

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 15 % y curado en Agua”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Eduardo Mauricio Jácome Berrezueta

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

Principalmente a mis padres, debido al esfuerzo realizado para yo poder lograr este Título, a mis hermanos por su apoyo moral, y como olvidar a mis amigos que de una u otra forma, contribuyeron a la finalización de mis estudios.

DEDICATORIA

A MIS PADRES,
HERMANOS Y
AMIGOS.

DECLARACIÓN EXPRESA

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



Eduardo Jácome Berrezueta

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



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



Ing. Juan Carlos Pindo
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Mauricio Cornejo M.
VOCAL



Ing. Javier Bermudez R.
VOCAL

RESUMEN

La Industria del cemento se ha desarrollado a alta velocidad en las últimas décadas. Se lo ha utilizado para la construcción de pequeñas casas, hasta para grandes construcciones, por lo que las exigencias del consumidor se han elevado considerablemente.

Dentro de estas exigencias, resalta la resistencia a la compresión, propiedad en la que se basa el siguiente estudio, teniendo el objetivo de elevar dicha resistencia mediante la adición de un aditivo, que para este caso, se trata de Zeolita 2, en un 15 % de la mezcla total del concreto.

El tipo de cemento para este estudio es el cemento comercial Pórtland tipo I utilizados para las construcciones comunes en nuestro país. Se desea analizar la resistencia a la compresión con un grado de confiabilidad del 95% de manera tal que las construcciones con este tipo de concreto sean más resistentes y así brindar mayor durabilidad y aún más importante, mayor seguridad.

Parte importante del estudio es el tipo de curado que será en agua con tiempos de 7, 14, 21, 28 días de curado, en cada uno de los cuales se tomarán muestras para ser analizadas y estudiar la variación de la resistencia a la compresión.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS.....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	VII
INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1	
1. GENERALIDADES.....	4
1.1. Presentación del problema	4
1.2. Hipótesis.....	5
1.3. Objetivos de la Tesis.....	5
1.4. Metodología usada para el desarrollo de la Tesis.....	6

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Cemento Portland Tipo I.....	8
2.2. Zeolita 2.....	12
2.3. Métodos de Curado del Cemento.....	14
2.4. El Estado del Arte de la Simulación del Comportamiento de Cemento Portland Tipo I.....	20

CAPITULO 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3.1. Equipos y materiales.....	22
3.2. Métodos de experimentación.....	24
3.2.1. Método Matemático.....	29
3.2.2. Método Estadístico.....	32

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE LA PRUEBA Y RESULTADOS.....	35
4.1. Adquisición de datos y tabulación.....	35
4.2. Análisis de Cambios de propiedades.....	37
4.3. Análisis de resultados.....	42

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
5.1. Conclusiones.....	53
5.2. Recomendaciones.....	54

Abreviaturas

Fcritico	Valor estadístico F crítico
Fcal	Valor estadístico F calculado
Wcal	Valor estadístico W calculado
Wtab	Valor estadístico W tabulado
CaO	Óxido de calcio
SiO ₂	Dióxido de Silicio
Al ₂ O ₃	Trióxido de
Fe ₂ O ₃	Trióxido de hierro
Nh ₄	Amoníaco
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
Na	Sodio
K	Potasio
Kg.	Kilogramo
gr.	Gramo
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
µm	Micrómetro
ml	Mililitro
HRb	Dureza Rockwell B
ASTM	American Steel Testing Manufacture
Eprom	Esfuerzo Promedio

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Metodología de la tesis.....	6
Figura 4.1 Gráfica de esfuerzo vs. Deformación a los 7 días de curado.....	36
Figura 4.2 Comparación de esfuerzos promedios.....	40
Figura 4.3 Obtención del módulo de elasticidad.....	41
Figura 4.3 Gráfica esfuerzos maximos promedios vs. tiempo de curado.....	42
Figura 4.4 Gráfica de comportamiento plástico – elástico.....	44
Figura 4.5 Histograma de Eprom para pastas de cemento con una concentración de 15% de zeolita 2.....	46
Figura 4.6 Módulo de elasticidad vs. días de curado.....	48
Figura 4.7 Gráfica esfuerzo último vs. Porcentaje de zeolita 2.....	51
Figura 4.8 Esfuerzos últimos vs. tiempo de curado.....	52

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1 Detalles de moldes.....	22
Tabla 3.2 Máquinas y tiempo de molienda.....	24
Tabla 3.3 Granulometría de los tamizados.....	24
Tabla 4.1 Esfuerzos y deformaciones a los 7 días de curado con 15 % de Zeolita 2.....	36
Tabla 4.2 Esfuerzos promedios de compresión en cemento tipo 1 con aditivo.....	38
Tabla 4.3 Esfuerzos promedios de compresión en cemento tipo I sin aditivo.....	39
Tabla 4.4 Esfuerzos promedios de compresión en cemento tipo IV sin aditivo.....	39
Tabla 4.5 Esfuerzo promedios máximos para el diferente tiempo de curado.....	42
Tabla 4.6 Datos para analisis por elementos finitos.....	43
Tabla 4.7 Datos ingresados en el software STATISTICA.....	45
Tabla 4.8 Análisis de varianza.....	47
Tabla 4.9 Intervalos de confianza para cada tratamiento.....	47
Tabla 4.10 Datos ingresados en el software STATISTICA.....	49

Tabla 4.11 Análisis de varianza factorial.....	50
Tabla 4.12 Intervalos de confianza para cada % de zeolita 2.....	50
Tabla 4.13 Intervalos de confianza para los tiempos de curado.....	52

INTRODUCCION

El concreto es un material durable y resistente y dado que se trabaja en su forma líquida, prácticamente puede adquirir cualquier forma. Esta combinación de características es la razón principal por la que es un material de construcción tan popular.

La obtención del concreto se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a esto y con el fin de mejorar las propiedades se incorpora un aditivo. Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una pasta de cemento, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire.

La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

El comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

- 1) Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida.
- 2) La calidad propia de los agregados.
- 3) La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe realizarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua-cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario. Todo esto asegura una óptima calidad en la fabricación de concreto.

En cuanto a la calidad de los agregados, es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no representen el punto débil en el comportamiento del concreto y en su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que esté sometido.

Finalmente, la compatibilidad y el buen trabajo de conjunto de la matriz cementante con los agregados, depende de diversos factores tales como las características físicas y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, y la forma, tamaño máximo y textura superficial de éstos.

De la importancia que uno le de a estos puntos mencionados, depende sustancialmente la capacidad potencial del concreto, como material de construcción, para responder adecuadamente a las acciones resultantes de las condiciones en que debe prestar servicio. Pero esto, que sólo representa emplear el material potencialmente adecuado, no basta para obtener estructuras resistentes y durables, pues requiere conjugarse con el cumplimiento de previsiones igualmente eficaces en cuanto al diseño, especificación, construcción y mantenimiento de las propias estructuras.

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Presentación del Problema

Una estructura de concreto se somete a grandes valores de compresión, y no solo se refiere a estos valores como el peso de la misma estructura que de por si es enorme, sino a todo lo que será puesto sobre ella, así como también fuerzas externas, como temblores, vientos, e inclusive a la masa de agua que pueda acumularse sobre una terraza que dicha estructura soporte.

Se ha visto colisionar edificios, casas, e innumerables infraestructuras debido a un concreto "débil", es decir con resistencia no lo suficientemente alta para soportar condiciones extremas.

Se han realizado muchos estudios para mejorar dichas propiedades, no solo con proporciones de mezclas apropiadas, sino también con la adición de aditivos naturales y sintéticos.

El estudio realizado tiene como objetivo principal analizar cambios que se presenten en esta resistencia. No solo se refiere a factores que podemos ver, sino los más peligrosos, los que no se aprecian a simple vista, como la presencia de burbujas de aire en la pasta de cemento.

1.2 Hipótesis

La adición de Zeolita 2 al 15% en una pasta con cemento Portland Tipo I aumentará la resistencia a la compresión de la mezcla.

1.3 Objetivos de la Tesis

Objetivo General

Analizar el efecto que se obtiene, al incluir zeolita 2 y curado bajo agua, en el esfuerzo de compresión, en el cemento Pórtland tipo I.

Objetivos específicos

- Diseñar un modelo de experimento
- Efectuar los ensayos con muestras de concreto
- Adquirir los datos de la resistencia a la compresión
- Analizar e interpretar los datos recolectados

1.4 Metodología de la Tesis

Para el desarrollo de este estudio tomaremos en consideración la siguiente figura 1.1

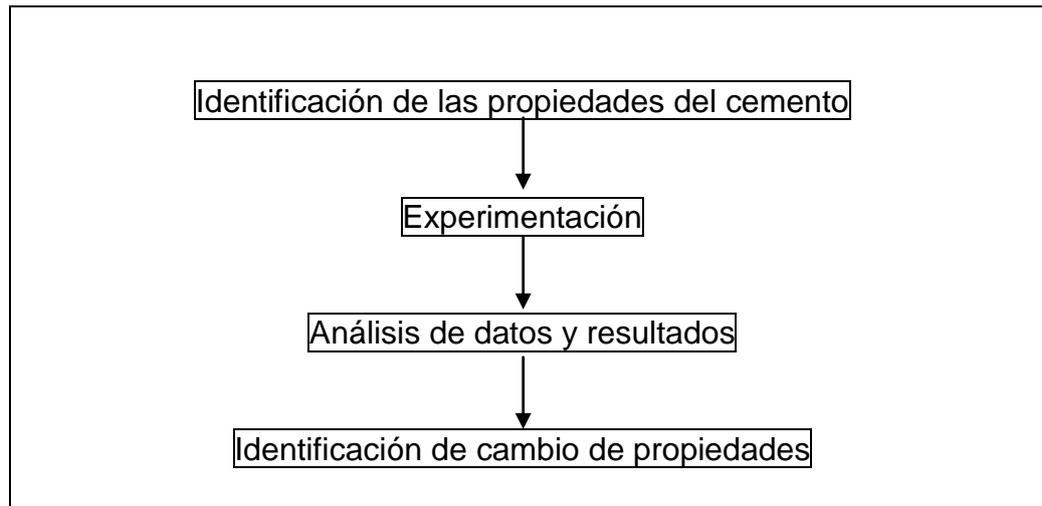


FIGURA 1.1 METODOLOGÍA DE LA TESIS

En la identificación del cemento se da a conocer propiedades y conceptos teóricos respecto al cemento comercial, para así poder realizar una posterior comparación con los resultados obtenidos en el estudio.

Se procede luego con la experimentación donde se detalla el procedimiento de experimentación utilizado en el estudio así como también equipos y materiales a utilizarse.

Seguidamente, una vez adquirido los datos se realiza el análisis de datos y los resultados que éstos proporcionan para finalmente identificar los cambios en cuanto a la resistencia a la compresión que se presente.

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

En esta parte del estudio se da a conocer fundamentos teóricos sobre los agregados que forman parte de la pasta de cemento así como diferente métodos de curado existentes.

2.1 Cemento Portland Tipo I

El cemento Portland tiene sus orígenes en la cal u óxido de calcio, a partir del cual y luego de cientos de años de estudios empíricos y científicos, se llega a lo que hoy se conoce como cemento. En la América Prehispánica los aztecas la emplearon también en la fabricación de tabiques y techos armados con caña y bambú. En 1824, un albañil Inglés llamado Joseph Aspdin, patentó un producto que él llamó cemento Pórtland, pues al endurecerse adquiría un color semejante al de una piedra de la isla Pórtland en Inglaterra. En 1838, este cemento se utilizó por primera vez en una construcción de importancia en uno de los túneles construidos bajo el río Támesis en Londres. El uso del cemento Pórtland continuó extendiéndose hasta convertirse en el material de construcción más utilizado en el mundo [1].

