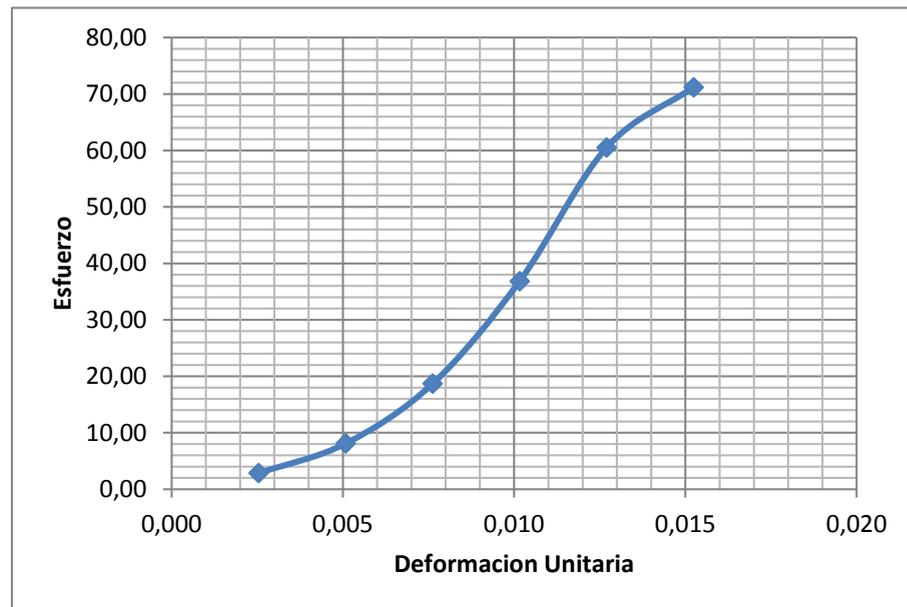


FIGURA 4.5 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 3 CURADO 7 DIAS EN AGUA

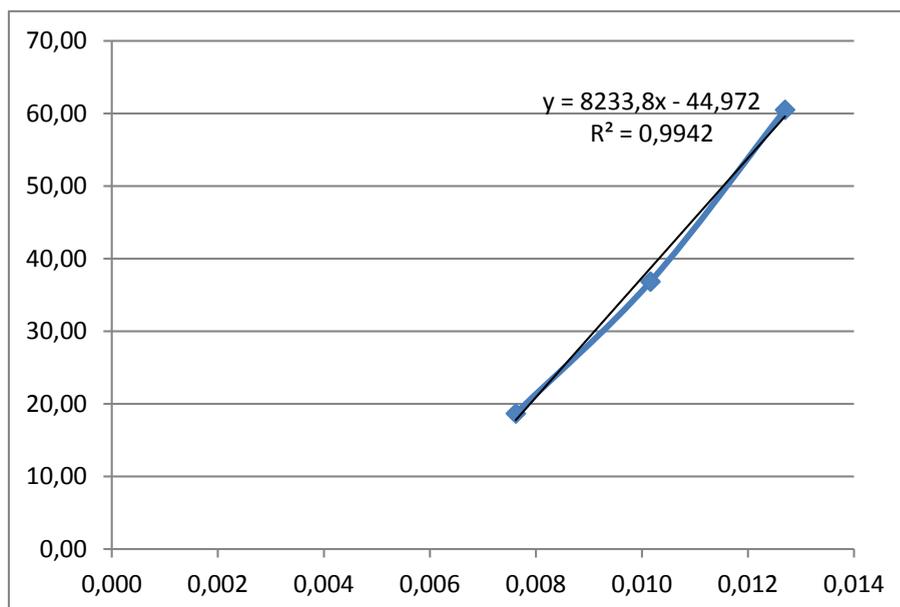


FIGURA 4.6 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO,
PROBETA 1 CURADO 7 DIAS EN AGUA

Para la probeta 3 a los 7 días de curado en agua, se obtuvo con la linealización del gráfico una pendiente cuyo valor es el Modulo de Elasticidad del concreto a base de Cemento Portland tipo I con adición de Zeolita 2, el siguiente resultado:

$$E = 8233 \text{ N/m}^2$$

Los datos, resultados y gráficos de las probetas con 14, 21 y 28 días de curado, se encuentran en el Anexo 2.

4.2 Análisis de resultados

A continuación se detalla la tabla de datos de los esfuerzos promedios máximos obtenidos en los días de curado respectivos:

TABLA 4.4

ESFUERZOS MAXIMOS

Curado (días)	Concentración Zeolita 2 (%)	Esfuerzo Máximo
7	10	84.23
14	10	94.04
21	10	112.13
28	10	92.55

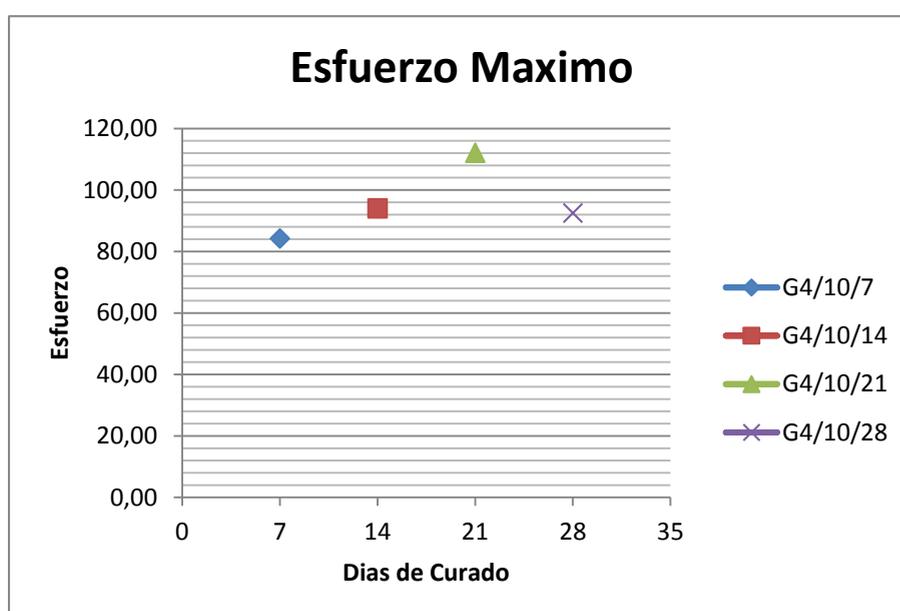


FIGURA 4.7 – ESFUERZO MÁXIMO vs DÍAS DE CURADO

Por cada día de curado se realizó tres ensayos obteniendo los resultados tabulados anteriormente, se procedió a obtener un promedio por cada día de curado para realizar la comparación respectiva. El esfuerzo máximo se obtuvo a los 21 días de curado, luego del cual se decrementó como se puede apreciar en la gráfica.

4.3 Identificación de cambios de propiedades

4.3.1 Comparación Individual (Zeolita 2 al 10%)

Con los resultados obtenidos en la experimentación se pudo realizar una comparación con los datos del Cemento Portland tipo I sin adición de Zeolita 2 y el Cemento Portland tipo IV, que es el más comercial, para verificar si existe un cambio significativo en la resistencia a la compresión y de qué tipo es esta variación.

TABLA 4.5

COMPARACION DE ESFUERZOS A LOS 7 DIAS DE CURADO

Curado 7 días			
Tipo de Cemento	Cemento I con 10% de Zeolita 2	Cemento I	Cemento IV
Deformación Unitaria	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0.003	2.17	5.16	0.72
0.005	6.46	18.99	1.24
0.008	17.24	34.47	2.16
0.010	34.23	52.51	4.19
0.013	63.28	72.09	8.18
0.015	76.63	86.62	13.80
0.018	84.23	92.85	20.21
0.020			29.10
0.023			35.97
0.025			44.15
0.028			50.03
0.030			53.96

A los 7 días de curado en agua las probetas alcanzan una resistencia a la compresión máxima promedio de 84.23 MPa, y se logra observar en la Figura 4.8 que en este tiempo de curado la resistencia a la compresión es menor en comparación a las probetas de Cemento Portland tipo I sin adición de Zeolita 2 y mayor en comparación con la de Cemento IV.

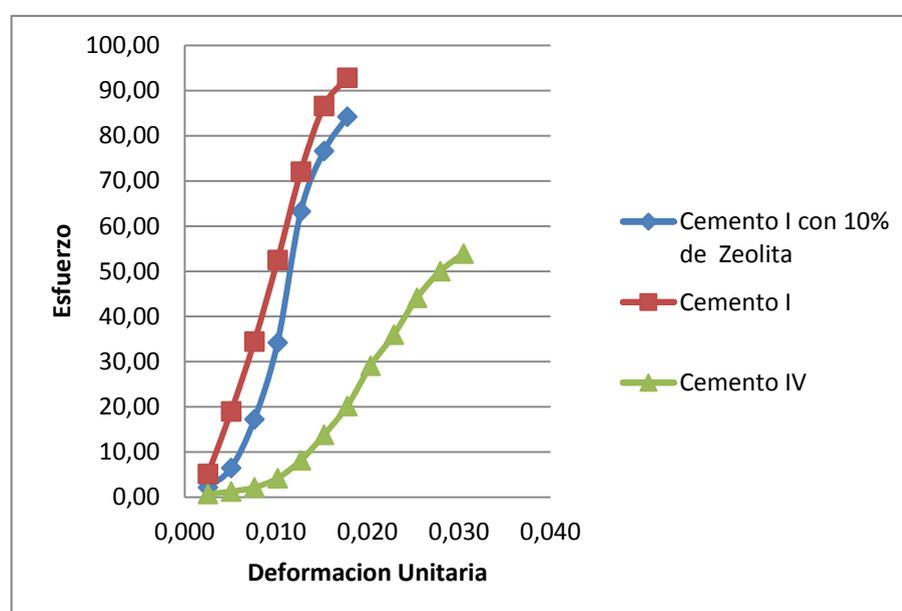


FIGURA 4.8 – ESFUERZO vs DEFORMACION UNITARIA EN LOS TIPOS DE CEMENTO A LOS 7 DIAS DE CURADO

Los resultados y gráficos de las probetas con 14, 21 y 28 días de curado, se encuentran en el Anexo 3.

