



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DE LOS
CONCRETOS PREMEZCLADOS DE MAYOR USO, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Leonel de Jesús Pineda Samayoa
Asesorado por el Ing. Emilio Beltranena Matheu

Guatemala, agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DE LOS
CONCRETOS PREMEZCLADOS DE MAYOR USO, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LEONEL DE JESÚS PINEDA SAMAYOA

ASESORADO POR EL ING. EMILIO BELTRANENA MATHEU

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DE LOS
CONCRETOS PREMEZCLADOS DE MAYOR USO, EN EL ÁREA
METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA,**

tema que me fuera asignado por Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
el 8 de octubre de 2008.



Leonel de Jesús Pineda Samayoa

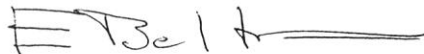
Guatemala,
15 de julio de 2009

Señor Ingeniero
Sydney Samuels
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad de Guatemala

Señor Director:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he efectuado la revisión final del trabajo de tesis titulado "DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DE LOS CONCRETOS PREMEZCLADOS DE MAYOR USO EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA", presentado por el estudiante universitario LEONEL DE JESÚS PINEDA SAMAYOA, el cual llena los requisitos establecidos en la propuesta hecha por el sustentante, por lo que me permito aprobarlo en mi calidad de asesor del mismo.

Atentamente,



Ing. Emilio Beltranena Matheu
Ingeniero Civil Colegiado No. 264

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 27 de julio de 2 009

Ingeniero
Sydney Alexander Samuels Milson
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Señor Director:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **“Determinación del módulo de elasticidad estático de los concretos premezclados de mayor uso en el área metropolitana de la ciudad de Guatemala”**, realizado por el estudiante universitario **Leonel de Jesús Pineda Samayoa**, quien contó con la asesoría del Ingeniero Emilio Beltranena Matheu.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante **Pineda Samayoa**, cumple con los objetivos para los cuales fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención que se sirva prestar a la presente.

Atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

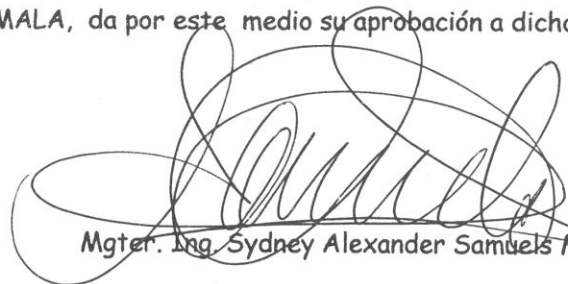
Cc archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Emilio Beltranena Matheu y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Leonel de Jesús Pineda Samayoa, titulado DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DE LOS CONCRETOS PREMEZCLADOS DE MAYOR USO, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Mgter. Ing. Sydney Alexander Samuels Milson



Guatemala, agosto 2009

/bbdeb.

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.298.09

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO DE LOS CONCRETOS PREMEZCLADOS DE MAYOR USO, EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Leonel de Jesús Pineda Samayoa**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, agosto de 2009

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS

Porque de Él es toda la gloria y reconocimiento, y todo lo bueno que hay en mí no es más que el reflejo de su amor.

MI ASESOR

El Ingeniero Emilio Beltranena, por su tiempo, dedicación, conocimiento y apoyo en general, que durante el desarrollo del trabajo de graduación me brindó.

INGENIERO HERBERT LÓPEZ

Por todo el apoyo brindado durante el desarrollo del trabajo de graduación.

MARIO SIERRA

Por su ayuda y conocimientos brindados

MIS AMIGOS

José Manuel, Gabriel, Joel, Hieme, Jaime, William, Edwin, José Mario, Sergio, por su apoyo y amistad.

MIS AMIGOS UNIVERSITARIOS

Rudy, Carlos, Noé, Gustavo y demás compañeros en general por su amistad y compañerismo.

LAS FAMILIAS

Revolorio Pineda, Samayoa Nájera, Samayoa Toledo, Rizo Roque, por todo su cariño y apoyo incondicional.

ACTO QUE DEDICO A:

MIS PADRES

Francisco Leonel Pineda y Miriam Samayoa, por su amor incondicional, su ejemplo y dedicación sin fronteras que en su afán por mi bien han entregado sin medida y en virtud de ello, en honor a su esfuerzo se refleja la culminación exitosa de una etapa de mi vida.

MI ESPOSA

Andrea Rizo Roque de Pineda, que con entrega, lucha y paciencia me ha apoyado firmemente y con su amor ha llenado mi vida, impulsándome a marcar mi camino trascendentalmente.

MI NENA

Ximena Nicolle Pineda Rizo, por ser la luz que Dios envió para iluminar mi camino y llenar mi vida de energía y alegría.

MIS HERMANAS

Ligia Nancy, Miriam Adela y Ana Lucia, porque aun en los tiempos más difíciles siempre me han acompañado y con sus acciones me han demostrado su cariño.

MIS ABUELOS

Luis de Jesús Pineda (+), Hortensia Roca, Nery Samayoa (+), María Adela Abadía (+), por todo su amor.

MIS PRIMOS Y AMIGOS

Edgar, Miguel, Pablo y Erick (+) por su amistad y cariño, que han sido parte esencial en mi formación humana y profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. GENERALIDADES	
1.1. El concreto como material estructural.....	1
1.2. Propiedades principales del concreto endurecido.....	2
2. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON.....	3
2.1. Importancia de las propiedades elásticas.....	6
2.2. Importancia de los agregados.....	11
3. IDENTIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS A UTILIZAR, TOMANDO, EN CUENTA SUS CLASES DE RESISTENCIA Y COMBINACIÓN DE AGREGADOS	
3.1. Agregados disponibles.....	15
3.2. Agregados utilizados en el presente estudio.....	16
3.2.1. Agregados utilizados por Mezcladora, S.A.....	16
3.2.2. Agregados del río Chinautla.....	17
3.3. Características de los agregados utilizados en el presente estudio.....	17

4. PROGRAMA DE ENSAYOS	
4.1. Muestreo de agregados.....	21
4.2. Ensayo de los agregados.....	21
4.3. Muestreo de concreto.....	21
4.4. Ensayo de resistencia a compresión.....	22
4.5. Ensayo de módulo de elasticidad estático.....	23
5. REGISTRO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	
5.1. Ensayo de concreto fresco.....	27
5.2. Ensayo de resistencia a compresión y módulo de elasticidad del concreto.....	31
5.3. Curva esfuerzo-deformación del concreto.....	32
6. DISCUSIÓN EN CUANTO A LAS CURVAS ESFUERZO- DEFORMACIÓN OBTENIDAS.....	37
7. RELACIÓN ENTRE TIPOS DE AGREGADOS USADOS, RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS.....	39
8. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS Y LOS CALCULADOS POR FÓRMULAS EN PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL	
8.1. Desarrollo de fórmulas empíricas con base a la resistencia a la compresión y la densidad del concreto.....	47
8.2. Comparación entre los módulos obtenidos por la ASTM C469 y los calculados por el ACI 318-08 y Eurocódigos.....	51

CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÉNDICE	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Curva típica esfuerzo-deformación.....	8
2.	Módulos de elasticidad curva esfuerzo-deformación.....	9
3.	Curvas esfuerzo-deformación combinación 1.....	32
4.	Curvas esfuerzo-deformación combinación 2.....	32
5.	Curvas esfuerzo-deformación combinación 3.....	33
6.	Curvas esfuerzo-deformación combinación 4.....	33
7.	Curvas esfuerzo-deformación combinación 5.....	34
8.	Curvas esfuerzo-deformación combinación 6.....	34
9.	Curvas esfuerzo-deformación combinación 7.....	35

TABLAS

I.	Módulo de elasticidad y relación de Poisson más comunes en materiales.....	5
II.	Efecto del tipo de agregado en el módulo de elasticidad del concreto.....	13
III.	Resultados y análisis de agregados.....	17
IV.	Combinaciones de agregados para mezclas de concreto de Mezcladora, S.A.....	19
V.	Resultados de concreto fresco combinación 1.....	27
VI.	Resultados de concreto fresco combinación 2.....	28
VII.	Resultados de concreto fresco combinación 3.....	28
VIII.	Resultados de concreto fresco combinación 4.....	29
IX.	Resultados de concreto fresco combinación 5.....	29
X.	Resultados de concreto fresco combinación 6.....	30
XI.	Resultados de concreto fresco combinación 7.....	30
XII.	Resultados de resistencia a compresión y módulo de elasticidad.....	31
XIII.	Análisis de agregados.....	40
XIV.	Características de los concretos frescos y endurecidos de las combinaciones de agregados usados.....	41
XV.	Tipos de mezclas de concretos de Mezcladora S.A.....	42
XVI.	Comparación entre combinaciones 5 y 6.....	43
XVII.	Comparación entre combinaciones 1,2,3 y 4.....	44
XVIII.	Comparación módulo ASTM C469 vrs (ACI 318 y CEB) (Eurocódigo 2).....	51
XIX.	Ejemplo de formato utilizado para los ensayos de módulo de elasticidad.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Psi	Medida de esfuerzo libra fuerza sobre pulgada cuadrada
σ	Esfuerzo
ε	Deformación unitaria del concreto
μ	Relación de Poisson
$\mu\varepsilon$	Deformación unitaria en millonésimas
MF	Módulo de finura de los agregados
f'c teórico	Resistencia teórica del concreto
f'c real	Resistencia real obtenida en ensayos
E	Módulo de elasticidad del concreto
% tamiz 200	Porcentaje de material que pasa el tamiz 200 en el proceso de tamizado

GLOSARIO

Agregado fino	Agregado que pasa por el tamiz No.4 y pasa casi totalmente por el tamiz 4.75 (No.4).
Agregado grueso	Grava natural o piedra triturada predominantemente retenido en el tamiz No.4.
Concreto	Mezcla de un material cementante y agregados finos y gruesos.
Concreto endurecido	Concreto con el estado sólido, que haya desarrollado cierta resistencia.
Concreto fresco	Concreto recién mezclado, aun plástico y trabajable.
Contracción	Disminución de la longitud o del volumen del material, resultante de cambios en el contenido de humedad, temperatura y cambios químicos.
Control de calidad	Acciones realizadas por el productor o contratista, a fin de proveer un control sobre lo que se está haciendo y lo que se está suministrando, para que las normas de buena práctica de obra se implementen.
Curado	Proceso a través del cual se mantiene el concreto en la condición húmeda y a una temperatura favorable.

Durabilidad	Capacidad del concreto, mortero o grout de cemento hidráulico de resistir a la acción de la interperie y otras condiciones de servicio, tales como ataque químico, congelación, deshielo, abrasión.
Fluencia	Deformación del concreto o de cualquier material, dependiente del tiempo y provocada por una carga mantenida en el tiempo.
Hidratación	Es la reacción entre el cemento hidráulico y el agua, a través de la cual se forman nuevos compuestos que confieren resistencia al concreto.
Módulo de elasticidad	Relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria para esfuerzos de compresión o tracción menores que el límite elástico proporcional del material; es también conocido como módulo de Young y designado por el símbolo E.
Módulo de finura	Factor que se obtiene por la suma de los porcentajes acumulados de material de muestra de agregado en cada uno de los tamices especificados dividido cien.

Pasta de cemento	Constituyente del concreto, que consiste en cemento y agua.
Resistencia a compresión	Resistencia máxima que una probeta de concreto, puede resistir cuando es cargada axialmente, en compresión en una máquina de ensayo a una velocidad especificada.

RESUMEN

La importancia de conocer el módulo de elasticidad del concreto radica en que este es una medida de su rigidez. Para el diseño de muchas edificaciones o construcciones en general no se necesita saber con exactitud dicho módulo, por lo que es usual descansar en aproximaciones que proporcionan las fórmulas expuestas por los diversos códigos. Dichos códigos proporcionan un dato aproximado del módulo de elasticidad estático del concreto, algunos ejemplos de los mismos son ACI 318 y CEB-FIB, utilizando el EUROCODIGO 2 que se comparan y discuten en el presente trabajo.

No obstante, en un proyecto donde se requiere conocer con exactitud la medida del módulo de elasticidad del concreto, es necesario realizar el ensayo de una muestra de concreto fabricada con los materiales a utilizar de acuerdo a la ASTM C469 (módulo cuerda).

El principal ensayo utilizado para evaluar la calidad del concreto es la resistencia del concreto a compresión, esto debido a que es una prueba relativamente sencilla de realizar y da un buen parámetro a de todas las propiedades ingenieriles del concreto.

Es sabido que cuando aumenta la resistencia del concreto a compresión, aumentan todas sus propiedades, pero no se sabe en qué proporción lo hace; es por esta razón que muchos investigadores han realizado pruebas, con el fin de encontrar una relación directa entre la resistencia a compresión del concreto y sus otras propiedades, en especial la relación entre su resistencia a compresión y el módulo de elasticidad.

Entre los ingenieros e investigadores destaca Stanton Walker (1919), quien propuso una relación; pero no fue hasta mucho tiempo después que muchos investigadores llegaron a fórmulas similares que se utilizaron en los códigos.

Existen varios métodos para la obtención del módulo de elasticidad estático del concreto como lo son el módulo tangente, el módulo secante, el módulo cuerda (ASTM C469) y también varios para el módulo dinámico (ASTM C215, ASTM 597 y ASTM C1383).

En el presente trabajo se evalúan los agregados derivados de la explotación de canteras y agregados obtenidos de algunos de los ríos aledaños a la ciudad de Guatemala de mayor consumo para la fabricación de concreto premezclado en el área metropolitana de la ciudad de Guatemala. (Normalmente para la fabricación de concreto premezclado es más común la utilización el agregado de trituración, de calidad más controlada. A las arenas de trituración se les suele mezclar con algún porcentaje de arenas naturales para compensar la falta de finos intermedios).

De esta manera se hace una comparación entre los resultados obtenidos, según los procedimientos detallados en la ASTM C469 y las especificaciones del ACI 318 y CEB-FIB-EUROCODIGO 2.

Es importante recordar que para concreto de resistencia y densidad normal se tiene un módulo de elasticidad de 140,000 a 420,000 kg/cm² ó de 14,000 a 41,000 Mpa (2,000,000 a 6,000,000 lb/plg²) y una relación de Poisson de 0.15 a 0.21.

OBJETIVOS

GENERAL:

Establecer el efecto sobre el módulo de elasticidad del concreto, de los diversos tipos de agregados utilizados en el área metropolitana de la ciudad de Guatemala.