Materias primas

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

Proceso de elaboración

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

Estas rocas deben ser tratadas primeramente para poder ser ingresadas al horno, por lo que existe un proceso de trituración:

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

Trituración secundaria: Ingresar el material proveniente de la trituradora primaria y salir con tamaños máximos inferiores a 2,5 cm.

Molienda: El material resultante de la trituradora secundaria ingresa a un molino, resultando un producto impalpable, denominado polvo crudo.

Homogeneización: Con el fin de alcanzar la unión íntima de los compuestos, se somete al polvo crudo a un mezclado intensivo, por medio de ciclones de aire.

Calcinación: El polvo crudo ingresa al horno, elevándose la temperatura hasta alcanzar los 1450 °C, en donde se produce una fusión incipiente del producto resultante, denominado clínker.

Molienda: Finalmente, el clínker conjuntamente con el yeso se muele hasta obtener el Cemento Pórtland.

Se utilizan dos métodos de manufactura: los procesos mojado y seco. En ambos procesos se prefiere el circuito cerrado pulverizado en preparación de los materiales crudos que el circuito abierto de pulverizado porque en el primero las partículas pequeñas o finas son coladas y los gruesos del material son regresados; mientras que en el segundo, el material crudo es molido continuamente lo que significa que en lo más fino se consigue el valor deseado. El proceso mojado fue desplazado por un tiempo por el proceso en seco, pero actualmente

empieza a ser adaptado por nuevas plantas debido al control más exacto y el mezclado de los materiales crudos con sus proporciones.

Campos De Aplicación

Se emplea en todo tipo de obra que no requiera de un cemento especial, a saber:

- Estructuras de Hormigón Armado, pre-tensado y pos-tensado
- Premoldeados
- Pavimentos, pistas de aeropuertos y puentes
- Canales y alcantarillas
- Trabajos de albañilería (carpetas, probetas)

Por su elevada resistencia y rápida evolución, se recomiendan especialmente para:

- Hormigones de alta resistencia
- Habilitación al tránsito (fast-track). Pavimentos de hormigón donde se requiere una rápida solidificación.
- Estructuras elaboradas con encofrados deslizantes.
- Hormigonados en períodos de baja temperatura

Los hormigones elaborados con Cemento Pórtland Normal poseen los máximos valores de resistencia, permitiendo:

- Incrementar la seguridad, si se mantiene la dosificación.
- Posibilitar, además, mayor vida útil.
- Economizar el costo, si se reduce el contenido de cemento.

Los hormigones elaborados con Cemento Pórtland Normal desarrollan una rápida evolución de resistencia posibilitando:

- Acortar los tiempos de obra
- Habilitar más rápidamente la obra
- Reducir costos

El Cemento Pórtland Normal es moderadamente resistente a los sulfatos.

Dentro de los compuestos de la pasta de cemento a analizarse, se encuentra el aditivo, que en caso de este estudio se trata de la Zeolita 2.

2.2 Zeolita 2

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados de sodio, potasio y calcio.

Posee propiedades físico-químicas excepcionales como [2]:

1) Absorción.- La zeolita tiene la capacidad de adsorber Amonio (NH_4), no dejando que se lixivie, es decir, no se pierda, de esta manera la planta lo aprovecha de una mejor manera.

2) Intercambio Cationico.- Las zeolitas han resultado beneficiosas en el tratamiento de suelo, debido a sus propiedades de intercambio iónico y retención de agua. La zeolita en su composición química contiene: calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Potasio (K), y al momento que adsorbe Amonio (NH_4) cede los minerales antes mencionados. El calcio es importante y sirve para los suelos ácidos, el Potasio es uno de los tres principales nutrientes para la planta.

3) Tamiz molecular.- Debido a su sistema fijo de canales este permite pasar selectivamente moléculas por dichos canales según su tamaño con un cedazo o malla, es decir, retiene los elementos pesados como: cromo, plomo, mercurio que son nocivos para la planta y solo permite pasar Potasio, Fósforo, Amonio.

4) Actividad Catalítica.- Acelera los procesos químicos-físicos por la presencia de metales activos en su estructura como: níquel, cobalto, zinc.

5) Estimulación Biológica.- Las zeolitas naturales estimulan los procesos biológicos acelerando la fermentación y la descomposición de las bacterias, así por ejemplo si hay un hongo en la planta, este necesita de agua, entonces la zeolita adsorbe esa agua y hace que el hongo se muera.

Debe considerarse que existen varios métodos de curado para el concreto. En este estudio se procederá aplicar en método de curado por inmersión en agua.

2.3 Métodos de Curado del Cemento

Los procedimientos de curado se agrupan en tres grandes categorías [3]:

- Aquellos que previenen o impiden la evaporación del agua por interposición de un medio húmedo.
- Aquellos que tratan de impedir o reducen la pérdida de agua por interposición de un medio impermeable el cual controla la evaporación.
- Aquellos que aceleran el desarrollo de resistencia por aplicación artificial de calor, mientras el concreto es mantenido en condición húmeda.

Curado por interposición de un medio húmedo

- Formación de lagunas sobre el concreto después que éste ha fraguado donde se mantendrá una capa de agua de cinco centímetros de espesor sobre la superficie de éste. Para la formación del pequeño murete o cerco que actuará como muro de retención del agua se empleará arcilla o barro. La capa de agua se mantendrá por lo menos 72 horas.

- Aplicación de agua por roseado a la superficie del concreto el cual debe comenzar tan pronto como toda agua libre ha desaparecido de la superficie del concreto. El rocío debe ser fino, mantenerse por lo menos 72 horas, y no dejar marcas sobre la superficie del concreto.
- Cobertura de la superficie de concreto con tierra, arena, aserrín o paja, mantenidos húmedos por roseado donde la humedad puede ser aplicada al concreto empleando una capa de tierra, arena, aserrín o paja, la cual debe ser mantenida constantemente húmeda por rociado por un lapso no menor de 72 horas, la cobertura tendrá un espesor no menor de tres centímetros, debiendo ser aplicada inmediatamente después que el concreto ha iniciado su fragua, o después de seis horas de la colocación del mismo. La arena o tierra deberán estar libres de grandes terrones o piedras a fin de evitar un secado irregular de la cobertura. Si se emplea paja húmeda es recomendable colocar sobre el concreto aspillera y encima la paja con un espesor de 20 a 30 centímetros. La aspillera y la paja se mantendrán húmedas por el lapso de curado especificado. Se debe tener consideración la suciedad resultante y el peligro de reacciones químicas por descomposición de la materia orgánica.
- Cobertura de la superficie con aspillera o estera de algodón que se mantienen húmedas el tiempo necesario, la que podrá aplicarse

únicamente manteniéndolas húmedas en forma continua, en aquellos casos en que el concreto no puede ser cubierto con agua. Este tipo de curado se aplicará tan pronto como sea posible sin dañar la superficie de concreto.

Para este procedimiento debe tomarse en cuenta que el material no deberá arrastrarse sobre la superficie de concreto. La cobertura húmeda deberá dejarse por lo menos 72 horas. La cobertura deberá ser mantenida húmeda por rociado con agua, no debiendo el rocío hacer ningún daño al concreto y que la aspillera estará compuesta de 95% de yute y su peso seco no será menor de 2 kg/m^2 . La aspillera húmeda deberá mantenerse en contacto con el concreto, debiendo emplearse espesores dobles de la misma así como también debe tenerse en cuenta que las esteras consistirán de dos capas de tejido de algodón y entre ambas un relleno de algodón en rama. Serán cosidas y deberán prepararse en tamaños que permitan cubrir completamente el concreto

Curado por control de evaporación

Para este método de curado existen también varios procedimientos utilizables como:

- Los que utilizan el encofrado como medio de cobertura que puede proporcionar protección satisfactoria contra las pérdidas de humedad siempre que la superficie expuesta del concreto reciba la cantidad de agua necesaria para que ella encuentre su camino entre el encofrado y el concreto.
- Aquellos que controlan la evaporación mediante la protección con papel impermeable lo que se clasifica como curado rápido y efectivo ya que retarda la evaporación del agua y protege al concreto de daños. Su principal inconveniente es que si las pérdidas han ocurrido antes de la aplicación del mismo, ellas no son recuperables por curado posterior. En este procedimiento de curado se tendrá en cuenta lo siguiente:
 - a)** El papel impermeable debe mantenerse sobre la superficie del concreto.
 - b)** Las Juntas entre pliegos deben mantenerse adecuadamente selladas.
 - c)** El papel impermeable no debe estar dañado
 - d)** Debe realizarse inspección periódica de la superficie del concreto debajo del papel, procediendo a humedecerla cuando fuese necesario.

- e) El papel impermeable debe ser preferiblemente de color blanco, uniforme y libre de defectos. Su tenacidad debe permitirle resistir el trato de la obra
 - f) El papel debe ser de preferencia de color blanco, no decolorable, uniforme y libre de defectos. Su tenacidad debe permitirle resistir el trato de obra. Las hojas de polietileno con un espesor mínimo de 0.1 mm están incluidas en esta categoría.
- La utilización de aditivos para aumentar la velocidad de endurecimiento puede ser considerada como un método indirecto de curado en la medida que permite reducir el tiempo durante el cual el agua puede evaporarse antes de obtener el concreto de resistencia dada. El empleo de aditivos acelerantes puede complementarse con procedimientos de curado normales, pero éstos últimos no necesitan aplicarse un tiempo similar al necesario cuando no se utilizan aditivos.
- Los que utilizan compuestos químicos como sellantes. Se puede aplicar cloruro de calcio a la superficie para lograr un endurecimiento superficial que favorezca el control de la evaporación. Este procedimiento no es muy efectivo y, en general, no es muy recomendable. El rociado de la superficie del concreto con silicato de sodio tiene acción inhibitoria sobre la evaporación del agua. Este método tampoco es considerado muy efectivo.

- Y por último los que actúan por sellado de la superficie por aplicación de membrana impermeable. El curado podrá realizarse por aplicación a la superficie del concreto de una membrana de sellado la cual, al formar una película impermeable, controla la evaporación del agua permitiendo una adecuada hidratación. Los compuestos sellantes son productos líquidos que se aplican por rociado inmediatamente después que el agua de exudación ha desaparecido de la superficie del concreto.

Curado por aplicación artificial

Los procedimientos de curado por aplicación artificial de calor mientras el concreto está en condición húmeda comprenden:

- Curado por rayos infrarrojo que permite una ganancia de resistencia más rápida que cuando se emplea al vapor. Adicionalmente, la rápida elevación de temperatura inicial no da lugar a disminución de la resistencia final. Este procedimiento es especialmente aplicable en la fabricación de tuberías, siendo la temperatura de operación de 90 grados centígrados y la ubicación de la fuente de calor el espacio hueco en la tubería.
- Curados eléctricos donde se transmite una corriente alterna a través del elemento, mediante la utilización de dos electrodos fijos al concreto o colocados sobre la superficie del mismo. El curado se

produce por aplicación de calor. El costo de este tipo de curado es alto y su mejor aplicación en climas fríos. Puede emplearse para proteger al concreto de las heladas, con pequeño consumo de energía.