Analizando los resultados de las probetas en los diferentes días de curado, se observa que la mayor resistencia a la compresión promedio en el Cemento Portland tipo I con adición de Zeolita al

10% de concentración, se la obtuvo a los 21 días de curado en agua.

TABLA 4.6

COMPARACION DE ESFUERZOS MAXIMOS EN LOS TIPOS DE CEMENTO

Curado (días)	Cemento I con 10% de Zeolita 2	Cemento I	Cemento IV
7	84.23	92.85	53.96
14	94.04	99.38	68.67
21	112.13	99.97	78.48
28	92.55	99.67	73.58

Comparando los resultados obtenidos con el Cemento Portland tipo I sin adición de Zeolita se revela un incremento del 12% y con el Cemento Portland tipo IV un incremento del 43%.

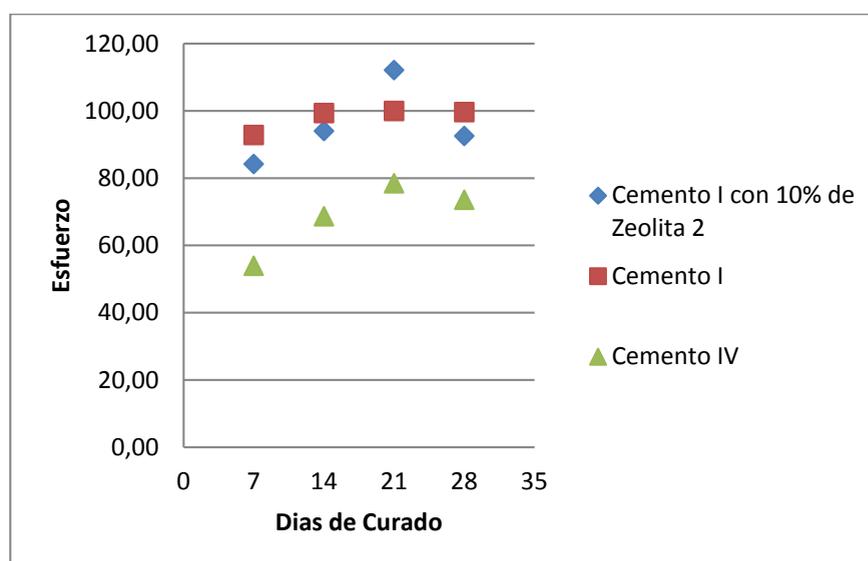


FIGURA 4.9 – ESFUERZO vs DIAS DE CURADO EN LOS TIPOS DE CEMENTO

Por cada ensayo realizado en las probetas se obtiene el gráfico Esfuerzo vs Deformación Unitaria cuya linealización permite encontrar el Modulo de Elasticidad correspondiente. A continuación se presenta una tabla con los valores del Modulo de Elasticidad (E) del concreto a los diferentes días de curado y los respectivos promedios por día.

TABLA 4.7

MODULOS DE ELASTICIDAD (E) POR CADA PROBETA Y DIA DE CURADO RESPECTIVO

Probeta	Curado (días)	E (N/m ²)	E _{prom} (N/m ²)
1	7	9810	9062.33
2	7	9144	
3	7	8233	
1	14	9810	10487.67
2	14	11527	
3	14	10126	
1	21	7427	7780.00
2	21	8689	
3	21	7224	
1	28	4695	5456.00
2	28	6327	
3	28	5346	

4.3.2 Comparación Grupal (Porcentajes de Zeolita 2)

El análisis grupal se realizó a las probetas de pasta de cemento con diferente adición de Zeolita 2, las concentraciones de las mismas son de 5%, 10%, 15%, 20% y 25%. En la Figura 4.10 se nota claramente que en la mezcla con un porcentaje de adición de 5% el valor del esfuerzo de compresión es el mayor en comparación con

las mezclas con diferente porcentaje de adición y los cementos de muestra.

TABLA 4.8

ESFUERZOS MAXIMOS EN LOS TIPOS DE CEMENTO

Cemento	Dias			
	7	14	21	28
Zeolita 5%	80.61	114.63	108.39	101.86
Zeolita 10%	79.88	94.03	102.34	84.84
Zeolita 15%	81.37	82.55	97.41	89.39
Zeolita 20%	83.80	93.11	98.45	102.30
Zeolita 25%	78.23	78.53	78.53	80.59
Cemento I	92.95	99.48	100.08	99.78
Cemento IV	47.37	63.50	78.40	68.27

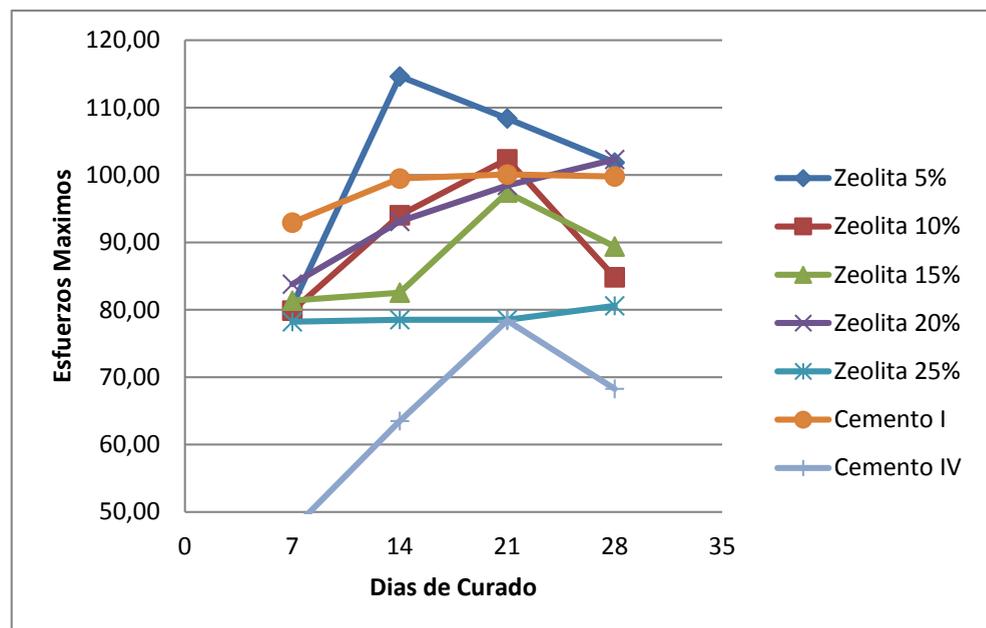


FIGURA 4.10 – ESFUERZOS MAXIMOS vs DIAS DE CURADO EN LOS TIPOS DE CEMENTO

CAPÍTULO 5

C5 SIMULACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I

5.1 Simulación por Matlab

En el software Matlab simulamos el comportamiento del Concreto a base de Cemento Portland Tipo I con adición de Zeolita 2, sometido a esfuerzos de compresión uniaxial. El comportamiento teórico del concreto sin aditivo es una función no lineal, por tal razón el método que se utilizó para la simulación es el de Newton Raphson.

El método de Newton Raphson es un método iterativo para la obtención de la raíz de un polinomio o función de manera general. El método consiste en una aproximación que se acerca a la raíz en aproximaciones que dependen del valor inicial supuesto. Entre más alejado este el valor inicial del valor buscado más tardará en iterar hasta llegar a la solución.

La fórmula general es:

$$x(i+1) = x(i) - \frac{f(x)}{f'(x)}$$

Para la simulación el valor de inicial es 0. Este método permite iterar las veces que sean necesarias para poder llegar al punto de convergencia de la función.

El programa compila introduciendo los valores de la variación de la deformación (d_e), el valor de deformación al cual se pretende llegar (d_{ef}), el esfuerzo inicial que en este caso es cero (σ_{y0}), el Módulo de Elasticidad (E) y el esfuerzo de fluencia (σ_y) de acuerdo al material analizado o resultado obtenido en la experimentación.

TABLA 5.1

DATOS PROMEDIOS DE LAS PROBETAS PARA LA SIMULACION

	7 días	14 días	21 días	28 días
a	0.33	0.33	0.33	0.33
m	0.01080929	0.00851511	0.00951022	0.01013713
E_{prom}	9062.33	10487.67	7780.00	5456.00
σ_y	63.17	70.53	84.10	69.42
d_{ef}	0.018	0.015	0.020	0.023
d_e	0.00254	0.00254	0.00254	0.00254

El valor de a se lo calcula de acuerdo a la norma ASTM

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{rup}} = 0.75$$

Los valores de m se los calcula con la siguiente fórmula:

$$m = \frac{(E_{prom} d_{ef}) - \sigma_y}{E_{prom}}$$

Los valores de los E_{prom} y d_{ef} son resultados de la experimentación. Y los σ_y son el 0.75σ obtenido experimentalmente.

El valor de d_e es una constante.

La simulación del Cemento Portland tipo I con adición de Zeolita al 10% de concentración y curado en agua nos muestra que el esfuerzo vs la deformación unitaria de la probeta posee un comportamiento bilineal, es decir que como se aprecia claramente se denotan dos fases una lineal y otra no-lineal.

El punto de inflexión en la grafica es el esfuerzo de fluencia del concreto. Este comportamiento se repite en los diferentes días de curado. A continuación se presentan las graficas respectivas.