ESPECÍFICOS:

1. Determinar las características de los agregados utilizados.
2. Determinar las mezclas de concreto para cada clase de resistencia (3000,4000 y 5000 psi), previo a la evaluación.
3. Realizar los ensayos de resistencia y módulo de elasticidad estático de conformidad con las normas ASTM vigentes.
4. Comparar para cada clase de resistencia la variación del módulo de elasticidad estático para cada tipo de concreto y combinación de agregados utilizada.
5. Comparar los módulos de elasticidad obtenidos con los calculados por fórmulas usadas en los procedimientos de cálculo estructural, más utilizados y reconocidos a nivel mundial ACI 318, Código CEB-FIP.

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más utilizado en la construcción, debido a las ventajas que presenta por ser un material que utiliza recursos locales, es económico, muy versátil en sus aplicaciones y es resistente.

El concreto es un material heterogéneo, mezcla de dos componentes básicos: la pasta de cemento hidratado y los agregados, y por lo tanto sus características están afectadas por las propiedades de estos dos componentes y sus interfaces.

En general se considera que la resistencia es la propiedad más importante del concreto, aunque en muchos casos pueden ser la durabilidad e impermeabilidad las más importantes. La imagen general de la calidad de un concreto por la resistencia viene que la misma es de una importancia significativa en el diseño y desempeño de las estructuras de concreto. Sabemos que la resistencia es afectada por las propiedades de la pasta de cemento hidratado, en especial la relación agua/cemento, pero también por la relación cemento/agregado; la granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez del agregado. Es importante también la adhesión pasta de cemento-agregado, particularmente de mortero agregado-grueso.

De lo anterior, resulta que tomando en cuenta que los agregados ocupan del 65 al 75% del volumen del concreto, su influencia en la resistencia del concreto es significativa.

Íntimamente relacionada con la resistencia está la deformación. A cualquier esfuerzo siempre hay asociada una deformación y viceversa. Asimismo, hay deformaciones que pueden ser causadas por otras causas como (humedad o temperatura) que las debidas a la aplicación de cargas y que la relación entre el esfuerzo y la deformación en una forma integral es de sumo interés en el diseño estructural.

El estudio de la relación esfuerzo-deformación comprende principalmente la definición de las características de la curva esfuerzo-deformación y la determinación del módulo de elasticidad estático y del módulo de Poisson asociado.

El presente trabajo pretende hacer un estudio del módulo de elasticidad estático y módulo de poisson asociado y de las características de la curva esfuerzo-deformación para los concretos más usados en el área metropolitana de Guatemala, de acuerdo a los tipos de agregados utilizados por Mezcladora, S.A, de acuerdo con sus clases de resistencias (3000, 4000, 5000 PSI) y con los diversos tipos de agregados grueso y fino que se utilizan en su elaboración.

Para el estudio se utilizó la norma ASTM C-469 en la determinación del módulo de elasticidad estático y relación de poisson, y además la norma ASTM C-39 para las pruebas de resistencia a compresión del concreto. Para cada tipo de mezcla se realizaron los ensayos correspondientes de concreto fresco (asentamiento, temperatura, masa unitaria, contenido de aire, y moldeo de cilindros, con base en las normas ASTM aplicables.

Se analizaron los resultados obtenidos y se compararon con los determinados por las fórmulas utilizadas en los procedimientos de diseño estructural más reconocidos como lo son ACI 318 Y CEB.

1. GENERALIDADES

El concreto es el material más utilizado en el mundo, esto debido a las múltiples ventajas que lo caracterizan: es versátil, resistente, durable y económico.

Debido a que es un material heterogéneo, sus características físicas y mecánicas han sido motivo de varios estudios que han proporcionado bastante información sobre sus propiedades; dicha información ha sido empleada de forma benéfica en pro del desarrollo de la industria y tecnología del concreto en su estudio continuo.

El concreto en su estudio se presenta en tres etapas: estado fresco, en proceso de fraguado y en estado endurecido, y en los tres estados presenta características típicas que determinan su desempeño.

La calidad del concreto está directamente influenciada por cada uno de sus componentes; es decir de la pasta de cemento hidratado, los agregados y por la adherencia en las interfaces de estos dos materiales.

1.1 El concreto como material estructural

El concreto como material estructural presenta ventajas: es durable, necesita de poco mantenimiento, posee una alta resistencia a la compresión, posee una alta resistencia al fuego y al clima; la principal desventaja del concreto es su poca resistencia a la tracción o tensión, por lo que normalmente se utiliza en forma de concreto reforzado.

El concreto es un material utilizado para la construcción de diversos tipos y tamaños de estructuras: puentes, presas, pavimentos, edificaciones varias, y componentes prefabricados, y en su mayor consumo se encuentran los concretos con resistencias especificadas en el rango de 3000 a 5000 psi (21 a 35 Mpa).

La propiedad más apreciada por los diseñadores y constructores es la resistencia del concreto, principalmente de compresión, la prueba de resistencia es relativamente fácil de realizar, y muchas de las propiedades del concreto como su módulo de elasticidad, la impermeabilización, la resistencia a agentes agresivos; están directamente relacionados con la resistencia.

1.2 Propiedades principales del concreto endurecido

El concreto es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión, dependiendo de las características físicas, químicas y mecánicas de cada uno de sus elementos y la interacción entre cada uno de ellos.

Otros factores que afectan la resistencia del concreto endurecido son las condiciones de tiempo, temperatura y humedad en el proceso de endurecimiento y desarrollo de resistencia, el tiempo de curado que se le aplique, ya que entre mayor sea este periodo, más adecuadas las condiciones de humedad y temperatura, mejor se hidratan las partículas de cemento.

La resistencia a tracción del concreto es solo una fracción de su resistencia a compresión (del orden del 10%).

2. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE POISSON

Al aplicar una carga a un material este se deforma, muchos materiales regresan a sus dimensiones originales cuando les es removida la carga. Esto describe la elasticidad del material. Hooke propuso en 1678, que este comportamiento es similar al de un resorte que cuando se comprime o se estira cambia de longitud y cuando la carga se quita, vuelve a su posición original. Hooke señaló que la deformación de un cuerpo (δ) era linealmente proporcional a la fuerza aplicada (F), y la constante proporcional (K) fue denominada por mucho tiempo la constante del resorte. La expresión de esta relación fue:

$$F = K\delta$$

F = la carga o fuerza aplicada

K = constante del resorte

δ = deformación

Actualmente, la constante del resorte es la “rigidez” del material o estructura que depende de la geometría del cuerpo que es sometido a carga y de las propiedades del material. La fuerza se pone en términos de esfuerzo $\sigma = F/A$, donde A es el área del espécimen donde se aplica la carga y la deformación se pone en términos de $\epsilon = \delta/L$ donde L es la longitud original del espécimen, lo que da lugar a la fórmula más conocida para carga uniaxial, donde el esfuerzo se relaciona con la deformación por la constante de proporcionalidad llamada módulo de elasticidad o módulo de Young, y expresada por:

$$\sigma = E\epsilon$$

σ = esfuerzo aplicado

ϵ = deformación unitaria

Ahora bien, cuando se aplican esfuerzos en una dirección, se producen cambios en dos dimensiones en direcciones perpendiculares a la anterior. Por lo tanto se requiere de dos parámetros para describir el comportamiento elástico del material: El módulo de elasticidad o módulo de Young, y la Relación de Poisson que es el valor absoluto de la relación de la deformación transversal a la correspondiente longitudinal, resultante del esfuerzo axial uniformemente distribuido, bajo el límite proporcional del material (ASTM E6). Las deformaciones transversales son de dirección opuesta a la deformación axial y su relación se expresa:

Donde:

$$\varepsilon_{\text{lat}} = \sigma_{\text{lat}}/E - \mu (\sigma_{\text{axial}}/E)$$

μ = Relación de Poisson

σ_{lat} = esfuerzo en dirección lateral

σ_{axial} = esfuerzo en dirección axial

$\varepsilon_{\text{axial}}$ = deformación unitaria en dirección axial

E= Módulo de elasticidad

ε_{lat} = deformación unitaria en dirección lateral

Fuente: Capítulo 2 Resistencia de Materiales, Pytel-Singer

Es importante hacer notar que conocidas E y μ , puede con base en ellas calcularse G llamado módulo de corte, módulo de rigidez o módulo torsional, que es la relación entre el esfuerzo de corte a la deformación por corte “tangente del cambio angular entre dos líneas originalmente perpendiculares entre sí” (ASTM E6). Para un material isotropico generalmente se tiene la siguiente relación entre E, μ y G:

$$\mu = (E/2G) - 1$$

μ = Módulo de Poisson

E= Módulo de elasticidad

G= Módulo de elasticidad en corte.

Fuente: Capítulo 2 Resistencia de Materiales, Pytel-Singer

Finalmente es importante notar que hay una relación entre la frecuencia natural de vibración y las propiedades elásticas. Se ha encontrado que la frecuencia natural de vibración de un cuerpo elástico es proporcional a la raíz cuadrada de E o de G dependiendo del modo de vibración. Asimismo la velocidad de propagación de una onda de compresión en un cuerpo elástico es proporcional a la raíz cuadrada del módulo de elasticidad (E).

Puede notarse que el E del concreto es más bajo que la mayoría de metales y un poco más alto que el de la madera. La relación de Poisson es de 0 a 0.5 para casi todos los materiales y para el concreto es menor que para la mayoría de metales y es consistente con el de muchos materiales cerámicos.

Tabla I. Módulo de elasticidad y relación de poisson más comunes en materiales

Módulo de elasticidad y relación de Poisson comunmente usadas en Materiales de construcción			
Material	Módulo de elasticidad		relación poisson
	* 10⁹psi	Gpa	
Acero, grado A 36	30	207	0.3
Metal	9.6 a 25	66 a 169	0.26 a 0.31
Aluminio	10 a 10.5	69 a 72.5	0.33
Cobre	14 a 22	97 a 150	0.30 a 0.35
Concreto	3 a 6	21 a 42	0.18
Madera paralela	1.6 a 2	11 a 13.8	
Madera perpendicular	0.08 a 0.10	0.55 a 0.69	

Fuente: Capítulo 19- Elastic Properties, Creep and relaxation, Jason Weiss

2.1 Importancia de las propiedades elásticas

Los ingenieros deben ser capaces de calcular las deflexiones en las estructuras, calcular esfuerzos de las deformaciones observadas, proporcionar las secciones de concreto requeridas y determinar el refuerzo requerido en los elementos de concreto reforzado. En todos estos cálculos se necesita conocer las propiedades elásticas que relacionan el esfuerzo y su correspondiente deformación producida. En términos estrictos, el comportamiento esfuerzo-deformación del concreto es no lineal e inelástico dada su naturaleza heterogénea y los microagrietamientos en la pasta y entre los agregados, al subir el nivel de carga, pero generalmente se asume un comportamiento lineal porque así se simplifican los cálculos ingenieriles para niveles de carga que producen esfuerzos menores del 50% de la resistencia última y deformaciones unitarias menores de 1000 millonésimas ($\mu\epsilon$) en compresión y 100 ($\mu\epsilon$) en tracción. La característica más importante de la relación esfuerzo-deformación es la pendiente de la línea recta denominada **módulo de elasticidad** que es una **constante elástica** comúnmente utilizada para medir la deformabilidad elástica instantánea de un material bajo compresión o tracción uniaxial, dentro de los límites señalados.

Así mismo el concreto puede estar sometido a deformaciones derivadas de cambios de humedad y temperatura, y deformaciones que se van incrementando con el tiempo debido a la presencia de una carga sostenida. Esta última forma de la deformación viscosa, se denomina fluencia o flujo plástico (Creep), y su efecto es el de relajación o reducción de esfuerzos con el tiempo debido a una sistemática deformación del material.

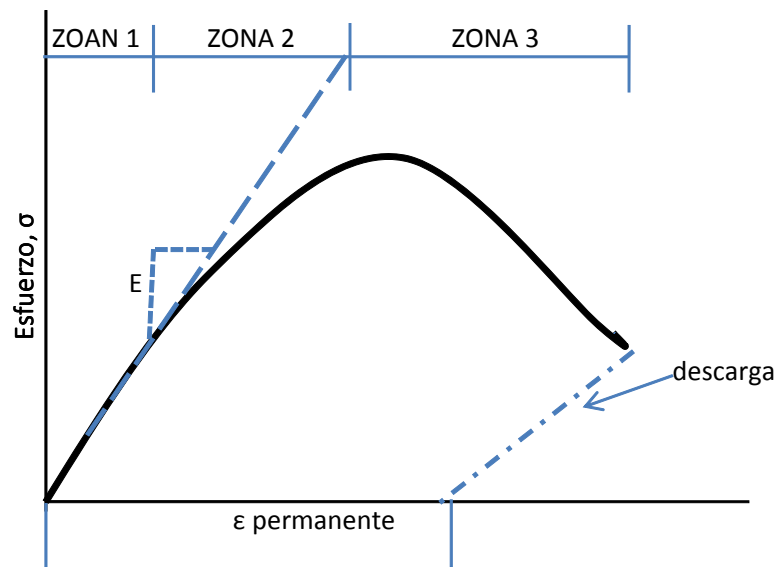
En el presente estudio no se trataran estas deformaciones, pero es importante recordar que, la deformación por fluencia y por retracción del concreto dependen fundamentalmente de la edad del concreto, las dimensiones del elemento y la composición del concreto. Está influenciada también por la madurez del concreto al aplicarle carga la primera vez y por la duración y magnitud de esta carga, y es útil determinar sus características para concreto preesforzado y para concreto normal sujeto a cargas fuertes de compresión por el efecto de relajación de esfuerzos que causa dicha deformación por fluencia o flujo plástico.

Hay varios métodos de ensayo. Los más conocidos y utilizados son el ASTM C-39 para determinar la resistencia máxima de compresión en cilindros de concreto y el ASTM C-469 para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto en compresión. No existe un método normalizado para obtener estos datos en tracción, sin embargo podrían usarse los ensayos de flexión en vigas ASTM C-78 (vigas con cargas a un tercio de la luz). Así mismo podría usarse el método ASTM C-1018 para obtener resistencia a la primera grieta y tenacidad a flexión de concreto reforzado con fibras (vigas con carga a tercios de luz).

Como ya se comentó antes, el módulo de elasticidad se determina aún para materiales que como el concreto no tienen una relación esfuerzo-deformación verdaderamente lineal. Para describir los límites del comportamiento elástico proporcional se usan dos términos: (1) El límite elástico proporcional y (2) El límite elástico.