- Curado al vapor a alta presión donde es necesario contar con cámaras de presión, abastecimiento permanente de vapor húmedo, temperaturas de curado de orden de 177 grados centígrados y presiones de vapor de 8.5 kg/cm^2 .
- Curado al vapor a presión normal puede emplearse para acelerar el desarrollo de la resistencia en las edades iniciales del concreto mediante la saturación del elemento estructural con vapor a presión atmosférica y temperaturas por debajo de 100 grados centígrados.

2.4 El Estado del Arte de la Simulación del Comportamiento de Cemento Pórtland Tipo I

La Industria del cemento se ha desarrollado a alta velocidad en las últimas décadas. Se lo ha utilizado para la construcción de pequeñas casas, hasta para grandes construcciones, por lo que las exigencias del consumidor se han elevado considerablemente.

Dentro de estas exigencias, resalta la resistencia a la compresión, propiedad en la que se basa el siguiente estudio, teniendo el objetivo de

elevar dicha resistencia mediante la adición de un aditivo, que para este caso, se trata de Zeolita 2, en un 15 % de la mezcla total del concreto.

El tipo de cemento para este estudio es el cemento comercial Pórtland tipo I utilizados para las construcciones comunes en nuestro país. Se desea analizar la resistencia a la compresión con un grado de confiabilidad del 95% de manera tal que las construcciones con este tipo de concreto sean más resistentes y así brindar mayor durabilidad y aún más importante, mayor seguridad.

Parte importante del estudio es el tipo de curado que será en agua con tiempos de 7, 14, 21, 28 días de curado, en cada uno de los cuales se tomarán muestras para ser analizadas y estudiar la variación de la resistencia a la compresión.

CAPITULO 3

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Se detalla a continuación los equipos y materiales utilizados en el estudio así como también procedimientos de las pruebas y métodos que se usarán para el análisis de la variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento.

3.1 Equipos y Materiales

Para la realización de esta prueba nos regiremos a la norma ASTM C 109/C 109M, para así poder obtener resultados estandarizados [5].

Para el uso de balanzas, éstas deben cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C 1005, las mismas que deben catalogarse como dispositivos de precisión para una carga total de 2000 gramos. Así mismo, los recipientes para realizar las mezclas deben indicar las medidas para una temperatura de 20° C, con una variación permisible de 2 ml. Dicho recipiente debe tener graduaciones subdivididas de al menos 5 ml siendo éstas circulares al contorno del recipiente y numeradas.

Por otra parte los moldes para las probetas son cubos de 50 mm de longitud. Estos moldes no deben tener más de tres compartimientos y no más de 2 filas. El material utilizado para dichos moldes debe ser de un metal duro no atacado por el probeta de cemento, para el caso de moldes nuevos, la dureza Rockwell del metal no debe ser menor a 50 HRb lo que significa que las paredes del molde deben ser lo suficientemente rígidas para prevenir la deformación de la probeta, para aclarar estos detalles se colocó a continuación la Tabla 3.1

TABLA 3.1 DETALLES DE MOLDES

Molde de cubos de 50 mm		
Parámetro	Nuevo	En uso
Inclinación de caras	+/- 0,025 mm	+/- 0,050 mm
Distancias entre caras opuestas	50 mm +/- 0,13 mm	50 mm +/- 0,50 mm
Altura de cubo	50 mm + 0,25 mm a -0,13 mm	50 mm + 0,25 mm a -0,38 mm
Ángulo entre caras adyacentes	90° +/- 0,5°	90° +/- 0,5°

Para esta prueba se requiere además la utilización de una mezcladora mecánica impulsado eléctricamente, con especificaciones establecidas en la norma ASTM C 305.

Con respecto a las temperaturas de la prueba debe tomarse en cuenta que el aire en las proximidades de la mezcla, los materiales secos, los moldes, las platinas base y el tazón de mezcla de estar entre 20° C y 26° C mientras que la temperatura del agua para la mezcla, cuarto húmedo, y el agua del tanque de almacenamiento deberá oscilar entre 21° C y 25° C. Igualmente la humedad relativa del laboratorio donde se realice la prueba no debe ser menor a 50%, debiendo satisfacer el cuarto húmedo la norma ASTM C 511.

3.2 Métodos de Experimentación

Molienda de aditivo

La Zeolita 2 en su estado natural se presenta en forma de rocas la cual para poder utilizada en una mezcla de pasta de cemento debe ser sometida a una molienda para obtener una granulometría muy fina. Antes de cualquier sometimiento mecánica se debe golpear las rocas del mineral con un martillo grande para obtener rocas chicas capaces de poder entrar a las diferentes máquinas

trituradoras. Entonces, luego de ser golpeadas y haber obtenido rocas de tamaño óptimo se puede observar en la siguiente tabla los tiempos y tipos de máquinas utilizados en la molienda.

Tabla 3.2 Máquinas y tiempo de molienda

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

El término tamizado significa cernir el producto de las trituradoras para así tener como producto final del proceso un rango de granulometría constante.

A Continuación también se muestra una tabla con los tamizados realizados para así obtener la granulometría deseada con el fin poder realizar la mezcla para la pasta de cemento.

TABLA 3.3 Granulometría de los Tamizados

Número de Malla	Primer Tamizado	Segundo Tamizado
14 (1.4 mm)	58	19.5
18 (1 mm)	10	15.5
40	14	27.5

(425 μm)		
50 (300 μm)	3	7
Fondo	14	30
Peso Final	99 gr.	99.5 gr.

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.

Las imágenes son respecto a este procedimiento se encuentran anexadas en el Anexo 1.

Preparación y almacenamiento de probetas

Una vez obtenidas las características necesarias para el aditivo, éste de ser guardado en un lugar seco, evitando contacto con humedad, pues es un factor que afecta directamente a la variable a ser evaluada.

Primeramente se deben tener listos los moldes para los probetas, esto es, lavarlos y deshacerse si es necesario con una lija muy fina (400) de relieves o impurezas de pruebas anteriores. Ser arman lo moldes y se les aplica una capa fina de aceite para evitar la adhesión de la pasta a las paredes del molde.

Consecuentemente realizamos las medidas de las masas requeridas según la norma ASTM C 109/C 109M, hecha para preparación de probetas de 300 gr. de pasta de cemento, componiéndose éste en este estudio de 450 gr. De Zeolita 2 y 2550 gr. de Cemento Pórtland tipo I, además de 900 gr. de agua para crear la pasta. Al tener las masas requeridas, tanto de cemento como de aditivo, deben mezclarse por unos 5 minutos aproximadamente para obtener una mezcla homogénea de los agregados finos de la pasta y luego poder agregar el agua requerida y mezclar u minuto en velocidad baja y un minuto en velocidad media. Se debe recordar mantener siempre con movimiento la pasta manualmente para evitar un endurecimiento prematuro.

Se llenan los moldes con la pasta hasta la mitad de su capacidad y golpea contra una superficie sólida tratando de lograr la eliminación completa de burbujas de aire habientes en el molde, nuevamente se introduce pasta en lo moldes hasta llenar y se repite el procedimiento de eliminación de burbujas de aire, finalizando el procedimiento retirando el excedente de pasta de los moldes.

Al finalizar el moldeo de la pasta de cemento se arrinconan con la superficie superior expuesta por 24 horas para proceder con el desmontaje de las probetas de los moldes siendo seguidamente codificadas y sumergidas por completo en agua para así iniciar el curado por inmersión en agua.

Las imágenes son respecto a este procedimiento se encuentran anexadas en el Anexo 2.

Determinación de la resistencia a la compresión

Una vez cumplido el tiempo de curado previamente establecido, se retiran las probetas de las tinas de curado y con un paño se procede a eliminar el exceso de agua de las probetas.

Utilizando la misma balanza de precisión se pesan las muestras, dato que nos dirá cuanta agua perdió la misma en todo el proceso de endurecimiento.

Consiguientemente se codifican las probetas con la fecha, porcentaje de aditivo y días de curado por inmersión.

Previa la colocación de la muestra en la máquina de ensayo debemos asegurarnos que éstas tengan las caras donde se aplicará las fuerzas de acción y reacción planas y paralelas. En

casos, se encontraron salientes en los filos por lo que se utilizó una péquela lima para dejar las caras lisas.

Al momento de colocar la muestras en la máquina se toma en cuenta que los indicadores de carga está en cero, condición que se revisa a simple vista y cuando está todo lista para iniciar la aplicación de la carga, se encera el medidor de desplazamiento para así controlar la deformación que se presenta durante el procedimiento experimental.

Ya iniciada la aplicación de la carga, al momento de indicar variaciones de 0.005 pulgadas, el medidor de desplazamiento, se marca la carga aplicada en ese momento, hasta el momento de la ruptura de la probeta.

3.2.1 Método Matemático

Fundamentos Teóricos

El límite del análisis se usa para determinar la capacidad de la resistencia de sistemas de material y se basa en asumir unos sistemas de material a un determinado colapso plástico [6].

Homogenización de la resistencia y teoremas de límite

Para el desarrollo a continuación se retomaron micro mecanismos elementales. Para estos estudios, la micro fatiga debe ser simétrica y satisfacer la ecuación de balance de momento.

Límite de resistencia de Voigt – Reuss

Para ilustrar la aplicación del teorema del límite, se considerará una prueba de resistencia a la compresión uniaxial. También se considera material heterogéneo que obedece al criterio de resistencia de Drucker – Prager

Equilibrio del elemento

El teorema del límite inferior nos dice que la fatiga en el elemento debe cumplir con las ecuaciones de equilibrio estático.

Equilibrio a lo largo de la discontinuidad de la fatiga

Una fatiga discontinua es admisible estáticamente siempre y cuando si la fatiga normal que actúa en el plano de discontinuidad es continua.

Limitaciones de las condiciones del límite de fatiga

Enfocándose en lo anterior, las condiciones del límite de fatiga se reducen para imponer limitaciones adicionales de igualdad en la fatiga de nodos, por lo que la fatiga es permitida únicamente para variar linealmente.

Limitaciones del criterio de fluencia

La segunda parte del teorema del límite inferior es la compatibilidad del campo de fatiga con el dominio de la resistencia del material por una función de fluencia.

Función objetiva de la prueba de compresión

La condición del límite de fatiga es dada por elemento, de la suma de la fatiga de nodos de todos los elementos situados. (el cubo se descompone en 6 tetraedros, lo que nos da 24 nodos)

Aplicación a la pasta de cemento

El objetivo de la aplicación presentada es comprobar que el algoritmo es capaz de lidiar con complejos materiales heterogéneos. Se escoge pasta de cemento que es altamente heterogéneo y está compuesta de diferentes capas sólidas.

Se emplea una discretización de 2D para así trasladar la imagen digital a una malla de elemento finito, y es ahí donde se usa el

algoritmo para simular una prueba a la resistencia en 2D asumiendo condiciones de fatiga plana.

3.2.2 Método Estadístico

Actuales modelos toman en concreto como material homogéneo y han sido tomados muy en consideración al diseñar una estructura. Como clasificación general, los modelos mecánicos del concreto se distinguen en tres niveles conforme al grado de detalles de la estructura que se desea [7].

La generación del mecanismo debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- La localización de partículas del agregado debe estar libre de correlaciones.
- Tamaño y forma de las partículas debe ser distribuida variablemente sin límites.
- La distribución espacial del agregado debe ser relativamente uniforme.
- Los datos del tamaño de la distribución y contenido de los agregados debe ser exacta.
- El máximo contenido de agregados debe ser igual de grande como en el concreto real.