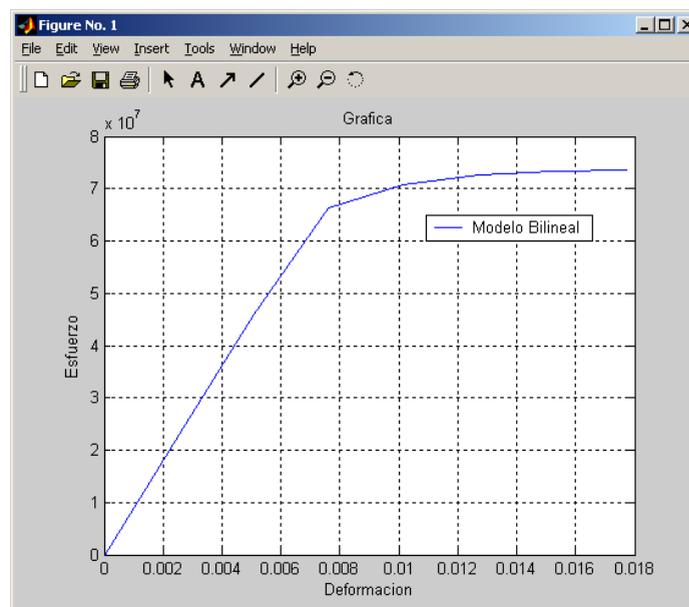


FIGURA 5.1 – SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO I CON ZEOLITA 2 AL 10% CON 7 DIAS DE CURADO

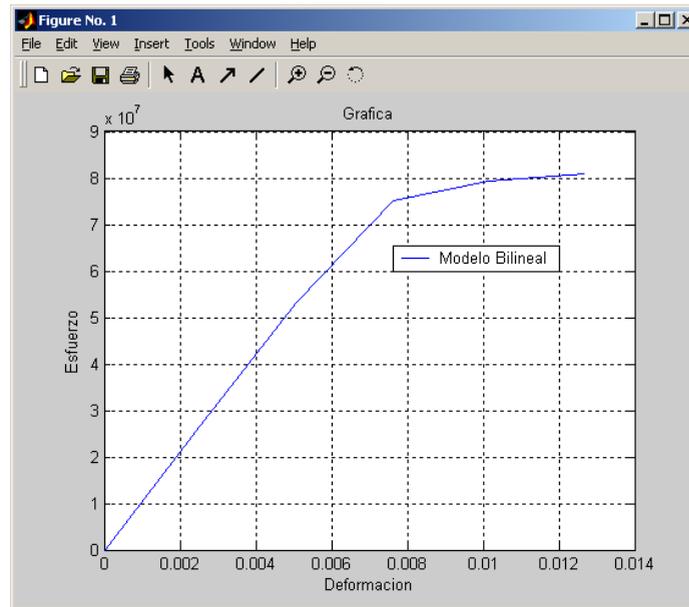


FIGURA 5.2 – SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO I CON ZEOLITA 2 AL 10% CON 14 DIAS DE CURADO

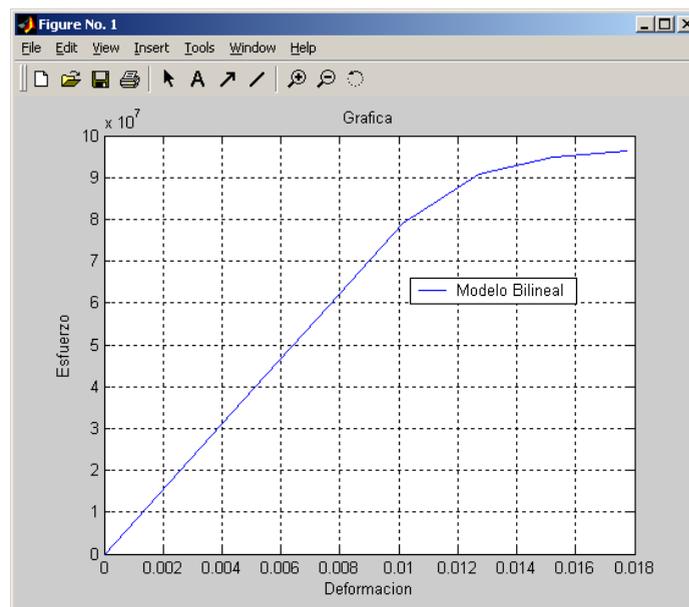


FIGURA 5.3 – SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO I CON ZEOLITA 2 AL 10% CON 21 DIAS DE CURADO

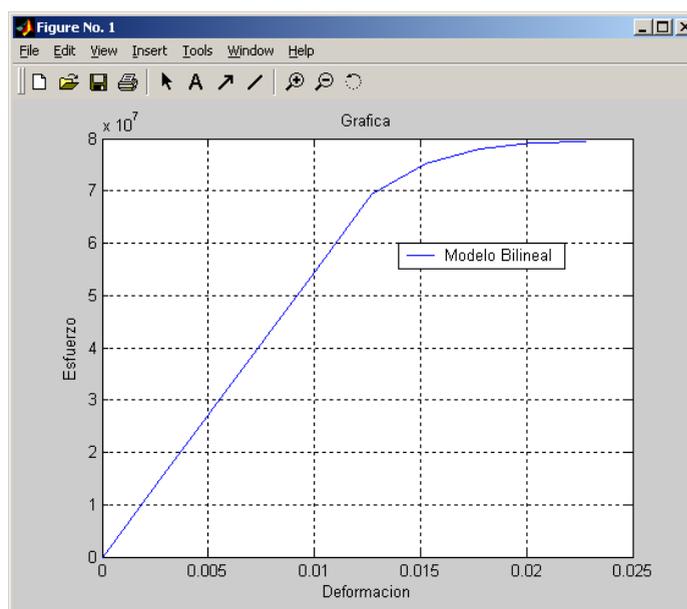


FIGURA 5.4 – SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DEL CEMENTO I CON ZEOLITA 2 AL 10% CON 28 DIAS DE CURADO

La programación en Matlab se describe en el Anexo 4.

5.2 Análisis por modelo Estadístico

Los datos y resultados obtenidos en la experimentación se analizaron mediante el software Estadística, para comprobar su validez y determinar la existencia de diferencias significativas en las variables dependientes, en el caso específico (Zeolita 2 al 10%) la variable dependiente es el Módulo de Elasticidad (E) obtenido en cada ensayo en los diferentes días de curado y para el caso general (Porcentajes de Zeolita 2) se analizó los esfuerzos de compresión, resultados de la experimentación.

5.2.1 Análisis específico – Zeolita 2 al 10%

Para el análisis de los resultados del Módulo de Elasticidad (E) obtenidos en la experimentación (Tabla 4.7) se utilizó la prueba de Shapiro y Wilk, la cual verifica si los datos poseen una distribución normal.

Para comprobar si los datos poseen una distribución normal se realiza la comparación entre los datos de W y p obtenidos con los ya tabulados.

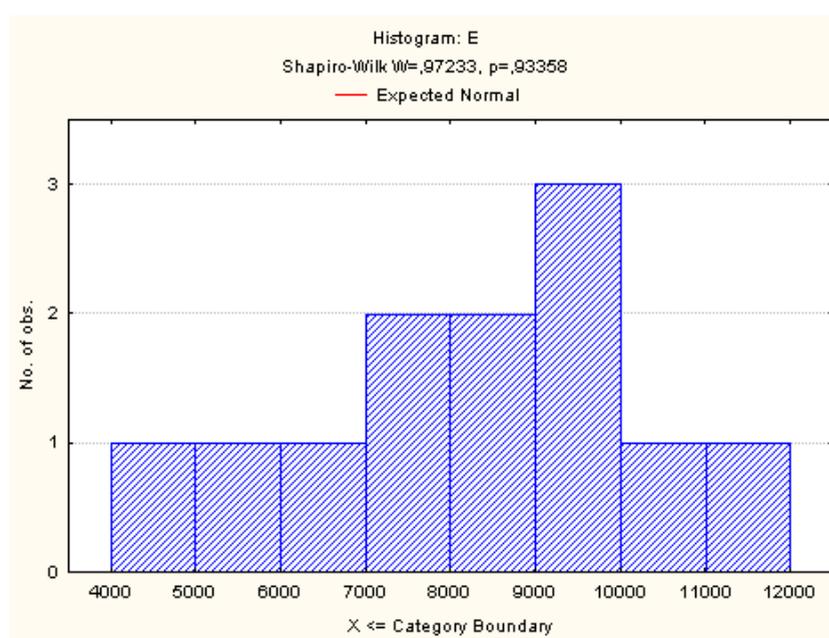


FIGURA 5.5 – HISTOGRAMA DEL MODULO DE ELASTICIDAD (E) PARA LOS DIAS DE CURADO, DISTRIBUCION NORMAL

Como se aprecia en la tabla 5.2 el $W_{obt} > W_{tab}$ y la probabilidad (p) es mayor a 0.05, por lo cual se puede descartar la hipótesis nula, la cual indica que los datos no poseen una distribución normal.

TABLA 5.2

DATOS EXPERIMENTALES Y TABULADOS DE W Y p

	Datos Obtenidos	Datos Tabulados
W	0.97233	0.859
p	0.93358	0.05

Análisis de la Varianza

Los datos, ya correspondientes a una distribución normal, son sometidos a un análisis de varianza simple, mediante la herramienta ANOVA – ONE WAY, con el propósito de identificar si existen diferencias significativas entre las medias del Módulo de Elasticidad (E) en los respectivos días de tratamiento o curado.

Se encuentran diferencias significativas con la comparación del valor de F que obtenemos en el análisis, con el del F crítico obtenido por tabla cuyo valor es $F_{cr} = 4.06$.

Con el análisis se obtuvo un F igual a 19.782, lo cual nos indica que $F > F_{cr}$, por consiguiente se afirma que existen diferencias significativas entre las medias, es decir que en al menos uno de los días de tratamiento o curado el Módulo de Elasticidad se incrementará.

La Tabla 5.4 muestra el intervalo de los valores del Módulo de Elasticidad en los días de curado con un 95% de confianza.

TABLA 5.3

ANALISIS DE VARIANZA SIMPLE

Univariate Results for Each DV (Sheet1 in Imported from Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition)					
Effect	Degr. of Freedom	E SS	E MS	E F	E p
Intercept	1	806191347	806191347	1165,521	0,000000
dias	3	41048774	13682925	19,782	0,000466
Error	8	5533605	691701		
Total	11	46582379			

TABLA 5.4

INTERVALOS DE CONFIANZA PARA EL MODULO DE ELASTICIDAD EN LOS DIAS DE CURADO

dias; LS Means (Sheet1 in Imported from C:\Docur Current effect: F(3, 8)=19,782, p=,00047 Effective hypothesis decomposition)						
Cell No.	dias	E Mean	E Std.Err.	E -95,00%	E +95,00%	N
1	7	9062,33	480,1738	7955,051	10169,62	3
2	14	10487,67	480,1738	9380,384	11594,95	3
3	21	7780,00	480,1738	6672,717	8887,28	3
4	28	5456,00	480,1738	4348,717	6563,28	3

La Figura 5.6 muestra las medias del Módulo de Elasticidad con su respectivo intervalo de confianza en los diferentes días de tratamiento o curado. Se puede apreciar claramente que el valor más elevado se obtuvo a los 14 días de curado en agua.