El límite elástico proporcional según ASTM E-6 es el mayor esfuerzo que un material es capaz de sostener sin desviarse de la ley de proporcionalidad esfuerzo-deformación (ley de Hooke). El límite elástico es el mayor esfuerzo que un material es capaz de sostener, sin que ocurra una deformación permanente al relevar completamente el esfuerzo.

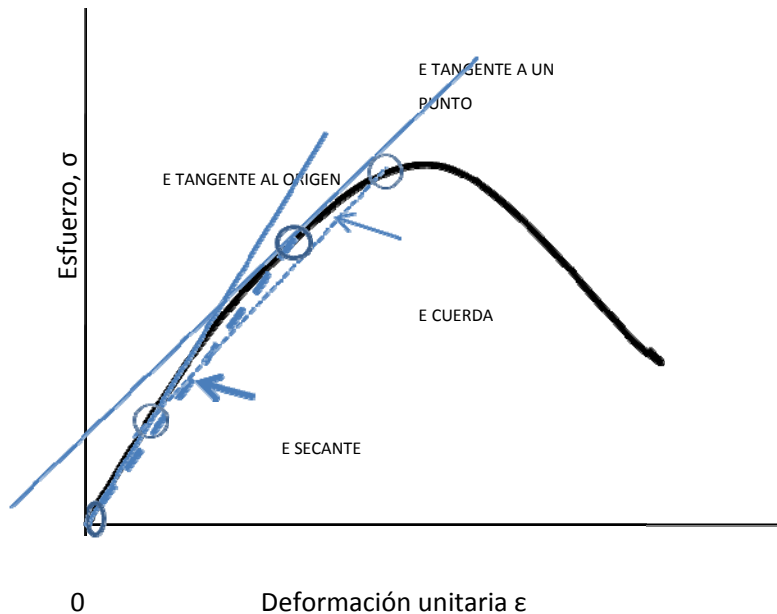
Figura 1. Curva típica esfuerzo-deformación



En la zona 1 la relación σ/ϵ es relativamente lineal, lo que ocurre en niveles bajo el 50% del esfuerzo máximo y a deformaciones del orden de 1000 millonésimas ($\mu\epsilon$). En la zona 2 la relación σ/ϵ , ya no es lineal, debido al desarrollo de grietas en la pasta. En la zona 3, la curva cae después de alcanzar el máximo esfuerzo y los esfuerzos bajan rápidamente debido a la abertura progresiva de las microgrietas, en la pasta entre los agregados.

Dado que el concreto no tiene un límite proporcional, ni un límite elástico bien definidos se han propuesto varias formas de estimar el módulo de elasticidad como se indica en la figura 2 (Ver ASTM E-6).

Figura 2. Módulos de elasticidad curva esfuerzo-deformación



El módulo tangente es dado por la línea tangente a la curva trazada en cualquier punto de la curva. Generalmente se define el módulo tangente al origen y el módulo tangente al punto seleccionado dentro de la zona de esfuerzos de trabajo previstos.

El módulo secante es dado por la pendiente de la línea trazada desde el origen a un punto de la curva, (del 40% al 50% del esfuerzo máximo).

El método más usado, ASTM C-469 (método cuerda), estipula una cuerda entre dos puntos de la curva esfuerzo-deformación: El más bajo corresponde a una deformación unitaria de 50 millonésimas ($\mu\epsilon$) y el punto más alto corresponde a un esfuerzo igual al 40% del máximo esfuerzo del concreto que se está ensayando.

El punto más bajo es cercano al origen, pero suficientemente separado para estar libre del efecto de irregularidades en las lecturas de deformación causadas por efectos del ajuste inicial de los cabezales de la máquina de ensayo y de los instrumentos de medida de la deformación.

El punto más alto queda cercano al extremo del comportamiento lineal y cercano al nivel del máximo esfuerzo de trabajo asumido en la mayoría de diseños, de modo que el módulo de elasticidad representa un módulo de elasticidad promedio dentro del rango probable de esfuerzos de trabajo.

Aunque en el método estándar no se hace referencia al comportamiento del concreto a esfuerzos mayores del 40% del máximo, la forma de la curva σ/ε a esfuerzos altos puede ser útil para establecer la capacidad del concreto a carga última. El concreto agrietado en la porción descendiente de la curva σ/ε tiene una importante capacidad de carga, pero esta decrece rápidamente con el incremento de la deformación (y del agrietamiento). Esta habilidad del concreto reduce el efecto de “picos” de esfuerzos disminuyendo la posibilidad de fallas súbitas y violentas.

En el ensayo estándar, bajo control de la velocidad de carga, la rotura de los cilindros es muy rápida y a veces explosiva, poco después de alcanzada la carga máxima, lo que impide medir la curva σ/ε de descarga en forma adecuada.

Varios investigadores han experimentado con procedimientos más adecuados para evaluar la curva σ/ε , pero hasta la fecha no existe un método normalizado para realizar este ensayo.

2.2 Importancia de los agregados

Como ya se ha mencionado los agregados constituyen del 65 al 75% del volumen de la mezcla por lo que indudablemente forman parte importante y contribuyen en gran manera en las características y la calidad del concreto, tanto en trabajabilidad en estado fresco, como en resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo de elasticidad, etc.

La importancia de los agregados también se fundamenta en que estos resisten los cambios volumétricos que se originan por las contracciones plásticas, resisten los cambios volumétricos por secado; por lo que el módulo de elasticidad del concreto se ve fuertemente influenciado por el módulo de elasticidad del agregado y su resistencia a la tracción.

Indudablemente la característica del agregado que más influye en el módulo de elasticidad del concreto, es la porosidad (medida de la densidad aparente o masa unitaria) esto debido a que la porosidad del agregado determina su rigidez. Los agregados densos tienen un módulo de elasticidad mayor, por lo que entre mayor sea la cantidad de este agregado mayor será el módulo de elasticidad del concreto.

Otras propiedades de los agregados que influyen en las características del concreto son: granulometría (una óptima distribución de sus partículas nos proporciona un concreto más denso y homogéneo. Tamaño máximo, textura superficial (adherencia), forma, composición mineralógica, etc.

En cuanto a la composición mineralógica, en Guatemala es muy variable como puede observarse de la distribución siguiente que clasifica los agregados por los tipos de rocas donde se originan y la región del país en que son abundantes. (Información obtenida del Instituto del cemento y del concreto de Guatemala – ICCG).

La composición mineralógica es muy variable en Guatemala.

TIPOS DE ROCAS

OCURRENCIA

IGNEAS INTRUSIVAS (PLUTÓNICAS)

GRANITOS - - Occidente del país: San Marcos y Quetzaltenango.

IGNEAS EXTRUSIVAS (VOLCÁNICAS)

RIOLITAS	}	- Parte sur del país desde la cadena montañosa central.
ANDESITAS		
BASALTOS		
DACITAS		

SEDIMENTARIAS - ACCIÓN MECÁNICA

ARENISCAS

Y CONGLOMERADOS - Pocas y de calidad dudosa, Alta y Baja Verapaz.

SEDIMENTARIAS - ACCIÓN QUÍMICA

CALIZAS - Parte del norte del país desde la cadena montañosa
Y DOLOMITAS central

YESOS - Distribución igual que anterior, pero no son
Adecuados como agregados para concreto.

METAMÓRFICAS

(Alta Verapaz y Baja Verapaz, Petén, Izabal, El Progreso).

ESQUISTOS Y PIZARRAS -Rocas foliadas con mica, arcillas,
(Derivadas de rocas ígneas) y limos –baja calidad de agregados

MARMOLES, CUARCITAS -Rocas muy cristalizadas y lisas,
Y SERPENTINAS baja calidad de agregados.
(Derivadas de rocas sedimentarias)

En Estados Unidos y Europa la mayoría de agregados son de origen cuarcítico y muy uniformes. Hay explotación de algunas calizas de calidad adecuada.

Como comprobación del efecto del tipo de agregado por su composición en el módulo de elasticidad del concreto se presenta en la tabla siguiente.

Tabla II. Efecto del tipo de agregado en el módulo de elasticidad del concreto

Tipo de agregado	f corrección
Basalto, piedra caliza densa	1.2
Cuarcita	1
Piedra caliza	0.9
Piedra arenisca	0.7

FUENTE: pág. 62 ver Ref. Bibl. 1.

La fórmula básica para E_c fue desarrollada para cuarcita. Para otros agregados, puede E obtenerse multiplicando E_c por los factores de la tabla anterior.

3. IDENTIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO A UTILIZAR, TOMANDO EN CUENTA SUS CLASES DE RESISTENCIAS Y COMBINACIÓN DE AGREGADOS

3.1 Agregados disponibles

Existe una diversidad de agregados en el área metropolitana de Guatemala; los existentes en los ríos y sus afluentes; Chinautla, Las Vacas, Villalobos, los obtenidos en explotación de canteras de calizas en el norte de la ciudad y los de canteras del Sur principalmente en el cañón de Palin. Los de explotación de los depósitos de ríos o afluentes están muy contaminados por desagües y desechos de la ciudad de Guatemala, y en general son ahora de baja calidad.

Los provenientes de la explotación de canteras son de mejor calidad y uniformidad, y son los que preferentemente utilizan las plantas de concreto premezclado.

Por lo tanto, se estimó como más apropiado, hacer una evaluación de los agregados usados en las mezclas de concreto premezclado de Mezcladora, S.A. que a la fecha son las de mayor uso en el área metropolitana de la ciudad de Guatemala.

Así mismo para ilustrar la calidad de los agregados disponibles en los depósitos de los ríos y afluentes aledaños a la ciudad se fabricaron algunos concretos con arena y grava naturales del río Chinautla.

3.2 Agregados utilizados en el presente estudio

3.21 Agregados usados por Mezcladora, S.A

Arena

1. **0 ¼” PPO** Polvo de trituración de basalto Planta Palín Oeste
2. **La Pedrera (LP)** Arena caliza triturada- Planta la pedrera
3. **Arena Sur** Polvo de trituración con 80 % PPO y 20 de P
Amatitlán
4. **Arena Norte** Arena Norte con 90 % Caliza y 10 % del río Chinautla

Piedrín de 3/8”

5. **PPO** Piedrín de basalto Planta Palín Oeste
6. **La Roca** Piedrín de caliza Planta La Roca zona 18
7. **La Pedrera (LP)** Piedrín de caliza Planta la Pedrera zona 6

Piedrín ¾” o 1”

8. **¾” PPO** Piedrín de basalto Planta Palín Oeste
9. **1” La pedrera** Piedrín de Caliza Planta La Pedrera

3.2.2 Agregados del río Chinautla

10. Grava Grava de andesita de la rivera del río Chinautla, separada por tamizado.

11. Arena Arena andesítica de la ribera del río Chinautla, sin ningún procesamiento.

Cada agregado se especifica de acuerdo a la planta que los produce; sus características técnicas se indican a continuación:

3.3 Características de los agregados utilizados en el presente estudio

Tabla III. Resultados y análisis de agregados

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AGREGADO	0-1/4" ppo	3/4" ppo	3/8" ppo	arena Lp	1" LP	3/8" LP	0 1/4" SUR	arena norte	3/8" la roca	ppo lavada	arena chinautla	grava chinautla
% ABSORCIÓN	1.92	0.83	1.16	1.35	0.67	0.8	3.3	2.49	1.6	1.1	4.96	2.41
PESO ESPECÍFICO	2.66	2.68	2.66	2.65	2.68	2.66	2.6	2.58	2.72	2.67	2.46	2.63
MASAUNITARIA SUELTA Kg/m³	1378	1446	1449	1312	1459	1398	1405	1219	1500	1198	1098	1480
MASA UNITARIA COMPACTADA Kg/m³	1528	1632	1616	1583	1633	1570	1640	1393	1670	1426	1440	1662
% TAMIZ PASA No.200	11.06	1.68	2.13	5.26	3.11	1.3	11.86	5.04	3.23	2.76	2.21	0.26
MÓDULO DE FINURA	2.63	6.95	5.84	3.01	6.76	5.88	2.73	2.87	5.62	2.72	2.73	6.72

Comentarios:

- Las arenas trituradas de La Pedrera (No.4), y 0 ¼” PPO (No.1), tienen buena densidad relativa de partículas, relativamente baja absorción pero le falta partículas intermedias y les falta finos a la No.4 y a la PPO lavada No.10, ya que su masa unitaria suelta es un poco baja.
- La arena 0 ¼” Sur (No.7) y la arena Norte (No.8) tienen absorciones altas y densidad relativa de partículas un poco bajas, posiblemente por su composición mineralógica de minerales volcánicos a base de andesitas y dacitas, así como cierto contenido de material poroclastico de pómez.
- Los piedrines de ¾” PPO (NO.2) y 3/8” PPO (NO.3), el piedrín de 1” (No5) y 3/8” de LP (No.6) y el piedrín de 3/8” de la Roca (No.9) tienen una buena densidad relativa de partículas, baja absorción y una masa unitaria buena. Se estiman como muy buenos agregados gruesos.

En resumen:

1. Arenas núm. 1, 4 y 10 buenas- pueden ser mejoradas en su granulometría y finos.
2. Arenas núm. 7 y 8 de calidad intermedia
3. Piedrines núm. 2, 3 5 6 y 9 son muy buenos.
4. La arena Chinautla es la de mayor absorción, más baja densidad relativa y masa unitaria suelta, por su composición a base de andesitas y dacitas y contenido de pómez. Además contiene contaminación de desechos y desagües. No es de calidad adecuada.

5. La grava de Chinautla núm.12 tiene la mayor absorción, densidad relativa está bien. Contiene contaminación de desechos y desagües.

Tabal IV. Combinaciones de agregados para las mezclas de concreto de Mezcladora, S.A

No.	1	2	3	4	5	6
ARENA	ARENA SUR	0-1/4 PPO	ARENA SUR	ARENA NORTE	ARENA LP	0-1/4 LAVADA
PIEDRIN 3/4 6 1"	PPO	PPO	PPO	PPO	LP	PPO
PIEDRIN 3/8"	PPO	PPO	LA ROCA	LA ROCA	LP	PPO

En la tabla IV se detallan 6 combinaciones de agregados para las mezclas de Concreto Premezclado de Mezcladora, S.A.

Dentro de los diferentes elementos estructurales que se desarrollan con mayor frecuencia en el proceso de construcción de las diferentes obras civiles se encuentran: pavimentos, losas, columnas, vigas, zapatas, muros, etc. y las resistencias de concretos requeridas para las diversas estructuras en su mayoría corresponden a clases de resistencias de 3000, 4000 y 5000 psi, por lo que se evaluarán las características físicas y mecánicas de los concretos desarrollados con dichas resistencias , y con las combinaciones de agregados de la tabla IV.