Mecanismo de generación

La estructura de la matriz de agregado se genera en dos pasos:

1. Generación de la partícula: se determina el tamaño y forma de todas las partículas agregadas de acuerdo al valor exacto del tamaño de la distribución y contenido de agregado.
2. Localización de la partícula: en espacio 3D, el punto centro y los ejes de coordenadas son determinados partícula por partícula comenzando por las de mayor tamaño.

En un proceso real de posicionamiento y compactado de concreto las partículas pequeñas son ajustadas de alguna manera por las partículas más grandes.

Idealización estructural y análisis

El uso de modelos discretos para estudiar el comportamiento no lineal de materiales como rocas y concreto ha aumentado. El modelo de este estudio combina modelos existentes y algunos detalles suplementarios. El medio mas utilizado por investigadores en el comportamiento del material y sobre todo en procesos de fractura es el de criterio de falla para determinar el colapso de

elementos discretos, después del cual, los elementos son removidos.

Simulación numérica y discusión

Solo se presentaron unos resultados seleccionados en este estudio. En la parte inicial de la simulación numérica, lo que se asumió mas comúnmente fue investigado con diferentes condiciones de carga. La primera parte fue útil en la etapa del desarrollo, para definir y/o desarrollar las condiciones del modelo actual. La segunda parte de simulaciones demuestra algunas condiciones o aplicaciones del modelo presentado aquí.

Etapa de desarrollo del modelo

Se asumen varias cosas que bajo ciertas condiciones son suficientes para capturar sobre todo el comportamiento de las fallas.

Etapa de selección de elementos del modelo

En esta etapa, un número de alternativas para corregir posibles fallas de modelos de este tipo fueron añadidas y las implementaciones que daban mejores resultados fueron unidas para producir el estado final del modelo.

CAPITULO 4

4. ANÁLISIS DE LA PRUEBA Y RESULTADOS

4.1 Adquisición de datos y tabulación

Luego de haber desmontado las probetas fueron sometidas a un curado por inmersión en agua. La primera prueba de compresión fue realizada después de 7 días de curado, momento en el cual fueron extraídas de la tina de curado, secadas con un paño para quitar el excedente de agua y pesadas en una balanza de precisión para luego ser sometidas a la prueba de compresión de donde se obtuvieron los siguientes datos:

- Prueba de compresión a los 7 días
- Temperatura ambiente: 26.1°C
- Humedad relativa: 68.8%

TABLA 4.1 Esfuerzos y deformaciones a los 7 días de curado con
15 % de Zeolita 2

		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Deformación	Área (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0,003	2500	1,425	1753,827	0,001
0,005	2500	7,662	326,293	0,023
0,008	2500	21,025	118,903	0,177
0,010	2500	35,636	70,153	0,508
0,013	2500	56,127	44,542	1,260
0,015	2500	75,727	33,013	
0,018	2500	77,509	32,254	

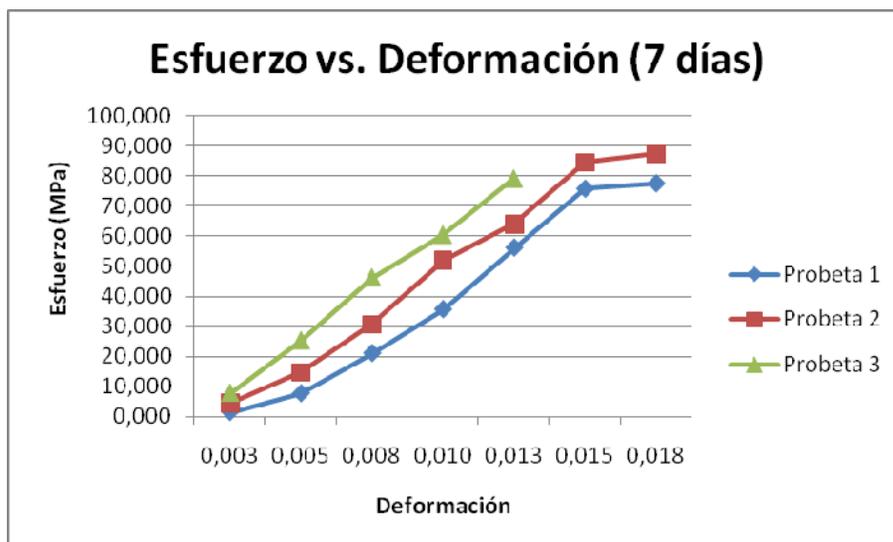


FIGURA 4.1 GRÁFICA DE ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN A LOS 7
DÍAS DE CURADO

Analizando los resultados de las tres probetas se observa una serie de variables como el esfuerzo de ruptura, lo que se debe a la presencia de burbujas de aire en las probetas, pues se debe considerar que no se utilizó una herramienta vibratoria específica para deshacerse de la presencia del mismo dentro de los probetas.

Se aprecia también en las graficas de Esfuerzo vs. Deformación de las dos primeras probetas una ligera curva al inicio de las prueba. Habiendo investigado las curvas de esfuerzos del cemento se confirmó este detalle, pues al inicio del curado, el cemento no es aún un material sólido sino más bien una pasta todavía acuosa [].

Las tablas de esfuerzos y gráficos para las tres probetas de los tiempos de curado por inmersión de 14, 21 y 28 días serán encontrados en el Anexo 4.

4.2 Analisis de cambio de propiedades

Para poder analizar que efecto causo la adición de Zeolita tipo 2 en una pasta de cemento se analizó y comparó los esfuerzos máximos obtenidos en la con una mezcla de Cemento Portland Tipo I con Zeolita 2 al 15%, Cemento Portland tipo I al 100% y Cemento Portland tipo IV al 100%. Existe varios factores que pueden alterar los resultados como condiciones ambientales, errores humanos, entre otros como

procedimiento al fabricar las probetas. La carga que se aplica sobre la probeta es tomada por cada 0,127 mm de deformación del mismo. Se muestran los tres esfuerzos correspondientes a cada una de las probetas para luego obtener un promedio y así compararlas con los promedios de esfuerzos aplicados en las probetas compuestas por 100% de Cemento tipo I y 100% de Cemento tipo IV, ambas también con curado por inmersión en agua por 7 días luego del desmontaje de las probetas.

TABLA 4.2 Esfuerzos promedios de compresión en Cemento tipo 1 con aditivo

Deformación (mm)	Cemento tipo I: 85%; Zeolita 2: 15%			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0,127	1,13	4,46	7,84	4,47
0,254	7,66	14,79	25,30	15,92
0,381	21,03	30,65	46,33	32,67
0,508	30,64	52,03	60,58	47,75
0,635	56,13	64,15	79,29	66,52
0,762	75,73	84,64	-	80,33
0,889	77,51	87,31	-	82,58
1,016	-	-	-	-
1,143	-	-	-	-
1,270	-	-	-	-
1,397	-	-	-	-
1.524	-	-	-	-

Esfuerzo promedio de Ruptura: **81.37 MPa**

TABLA 4.3 Esfuerzos promedios de compresión en Cemento tipo I sin aditivo

Deformación	Cemento tipo I: 100%			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0,127	7,31	6,24	1,96	5,17
0,254	23,34	23,34	10,33	19,00
0,381	39,73	37,95	25,84	34,51
0,508	57,91	57,91	41,87	52,56
0,635	76,62	77,51	62,36	72,16
0,762	89,09	90,87	80,18	86,71
0,889	93,55	94,44	90,87	92,95
1,016	-	-	-	-
1,143	-	-	-	-
1,270	-	-	-	-
1,397	-	-	-	-
1.524	-	-	-	-

Esfuerzo promedio de Ruptura: **92.95 MPa**

TABLA 4.4 Esfuerzos promedios de compresión en Cemento tipo IV sin aditivo

Deformación	Esfuerzos Promedios			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0,127	0,98	0,59	0,59	0,72
0,254	1,18	1,37	1,18	1,24
0,381	2,16	2,55	1,76	2,16
0,508	3,72	4,90	3,92	4,18
0,635	6,08	10,19	8,23	8,17
0,762	12,15	15,68	13,52	13,78
0,889	18,42	21,56	20,58	20,19
1,016	29,40	29,40	28,42	29,07
1,143	36,26	36,26	35,28	35,93
1,270	45,08	44,10	43,12	44,10
1,397	49,00	49,98	50,96	49,98
1.524	0,00	0,00	53,90	-

Cemento tipo I: 85%; Zeolita 2: 15%
 Cemento tipo I: 100%
 Cemento tipo IV: 100%

Esfuerzo promedio de Ruptura: **50.96 MPa**

Viendo los resultados obtenidos, podemos observar como la probeta hecho con 100% Cemento Portland Tipo I alcanza un mayor esfuerzo promedio, superando minimamente a la muestra constituida por una mezcla de Cemento Portland Tipo I y 15% de Zeolita tipo 2. Analizando los datos del Cemento Portland Tipo IV se puede ver como esta probeta se comporta de manera muy poco rigida alcanzando la mayor deformación de los 3 tipos de muestras y un menor esfuerzo promedio de Ruptura. Esto lo podemos observar de mejor manera en la siguiente figura donde se colocan las tres curvas para una mayor facilidad al momento de analizarlas.

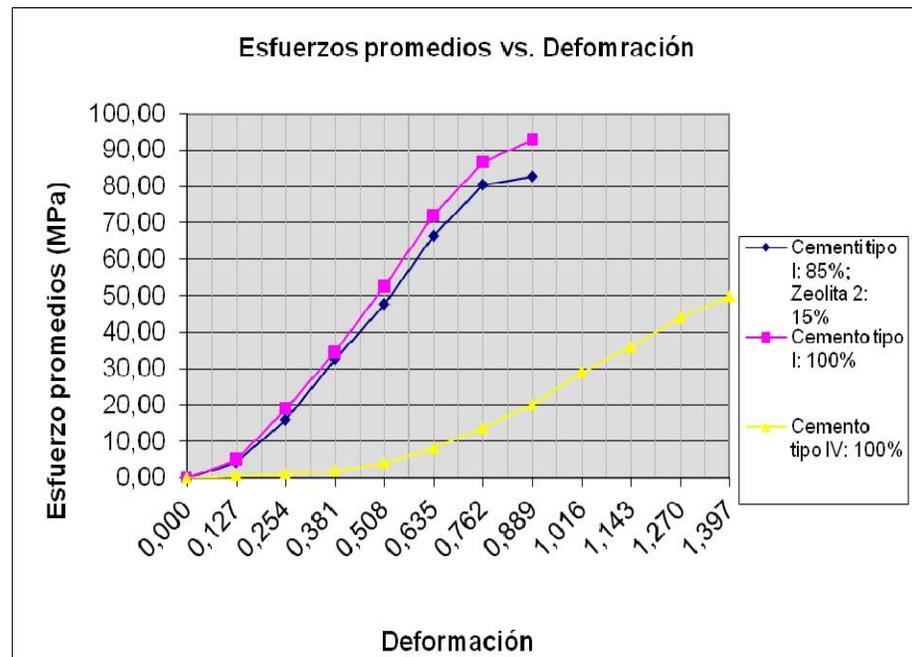


FIGURA 4.2 COMPARACIÓN DE ESFUERZOS PROMEDIOS

Las tablas de esfuerzos promedios y gráficos para las tres probetas de los tiempos de curado por inmersión de 14, 21 y 28 días serán encontrados en el Anexo 5.