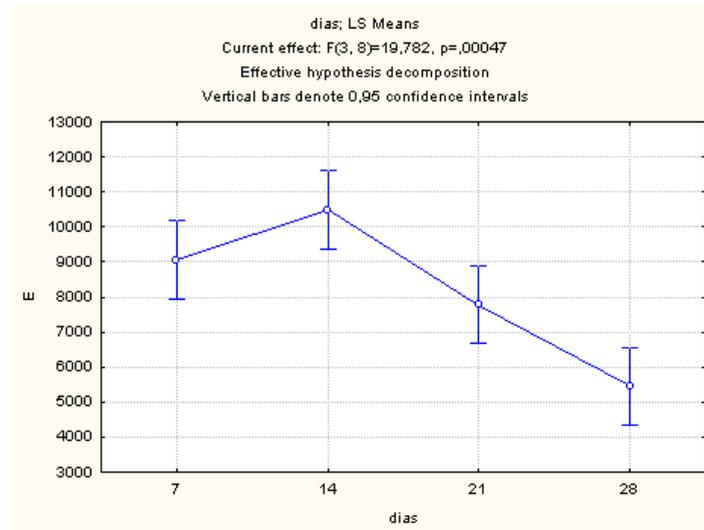


FIGURA 5.6 – MODULO DE ELASTICIDAD EN LOS RESPECTIVOS DIAS DE CURADO

5.2.2 Análisis Grupal – Porcentajes de Zeolita 2

Para el análisis de los resultados grupales de los esfuerzos de compresión obtenidos en la experimentación se utilizó la prueba de Shapiro y Wilk, la cual verifica si los datos poseen una distribución normal.

TABLA 5.5

DATOS INGRESADOS AL ESTADISTICA

	1 % Zeolita 2	2 Dias/inmersion	3 Esfuerzo de ruptura
J	5	7	87,612
J	5	7	75,8163636
J	5	7	78,4
J	5	14	117,6
J	5	14	111,363636
J	5	14	114,927273
J	5	21	122,054545
J	5	21	106,018182
J	5	21	97,1090909
J	5	28	114,036364
J	5	28	112,254545
J	5	28	79,2909091
J	10	7	79,46
J	10	7	88,99
J	10	7	71,2
J	10	14	103,23
J	10	14	89,88
J	10	14	88,99
J	10	21	99,67
J	10	21	112,13
J	10	21	95,22
J	10	28	74,76
J	10	28	92,55
J	10	28	87,21
J	15	7	77,51
J	15	7	87,31
J	15	7	79,29
J	15	14	89,06
J	15	14	76,62

Análisis de la Varianza

Una vez comprobado que los datos poseen una distribución normal, los mismos son sometidos a un análisis de varianza factorial, mediante la herramienta ANOVA – FACTOR, con el propósito de identificar si existen diferencias significativas entre las medias del Esfuerzo de Compresión por el efecto de los días de curado, porcentaje de Zeolita 2 y la combinación de ambos.

Se encuentran diferencias significativas con la comparación del valor de F que obtenemos en el análisis, con el del F crítico obtenido por tabla cuyo valor es $F_{cr} = 4.06$.

Con el análisis de los datos, la Tabla 5.6 nos muestra que para el porcentaje de Zeolita 2 y para los días de curado en agua, por individual, se obtuvo un $F > F_{cr}$, por lo tanto si existen diferencias significativas, pero para la combinación de ambos efectos se obtuvo

un F igual a 1.976, menor al F_{cr} , por lo cual no existen diferencias significativas. En conclusión esto nos indica que el esfuerzo de compresión relacionado de manera independiente con los días de curado y con el porcentaje de Zeolita 2 presenta diferencias significativas en los valores obtenidos, pero para la combinación de ambos efectos los valores del Esfuerzo a la Compresión no presentan diferencias significativas.

TABLA 5.6

ANALISIS DE VARIANZA FACTORIAL

Effect	Univariate Tests of Significance for Esfuerzo de i			
	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	1	487691,2	6145,210	0,000000
% Zeolita 2	4	865,5	10,906	0,000004
Dias/inmersion	3	704,5	8,878	0,000124
% Zeolita 2*Dias/inmersion	12	156,8	1,976	0,053393
Error	40	79,4		

En la tabla 5.7 se describe el intervalo para los valores del Esfuerzo de Compresión para los diferentes porcentajes de Zeolita 2 con un 95% de confianza.

La Figura 5.7 nos muestra las medias del Esfuerzo de Compresión con su respectivo intervalo de confianza con los respectivos porcentajes de Zeolita 2. Se puede apreciar claramente que el valor más elevado se obtuvo con el 5% de concentración de Zeolita 2.

TABLA 5.7

INTERVALOS DE CONFIANZA PARA EL ESFUERZO DE
COMPRESION EN LOS PORCENTAJES DE ZEOLITA 2

% Zeolita 2; Weighted Means (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Se Current effect: F(4, 40)=10,906, p=,00000 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	% Zeolita 2	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95,00%	Esfuerzo de ruptura +95,00%	N
1	5	101,3736	4,885806	90,61999	112,1272	12
2	10	90,2742	3,368476	82,86020	97,6881	12
3	15	85,7475	3,103729	78,91624	92,5788	12
4	20	94,4150	2,536422	88,83237	99,9976	12
5	25	78,9720	1,742315	75,13722	82,8068	12

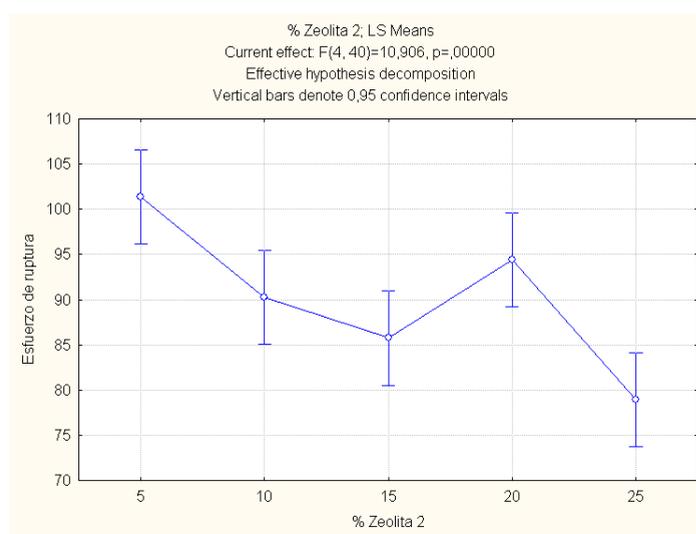


FIGURA 5.7 – ESFUERZO DE COMPRESION CON LOS
RESPECTIVAS CONCENTRACIONES DE ZEOLITA 2

La tabla 5.8 muestra el intervalo para los valores del Esfuerzo de Compresión en los diferentes días de curado con un 95% de confianza.

TABLA 5.8

INTERVALOS DE CONFIANZA PARA EL ESFUERZO DE
COMPRESION EN LOS DIAS DE CURADO

Dias/Inmersion; Weighted Means (Sheet1 in Imported from C:\Documents and Settings\sami Current effect: F(3, 40)=8.8777, p=.00012 Effective hypothesis decomposition						
Cell No.	Dias/Inmersion	Esfuerzo de ruptura Mean	Esfuerzo de ruptura Std.Err.	Esfuerzo de ruptura -95,00%	Esfuerzo de ruptura +95,00%	N
1	7	80,78003	1,338278	77,90971	83,6504	15
2	14	92,56993	3,664409	84,71056	100,4293	15
3	21	97,02359	3,301508	89,94256	104,1046	15
4	28	90,25226	3,800804	82,10035	98,4042	15

En la figura 5.6 se observa las medias del Esfuerzo de Compresión con su respectivo intervalo de confianza en los diferentes días de tratamiento o curado. Se puede apreciar claramente que el valor más elevado se obtuvo a los 21 días de curado en agua. Este resultado indica que a los 21 días de curado en agua el concreto alcanza su esfuerzo a la compresión máximo, luego de este tiempo ese valor se decrementa como se puede apreciar.

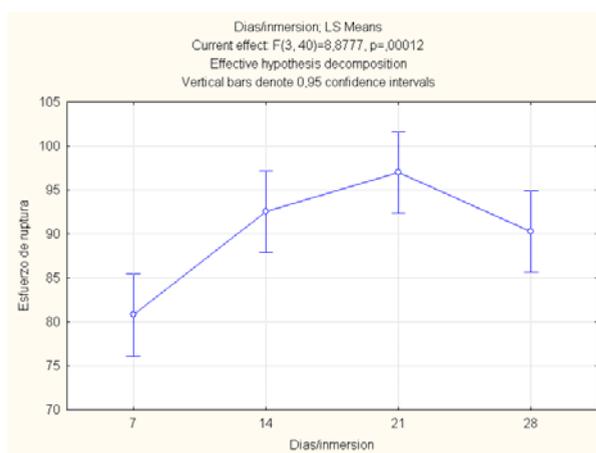


FIGURA 5.7 – ESFUERZO DE COMPRESION EN LOS DIAS DE
CURADO

CAPÍTULO 6

C6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En el presente estudio se analizó el cambio en los esfuerzos de compresión (a las edades de 7, 14 y 28 días) de mezclas de cemento con adición de Zeolita 2. Se diseñaron los experimentos de acuerdo con la Norma ASTM C 109/C 109M – 02. Los datos obtenidos se analizaron mediante el Software Estadística con la herramienta ANOVA para su respectiva validación. De acuerdo con los resultados experimentales, el efecto tanto de la Zeolita 2 como de los días de curado desempeña un papel significativo en la resistencia a la compresión, pero la combinación de ambas no presenta diferencias significativas en los resultados obtenidos.

Con una adición del 10% de Zeolita 2 al cemento Portland tipo I para una mezcla de concreto, se concluye que las condiciones óptimas para alcanzar la máxima resistencia a la compresión son a los 21 días de curado en agua. La resistencia a la compresión máxima conseguida en estas condiciones fue de 112.13 MPa.

Analizando los datos experimentales para todas las concentraciones de Zeolita 2, las condiciones óptimas que se han identificado son: 5% de Zeolita 2, 72% de Cemento Portland tipo I, 23% de Agua y 14 días de tiempo de curado. La resistencia a la compresión máxima conseguida en las anteriores condiciones fue de 114.63 MPa.