Nota: se debe de recordar que los concretos despachados en plantas de concreto premezclado utilizan un factor de seguridad estipulado por el ACI, en donde se toman en cuenta las desviaciones estándar de los concretos como factor de seguridad; de manera que la resistencia requerida corresponde a una resistencia $f'c$ mayorada.

4. PROGRAMA DE ENSAYOS REALIZADOS

4.1 Muestreo de agregados

Muestreo de agregados

Noviembre 2008

Para el muestreo se utilizó uno de los métodos propuestos por la (ASTM D75).

Las muestras se tomaron en tres o cuatro puntos a lo largo del almacenamiento, calculando la parte media de la altura.

4.2 Ensayo de agregados

Ensayo de agregados

Noviembre y diciembre 2008

Para el ensayo de agregados se utilizaron los procedimientos especificados (ASTM C33) y (ASTM C29).

4.3 Muestreo de concreto

Fabricación y muestreo de mezclas de concreto

diciembre 2008

4.4 Ensayo de resistencia a compresión (ASTM C31 Y ASTM C39)

Ensayo de resistencia a compresión

enero 2009

Se elaboraron los especímenes en base a las especificaciones (ASTM C31).

Se debe de homogenizar el concreto, llenar los especímenes de 6x12 en tres capas de igual volumen, cada capa debe de ser apisonada 25 veces en forma de espiral hacia dentro con una varilla de 24" de largo y 5/8" de diámetro con la punta semiesférica, el apisonamiento debe penetrar aproximadamente 1" de la capa anterior; los moldes deben de ser golpeados con un mazo de 1.25 +/- 0.5 libra de 10 a 15 veces por capa.

Los especímenes se ensayaron a compresión a la edad de 28 días según (ASTM C39).

El ensayo se debe de realizar en una máquina de compresión calibrada, a una velocidad de 30 a 40 psi (1.4 a 3.5 Kg/cm²) por segundo, las superficies de apoyo deben de estar planas y limpias, y el cilindro debe de estar centrado con los cabezales. Además los cilindros se cabecean con mortero especial de azufre (ASTM C617) o se usan con almohadillas o placas de neopreno (ASTM C1231) para uso de cabezas no adheridas.

4.5 Módulo de elasticidad estático (ASTM C469)

Análisis y cálculo de resultados

enero 2009

Del ensayo de módulo de elasticidad

A continuación se describe el procedimiento para el cálculo del módulo de elasticidad en base a ASTM C 469.

Se usa la pareja del espécimen para determinar la resistencia a compresión de acuerdo a (ASTM C39) antes de proceder al ensayo de módulo de elasticidad.

Luego se coloca el espécimen con el deformómetro puesto en el cabezal inferior de apoyo de la máquina de compresión. Se alinea el eje del espécimen con el centro de la rótula del cabezal superior. Se toma nota de la lectura del deformómetro. El cabezal superior de apoyo se lleva lentamente a asentarse sobre el espécimen.

Se aplica carga al espécimen por lo menos dos veces. No se registran datos durante el primer ciclo de carga. Se calcula utilizando el promedio de los resultados de los siguientes ciclos de carga.

Se aplica la carga continuamente y sin impactos. Cuando la deformación longitudinal es de 50 millonésimas y lecturas de deformación cuando la carga aplicada sea igual al 40% de la carga ultima obtenida en el cilindro ensayado a compresión. La deformación unitaria total longitudinal está definida como el total de la deformación longitudinal dividida por la longitud de base del deformómetro.

El módulo de elasticidad se calcula con base a la siguiente fórmula:

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.00005)$$

E= módulo de elasticidad cuerda

S₂=esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última.

S₁=esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal de las 50 millonésimas.

ε₂= deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo **S₂**.

Otra forma para calcular el módulo de elasticidad del concreto es por mediciones ultrasónicas, son un tipo de ensayo no destructivo relativamente de bajo costo y que no causan ningún daño. Se basan en que la velocidad de una onda de compresión a través de un cuerpo elástico es proporcional a la raíz cuadrada del módulo de elasticidad. El ensayo ASTM C597, de medición de la velocidad de un pulso ultrasónico a través del concreto, puede usarse para medir las velocidades de ondas. A este módulo se le llama módulo dinámico y puede ser hasta 25% más alto que el módulo estático, por dos razones: El ensayo se hace a muy bajos niveles de esfuerzo y sus resultados reflejan más un módulo de elasticidad tangente inicial. Adicionalmente el ensayo depende de la velocidad de aplicación de la carga. Cargas a mayor velocidad producen valores de E mayores. Existe también otro método el ASTM C1383, método de ensayo para determinar la velocidad de la onda de P y el espesor de placas de concreto utilizando el método del eco del impacto.

La fórmula general que este último utiliza es la siguiente:

$$E= V^2 * [\delta (1-\mu) (1-2\mu)] / (1-2\mu)$$

δ = densidad

V= velocidad

μ = relación de Poisson dinámica

E= Módulo de elasticidad dinámico.

También está el ensayo ASTM C215, basado en el concepto de frecuencia natural de vibración de un cuerpo elástico que es proporcional a la raíz cuadrada del módulo de elasticidad o del módulo de corte, dependiendo del modo de vibración, o que mide las frecuencias fundamentales de resonancia transversal, longitudinal y torsional de especímenes de concreto. En este ensayo, se somete el espécimen a una vibración de resonancia utilizando un vibrador electromagnético, o utilizando un impacto para generar una vibración que es registrada en un acelerómetro.

La fórmula utilizada es:

Módulo dinámico:

$$E = CMn^2$$

Donde:

M= masa del espécimen en Kg

n= frecuencia fundamental de vibración en Hz

C= 1.6067 (L^3T/d^4) para un cilindro

= 0.9464 (L^3T/bt^3) M^{-1} para un prisma

L= longitud del espécimen en metros

T, b= medidas de la sección transversal del prisma, en metros, siendo b la dirección de la vibración.

T= factor de corrección que depende de la relación del radio de giro K (que para un cilindro es $d/4$ y para un prisma es de $t/3.464$) a la longitud del espécimen L, y de la relación de Poisson, ver ASTM C215 para valores de T correspondientes a varios valores de K/L y relaciones de Poisson.

Los métodos anteriores pueden relacionarse con los del módulo de elasticidad estático de la ASTM C469, entre sí. En general el módulo dinámico de la velocidad de pulso es del orden de 25% superior al E estático y del 15-20% superior al E dinámico de resonancias.

En general, dado que los ensayos de E estático se hacen con esfuerzos del mismo orden de magnitud que los encontrados en la práctica, mientras que en los E dinámicos los esfuerzos son muy pequeños, hay preferencia por usar los estáticos como los más representativos.

5. REGISTRO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

A continuación se tienen los cuadros de resultados de los ensayos realizados después de muestrear los concretos que se utilizaron para los ensayos de módulo de elasticidad.

5.1 Ensayo de concreto fresco

Tabla V. Resultados de concreto fresco combinación 1

COMBINACIÓN 1			
Resistencia teórica en psi (Mpa)	3000 (21)	4000 (28)	5000 (35)
Asentamiento “ (cm)	5 (13)	6 ¼ (16)	6 ½ (16.5)
Masa Unitaria:	2341 kg/m ³	2361 kg/m ³	2354 kg/m ³
Porcentaje de Aire:	1.0%	1.1%	1.4%
Temperatura del concreto:	23.0 grados Celsius	21.5 grados Celsius	20.0 grados Celsius

Tabla VI. Resultados de concreto fresco combinación 2

COMBINACIÓN 2			
Resistencia teórica en psi (Mpa)	3000 (21)	4000 (28)	5000 (35)
Asentamiento “ (cm)	4 ½ (11.5)	5 ½ (14)	4 (10)
Masa Unitaria:	2361 kg/m ³	2361 kg/m ³	2354 kg/m ³
Porcentaje de Aire:	1.4%	1.3%	1.8%
Temperatura del concreto:	22.7 grados Celsius	23.1 grados Celsius	21.4 grados Celsius

Tabla VII. Resultados concreto fresco combinación 3

COMBINACIÓN 3			
Resistencia teórica en psi (Mpa)	3000 (21)	4000 (28)	5000 (35)
Asentamiento “ (cm)	5 (13)	4 ½ (11.5)	4 ¼ (11).
Masa Unitaria:	2365 kg/m ³	2361 kg/m ³	2359 kg/m ³
Porcentaje de Aire:	1.0%	1.1%	1.0%
Temperatura del concreto:	21.7 grados Celsius	23.5 grados Celsius	22.5 grados Celsius

Tabla VIII. Resultados de concreto fresco combinación 4

COMBINACIÓN 4			
Resistencia teórica en psi (Mpa)	3000 (21)	4000 (28)	5000 (35)
Asentamiento “ (cm)	5 ½ (14)	6 (15)	5 (13)
Masa Unitaria:	2347 kg/m ³	2365 kg/m ³	2361 kg/m ³
Porcentaje de Aire:	2.0%	2.2%	2.5%
Temperatura del concreto:	20.7 grados Celsius	21.7 grados Celsius	21.9 grados Celsius

Tabla IX. Resultados de concreto fresco combinación 5

COMBINACIÓN 5			
Resistencia teórica en psi (Mpa)	3000 (21)	4000 (28)	5000 (35)
Asentamiento “ (cm)	6 ¾ (17)	7 (18)	7 ¼ (18.5)
Masa Unitaria:	2333 kg/m ³	2326 kg/m ³	2333 kg/m ³
Porcentaje de Aire:	3.3%	3.0%	4.0%
Temperatura del concreto:	21.4 grados Celsius	21.7 grados Celsius	22.1 grados Celsius

Tabla X. Resultados de concreto fresco combinación 6

COMBINACIÓN 6			
Resistencia teórica en psi (Mpa)	3000 (21)	4000 (28)	5000 (35)
Asentamiento “ (cm)	4 ½ (12.5)	6 (15)	5 ¼ (13)
Masa Unitaria:	2361 kg/m ³	2354 kg/m ³	2347 kg/m ³
Porcentaje de Aire:	1.9%	2.2%	2.1%
Temperatura del concreto:	23.7 grados Celsius	23.4 grados Celsius	16.3 grados Celsius

Tabla XI. Resultados de concreto fresco combinación 7

COMBINACIÓN 7			
Resistencia teórica en psi (Mpa)	3000 (21)	4000 (28)	5000 (35)
Asentamiento “ (cm)	6” (15)	6 ¾” (17)	6 ½” (16.5)
Masa Unitaria:	2230	2221	2235
Porcentaje de Aire:	3.5%	3.8%	3.3%
Temperatura del concreto:	23.7 grados Celsius	20.5 grados Celsius	22.5 grados Celsius

5.2 Ensayo de resistencia a compresión y módulo de elasticidad del concreto

Tabla XII. Resultados resistencia a compresión y módulo de elasticidad

No.	RESISTENCIA TÉORICA A COMPRESIÓN psi	RESISTENCIA A COMPRESIÓN psi	RESISTENCIA PROMEDIO psi	MASA CILINDRO lbs.	DIAMETRO pl.	MÓDULO DE ELASTICIDAD PROMEDIO*10 ⁶ psi
1	3000	3180	3308	29.05	5.985	3.00
		3436				
	4000	4311	4440	29.2	5.995	3.31
		4568				
	5000	6020	6060	29.3	5.98	3.49
		6100				
2	3000	3790	3788	29.05	6.02	3.01
		3785				
	4000	4279	4430	29.1	5.99	3.45
		4581				
	5000	6360	6270	29.2	5.98	3.72
		6179				
3	3000	4514	4467	28.95	5.99	3.01
		4419				
	4000	5084	5222	29.1	5.99	3.32
		5359				
	5000	6475	6446	29.1	5.98	3.59
		6416				
4	3000	4023	3799	28.95	5.99	2.90
		3575				
	4000	5023	5068	29	5.99	3.29
		5112				
	5000	6167	6051	28.95	5.98	3.54
		5935				
5	3000	3805	3870	28.85	5.99	3.17
		3934				
	4000	4736	4627	29.1	5.98	3.36
		4517				
	5000	5902	5947	29	5.99	3.95
		5992				
6	3000	3694	3746	28.95	5.99	3.37
		3797				
	4000	4860	4771	29.1	5.99	3.45
		4681				
	5000	6206	6069	28.85	5.99	3.59
		5931				
7	3000	1857	1808	27.35	5.99	1.45
		1759				
	4000	2122	1857	27.5	5.99	1.59
		1591				
	5000	3740	3842	27.75	6.01	2.07
		3944				