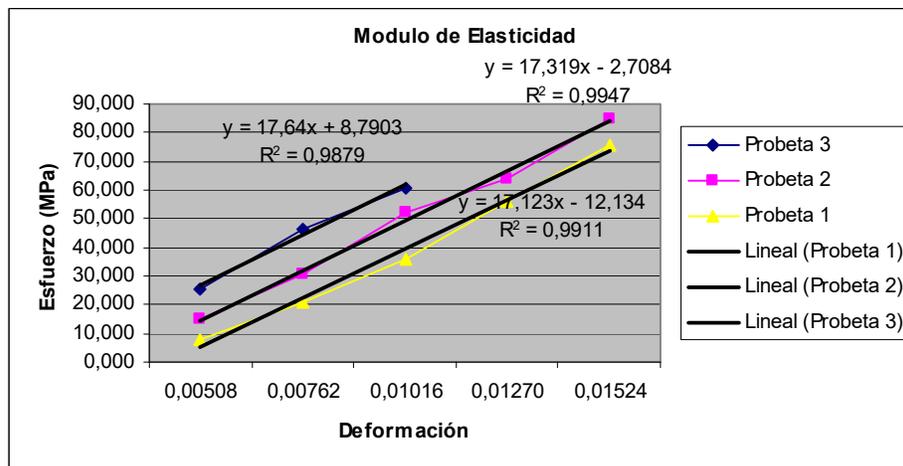


FIGURA 4.3 OBTENCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Una vez obtenida la linealidad de curva que, así como la ecuación de la tendencia lineal, ésta nos entrega el valor del Modulo de Elasticidad. Los datos recopilados para realizar este cálculo son los correspondientes a la zona elástica de la curva Esfuerzo vs. Deformación, Se rechaza la zona inicial, puesto que la pasta no se encuentra aún endurecido y de la misma forma se rechaza la zona plástica de la gráfica ya que el módulo de Elasticidad se presenta únicamente en la zona elástica.

Para analizar las variaciones en la resistencia a la compresión se presenta a continuación una tabla y gráfico donde se puede apreciar y analizar las variaciones de los esfuerzos máximos de la pasta de cemento con la adición de los diferentes porcentajes de Zeolita 2 utilizada en este estudio.

TABLA 4.5 ESFUERZO PROMEDIOS MÁXIMOS PARA EL DIFERENTE TIEMPO DE CURADO

Cemento	Días			
	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

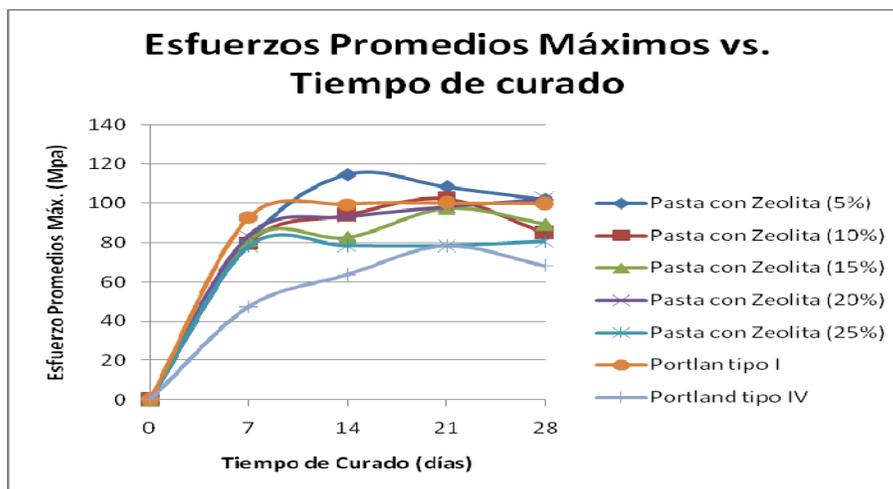


FIGURA 4.4 GRÁFICA ESFUERZOS MAXIMOS PROMEDIOS VS. TIEMPO DE CURADO

Se puede observar con claridad como la adición de 5% de Zeolita 2 aumenta notablemente la resistencia a la compresión con un curado de 14 días, pero consecuentemente ésta disminuye.

4.3 Analisis de resultados

Aquí se analiza los cambio de la propiedades utilizando los metodos mencionados en el Capitulo 3, denominados Método Matemático y Método Estadístico.

Comenzando con el Método de Matemático, se realizó un algoritmo en el Programa de MatLab utilizando el Método numérico de Newton Raphson para así obtener una gráfica que represente el comportamiento Elástico – Plástico de la pasta de cemento correspondiente al presente estudio.

TABLA 4.6 DATOS PARA ANALISIS MATEMÁTICO

	7	14	21	28
a	0,33	0,33	0,33	0,33
m	0,00601	0,00363	0,00568	0,00431
E_{prom}	6785,33	5746,00	7903,33	5697,70
σ_y	61,03	61,91	73,06	67,04
de	0,018	0,018	0,018	0,020
def	0,00254	0,00254	0,00254	0,00254

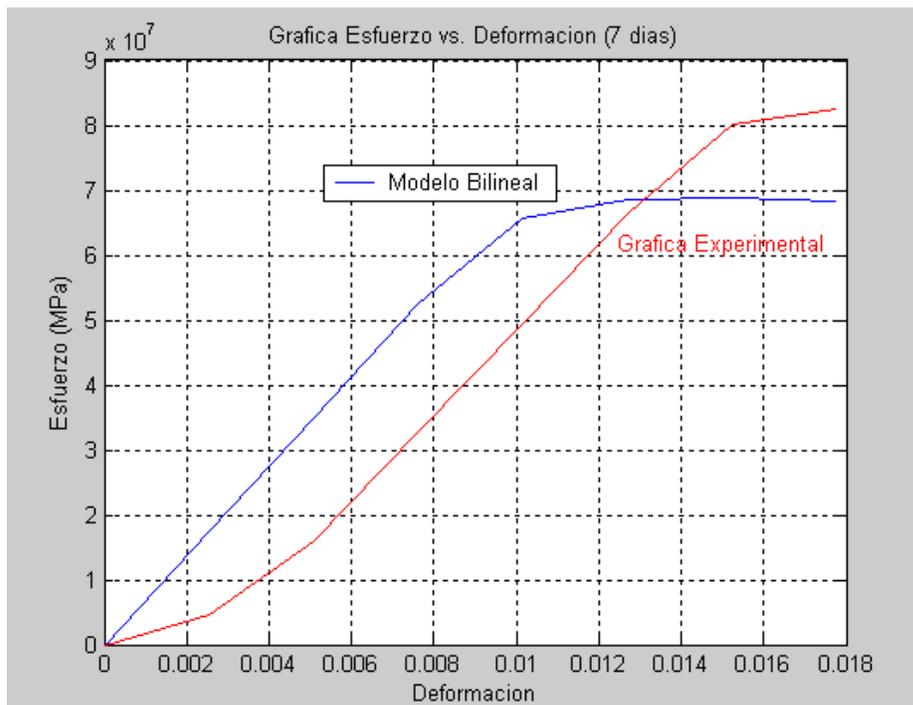


FIGURA 4.5 GRAFICA DE COMPORTAMIENTO PLÁSTICO - ELÁSTICO

La programación del algoritmo y las gráficas de los comportamientos Elásticos – Plásticos para los diferentes tiempo de curado por inmersión se encuentran en el Anexo 6.

Para finalizar el estudio se utilizó un Software denominado STATISTICA 7.0, que nos permite determinar estadísticamente si los datos obtenidos son normales o no, así como también determinar si los datos tienen o no diferencias significativas que existieran con respecto al modulo de elasticidad de la pasta de cemento aplicándose

un curado por inmersión por 7, 14, 21, 28 días. Este análisis se realizó de manera individual y grupal para así poder determinar la mejor combinación entre porcentaje de aditivo (Zeolita 2) y tiempo de curado.

Análisis individual

Para determinar si los datos obtenidos cumplen con la normalidad se utiliza la prueba de Shapiro y Wilk. Se debe establecer primero la hipótesis nula H_0 :

H_0 : los datos no tienen una distribución normal

Luego se ingresó los da desde un archivo de Excel. El software los importa desde Excel y analiza los datos y nos muestra un histograma.

TABLA 4.7 DATOS INGRESADOS EN EL SOFTWARE STATISTICA

	1 días	2 Eprom
J	7	8190,3
J	7	8050,7
J	7	7350
J	14	9100,9
J	14	8715,1
J	14	8225,1
J	21	5565,9
J	21	6545,2
J	21	5880
J	28	5985,7
J	28	4627,1
J	28	6181,1

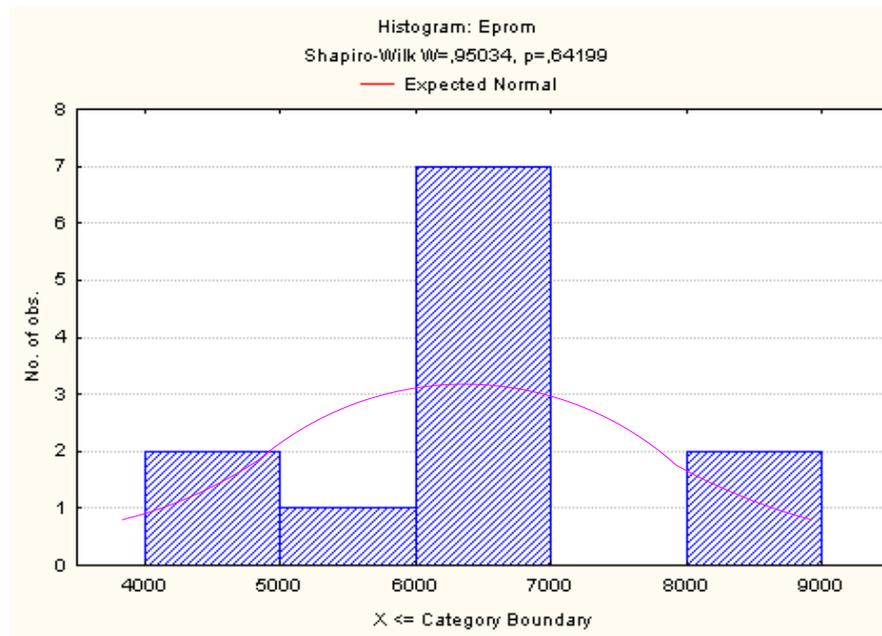


FIG 4.6 HISTOGRAMA DE EPROM PARA PASTAS DE CEMENTO CON UNA CONCENTRACIÓN DE 15% DE ZEOLITA 2.

Como se obtuvo un valor estadístico W calculado $W_{cal}=0.95034$ mayor al valor estadístico W tabulado $W_{tab}=0.859$ y una probabilidad mayor a 0.05 se descarta la hipótesis nula concluyendo que los datos obtenidos tienen una distribución normal.

Análisis de varianza (ANOVA-ONE WAY)

El análisis de la varianza ayuda a determinar si existen diferencias significativas en los valores de Módulos de Elasticidad de las diferentes probetas con los diferentes tiempo de curado (7, 14, 21, 28 días).

Existen diferencias significativas si, una vez calculado el valor estadístico F crítico, $F_{critico}$, mediante tablas según los grados de libertad, dando como resultado un valor de 4.06. El programa calcula un valor estadístico F de $F_{cal.} = 4.8651$ y se confirma la existencia de diferencias significativas, pues F_{cal} es mayor a $F_{critico}$.

TABLA 4.8 ANALISIS DE VARIANZA

Univariate Results for Each DV (Sheet1 in Imported from Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition)					
Effect	Degr. of Freedom	Eprom SS	Eprom MS	Eprom F	Eprom p
Intercept	1	512175441	512175441	764,6831	0,000000
dias	3	9775742	3258581	4,8651	0,032714
Error	8	5358303	669788		
Total	11	15134045			

Lo que confirma también la existencia de un nivel de confianza del 95% asegurando que al menos uno de los tratamientos aumenta el módulo de elasticidad de la pasta de cemento.