6.2 Recomendaciones

Existen factores que pueden influir en los resultados de la experimentación como son los factores humanos, la metrología, las condiciones ambientales, la instrumentación, equipos, etc. por lo que se recomienda para estudios futuros tomar en cuenta la calibración de equipos, ambientar el área de experimentación y precisión en la lectura de datos. Para mayor exactitud en la lectura de datos se recomienda una máquina de ensayos con lector digital ya que la lectura en un dial posee errores y la velocidad de carga sobre la probeta pueden afectar los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto. “Tipos de Cemento y sus Usos”.
www.iccyc.com/pagecreator/paginas/TIPOS%20DE%20CEMENTO%20Y%20SUS%20USOS.pdf
- [2] Publicación técnica de la cámara de construcción de Guayaquil- Marzo 2008
- [3] Instituto Colombiano de Productores de Cemento, “Consumo de Cemento”.
<http://www.soboce.com/websoboce/html/Enconcreto2007Nov/sorevistas15cincoyuno.htm>
- [4] Wikipedia. “Cemento”. <http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento>
- [5] Sara Guadalupe Reyes Echavarría. “Manufactura del cemento Portland”.
<http://www.monografias.com/trabajos7/mace/mace.shtml?monosearch>
- [6] ZeoCat. “¿Qué es la Zeolita?”
<http://www.zeolitanatural.com/html/spanish/queeszeolita.htm>
- [7] Solís Carcaño R. y Moreno E. “Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo”.
www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen9/influencia.pdf
- [8] Melon – Webtips. “Guía para el curado del hormigón”.
http://www.cementomelon.cl/html_construc_prof/webtipn9.htm
- [9] Ing. Ramperti Alberto E. “Introducción al Diseño de Experimentos”.
www.rubberservice.com.ar/literatura/confdoe.pdf
- [10] Lic. Solís Reyna Norma Irene, Lic. Márquez Jesús Daniel, “Diseño de Experimentos”.

Meléndez http://www.scribd.com/doc/2249644/DisenodeExperimentos?ga_related_doc=1

[11] Pekmezci B. Y., Akyuz S., “Uso óptimo de la puzolana natural para la resistencia máxima compresiva del concreto”. Cement and Concrete Research.

[12] Petkova Violeta, Ivanov Yachko. “Uso de un modelo matemático en la composición de un material compuesto”. Cement and Concrete Research.

[13] Norma ASTM C 595 – 03

[14] Norma ASTM C 109/C 109M – 02

ANEXO 1

PROTOCOLO EXPERIMENTAL

ANEXO 1.1 - PROCESO DE MOLIENDA DE LA ZEOLITA 2



REDUCCION DE TAMAÑO



RESULTADOS DE LA REDUCCION DE TAMAÑO



TRITURADORA DE MANDIBULAS



TRITURADORA DE RODILLOS



MATERIAL TRITURADO



MOLINO DE BOLAS



MALLAS PARA EL TAMIZADO



TAMIZADO DEL MATERIAL

ANEXO 1.2 – EQUIPOS PARA LA PREPARACION DE PROBETAS



BALANZA DIGITAL



RECIPIENTES GRADUADOS



MOLDES



MEZCLADORA



LEVA VIBRATORIA

ANEXO 1.3 – EQUIPO PARA ENSAYOS DE COMPRESION



MAQUINA PARA ENSAYOS DE COMPRESION

ANEXO 2

Probeta 1 a los 14 días de curado

TABLA 4.8

DATOS PROBETA 1 CURADO 14 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.127	0.003	1133.98	11124.35	2500.00	4.45
0.254	0.005	4263.77	41827.57	2500.00	16.73
0.381	0.008	8164.66	80095.34	2500.00	32.04
0.508	0.010	15875.73	155740.94	2500.00	62.30
0.635	0.013	20865.25	204688.09	2500.00	81.88
0.762	0.015	26308.36	258084.99	2500.00	103.23

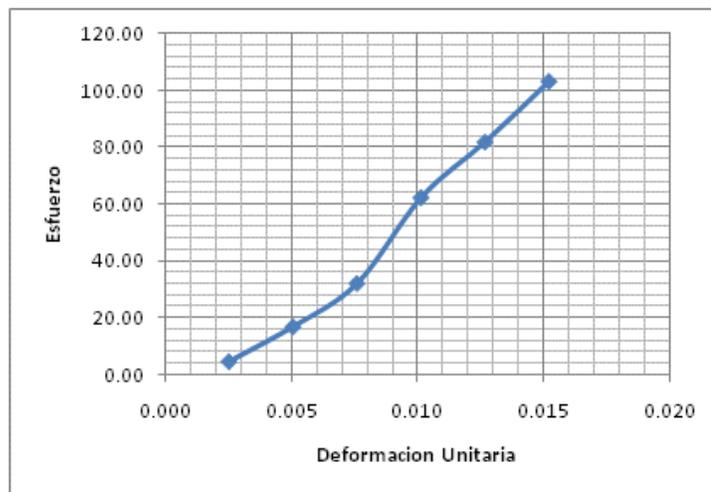


FIGURA 4.10 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 1 CURADO 14 DIAS EN AGUA

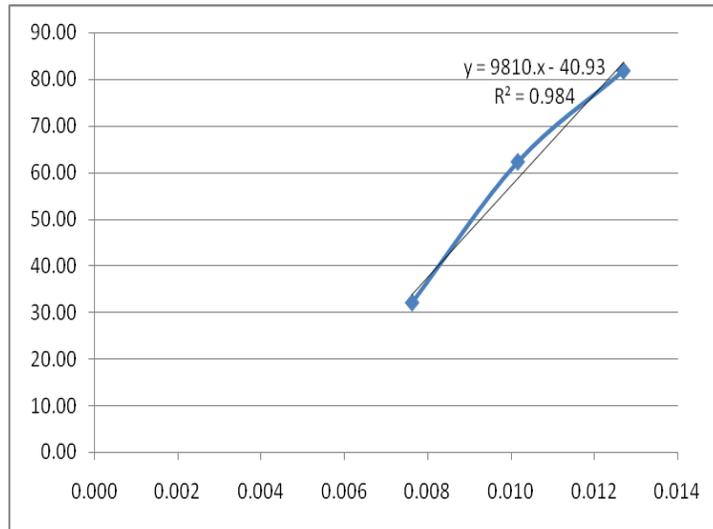


FIGURA 4.11 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 1
CURADO 14 DIAS EN AGUA

Probeta 2 a los 14 días de curado

TABLA 4.9

DATOS PROBETA 2 CURADO 14 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.13	0.00	907.18	8899.48	2500.00	3.56
0.25	0.01	2857.63	28033.37	2500.00	11.21
0.38	0.01	6168.86	60516.48	2500.00	24.21
0.51	0.01	16556.12	162415.55	2500.00	64.97
0.64	0.01	21092.05	206912.96	2500.00	82.77
0.76	0.02	22906.41	224711.93	2500.00	89.88

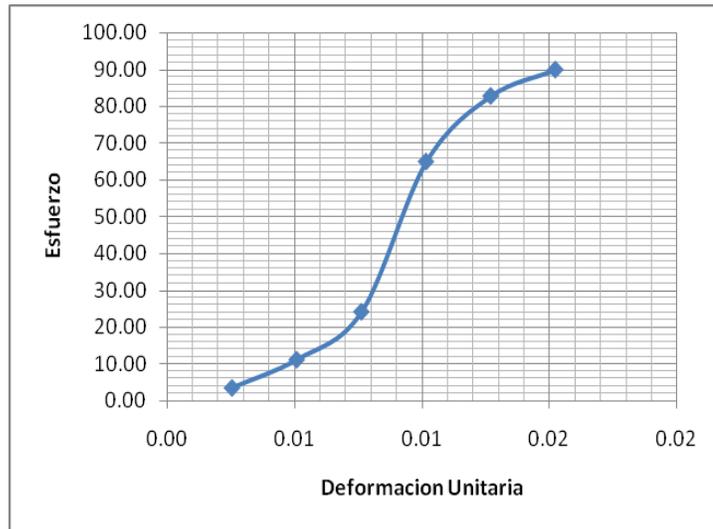


FIGURA 4.12 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 2 CURADO 14 DIAS EN AGUA

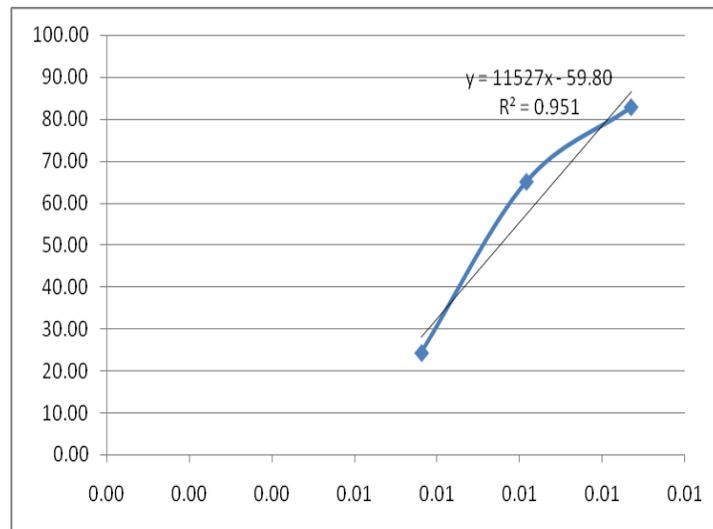


FIGURA 4.13 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 2 CURADO 14 DIAS EN AGUA

Probeta 3 a los 14 días de curado

TABLA 4.10

DATOS PROBETA 3 CURADO 14 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.127	0.003	408.23	4004.77	2500.00	1.60
0.254	0.005	1678.29	16464.04	2500.00	6.59
0.381	0.008	5034.88	49392.13	2500.00	19.76
0.508	0.010	10750.14	105458.87	2500.00	42.18
0.635	0.013	18143.69	177989.65	2500.00	71.20
0.762	0.015	22679.62	222487.06	2500.00	88.99