5.3 Curva esfuerzo-deformación del concreto

Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación combinación 1

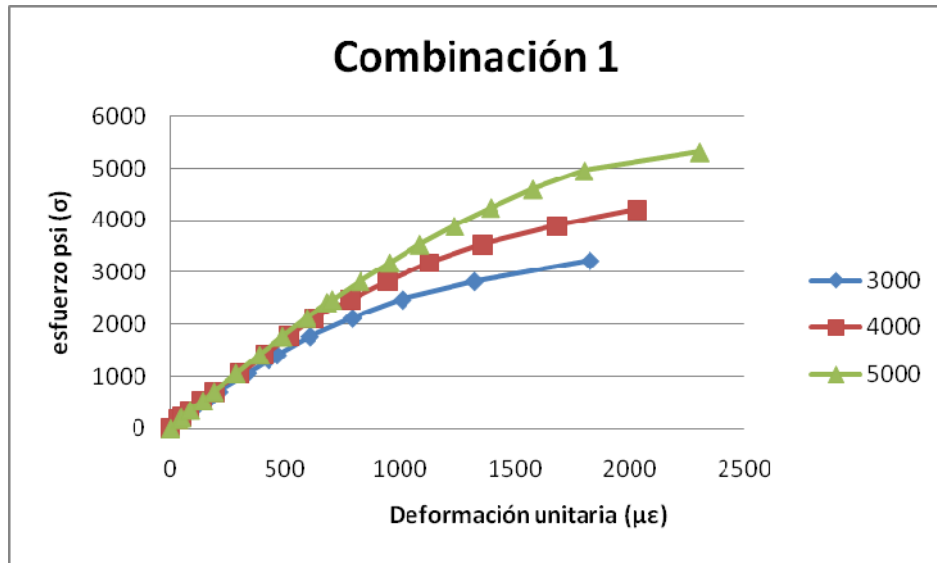


Figura 4. Curvas esfuerzo-deformación combinación 2

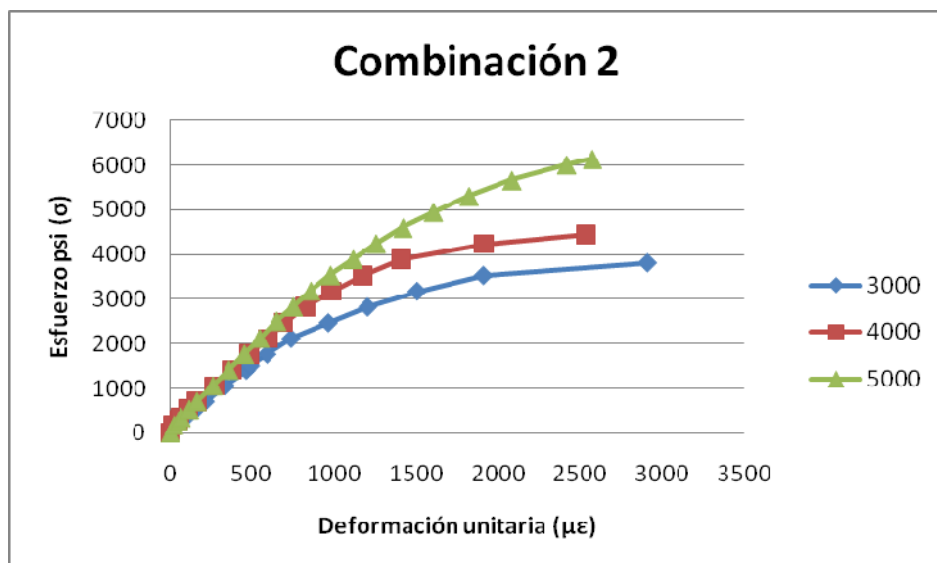


Figura 5. Curvas esfuerzo-deformación combinación 3

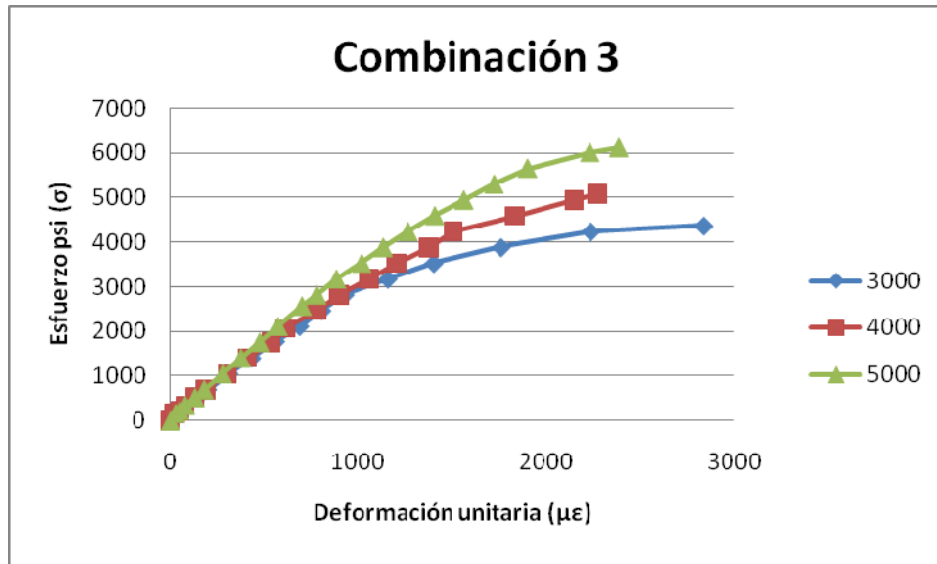


Figura 6. Curvas esfuerzo-deformación combinación 4

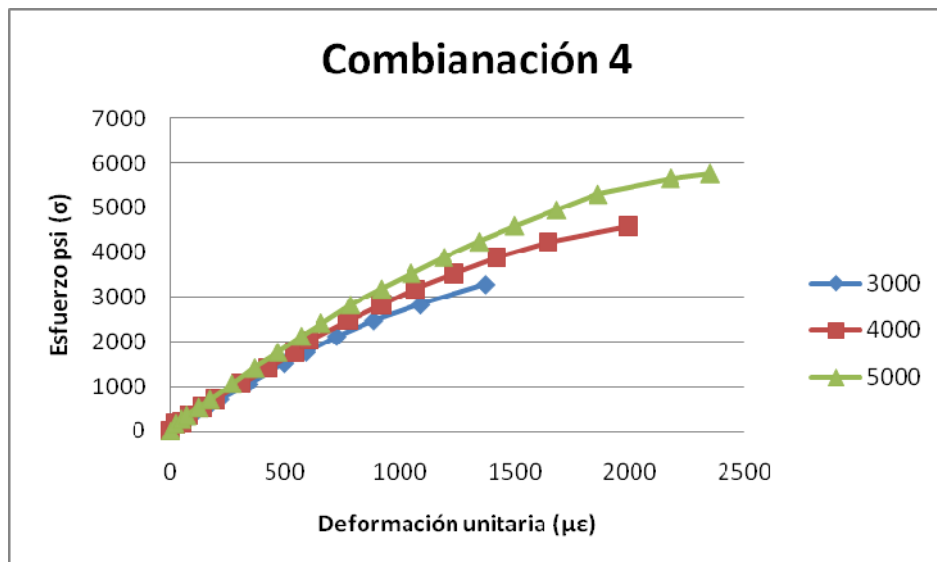


Figura 7. Curva esfuerzo-deformación combinación 5

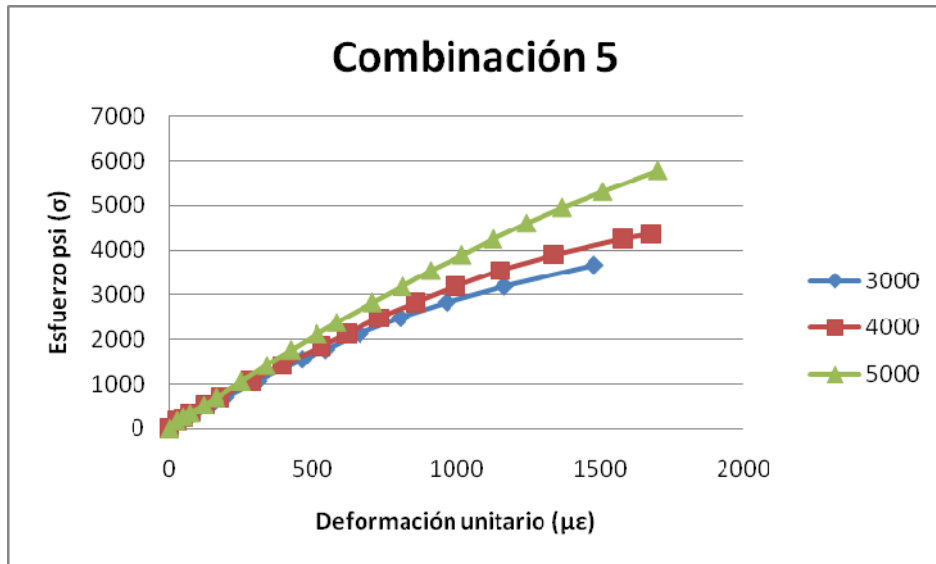


Figura 8. Curva esfuerzo-deformación combinación 6

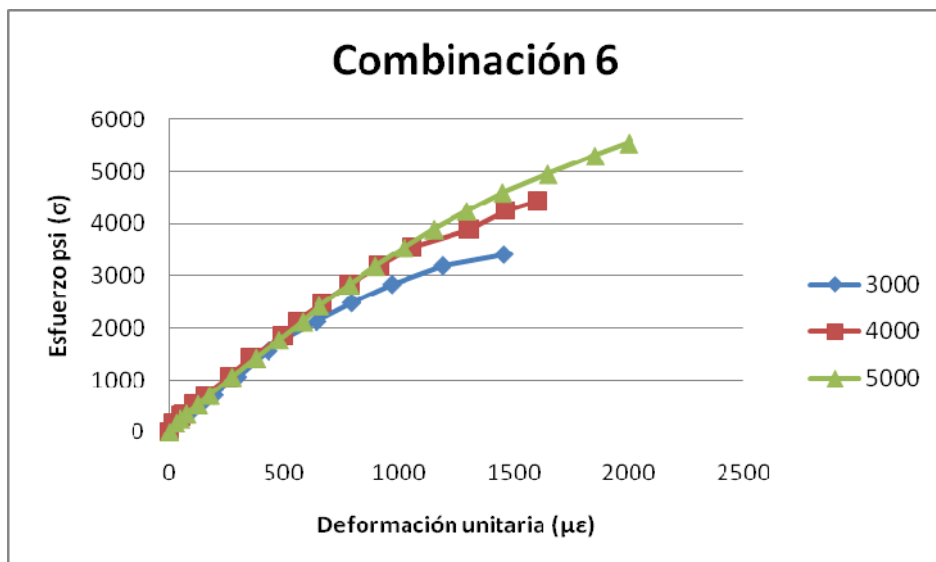
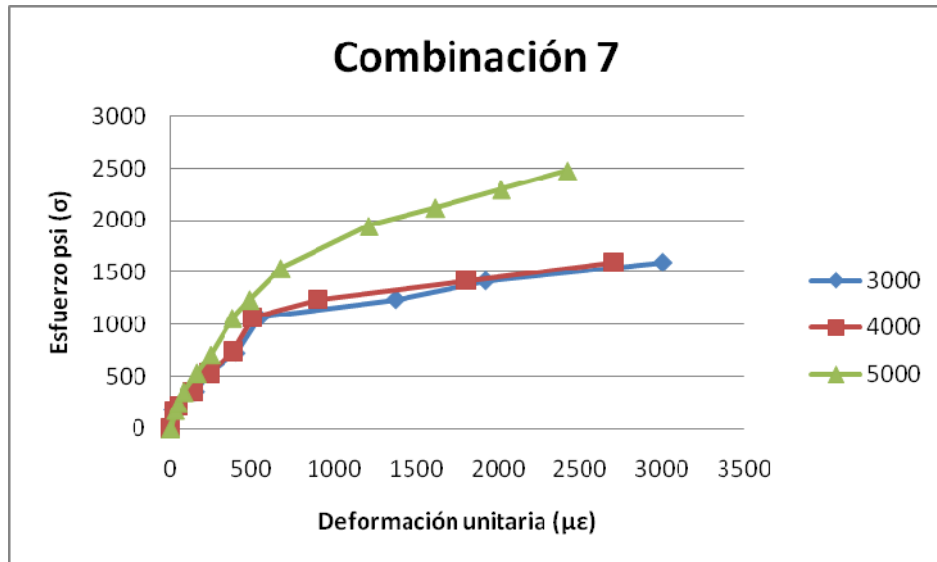


Figura 9. Curvas esfuerzo-deformación combinación 7



6. DISCUSIÓN EN CUANTO A LAS CURVAS ESFUERZO- DEFORMACIÓN OBTENIDAS

Las curvas esfuerzo-deformación unitaria obtenidas concuerdan con lo expuesto en investigaciones anteriores. A mayores resistencias se tiene una línea más inclinada en referencia al eje de deformación unitaria que obedece a un rango elástico más amplio.

Cuando menos inclinada es la parte descendiente de la curva esfuerzo-deformación en referencia siempre del eje de deformación unitaria, más dúctil es el comportamiento. En nuestro caso no se pudo evaluar la forma de la curvatura pasado el esfuerzo máximo, dada la imposibilidad de hacerlo con el método de ensayo ASTM C469 usado u otros similares. No obstante en general, se sabe que para resistencias menores de 28 Mpa (4000 psi), las curvas esfuerzo-deformación después de la carga máxima, tiene un amplio margen de deformación inelástica (plástica). Arriba de 42 Mpa (6000 psi) ya se tiene menos deformación inelástica, y comparativamente hay un poco menos ductilidad, sin embargo para esfuerzos mayores la curva esfuerzo-deformación es menos inclinada (mayor módulo de elasticidad) y tiene mayor módulo de resiliencia (mayor capacidad de absorción de energía en la zona elástica).

Además, pueden hacerse los comentarios siguientes:

Es notorio que para deformaciones unitarias del orden de 1000 millonésimas ($\mu\epsilon$) hay muy poca variación en la pendiente de las curvas esfuerzo deformación unitaria, de las combinaciones 1 a 6 de las curvas esfuerzo-deformación, de allí que los módulos de elasticidad, calculados tengan relativamente poca variación en las mezclas analizadas, no importando tanto su clase de resistencia, lo que resalta la influencia del tipo de agregados. Otra cosa que se observa es la mayor tendencia a deformación unitaria en las combinaciones (1,2,3 y 4) con respecto a (5 y 6), lo que también denota la influencia del tipo de agregado. En las mejores combinaciones 5 y 6, la deformación unitaria a la rotura está entre 1500 y 2000 $\mu\epsilon$. Para mezclas 1 y 4 llega entre 2000 y 2500 $\mu\epsilon$ y para mezclas de 2 y 3 llega entre 2500 y 3000 $\mu\epsilon$.

Para la combinación 7, las curvas esfuerzo-deformación son de menor pendiente y de esfuerzos más bajos que los de las combinaciones de 1 a 6.

7. RELACIÓN ENTRE TIPOS DE AGREGADOS USADOS, RESISTENCIAS A COMPRESIÓN Y MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS.

Ciertamente el módulo de elasticidad del concreto aumenta con el aumento de resistencia, pero en realidad no se sabe en que proporción lo hace, ya que este se ve afectado por el módulo de elasticidad del agregado y la pasta de cemento hidratado, además de la zona de interfase.

En materiales homogéneos existe una relación directa entre la densidad y el módulo de elasticidad, pero en materiales heterogéneos como el concreto, el volumen de los agregados, el módulo de elasticidad de los materiales constituyentes y las características de la zona de interface, determinan el comportamiento elástico del mismo.

En comentario anterior sobre las curvas esfuerzo-deformación unitaria, se destaca la influencia del tipo de agregado usado (por su composición).

En las tablas XIII y XIV siguientes se hace un resumen de las características de los agregados y de las mezclas de concreto utilizadas 1 a 7.