TABLA 4.9 INTERVALOS DE CONFIANZA PARA CADA TRATAMIENTO

dias; LS Means (Sheet1 in Imported from C:\Docur Current effect: $F(3, 8) = 4,8651$, $p = ,03271$ Effective hypothesis decomposition)						
Cell No.	dias	Eprom Mean	Eprom Std.Err.	Eprom -95,00%	Eprom +95,00%	N
1	7	6785,333	472,5067	5695,731	7874,936	3
2	14	5746,000	472,5067	4656,398	6835,602	3
3	21	7903,333	472,5067	6813,731	8992,936	3
4	28	5697,700	472,5067	4608,098	6787,302	3

La tabla 4.11 muestra el intervalo de confianza del módulo de elasticidad con respecto a tiempo de curado por inmersión en agua. (7, 14, 21, 28 días).

Para finalizar el análisis de pasta de cemento con 15% de Zeolita 2 se observa en la Figura 4.8 que el mayor módulo de elasticidad conseguido en el estudio se da los 21 días de curado por inmersión en agua.

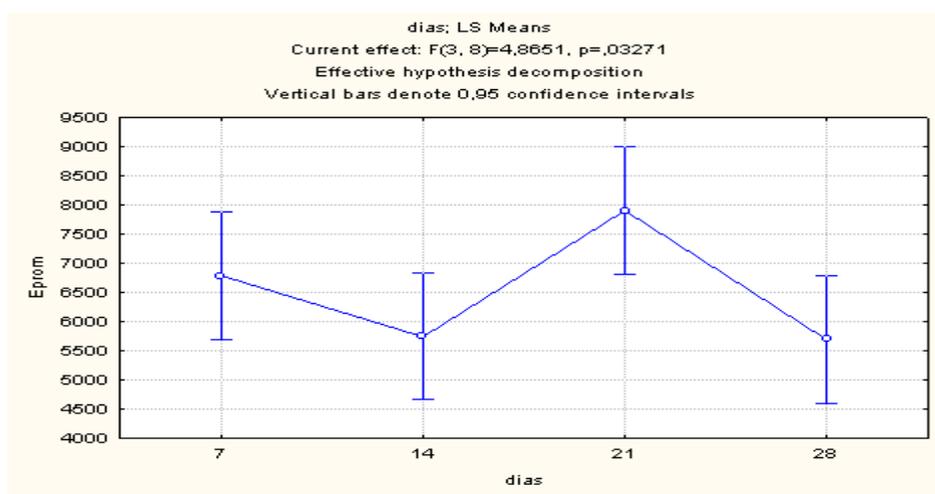


FIGURA 4.7 MODULO DE ELASTICIDAD VS. DÍAS DE CURADO

Análisis grupal

Se utiliza el mismo procedimiento para realizar el análisis grupal ingresando primeramente los datos generales en el software STATISTICA.

TABLA 4.10 DATOS INGRESADOS EN EL SOFTWARE STATISTICA

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

Análisis de varianza (ANOVA-FACTORIAL)

En este caso se realiza un análisis de varianza ANOVA – FACTORIAL, donde nuevamente se utilizó el software para determinar la existencia de diferencias significativas, pero en esta ocasión el análisis será a la variación del esfuerzo de compresión debido a la variación de la adición de porcentajes de Zeolita 2 y al tiempo de tiempo de curado.

TABLA 4.11 ANALISIS DE VARIANZA FACTORIAL

Effect	Univariate Tests of Significance for Esfuerz Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition			
	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		

Tal como en el análisis individual, el valor estadístico F calculado, F_{cal} , es mayor con respecto al valor estadístico F crítico, $F_{critico} = 4.06$, lo que confirma la existencia de diferencias significativas con un nivel de confianza del 95%, entre los porcentajes de aditivo adicionado y los tiempos de curado

A continuación se muestra en la tabla 4.14 los intervalos de confianza para cada porcentaje de aditivo adicionado.

TABLA 4.12 INTERVALOS DE CONFIANZA PARA CADA % 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

En esta ocasión se muestra la gráfica de esfuerzo último, pero relacionado con los porcentajes de adición de Zeolita 2 dando como resultado que la mejor adición de aditivo fue la adición de 5% de Zeolita 2

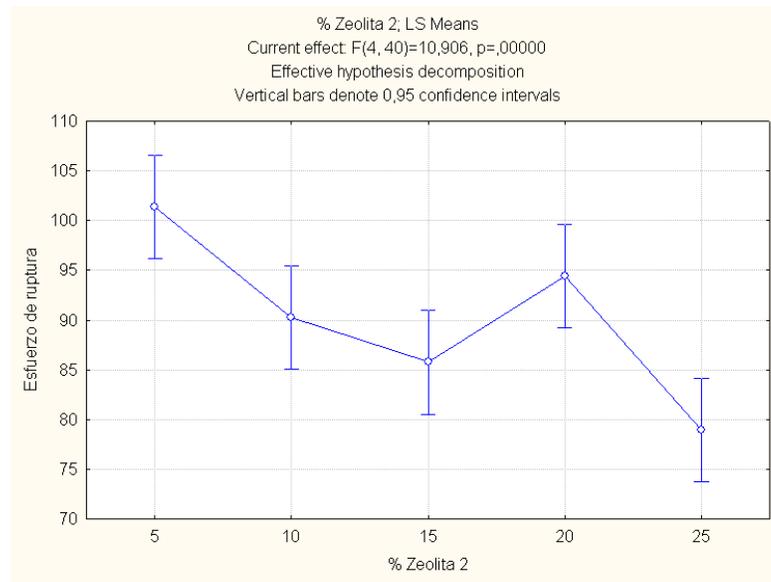


FIGURA 4.8 GRÁFICA ESFUERZO ÚLTIMO VS. % ZEOLITA 2

Ahora se obtienen los intervalos de confianza pero con respecto al tiempo de curado por inmersión en agua

TABLA 4.13 INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LOS TIEMPOS 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	83,6604	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

Y nuevamente y para concluir este estudio se presenta la gráfica de esfuerzos últimos versus el tiempo de curado por inmersión en agua determinándose así que el mayor esfuerzo último se consigue a los 21 días de curado.

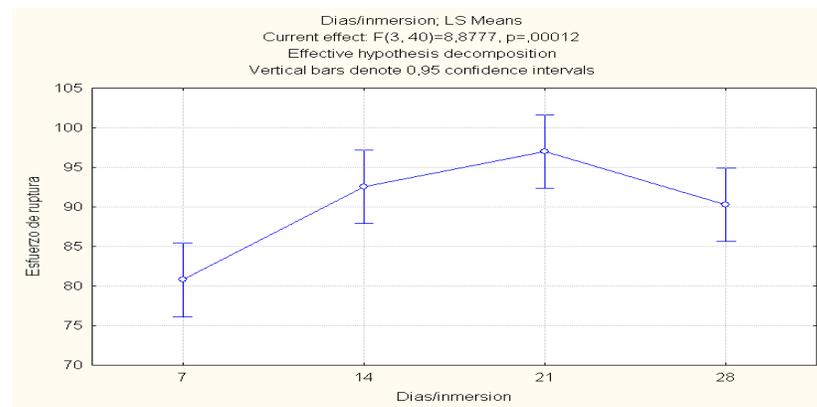


FIGURA 4.9 ESFUERZOS ULTIMOS VS. TIEMPO DE CURADO

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Una vez realizadas las practicas experimentales para así adquirir datos prácticos de resistencia a la compresión y mediante software's de computadora, se pudieron realizar modelos experimentales con los cuales se pudo analizar los cambios de propiedades mecánicas.

Al analizar los datos obtenidos se ha demostrado una variación en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento al adicionar un porcentaje de aditivo, específicamente para este estudio, Zeolita 2 al 15%. Este análisis también demuestra que la pasta de cemento del estudio tiene una resistencia mayor a la del cemento comercial Portland tipo 4, siendo así recomendable utilizar una pasta de cemento de 85% de cemento Portlan tipo I y 15% de Zeolita 2 con respecto a cemento Pórtland tipo IV al 100% en cuanto a propiedades mecánicas, pero debe considerarse que a los 28 días de curado, la tendencia de la resistencia a la compresión de la pasta de cemento es que continuará disminuyendo.

Para este estudio específico la adición de 15% de Zeolita no logró incrementar la resistencia a la compresión de la pasta de cemento en comparación a la resistencia obtenida en una probeta de Cemento Portland Tipo I al 100%. Pero en el estudio general, la adición de 5% de Zeolita 2 en un curado prematuro de 14 días, la resistencia de la pasta de cemento fue mayor, obteniendo como resultado a los 28 días de curado una menor resistencia a la compresión con la misma tendencia antes mencionada de decrecer.

5.2. Recomendaciones

Deben tomarse en cuenta varios aspectos, principalmente al momento de encerar la máquina de ensayos pues una mala calibración ocasiona datos no exactos como resultados.

Se pudo observar al momento de los ensayos de compresión, la probeta ya rota, espacios donde se alojó aire, lo que varía los datos de la resistencia a la compresión, para lo que se recomienda utilizar un vibrador e introducirlo en la probeta aún fresca, para así eliminar las burbujas habientes en la muestra.

Debe pesarse con la mayor exactitud posible la cantidad de los agregados y el agua que conforman la pasta de cemento pues para

una diferente proporción de componentes la norma utilizada en este estudio no sería válida.

Como recomendación final del estudio, se aconseja realizar un nuevo estudio con un tiempo de curado mayor, conocer el comportamiento final de la resistencia a la compresión, así como también un análisis de costos, para determinar si es mas factible utilizar una mezcla de cemento Pórtland tipo I junto con Zeolita 2 en lugar de cemento Pórtland tipo IV.