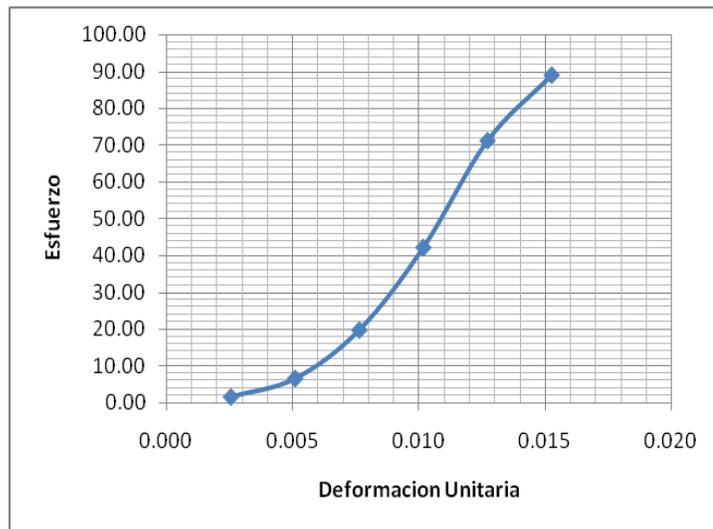


FIGURA 4.14 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 3 CURADO 14 DIAS EN AGUA

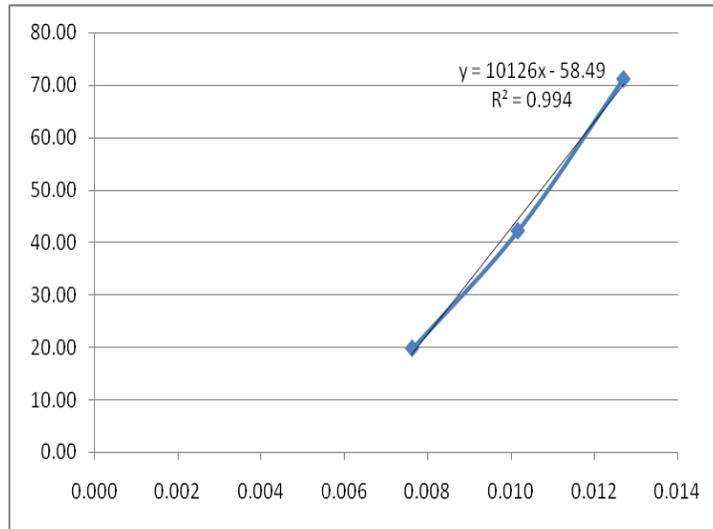


FIGURA 4.15 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 3
CURADO 14 DIAS EN AGUA

Probeta 1 a los 21 días de curado

TABLA 4.11

DATOS PROBETA 1 CURADO 21 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg.)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.13	0.00	1179.34	11569.33	2500.00	4.63
0.25	0.01	2721.55	26698.45	2500.00	10.68
0.38	0.01	7030.68	68970.99	2500.00	27.59
0.51	0.01	12927.38	126817.62	2500.00	50.73
0.64	0.01	17463.31	171315.03	2500.00	68.53
0.76	0.02	21545.64	211362.70	2500.00	84.55
0.89	0.02	25401.17	249185.50	2500.00	99.67

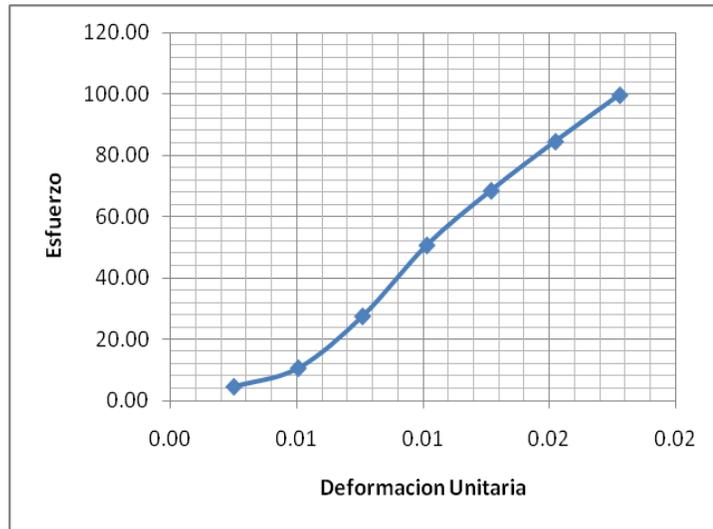


FIGURA 4.16 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 1 CURADO 21 DIAS EN AGUA

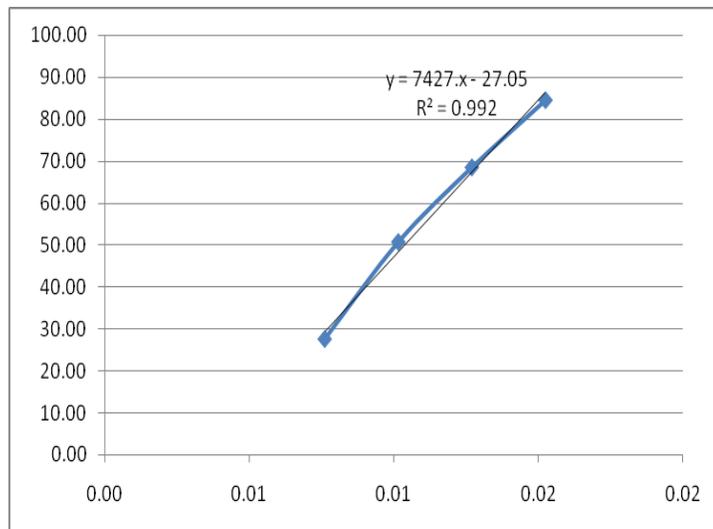


FIGURA 4.17 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 1 CURADO 21 DIAS EN AGUA

Probeta 2 a los 21 días de curado

TABLA 4.12

DATOS PROBETA 2 CURADO 21 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg.)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.13	0.00	635.03	6229.64	2500.00	2.49
0.25	0.01	1814.37	17798.96	2500.00	7.12
0.38	0.01	4535.92	44497.41	2500.00	17.80
0.51	0.01	9979.03	97894.31	2500.00	39.16
0.64	0.01	15195.34	149066.33	2500.00	59.63
0.76	0.02	21545.64	211362.70	2500.00	84.55
0.89	0.02	26535.15	260309.86	2500.00	104.12
1.02	0.02	28576.32	280333.69	2500.00	112.13

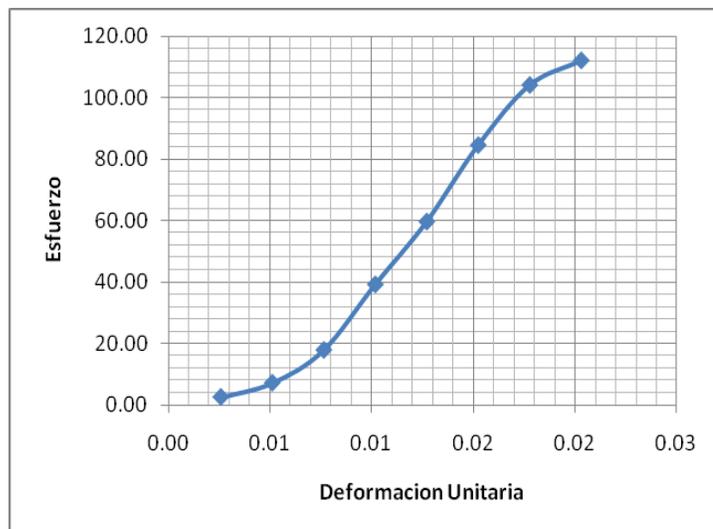


FIGURA 4.18 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 2 CURADO 21 DIAS EN AGUA

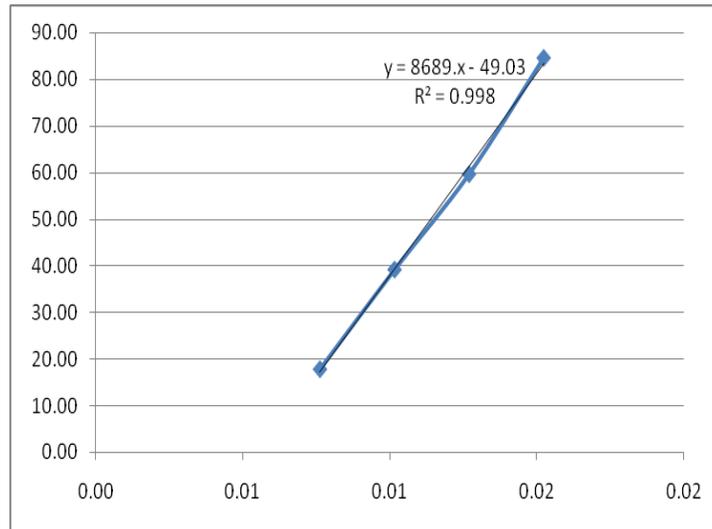


FIGURA 4.19 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 2
CURADO 21 DIAS EN AGUA

Probeta 3 a los 21 días de curado

TABLA 4.13

DATOS PROBETA 3 CURADO 21 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg.)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.13	0.00	1451.50	14239.17	2500.00	5.70
0.25	0.01	4445.21	43607.46	2500.00	17.44
0.38	0.01	6939.96	68081.04	2500.00	27.23
0.51	0.01	12020.20	117918.14	2500.00	47.17
0.64	0.01	17009.71	166865.29	2500.00	66.75
0.76	0.02	20865.25	204688.09	2500.00	81.88
0.89	0.02	24267.19	238061.15	2500.00	95.22

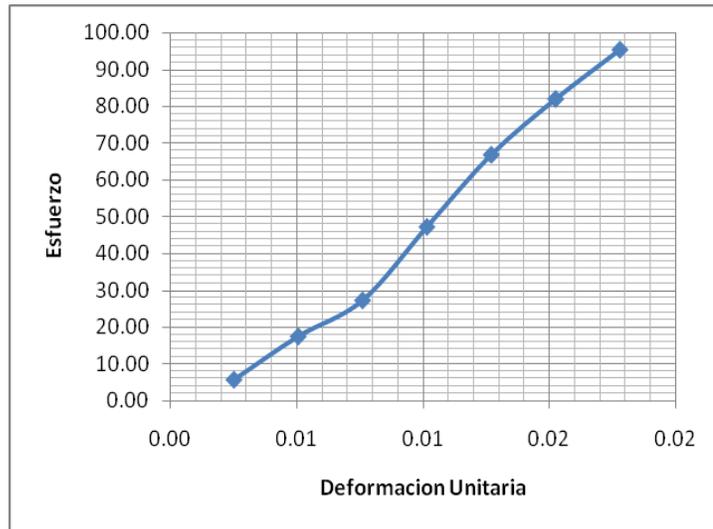


FIGURA 4.20 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 3 CURADO 21 DIAS EN AGUA