Tabla XIII. Análisis de agregados

ANÁLISIS DE AGREGADOS						
No.	Agregados Usados	ABS	Densidad Relativa	Masa Unitaria suelta kg/m ³	% tamiz 200	MF
1	3/4 PPO	0.83	2.68	1446	1.68	6.95
	3/8 PPO	1.16	2.66	1449	2.3	5.84
	A SUR	3.49	2.6	1405	11.86	2.73
2	3/4 PPO	0.83	2.68	1440	1.68	6.95
	3/8 PPO	1.16	2.66	1449	2.3	5.84
	0- 1/4 PPO	1.92	2.66	1378	11.06	2.63
3	3/4 PPO	0.83	2.68	1440	1.68	6.95
	3/8 LR	1.6	2.72	1500	3.23	5.62
	A SUR	3.3	2.6	1405	11.86	2.73
4	3/4" PPO	0.83	2.68	1446	1.68	6.95
	3/8" LR	1.6	2.72	1500	3.23	5.62
	A NORTE	2.49	2.58	1219	5.04	2.87
5	1" LP	0.67	2.68	1459	3.11	6.76
	3/8" LP	0.8	2.66	1398	1.3	5.88
	A LP	1.35	2.65	1312	5.26	3.01
6	3/4" PPO	0.83	2.68	1446	1.68	6.95
	3/8" PPO	1.16	2.66	1449	2.3	5.84
	LAVADA	1.1	2.67	1198	2.76	2.72
7	arena	4.96	2.46	1098	2.21	2.73
	grava	2.41	2.63	1480	0.26	6.72

Tabla XIV. Características de los concretos frescos y endurecidos de las combinaciones de agregados usadas

No.	CONCRETO FRESCO				CONCRETO ENDURECIDO	
	f'c Teórico (psi)	Asentamiento pulg (cm)	Masa unitaria Kg/m ³	% Aire	f'c Real (psi)	E *10 ⁶ (psi)
1	3000	5 (13)	2341	1	3308	3
	4000	6 ¼ (16)	2361	1.1	4440	3.31
	5000	6 ½ (17)	2354	1.4	6060	3.49
2	3000	4 ½ (11)	2361	1.4	3788	3.01
	4000	3 ½ (9)	2361	1.3	4430	3.45
	5000	4 (10)	2354	1.8	6270	3.72
3	3000	5 (13)	2365	1	4467	3.01
	4000	4 ½ (11)	2361	1.1	5222	3.32
	5000	4 ¾ (11)	2359	1	6446	3.59
4	3000	5 ½ (14)	2347	2	3799	2.9
	4000	6 (15)	2365	2.2	5068	3.29
	5000	5 (13)	2361	2.5	6051	3.54
5	3000	6 ¾ (17)	2333	3.3	3870	3.17
	4000	7 (18)	2326	3	4626	3.36
	5000	7 ¼ (18.5)	2333	4	5942	3.95
6	3000	4 ½ (11)	2361	1.9	3746	3.37
	4000	6 (15)	2354	2.2	4771	3.45
	5000	5 ¾ (13)	2347	2.1	6069	3.59
7	3000	6 (15)	2230	3.5	3842	2.07
	4000	6 ¾ (17)	2221	3.8	1857	1.54
	5000	6 ½ (17)	2235	3.3	1813	1.45

En la tabla XV se detallan los tipos de agregados usados en cada combinación de mezclas de concreto de Mezcladora S.A:

Tabla XV. Tipos de mezclas de concreto de Mezcladora S.A

COMBINACIÓN	1	2	3	4	5	6	Total combinaciones que utilizan cada agregado
AGREGADO							
0- 1/4" PPO	X						1
3/4" PPO	X	X	X	X		X	5
3/8" PPO	X	X				X	3
LA PEDRERA					X		1
1" LA PEDRERA					X		1
3/8 LA PEDRERA					X		1
0-1/4 SUR		X	X				2
ARENA NORTE				X			1
3/8 LA ROCA			X	X			2
0-1/4" PPO LAVADA						X	1

De las tablas XIV y XV se deduce que las combinaciones 5 y 6, cuentan con los mejores agregados, por lo que se propone realizar un análisis formando dos grupos:

- Grupo 1: Comparación entre combinaciones 5 y 6.
- Grupo 2: Todas las combinaciones restantes.

GRUPO 1

Tabla XVI. Comparación entre combinaciones 5 y 6

N0.	f' c (psi) teórico	f' c Real	Módulo de elasticidad (psi)*10 ⁶	Discusión
5	3000	3870	3.17	Ambas combinaciones presentan resistencias parecidas. El módulo de elasticidad de la combinación 6 es mayor en un 6.3%.
6		3756	3.37	
5	4000	4626	3.36	Ambas combinaciones presentan resistencias parecidas. El módulo de elasticidad de la combinación 6 es mayor en 2.7%
6		4771	3.45	
5	5000	5947	3.95	Ambas combinaciones presentan resistencias parecidas. El módulo de elasticidad de la combinación 5 es mayor en 10%.
6		6069	3.59	

GRUPO 2

Tabla XVII. Comparación entre combinaciones 1, 2, 3 y 4

Nº.	f'c (psi) teórico	f'c Real	Módulo de elasticidad (psi)*10 ⁶	discusión
1	3000	3308	3	Las resistencias y el módulo de elasticidad de las combinaciones 2-3, están ligeramente más altas que las combinaciones 1 y 4.
2		3788	3.01	
3		4467	3.01	
4		3799	2.9	
1	4000	4440	3.31	Las resistencias de 2 y 3 son mayores en cerca de 13% de las de 1 y 4, en módulo de elasticidad el valor de la combinación 2 está ligeramente por arriba de las otras combinaciones.
2		5222	3.45	
3		5068	3.32	
4		4627	3.29	
1	5000	6060	3.49	Las resistencias de 2 y 3 son mayores en 4% de las de 1 y 4. El módulo de elasticidad de 2 y 3 están ligeramente más altos que los de 1 y 4.
2		6270	3.72	
3		6446	3.59	
4		6051	3.54	

Análisis grupo 1

Las diferencias en resistencia real a compresión son mínimas, y en los módulos de elasticidad son muy bajas.

Análisis grupo 2

Se perfilan dos subgrupos afines:

El subgrupo 1 y 4 y el subgrupo 2 y 3, en general las resistencias 2 y 3 son un poco mayores que las de 1 y 4 para las 3 clases de resistencias.

En cuanto a los módulos de elasticidad, son ligeramente superiores, los del subgrupo 2 y 3 a los del subgrupo 1 y 4 para concretos de 3000 psi y de 5000 psi.

En esta forma, las resistencias y módulos de elasticidad de 2 y 3 son ligeramente superiores a los de 1 y 4.

8. COMPARACIÓN ENTRE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD OBTENIDOS Y LOS CALCULADOS POR FÓRMULAS EN PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO ESTRUCTURAL

8.1 Desarrollo de fórmulas empíricas con base a la resistencia a la compresión y la densidad del concreto.

Aunque se reconoce que el módulo de elasticidad estático determinado de acuerdo con la norma ASTM C469 es el más representativo y eficaz para un concreto determinado, frecuentemente los diseñadores no especifican el Módulo de elasticidad, ya que descansan en aproximaciones suficientemente eficaces, derivadas de otras propiedades (típicamente la densidad y la resistencia a compresión) para estimar el valor de E a utilizar.

Esto ocurre porque el ensayo estático es un poco complicado y delicado de realizar; requiere de mucho tiempo y atención, y de equipo no encontrado fácilmente en laboratorios de concreto. De allí que muchos ingenieros han tratado de encontrar enfoques empíricos o teóricos. Entre estos destaca Stanton Walker (1919) (pág. 420 de ref. Bibl. 9) quien propuso:

$$E = K f' c^n \quad (1)$$

Donde E = Módulo de elasticidad

f' c = Esfuerzo de compresión del concreto

K y n = parámetros ensayos experimentales dependientes de las condiciones de ensayo.

Para unidades en psi y cilindros de concreto, Walker obtuvo los siguientes valores para concreto de peso normal con masa unitaria cercana a 45 lb/p³ (2300 kg/m³) ó mayor:

$$E_{tg \text{ inicial}} = 33,000 f'c^{0.63} \quad (2)$$

$$E_{tg \text{ inicial a 25\% esfuerzo compresión}} = 66,000 f'c^{0.5} \quad (3)$$

Muchos investigadores llegaron a fórmulas similares. En 1983 la ACI recomendó la fórmula:

$$E = 57,000 f'c^{0.5} \quad (4) \quad (\text{en psi})$$

Muy parecida a la (1) y a la (3)

Cuando E se pone en N/mm² y f'c en N/mm² la ecuación (4) se convierte en

$$E = 4,730 f'c^{0.5} \quad (4a) \quad \text{En ACI 318-08 la fórmula es: } E = 4700 f'c^{0.5} \quad (4b)$$

Cuando la masa unitaria de (4) y (4a) fue de 145 lb/p³ (2300 kg/m³) o menos los valores obtenidos de (4) y (4a) fueron muy altos. Esto dio lugar a que se hicieran evaluaciones en relación a la porosidad y masa unitaria y al efecto conjunto esfuerzo y masa unitaria. Bolomey (1939) y luego Schaffer (1954) (pág. 421 ref. Bibl. 9) fueron los primeros en expresar el módulo de elasticidad del concreto en términos del esfuerzo a la compresión y a la densidad, d (masa unitaria seca al aire).

Sin embargo no fue sino hasta que Adrian Pauw (1960) (ref. bibl. 10), introdujo este concepto y tuvo ya una aceptación general. La fórmula empírica de Pauw ya se incluyó en el ACI 318 de 1983:

$$E=33d^{1.5}f_c^{0.5} \quad (5) \quad f_c \text{ en psi y } d \text{ en lb/p}^3 \quad (5)$$

Para unidades (SI) esta fórmula se vuelve:

$$E= 43d^{1.5} f_c^{0.5} * 10^{-6} \quad (5^a) \quad E \text{ en KN/mm}^2 \text{ y } f_c \text{ en N/mm}^2 \text{ d en kg/m}^3$$

$$E= 0.043 d^{1.5} f_c^{0.5} \quad E \text{ en N/mm}^2 \text{ y } f_c \text{ en N/mm}^2, \text{ de en kg/m}^3$$

La fórmula (5) para densidades entre 1440 y 2560 kg/m³ (ACI 318 08); y resistencias de 2000 a 6000 psi:

$$E= 57000 f_c^{0.5} \quad E \text{ y } f_c \text{ en psi} \quad (5b)$$

$$E= 4700 f_c^{0.5} \quad E \text{ y } f_c \text{ en N/mm}^2 \quad (5c)$$

Estas ecuaciones demostraron ser mucho más representativas para un amplio rango de datos experimentales.

En forma similar en Inglaterra, Neville (1981) y en Europa CEB (Comité Europeo del concreto) desarrollaron fórmulas aparecidas.

La fórmula del CEB (Eurocódigo 2) para densidades del concreto entre 2000 y 2800 kg/m³ es:

$$E= 9.5 (f_c + 8)^{0.33} * 10^{-6} \quad (6) \quad E \text{ en KN/mm}^2 \text{ y } f_c \text{ en N/mm}^2$$

Cuando la densidad del concreto está dentro de 90 y 150 lb/p³ (1400 y 2300 kg/m³) se tiene la fórmula:

$$E=1.6 d^2 (f'c+8)^{0.33} * 10^{-6} \text{ (6ª) } E \text{ en KN/mm}^2, f'c \text{ en N/mm}^2 d \text{ en Km/m}^3$$

Por supuesto se han hecho más evaluaciones tomando en cuenta la porosidad, densidad, la velocidad de ondas sónicas a través del material, su frecuencia fundamental de vibración, y se han desarrollado ingeniosos modelos matemáticos, que ya quedan fuera del presente trabajo de tesis.

Las fórmulas más usadas actualmente son las del ACI 318-08 (Ref. Bibl. 3) y las del CEB (Eurocódigo 2) (p.57 Ref. bibl. 11).

8.2 Comparación entre los módulos de elasticidad obtenidos por ASTM C469 y los calculados por fórmulas ACI 318 -08 y Eurocódigos.

Tabla XVIII. Comparación módulo ASTM C469 vrs (ACI 318-08 y CEB) (Eurocódigo 2).

No.	Resistencia a compresión (psi)	E (psi)*10 ⁶ ASTM C-469	E (psi)*10 ⁶ ACI 318	% de diferencia ACI respecto ASTM C469	E (psi)*10 ⁶ CEB Eurocódigo 2	% de diferencia CEB Eurocódigo 2 respecto ASTM C469
1	3308	3	3.2784	9%	4.32	44%
	4439.5	3.31	3.7979	15%	4.66	41%
	6060	3.49	4.4372	27%	5.07	45%
2	3787.5	3.01	3.5079	17%	4.47	48%
	4430	3.45	3.7938	10%	4.65	35%
	6269.5	3.72	4.5133	21%	5.12	38%
3	4466.5	3.01	3.8094	27%	4.66	55%
	5221.5	3.32	4.1188	24%	4.86	47%
	6445.5	3.59	4.5762	27%	5.16	44%
4	3799	2.9	3.5133	21%	4.47	54%
	5067.5	3.29	4.0576	23%	4.82	47%
	6051	3.54	4.4339	25%	5.07	43%
5	3869.5	3.17	3.5457	12%	4.49	42%
	4626.5	3.36	3.8770	15%	4.71	40%
	5947	3.95	4.3957	11%	5.04	28%
6	3745.5	3.37	3.4884	4%	4.46	32%
	4770.5	3.45	3.9369	14%	4.75	38%
	6068.5	3.59	4.4403	24%	5.07	41%
7	3838	2.07	3.5312	71%	4.48	117%
	1900	1.54	2.4846	61%	3.81	147%
	1813	1.45	2.4270	67%	3.77	160%

CEB Comité Europeo del concreto. Eurocódigo 2.

ACI Instituto Americano del Concreto

CONCLUSIONES

1. En general se puede ver que las mezclas de concreto utilizadas por las plantas de Mezcladora S.A, tienen un comportamiento bastante equivalente en cuanto a sus clases de resistencia y sus módulos de elasticidad, a pesar de proceder de diferentes plantas. Éstos son diferentes tipos de agregados.
2. En un análisis más detallado, las combinaciones 5 y 6 son las que presentan mejores características en cuanto a resistencia y módulos de elasticidad, como ya se esperaba dada la mejor clase de agregados (basalto y caliza). Siguen en comportamiento, las combinaciones 2 y 3, tomando en cuenta el uso de arena caliza de la Roca y la buena densidad relativa de la arena PPO. En el rango menor están las combinaciones 1 y 4, pero como se dijo en 1 , sus diferencias con las anteriores son relativamente bajas.
3. En cuanto a la aplicación de las fórmulas ACI 318 y CEB (Eurocódigos), se ve que la diferencia con respecto al módulo de elasticidad con ASTM C469, es mayor para la del CEB (Eurocódigos) (28-57%), que para la ACI (4-33%). Esto se debe a dos razones: la primera que ambas fórmulas fueron desarrolladas para agregados silíceos cuarcíticos, de mayor densidad y mayor módulo de elasticidad, que los que tenemos disponibles a nivel nacional. La segunda razón de la diferencia es que al obtener resistencias altas con agregados cuyo módulo de elasticidad es bajo, aumenta la diferencia entre los valores de las fórmulas de ACI o CEB y los obtenidos por ASTM C469.