ANEXO 1.1

Reducción de tamaño y Molienda de roca con contenido Zeolítico



Ruptura de rocas de mineral con martillos grande para reducir tamaño de piedras



Introducción de piedras a la trituradora de mandíbulas

ANEXO 1.2



Producto de la trituradora



Introducción a la trituradora de rodillos

ANEXO 1.3



Introducción a la trituradora de bolas



ANEXO 1.4

Proceso de tamizado



Proceso de tamizado



Producto del tamizado

ANEXO 2.1

Equipos utilizados para la elaboración de probetas



Dispositivo de medición: Balanza de precisión



Recipientes de almacenamiento de agregados

ANEXO 2.2



Dispositivo para realizar la mezcla de los agregados en seco y con agua



Dispositivo de golpes para la eliminación de burbujas de aire

ANEXO 2.3



MAQUINAS UTILIZADAS PARA LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN

ANEXO 3.1

Almacenamiento de probetas



Almacenamiento de probetas

ANEXO 4.1

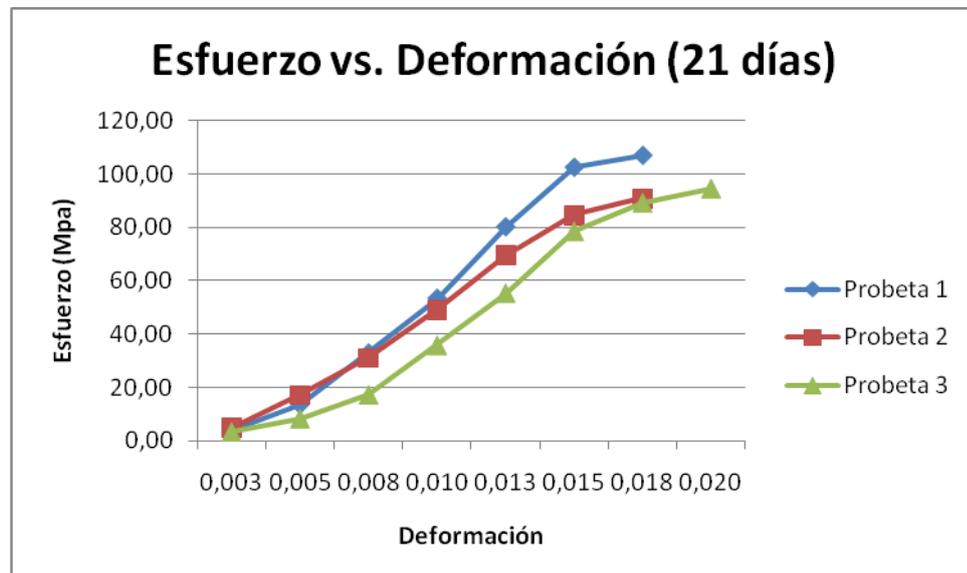
Tablas y gráficas de esfuerzos vs. Deformación a los diferentes tiempos de curado

		Probeta 1	Probetra 2	Probeta 3
Deformación	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0,003	2500	1,78	7,84	3,92
0,005	2500	3,74	26,55	20,85
0,008	2500	12,47	39,02	39,56
0,010	2500	29,58	51,67	54,35
0,013	2500	45,44	64,15	68,60
0,015	2500	66,82	75,73	80,18
0,018	2500	84,64	76,62	81,96
0,019	2500	89,09		



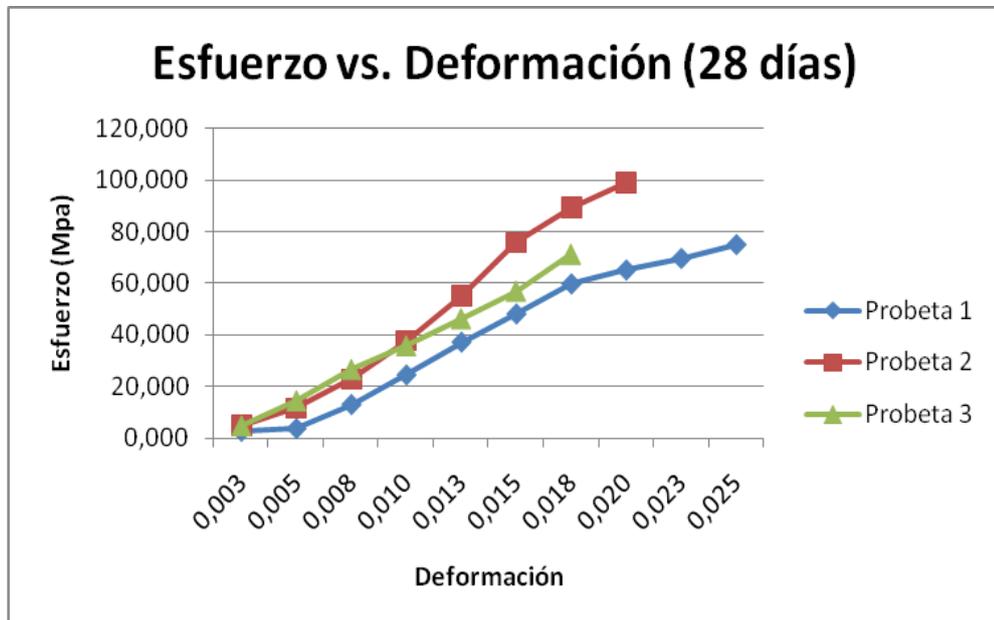
ANEXO 4.2

		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Deformación	Area (mm ²)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0,003	2500	3,92	4,63	3,21
0,005	2500	13,72	16,93	8,20
0,008	2500	32,96	30,83	17,11
0,010	2500	53,45	49,00	35,64
0,013	2500	80,18	69,49	55,24
0,015	2500	102,45	84,64	78,40
0,018	2500	106,91	90,87	89,09
0,020	2500			94,44



ANEXO 4.3

Deformación	Area (mm ²)	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
		Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)	Esfuerzo (Mpa)
0,003	2500	2,851	4,989	4,989
0,005	2500	3,920	11,760	14,611
0,008	2500	13,185	22,985	26,727
0,010	2500	24,589	37,775	35,993
0,013	2500	37,240	55,236	46,327
0,015	2500	48,109	75,727	57,018
0,018	2500	59,691	89,091	71,273
0,020	2500	65,036	98,891	
0,023	2500	69,491		
0,025	2500	74,836		



ANEXO 5.1

Tablas y gráficos para el análisis en variaciones de esfuerzos promedios

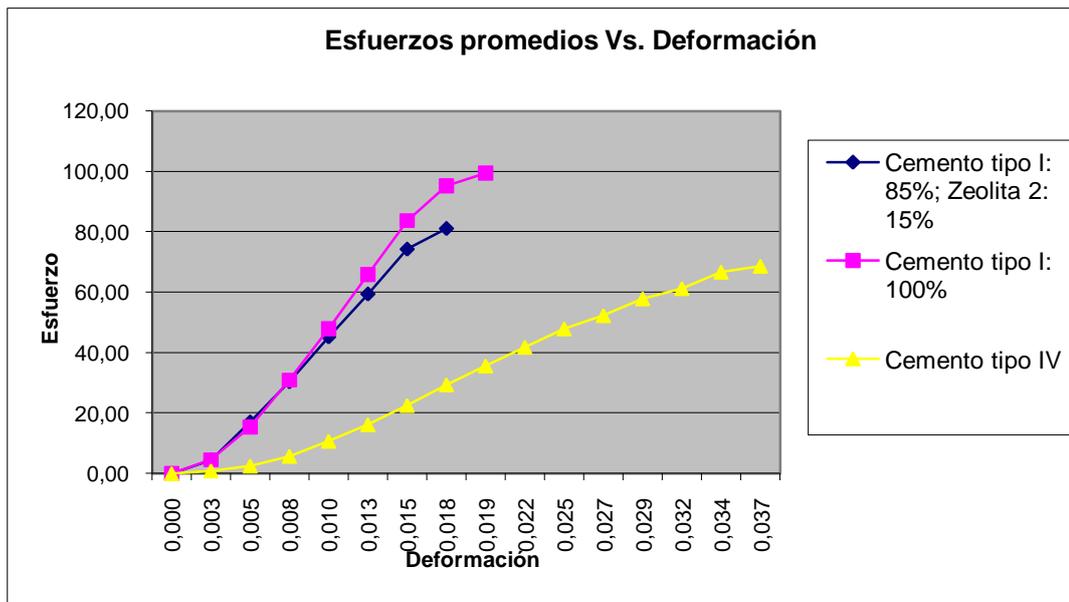
Tiempo de curado: 14 días por inmersión en agua

Cemento tipo I: 85%; Zeolita 2: 15%				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Promedio
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,003	1,78	7,84	3,92	4,514
0,005	3,74	26,55	20,85	17,046
0,008	12,47	39,02	39,56	30,350
0,010	29,58	51,67	54,35	45,199
0,013	45,44	64,15	68,60	59,394
0,015	66,82	75,73	80,18	74,242
0,018	84,64	76,62	81,96	81,073
0,019	89,06	-	-	-

Cemento tipo I: 100%				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Promedio
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,003	6,41	5,35	1,96	4,57
0,005	18,71	20,85	6,95	15,50
0,008	36,71	35,28	20,85	30,94
0,010	50,78	52,56	40,45	47,93
0,013	69,49	72,16	56,13	65,93
0,015	84,64	90,87	75,73	83,75
0,018	99,78	96,22	89,98	95,33
0,019	103,35	101,56	93,55	99,48

ANEXO 5.2

Cemento tipo IV: 100%				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Pormedio
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,003	1,18	0,78	0,78	0,91
0,005	2,94	2,55	2,16	2,55
0,008	6,08	6,66	4,51	5,75
0,010	11,76	11,56	8,82	10,71
0,013	16,66	17,64	14,31	16,20
0,015	23,52	23,52	20,58	22,54
0,018	29,40	31,36	27,44	29,40
0,019	35,28	38,22	33,32	35,61
0,022	41,16	44,10	40,18	41,81
0,025	47,04	49,98	46,65	47,89
0,027	51,94	52,92	51,94	52,27
0,029	56,84	57,82	58,80	57,82
0,032	61,74	60,96	60,96	61,22
0,034	66,64	0,00	0,00	66,64
0,037	68,60	0,00	0,00	68,60



ANEXO 5.3

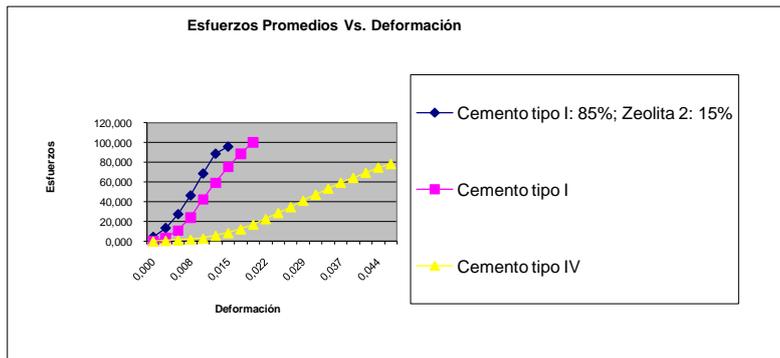
Tiempo de curado: 21 días por inmersión en agua

Cemento tipo I: 85%; Zeolita 2: 15%				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Pormedio
0,000	3,92	4,63	3,21	3,920
0,003	13,72	16,93	8,20	12,948
0,005	32,96	30,83	17,11	26,965
0,008	53,45	49,00	35,64	46,030
0,010	80,18	69,49	55,24	68,303
0,013	102,45	84,64	78,40	88,497
0,015	106,91	90,87	89,09	95,624
0,018	-	-	94,44	

Cemento tipo I				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Pormedio
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,003	2,67	4,10	2,85	3,21
0,005	11,76	11,94	8,55	10,75
0,008	25,48	27,44	18,53	23,82
0,010	41,69	47,22	38,13	42,35
0,013	59,69	65,04	52,56	59,10
0,015	78,40	80,18	66,82	75,13
0,018	86,42	104,24	74,84	88,50
0,019	106,91	113,15	80,18	100,08

ANEXO 5.4

Cemento tipo IV				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Pormedio
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,003	0,59	0,39	0,39	0,46
0,005	1,37	0,78	0,98	1,05
0,008	2,16	1,57	1,57	1,76
0,010	3,14	2,94	2,74	2,94
0,013	6,27	5,49	4,90	5,55
0,015	8,43	8,43	8,23	8,36
0,018	11,76	12,35	12,35	12,15
0,019	17,44	17,05	16,46	16,99
0,022	23,52	22,54	21,56	22,54
0,025	30,38	28,42	27,44	28,75
0,027	36,26	34,30	33,32	34,63
0,029	43,12	41,16	39,20	41,16
0,032	49,00	48,02	45,08	47,37
0,034	54,88	54,49	50,96	53,44
0,037	59,78	58,80	59,78	59,45
0,039	64,68	63,70	64,68	64,35
0,041	70,56	68,60	69,58	69,58
0,044	74,48	74,48	75,46	74,81
0,046	79,38	77,42	78,40	78,40