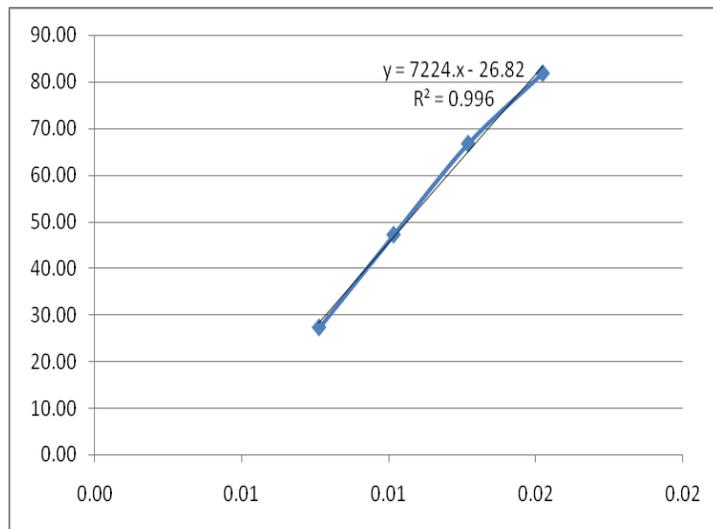


FIGURA 4.21 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 3 CURADO 21 DIAS EN AGUA

Probeta 1 a los 28 días de curado

TABLA 4.14

DATOS PROBETA 1 CURADO 28 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg.)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.13	0.00	816.47	8009.53	2500.00	3.20
0.25	0.01	2358.68	23138.65	2500.00	9.26
0.38	0.01	6849.24	67191.09	2500.00	26.88
0.51	0.01	9706.88	95224.46	2500.00	38.09
0.64	0.01	12927.38	126817.62	2500.00	50.73
0.76	0.02	19050.88	186889.13	2500.00	74.76

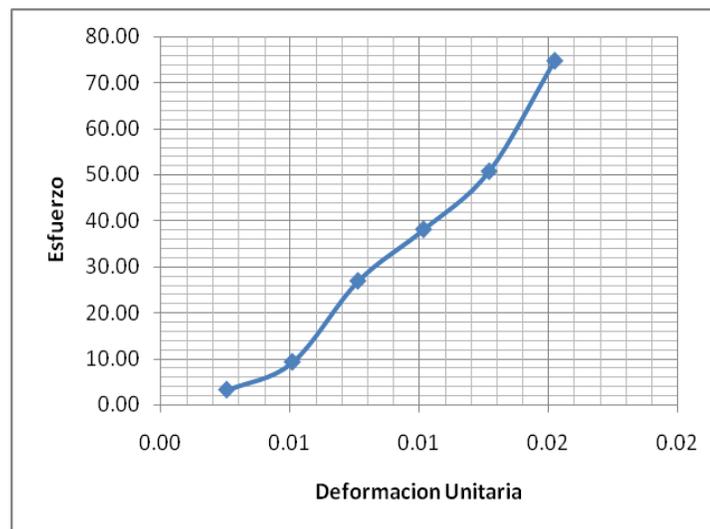


FIGURA 4.22 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 1 CURADO 28 DIAS EN AGUA

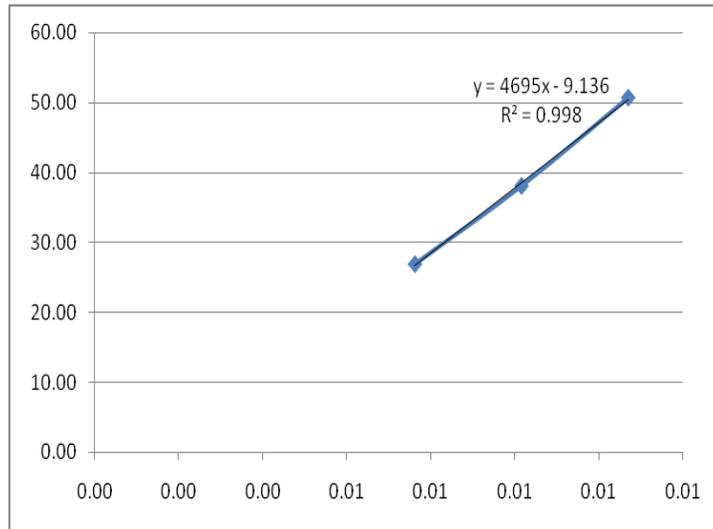


FIGURA 4.23 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 1
CURADO 28 DIAS EN AGUA

Probeta 2 a los 28 días de curado

TABLA 4.15

DATOS PROBETA 2 CURADO 28 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg.)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.13	0.00	1224.70	12014.30	2500.00	4.81
0.25	0.01	2404.04	23583.63	2500.00	9.43
0.38	0.01	5805.98	56956.69	2500.00	22.78
0.51	0.01	9661.52	94779.49	2500.00	37.91
0.64	0.01	14288.16	140166.85	2500.00	56.07
0.76	0.02	17916.90	175764.78	2500.00	70.31
0.89	0.02	20184.86	198013.48	2500.00	79.21
1.02	0.02	23133.21	226936.80	2500.00	90.77
1.14	0.02	23586.80	231386.54	2500.00	92.55

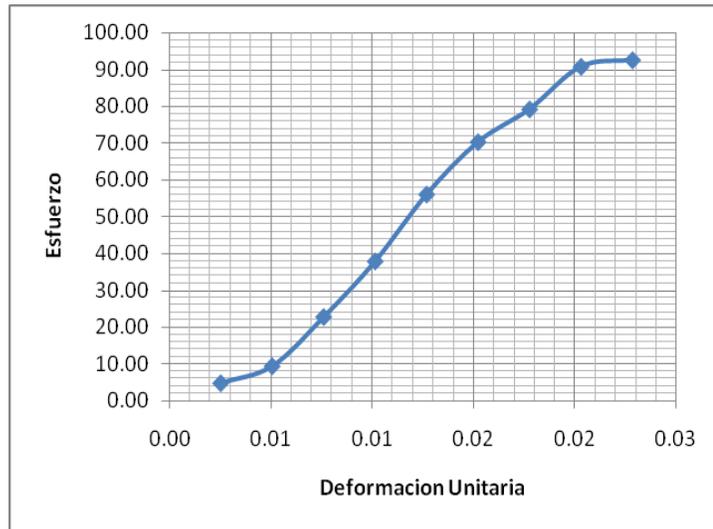


FIGURA 4.24 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 2 CURADO 28 DIAS EN AGUA

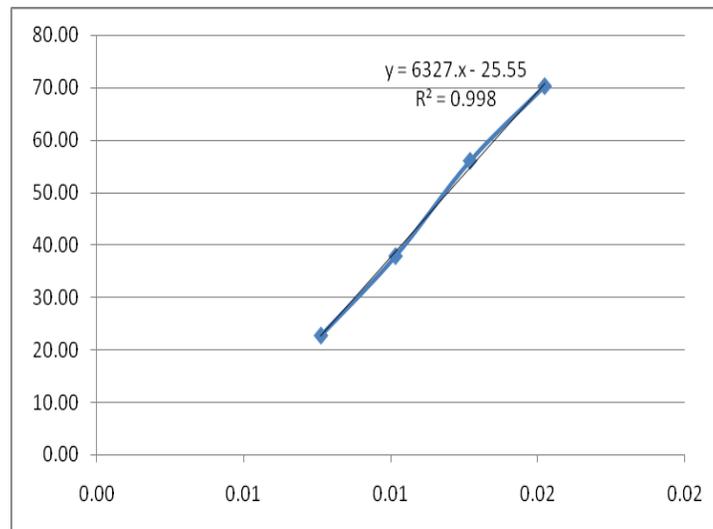


FIGURA 4.25 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 2 CURADO 28 DIAS EN AGUA

Probeta 3 a los 28 días de curado

TABLA 4.16

DATOS PROBETA 3 CURADO 28 DIAS

Marca (mm)	Deformación Unitaria	Masa (Kg.)	Fuerza (N)	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)
0.13	0.00	771.11	7564.56	2500.00	3.03
0.25	0.01	2585.48	25363.52	2500.00	10.15
0.38	0.01	6078.14	59626.53	2500.00	23.85
0.51	0.01	9752.24	95669.43	2500.00	38.27
0.64	0.01	12246.99	120143.01	2500.00	48.06
0.76	0.02	16782.92	164640.42	2500.00	65.86
0.89	0.02	22226.03	218037.32	2500.00	87.21