4. Para Guatemala es más recomendable la aplicación de ACI 318-08, que las de CEB (Eurocódigo 2). Aplicando las fórmulas de ACI 318 para calcular el módulo de elasticidad se obtuvieron las siguientes diferencias:
- a. Para concretos de clase 3000 psi (21 Mpa) el módulo de elasticidad, según ACI 318 -08 es de un 9% mayor para las combinaciones 1,2,5 y 6 y de un 24% para las combinaciones 3 y 4 (debido a las altas resistencias de estas a 28 días y el uso de agregados de E real menores).
 - b. Para concretos de clase 4000 psi (28 Mpa), el módulo de elasticidad, según de ACI 318 -08 es de un 13.5% mayor para combinaciones 1,2,5 y 6 y de un 33% mayor para combinaciones 3 y 4 (debido a las altas resistencias de éstas a 28 días y el uso de agregados de E real menores).
 - c. Para concretos de clase 5000 psi (35 Mpa), el módulo de elasticidad según ACI 318 -08 es de un 25% mayor para las combinaciones 1, 2,3, 4 y 6. Para la caliza los porcentajes de diferencia con el ACI fueron de 12.7% promedio).
 - d. Cuando se tienen resistencias altas con agregados que por su naturaleza tienen un menor módulo de elasticidad real, las diferencias con la fórmula se hacen mayores, como puede notarse en a, b y c anteriores.

5. En cuanto a los concretos fabricados con agregados provenientes del río Chinautla, presentan propiedades más bajas en cuanto a resistencia mecánica a compresión y módulo de elasticidad; lo cual se le atribuye a varios factores como: la alta absorción de los materiales, por la presencia de material pómez (piroclástico) y su contaminación con desagües de la ciudad, lo que hace que el agregado en sí y su adherencia con la pasta agua cemento sean más débiles que los anteriores.

6. De los muchos estudios efectuados incluyendo el del presente trabajo se ve que el módulo de elasticidad no depende únicamente de la clase de resistencia (o resistencia especificada a los 28 días) sino también de las propiedades reales de los agregados, principalmente, densidad relativa y porosidad (medida por su densidad aparente o masa unitaria).

7. Cuando no sea necesaria gran precisión, es válido estimar un valor de módulo de elasticidad con la fórmula del ACI 318 -08 preferentemente. Cuando las deformaciones son de gran importancia se deben realizar ensayos de acuerdo a ASTM C469 con un concreto fabricado con los agregados que se van a usar en la estructura.

8. Para el cálculo de deflexiones y deformaciones por cargas normales en la construcción es más conveniente usar el módulo de elasticidad estático obtenido con ASTM C469, o el de la fórmula de ACI 318 disminuido en los porcentajes señalados en la tabla siguiente:

Agregados	factor
Calizo LP	0.87
Basalto PPO	0.86
canto rodado	0.44
otras combinaciones	0.80

9. Para el análisis de esfuerzos y deformaciones, bajo cargas sísmicas o de impacto se estima más conveniente usar la fórmula del ACI 318 -08 sin factor de corrección, o valores de módulo de elasticidad dinámico obtenidos por ASTM C597 y ASTM C1383), dado que las cargas aplicadas a mayor velocidad producen módulos de elasticidad más altos, los valores obtenidos por los módulos dinámicos se aproximas mas al módulo elástico estático tangente al origen.

RECOMENDACIONES

1. Es aconsejable la realización de determinaciones de módulo de elasticidad estático ASTM C469 y de módulo de elasticidad dinámico ASTM C 597 y ASTM C1303 de todos los concretos que se utilizan en Guatemala, en especial los de las plantas de concreto premezclado.
2. Promover el estudio del comportamiento de la fluencia o flujo plástico (ASTM C512) de los concretos de clase de resistencia 5000 o mayor que son los más utilizados en concretos preesforzados.
3. Realizar un estudio de los concretos de alta resistencia y alta durabilidad (concretos de alto desempeño), incluyendo la determinación de sus módulos estáticos y dinámicos, por la relevancia que estos tipos de concretos tienen actualmente en relación con el desarrollo sostenible y la protección ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

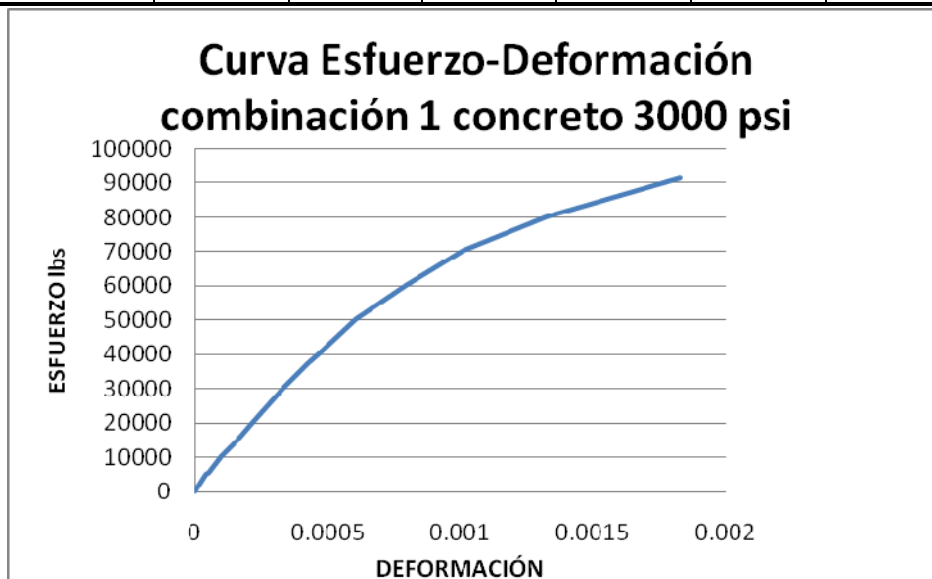
1. ACI 318-08 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y comentario (versión español y en sistema métrico). Comité ACI 318. ACI 2008.
2. Adam M. Neville, Tecnología del concreto IMCYC 1999
3. Adrian Pauw p. 679-687-Journal of the American Concrete Institute, v32, Mo. 6, Tote 57-32 – Static Modulus of Elasticity of concrete as affected by Density- Dec 1960 (procc.v.57).
4. Eurocódigo 2- proyecto de Estructuras de Hormigón (p-57 Norma UNE-ENV 1992-1-1:1993), AENOR,1998
5. Jaime Gómez Jurado Saria, Tecnología y Propiedades del concreto, ASOCRETO (Asociación Colombiana de Productores de Concreto a la fecha).
6. Kumar Metha y Paulo Monteiro, Concreto, Estructural, Propiedades y Materiales, IMCYC (1998).
7. Manual del aparato de ensayo para módulo de elasticidad,
8. Norma ASTM C-469, C-39, C-31, C-143, C-138, C-231, C-1064, C-172, FIB-CEB 90, Eurocódigo 2 1990.
9. Sándor Popovics. J. Wiley and Sons. A Quantitative Approach. Strength and Related Properties of Concrete, Inc 1998.

10. Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete marking Making Materials- STP169D-ASTM 2006.
11. Steven H. Kosmatka, Beatrix Lerlhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi. Diseño y control de mezclas de concreto. PCA (Portland Cement Asociaton) IMCYC 2004.

APÉNDICE

Tabla XIX. Ejemplo de formato utilizado para los ensayos de módulo de elasticidad.

FECHA:		GRADUACIÓN DEL APARATO: 0.0001"				PRUEBA		
DIÁMETRO MUESTRA:		f' c lbs.:				MÓDULO DE ELASTICIDAD		
ÁREA MUESTRA:		40% f' c lbs.:						
CONCRETO 3000 COMBINACIÓN 1								
carga a 50 millonésimas	Primer ciclo		segundo ciclo		tercer ciclo		promedio	
	5330		5061		5622		5338	
Carga	Deformación longitudinal	Deformación transversal	Deformación longitudinal	Deformación transversal	Deformación longitudinal	Deformación transversal	Deformación longitudinal	Deformación transversal
0							0	
5000	0.000042	0.000004	0.000040	0.000004	0.000042	0.000002	0.000041	0
5337.5	DEFORMACIÓN 50 MILLONÉSIMAS						0.000050	
10000	0.000098	0.000013	0.000098	0.000010	0.000102	0.000008	0.000099	0.000010
15000	0.000152	0.000019	0.000156	0.000021	0.000171	0.000017	0.000160	0.000019
20000	0.000208	0.000027	0.000215	0.000035	0.000221	0.000025	0.000215	0.000029
30000	0.000327	0.000050	0.000338	0.000052	0.000344	0.000044	0.000336	0.000049
37335	0.000421	0.000065	0.000423	0.000065	0.000440	0.000056	0.000428	0.000062
40000	0.000465	0.000073	0.000467	0.000071	0.000473	0.000063	0.000468	0.000069
50000					0.000608	0.000085	0.000608	0.000060
60000					0.000794	0.000113	0.000794	0.000113
70000					0.001013	0.000163	0.001013	0.000163
80000					0.001327	0.000204	0.001327	0.000204
91252					0.001831	0.000369	0.001831	0.000369



**MÓDULO DE ELASTICIDAD:
3.00+E06 psi**

RELACIÓN DE POISSON: 0.17



Método de Ensayo Estándar para determinar El Módulo de elasticidad Estático y Relación de Poisson del concreto a compresión¹

Esta norma es usada de acuerdo a la designación C 469; el número que inmediatamente le sigue a la designación indica el año original de adopción, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número en paréntesis indica el año de la última re aprobación. Una suscripción épsilon (ϵ) indica un cambio de editorial desde la última revisión o re aprobación.

1. Alcance

1.1 Este método cubre la determinación de (1) el módulo de elasticidad cuerda ó (Módulo de Young), y la relación de Poisson en cilindros de concreto y núcleos de concreto bajo esfuerzos de compresión longitudinal.

1.2 Los valores indicados en pulgadas-libras se toman como estándar.

1.3 Esta norma no pretende tratar todos los asuntos de seguridad, relacionados con su uso. Es responsabilidad del que use esta norma establecer las medidas de seguridad y salubridad apropiadas, y determinar la aplicabilidad de restricciones reglamentarias locales, antes de usarla.

2. Documentos de Referencia

2.1 Estándares ASTM:²

C 31/C 31M Práctica Estándar para la Fabricación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra.

C 39/C 39M Método de Ensayo para la Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.

C 42/C 42M Método de Ensayo para la Obtención y Ensayo de Núcleos Perforados y Vigas Aserradas de Concreto.

C 174/C 174M Método de Ensayo para la Medición del Espesor de Elementos de Concreto, usando Núcleos Perforados de Concreto.

C192/C 192M Práctica para la Fabricación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en el Laboratorio.

C617 Práctica para el Cabecéo de Especímenes Cilíndricos de Concreto.

E 4 Práctica para la Verificación de Fuerzas en las Máquinas de Ensayo.

E 6 Terminología Relativa a los Métodos de Ensayos Mecánicos.

E 83 Práctica para la Verificación y Clasificación del Sistema de Extensómetros.

E 177 Práctica para el uso de los Términos de Precisión y Sesgo en los métodos de ensayo ASTM.

2.2 Adjuntos de ASTM

Compresómetros (dos dibujos) y Extensómetros (dos dibujos)³

3. Significado y Uso

3.1 Este método proporciona una relación entre el esfuerzo y su deformación unitaria, y una relación entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal para el concreto endurecido a cualquier edad y condiciones de curado establecidas.

3.2 El módulo de elasticidad y la relación de Poisson, aplicables dentro de los rangos de esfuerzos de trabajo acostumbrados (0 a 40% de la carga última del concreto), son usados para el dimensionamiento de elementos reforzados o no reforzados, para establecer la cantidad de refuerzo y para calcular los esfuerzos para las deformaciones unitarias observadas.

3.3 Los valores de módulo de elasticidad obtenidos usualmente serán menores a los módulos obtenidos bajo una aplicación rápida de carga (por ejemplo a velocidades dinámicas o sísmicas) y serán más grandes que los valores bajo aplicación lenta de carga o una carga de mayor duración.

4. Aparatos

4.1 *Máquina de ensayo*- Use una máquina de ensayo capaz de aplicar una carga a la velocidad y a la magnitud prescritas en 6.4. La máquina de ensayo debe adecuarse a los requisitos de las Prácticas E 4 (sección de máquinas de ensayo tipo CRT de velocidad constante). El cabezal esférico y los bloques de apoyo deben cumplir con la sección de Aparatos del método de ensayo C39 /C 39M.

4.2 *Compresómetro*- Para determinar el módulo de elasticidad use un dispositivo sensor adherido o no adherido que mida con una aproximación de 5 millonésimas, la deformación promedio en dos líneas de base diametralmente opuestas, cada una paralela al eje axial y centrada cerca de la mitad de la altura del espécimen.

¹Este método de ensayo está bajo la jurisdicción de ASTM comité C09 Concretos y agregados para concreto. Es responsabilidad directa del subcomité C09.61 métodos para ensayo del concreto fresco.

²Edición vigente aprobada el 10 de Agosto de 2002 y publicada en octubre de 2002. Originalmente aprobada en 1961. La última edición previa en 1994 – 94.

³ pueden obtenerse con ASTM Internacional. Ordene Adjunto No. ADJ0469.

La longitud efectiva de cada línea base no debe ser menor que tres veces el tamaño máximo del agregado en el concreto, ni mayor que dos tercios de la altura del espécimen. Use ya sea deformómetros con puntos de medida que pueden estar embutidos o cementados (adheridos) al espécimen y que puedan leer de manera independiente la deformación en las dos líneas de base; o use un compresómetro (como el que se observa en la Fig. 1) constituido por dos anillos, uno de los cuales (ver B Fig. 1) está fijado rigidamente al espécimen y el otro (ver C Fig. 1) está fijado en dos puntos diametralmente opuestos de manera que tenga libertad de rotación. En un punto de la circunferencia del anillo rotativo, a la mitad de los dos puntos de soporte, use una barra pivote (ver A, Fig. 1) para mantener una distancia constante entre los dos anillos. En el punto opuesto de la circunferencia del anillo rotativo, el cambio de distancia entre los dos anillos (o sea la lectura de la deformación) es igual a la suma del desplazamiento debido a la deformación del espécimen y del desplazamiento de la rotación del anillo con respecto a la barra pivote (ver Fig.2).