ANEXO 5.5

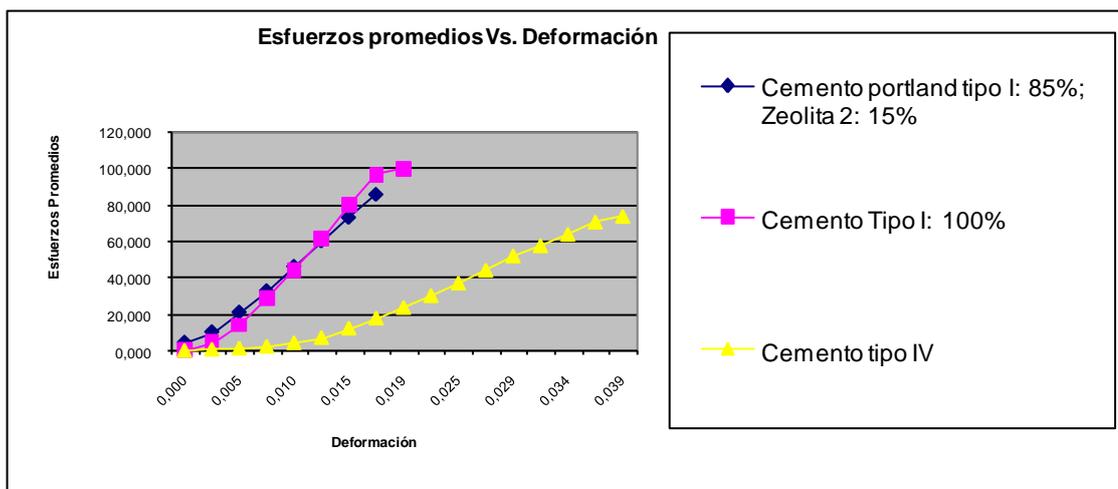
Tiempo de curado: 28 días por inmersión en agua

Cemento tipo I: 85%; Zeolita 2: 15%				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Pormedio
0,000	2,85	4,99	4,99	4,276
0,003	3,92	11,76	14,61	10,097
0,005	13,19	22,99	26,73	20,966
0,008	24,59	37,77	35,99	32,785
0,010	37,24	55,24	46,33	46,268
0,013	48,11	75,73	57,02	60,285
0,015	59,69	89,09	71,27	73,352
0,018	65,04	98,89	94,44	86,121
0,019	69,49	-	-	
0,022	74,84	-	-	

Cemento tipo I				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Pormedio
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,003	3,56	4,63	6,24	4,81
0,005	9,62	12,83	18,89	13,78
0,008	23,16	27,97	35,64	28,92
0,010	42,94	35,81	53,45	44,07
0,013	57,91	58,80	66,82	61,18
0,015	77,51	75,73	87,31	80,18
0,018	96,22	98,00	95,33	96,52
0,019	99,78	101,56	98,00	99,78

ANEXO 5.6

Cemento tipo IV				
Deformación	Mortero 1	Mortero 2	Mortero 3	Pormedio
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,003	0,51	0,67	0,59	0,59
0,005	0,98	1,37	1,18	1,18
0,008	1,69	2,16	2,74	2,20
0,010	3,33	4,12	4,90	4,12
0,013	6,08	7,25	7,64	6,99
0,015	10,39	12,94	13,13	12,15
0,018	15,88	18,23	19,01	17,71
0,019	21,56	24,50	24,50	23,52
0,022	28,03	30,97	30,97	29,99
0,025	34,30	38,22	38,22	36,91
0,027	41,75	45,08	45,08	43,97
0,029	49,00	51,94	54,49	51,81
0,032	55,86	58,41	57,82	57,36
0,034	62,72	64,68	0,00	63,70
0,037	69,58	71,15	0,00	70,36
0,039	73,5	73,5	0,00	73,5



ANEXO 6.1

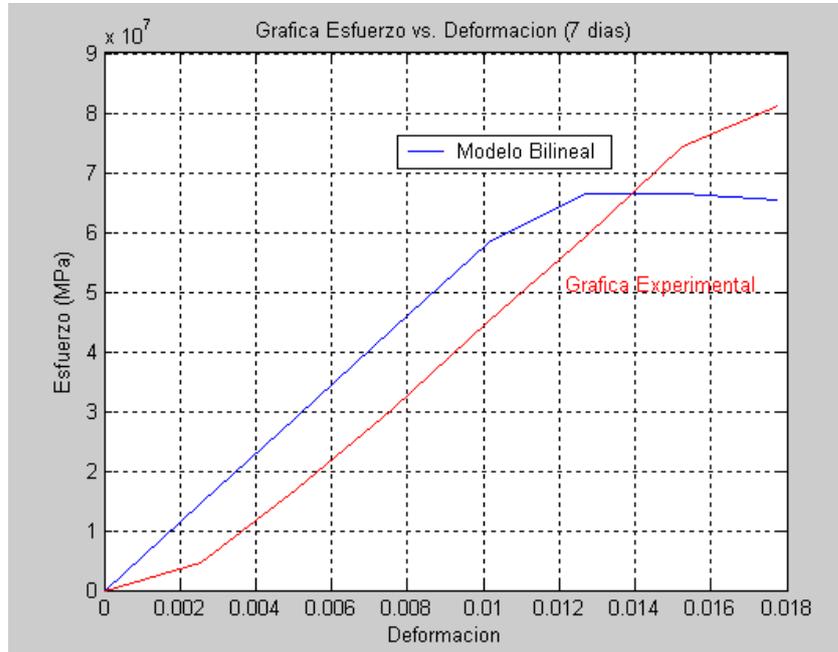
Algoritmo de MatLab para obtener la gráfica del comportamiento elástico – plástico de la pasta de cemento y gráficas comparativas.

```
clear;
clc;
E=6875.33e6;
m=0.00600796;
a=0.33;
de=0.00254;
def=0.01778;
e=[0:de:def]';
k=size(e);
iteracion=k(1,1);
G(1)=0;
Gy(1)=61.02751e6;
lampda(1)=0;

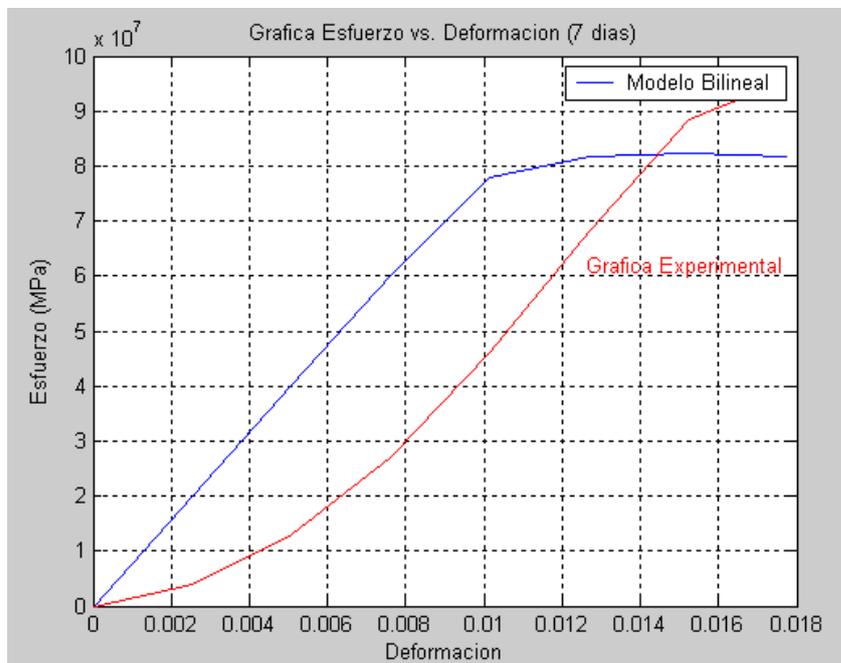
for i=1:iteracion
    Gtr(i+1)=G(i)+E*de;
    Ftr(i+1)=abs(Gtr(i+1))-Gy(i);
    if Ftr(i+1) > 0
        [deltalampdaf(i+1),H(i+1)]=MetodoN_R(Ftr(i+1),a,m,E,Gy(1),lampda (i));
        lampda(i+1)=deltalampdaf(i+1)+lampda(i);
        G(i+1)=Gtr(i+1)-E*deltalampdaf(i+1)*sign(Gtr(i+1));
        Gy(i+1)=Gy(i)+H(i+1)*deltalampdaf(i+1);
    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;
```

ANEXO 6.2

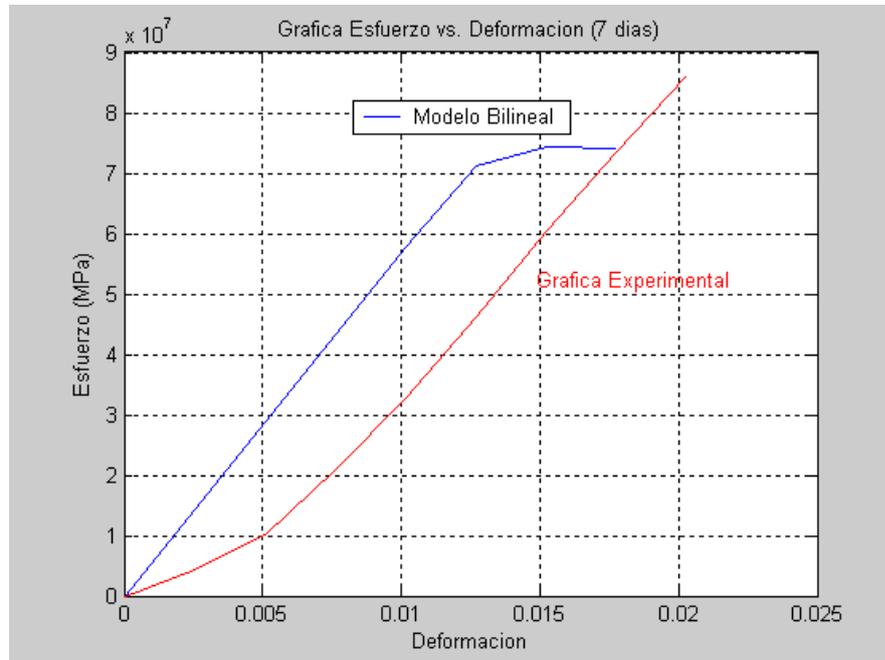


Comportamiento Elástico – Plástico de la pasta de cemento con un curado por inmersión de 14 días



Comportamiento Elástico – Plástico de la pasta de cemento con un curado por inmersión de 21 días

ANEXO 6.3



Comportamiento Elástico – Plástico de la pasta de cemento con un curado por inmersión de 21 días

REFERENCIAS

- [1] La química del cemento, H. W. Taylor, Editorial URMO
- [2] Características físico-químicas de las zeolitas naturales como medio filtrante, Eduardo Márquez Canosa, Tomás Noel Herrera Vasconcelos, Nancy Maritza Gutiérrez Duque
- [3] Métodos para curar concreto, BASF The Chemical Company, agosto 2006
- [4] Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, marzo 2007.
- [5] An algorithm for computing the compressive strength of heterogeneous cohesive-frictional materials – Application to cement paste, F.P. Ganneau, F.-J. Ulm, J. Gondzio, E.J. Garboczi, ELSEVIER Computers and Geotechnics, marzo 2007
- [6] Mesoscale simulation of cement based materials, time-dependent behavior, Abdulkadir Cüneyt Aydın, Abdussamet Arslan, Rüstem Gül, febrero 2007