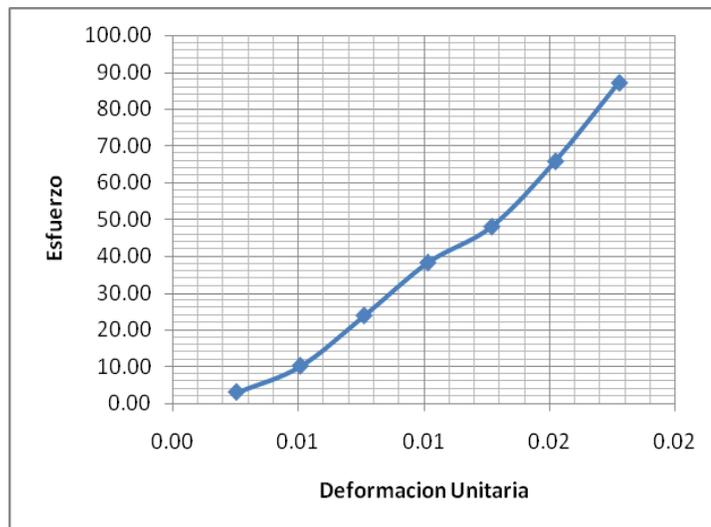


FIGURA 4.26 – ESFUERZO vs DEFORMACION PROBETA 3 CURADO 28 DIAS EN AGUA

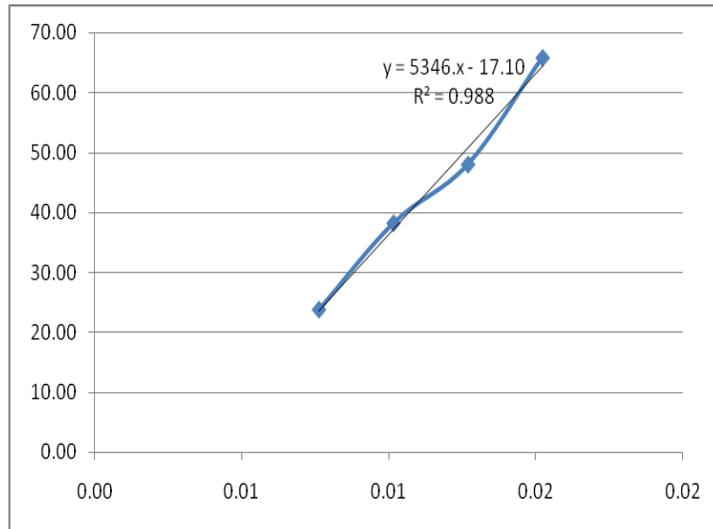


FIGURA 4.27 – ESFUERZO vs DEFORMACION LINEALIZADO, PROBETA 3
CURADO 28 DIAS EN AGUA

ANEXO 3

Resistencias a los 14 días de curado

TABLA 4.17

COMPARACION DE ESFUERZOS A LOS 14 DIAS DE CURADO

Curado 14 días			
Tipo de Cemento	Cemento I con Zeolita 2	Cemento I	Cemento IV
Deformación Unitaria	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0.003	3.20	4.57	0.92
0.005	11.51	15.49	2.55
0.008	25.33	30.91	5.76
0.010	56.48	47.88	10.73
0.013	78.61	65.86	16.22
0.015	94.04	83.66	22.56
0.018		95.22	29.43
0.020		99.38	35.64
0.023			41.86
0.025			47.94
0.028			52.32
0.030			57.88
0.033			61.28
0.036			66.71
0.038			68.67

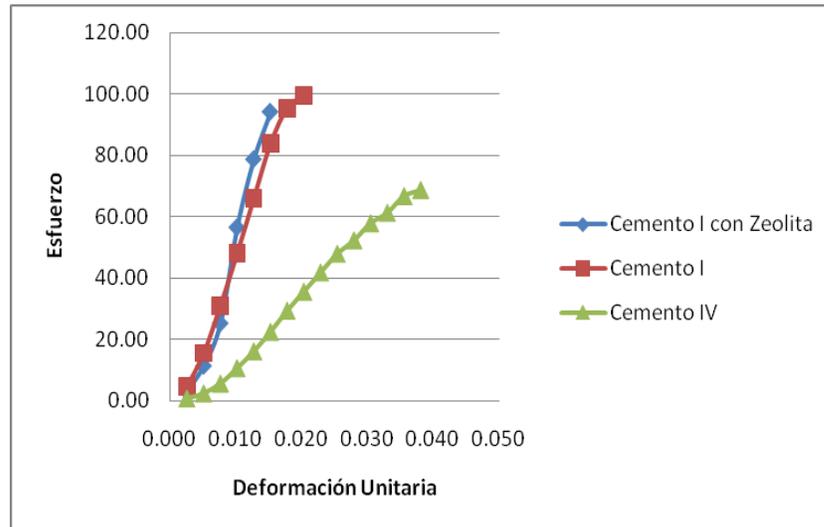


FIGURA 4.28 – ESFUERZO vs DEFORMACION UNITARIA EN LOS TIPOS DE CEMENTO A LOS 14 DIAS DE CURADO

Resistencias a los 21 días de curado

TABLA 4.18

COMPARACION DE ESFUERZOS A LOS 21 DIAS DE CURADO

Curado 21 días			
Tipo de Cemento	Cemento I con Zeolita 2	Cemento I	Cemento IV
Deformación Unitaria	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0.003	4.27	3.20	0.46
0.005	11.75	10.74	1.05
0.008	24.21	23.79	1.77
0.010	45.68	42.30	2.94

0.013	64.97	59.03	5.56
0.015	83.66	75.05	8.37
0.018	99.67	88.40	12.16
0.020	112.13	99.97	17.00
0.023			22.56
0.025			28.78
0.028			34.66
0.030			41.20
0.033			47.42
0.036			53.50
0.038			59.51
0.041			64.42
0.043			69.65
0.046			74.88
0.048			78.48

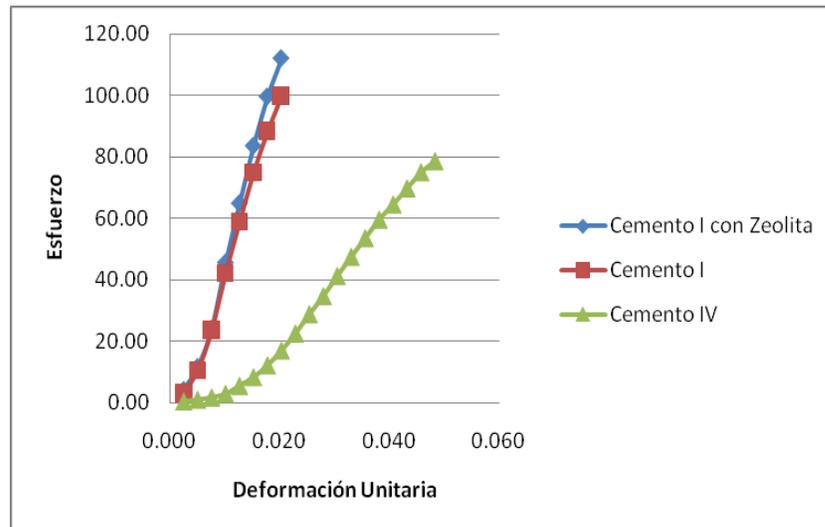


FIGURA 4.29 – ESFUERZO vs DEFORMACION UNITARIA EN LOS TIPOS DE CEMENTO A LOS 21 DIAS DE CURADO

Resistencias a los 28 días de curado

TABLA 4.19

COMPARACION DE ESFUERZOS A LOS 28 DIAS DE CURADO

Curado 28 días			
Tipo de Cemento	Cemento I con Zeolita 2	Cemento I	Cemento IV
Deformación Unitaria	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
0.003	3.68	4.81	0.59
0.005	9.61	13.76	1.18
0.008	24.50	28.89	2.20
0.010	38.09	44.02	4.12
0.013	51.62	61.11	7.00
0.015	70.31	80.10	12.16
0.018	83.21	96.41	17.72
0.020	90.77	99.67	23.54
0.023	92.55		30.02
0.025			36.95
0.028			44.01
0.030			51.86
0.033			57.42
0.036			63.77
0.038			70.44
0.041			73.58

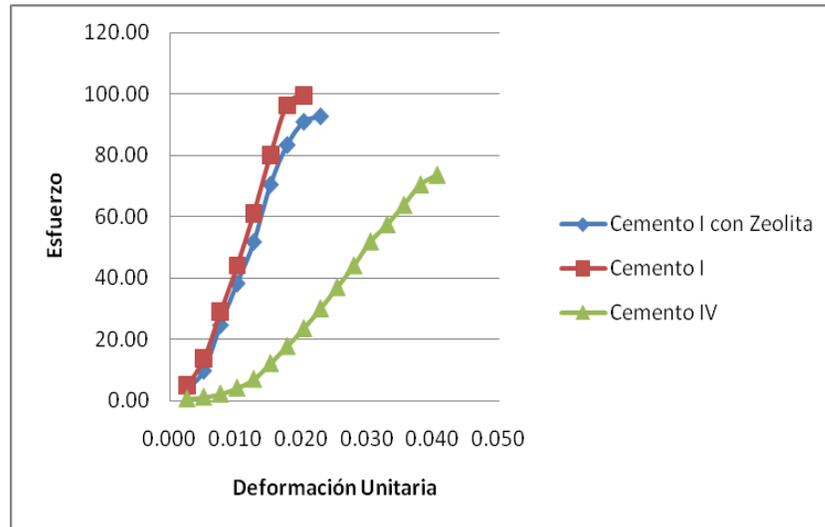


FIGURA 4.30 – ESFUERZO vs DEFORMACION UNITARIA EN LOS TIPOS DE CEMENTO A LOS 28 DIAS DE CURADO

ANEXO 4

Programación en Matlab

```
clear;

clc;

E=9062.33e6;      %Modulo de Elasticidad (Varía según día de curado)
m=0.01080929;    %Varía según día de curado
a=0.33;          %Constante para todos los días de curado
de=0.00254;      %Variación de la Deformación (Todos los días de curado)
def=0.018;       %Deformación Final (Varía según día de curado)
e=[0:de:def]';
k=size(e);
iteracion=k(1,1);
G(1)=0;
Gy(1)=63.17e6;
lampda(1)=0;

for i=1:iteracion

    Gtr(i+1)=G(i)+E*de;

    Ftr(i+1)=abs(Gtr(i+1))-Gy(i);
```

```

if Ftr(i+1) > 0
    [deltalampdaf(i+1),H(i+1)]=MetodoN_R(Ftr(i+1),a,m,E,Gy(1),lampda (i));
    lampda(i+1)=deltalampdaf(i+1)+lampda(i);
    G(i+1)=Gtr(i+1)-E*deltalampdaf(i+1)*sign(Gtr(i+1));
    Gy(i+1)=Gy(i)+H(i+1)*deltalampdaf(i+1);
else
    lampda(i+1)=0;
    G(i+1)=Gtr(i+1);
    Gy(i+1)=Gy(i);
end
end

esfuerzo=G(1:iteracion);
plot(e,esfuerzo,'b');
title ('Grafica')
xlabel('Deformacion');
ylabel('Esfuerzo');
legend('Modelo Bilineal');
grid;

```

Función Newton Raphson

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

TOL=1e-10;

deltalampda(1)=TOL;

for k=1:50,

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

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

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

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

    if norm(r(k))<TOL*norm(r(1))

        deltalampdaf=deltalampda(k+1);

        Hn1=a*Gy*sqrt(m/(deltalampda(k+1)+ln))*(m-deltalampda(k+1)-ln)/(m+deltalampda(k+1)+ln)^2;

        break

    end

end

end
```