4.2.1 La deformación se mide directamente por un indicador de cuadrante o por medio de un sistema multiplicador de niveles, por un deformómetro (galga) de alambre, o por un transformador lineal de diferencia variable. Si las distancias de la barra pivote y de la línea de medida del deformómetro al plano vertical que pasa por los dos puntos de soporte del anillo rotativo, son iguales, la deformación es igual a la mitad de la lectura del deformómetro.

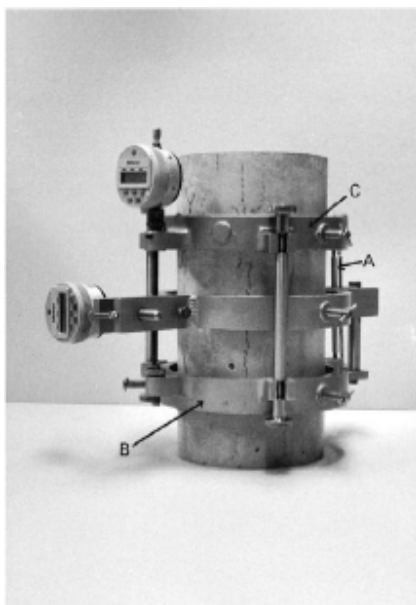
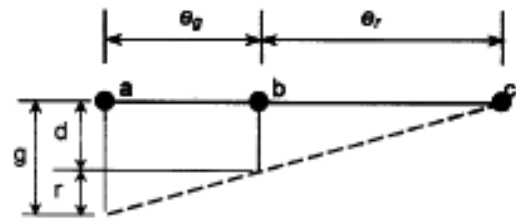


FIG. 1 Compresómetro



- d= desplazamiento debido a la deformación del espécimen
- r= desplazamiento debido a la rotación del anillo alrededor de la barra pivote
- a= localización del deformómetro
- b= punto de soporte del anillo rotativo
- c= localización de la barra pivote
- g= lectura del deformómetro

FIG. 2 Diagrama de desplazamientos

Si las distancias no son iguales, calcule la deformación de la siguiente manera:

$$d = g e_r / (e_r + e_g)$$

donde:

- d = deformación total del espécimen a lo largo de la longitud de base efectiva, $\mu\text{in.}$ (μm),
- g = lectura del deformómetro, $\mu\text{in.}$ (μm),
- e_r = distancia perpendicular, medida en pulgadas (milímetros) con una aproximación de 0.01". (0.254mm) desde la barra pivote al plano vertical que pasa a través de los dos puntos de soporte del anillo rotativo.
- e_g = distancia perpendicular medida en pulgadas (milímetros) con una aproximación de 0.01". (0.254mm) desde el deformómetro al plano vertical que pasa por los dos puntos de soporte del anillo rotativo.

Los procedimientos para calibración de los dispositivos de medición de la deformación de dan en la Práctica E 83.

Nota 1- Aunque los deformómetros (galgas) adheridos son satisfactorios en los especímenes secos, podría ser difícil si no imposible, montarlos continuamente sobre especímenes curados en húmedo antes del ensayo.

4.3 *Extensómetro*- Si se desea la relación de Poisson, la deformación transversal se debe determinar (1) mediante un extensómetro no adherido capaz de medir con una aproximación de $25\mu\text{in.}$ ($0.635\mu\text{m}$) el cambio de diámetro en la mitad de la altura del espécimen, o (2) mediante dos deformómetros(galgas) adheridos. (Nota 1), montados circunferencialmente en puntos diametralmente opuestos a la mitad de la altura del espécimen y capaces de medir la deformación circunferencial con una aproximación de 5 millonésimas. Una combinación de compresómetro y extensómetro(Fig. 3) es un dispositivo no adherido conveniente.. Este aparato debe contener un tercer anillo (Consistente de dos segmentos iguales) localizados a la mitad

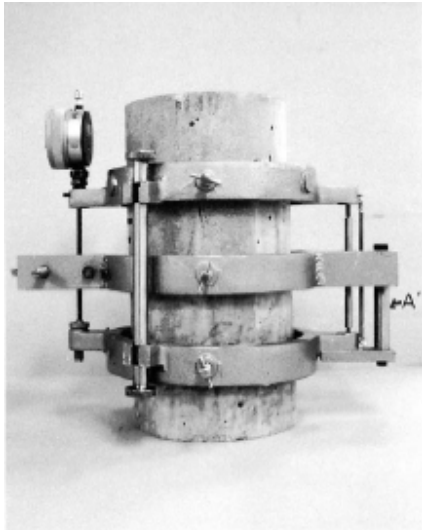


FIG 3. Combinación Compresómetro-Extensómetro

entre los dos anillos del compresómetro y fijados al espécimen en dos puntos diametralmente opuestos. A la mitad entre estos dos puntos use una barra pivote corta (A', ver Fig. 3), adyacente a la barra de pivote longitudinal, para mantener una distancia constante entre el anillo inferior y el intermedio. Articule el anillo intermedio al punto pivote para permitir la rotación de los dos segmentos en el eje horizontal. En el punto opuesto de la circunferencia, conectar los dos segmentos con un indicador de cuadrante u otro deformómetro, capaz de medir la deformación transversal con una aproximación de 50µin. (1.27µm). Si las distancias de la barra pivote y del deformómetro al plano vertical que pasa por los puntos de soporte del anillo intermedio son iguales, la deformación transversal en el diámetro del espécimen es igual a la mitad de la lectura del deformómetro. Si estas distancias no son iguales, calcule la deformación transversal del diámetro del espécimen de acuerdo a la ecuación 2.

$$d' = g' e'_h / (e'_h + e'_g) \quad (2)$$

donde:

d' = deformación transversal del diámetro del espécimen, µin. (µm),

g' = lectura del deformómetro transversal, µin. (µm),

e'_h = distancia perpendicular, medida en (milímetros) con una aproximación de 0.01". (0.254mm) desde la barra pivote al plano vertical que pasa a través de los puntos de soporte del anillo intermedio.

e'_g = distancia perpendicular, medida en (milímetros) desde el deformómetro transversal, al plano vertical que pasa a través de los puntos de soporte del anillo intermedio.

4.4 Balanza o báscula, con una precisión de 0.1lb (0.045kg), Puede ser usada si fuera necesario.

5. Especímenes de Ensayo

5.1 *Especímenes Cilíndricos Moldeados.* Moldeé los cilindros de acuerdo con los requerimientos para especímenes ensayados a compresión en la Práctica C 192/C 192M, o en la Práctica C 31/C 31M. Los especímenes deben someterse a las condiciones de curado especificadas y ser ensayados a la edad para la cual se desea la información del módulo de elasticidad. Los especímenes se deben ensayar una hora después de ser removidos del cuarto de almacenamiento o de curado. Los especímenes removidos del cuarto de curado para su ensayo se deben de mantener húmedos por medio de una lona mojada durante el intervalo de tiempo entre su remoción y la realización del ensayo.

5.2 *Núcleos extraídos del concreto-* los núcleos deben cumplir con los requerimientos de extracción, y condiciones de humedad aplicables a especímenes a compresión de acuerdo al método de ensayo C 42/C 42M, con la excepción de que solo se deben de usar núcleos extraídos con broca de punta de diamante cuya relación altura-diámetro no debe de ser mayor de 1.50. Los requerimientos de almacenamiento y condiciones ambientales inmediatamente anteriores al ensayo, deben de ser los mismos de los especímenes cilíndricos moldeados.

5.3 Los extremos de los especímenes de ensayo deben de ser perpendiculares a su eje (+/- 0.5°) y planos (dentro de 0.0002"). Si el espécimen no cumple con los requerimientos de planicidad, se debe de efectuar su nivelación con un cabeceado de acuerdo con la Práctica C617, o por medio de pulido o esmerilado. Se permite reparar los vacíos de agregados que ocurren en los extremos de los especímenes, procurando que el área total de los vacíos no exceda el 10% del área del espécimen y las reparaciones se hagan antes de completar el cabeceado o emparejado (Nota 2). La nivelación se debe de considerar dentro de la tolerancia de 0.002". (0.05mm) cuando una lámina calibradora no pase entre las superficies de los especímenes, y una regla metálica recta sostenida contra la superficie.

Nota 2 – Las reparaciones de los vacíos de los agregados sueltos pueden hacerse pegándolos en su lugar con epóxicos o por llenado de los vacíos con material para cabecear, y permitiendo un tiempo adecuado para el endurecimiento.

5.4 El diámetro del espécimen de ensayo se debe medir con un calibrador con aproximación de 0.01" (0.25 mm) promediando dos diámetros medidos perpendicularmente entre sí, cerca del centro de la longitud del espécimen. Use este diámetro promedio para calcular el área de la sección del espécimen. Mida y registre la longitud del espécimen, incluyendo el cabeceado, con una aproximación de 0.1". (2.54 mm). Mida la longitud del núcleo extraído, de acuerdo al método de ensayo C 174/C 174M; y registre su longitud, incluyendo el cabeceado, con una aproximación de 0.1". (2.54 mm).

6. Procedimiento

6.1 Mantenga la temperatura ambiente, y humedad lo más constante que sea posible, durante el ensayo. Registre cualquier fluctuación inusual de temperatura y humedad en el reporte.

6.2 Use la pareja de los especímenes de ensayo, para determinar la resistencia a compresión de acuerdo con el método de ensayo C 39 /C 39M, previo a realizar el ensayo del módulo de elasticidad.

6.3 Coloque el espécimen, con el equipo de medición de deformación instalado, en la platina o bloque de apoyo inferior de la máquina de ensayo. Cuidadosamente alinee el eje del espécimen con el centro de la rotula del cabezal superior de apoyo. A medida que el bloque superior de apoyo se lleva lentamente a asentarse sobre el espécimen, rote la parte móvil del bloque suavemente hasta que se obtenga un apoyo uniforme.

6.4 Cargue el espécimen por lo menos dos veces. No registre datos durante la primera carga. Realice los cálculos en base a los promedios de los siguientes ciclos de carga (Nota 3).

Nota 3- Se recomienda como mínimo dos ciclos de carga, para que la repetitividad de la carga se pueda notar.

Durante la primera carga que es preliminar para el ajuste de los deformómetros (Nota 4), observe el funcionamiento de los mismos y corrija cualquier comportamiento inusual antes de la segunda carga. Obtenga cada conjunto de lecturas de la siguiente manera: aplique la carga continuamente y sin impactos. Ajuste la máquina de ensayo del tipo de tornillos de manera que el cabezal móvil viaje a una velocidad aproximada de 0.05” (1.25mm)/min cuando la máquina está corriendo libre. En máquinas que operan hidráulicamente, aplique la carga a una velocidad constante dentro de un rango de 35+/- 5 psi (241 +/- 34 Kpa)/s. Registre sin interrupción del ensayo, la carga aplicada y la deformación unitaria al punto (1) cuando la deformación unitaria longitudinal es de 50 millonésimas y al punto (2) cuando la carga aplicada es igual al 40% de la carga última (ver 6.5). La deformación unitaria longitudinal es igual a la deformación longitudinal total, dividida por la longitud de base efectiva del deformómetro. Si se desea determinar la relación de Poisson, registre la deformación unitaria transversal en los mismos puntos. Si se va a determinar la curva esfuerzo-deformación unitaria tome dos o más lecturas en puntos intermedios, sin interrupción de la carga; o utilice un instrumento que haga registros continuos. Inmediatamente después que se alcance la carga máxima prevista, excepto en el ciclo final de carga, reduzca la carga a cero, a la misma velocidad como fue aplicada. Si el observador falla en realizar una lectura, complete el ciclo de carga y repítalo. Registre el ciclo de carga extra en el informe.

Nota 4- Cuando se utilice un deformómetro para medir la deformación longitudinal, es conveniente ajustarlo antes de cada ciclo de carga de manera que el indicador pase por el punto cero cuando la deformación unitaria longitudinal es de 50 millonésimas.

6.5 Se permite obtener el módulo de elasticidad y la resistencia en el mismo ciclo de carga, cuando los deformómetros sean desechables, removibles, o adecuadamente protegidos para que se pueda cumplir con los requisitos para carga continua dados en el método de ensayo C 39/C 39M. En este caso registre varias lecturas y determine por interpolación el valor de la deformación unitaria al 40% de la carga última.

6.6 Si se toman lecturas intermedias, grafique los resultados de cada uno de los tres ensayos con la deformación unitaria longitudinal en la abscisa y el esfuerzo de compresión en la ordenada. Calcule el esfuerzo de compresión dividiendo el valor de la carga en la máquina de ensayo, por el área transversal del espécimen, determinada de acuerdo con 5.4.

7. Cálculos

7.1 Calcule el módulo de elasticidad con una aproximación de 50,000 psi (344.74 Mpa) de la siguiente manera:

$$E = (S_2 \cdot S_1) / (\epsilon_2 - 0.000050)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad cuerda, psi,

S₂ = esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última

S₁ = esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ϵ_1 , de 50 millonésimas, y

ϵ_2 = deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S₂

7.2 Calcule la relación de Poisson con una aproximación de 0.01 de la siguiente manera:

$$\mu = (\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}) / (\epsilon_2 - 0.000050)$$

donde:

μ = relación de Poisson

ϵ_{t2} = deformación unitaria transversal en la altura media del espécimen producida por S₂

ϵ_{t1} = deformación unitaria transversal en la altura media del espécimen producida por el esfuerzo S₁

8. Reporte

8.1 El informe debe de incluir lo siguiente:

8.1.1 Número de identificación del espécimen

8.1.2 Dimensiones del espécimen, en pulg. (o milímetros).

8.1.3 Historial del curado y medio ambiente del espécimen.

8.1.4 Edad del espécimen.

8.1.5 Resistencia del concreto si se determinó.

8.1.6 Masa unitaria del concreto si se determinó.

8.1.7 Curva esfuerzo-deformación unitaria, si se dibujó.

8.1.8 Módulo de elasticidad cuerda, y

8.1.9 Relación de Poisson, si se determinó.

9. Precisión y Sesgo

9.1 Precisión- La precisión para múltiples mezclas realizadas por un mismo operador-máquina es de +/- 4.25% (RIS%) max, como se define en la Práctica E 177, sobre un rango de 2.5 a 4*10⁶ psi (17.3 a 27.6*10⁹ Pa); Por lo tanto, los resultados de los ensayos duplicados de cilindros de diferentes mezclas o amasadas, no deben desviarse más del 5% del promedio de los dos.

10. Palabras Claves o descriptores

10.1 Ensayo de compresión; concreto; módulo de elasticidad y relación de Poisson.