

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL
CONCRETO RECICLADO PARA SU USO EN EDIFICACIONES
CONVENCIONALES

Presentado por

Juliana M. Vanegas Cabrera
Juan Pablo Robles Castellanos

Director de Tesis

Ing. José Gabriel Gómez



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
Bogotá, Noviembre de 2008

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	2
1.1 Marco Teórico	2
1.2 Revisión Bibliográfica	17
2. OBJETIVOS	30
2.1 General	30
2.2 Específicos	30
3. EJECUCIÓN DE ENSAYOS	31
3.1 Implementaciones	31
3.1.1 Variables	31
3.1.2 Cantidades de muestras: vigas y cilindros	32
3.2 Descripción y propiedades de los materiales	32
3.2.1 Agregado grueso reciclado	32
3.2.2 Agregado grueso natural	33
3.2.3 Agregado fino	34
3.2.4 Cemento	34
3.2.5 Aditivo: Eucon N - TX40T019	34

	Pag.
3.3 Mezcla y Equipo	35
3.3.1 Diseño de Mezclas	35
3.4 Descripción de procedimientos y ensayos	39
3.4.1 Trituración del concreto	39
3.4.2 Fabricación de cilindros y vigas	40
3.4.3 Proceso de Desencofrado	41
3.4.4 Proceso de Curado: al aire libre y a un ambiente húmedo	42
3.4.5 Ensayos de propiedades físicas del agregado grueso	43
3.4.5.1 Peso Especifico y Absorción	43
3.4.5.2 Peso Unitario	43
3.4.5.3 Material que pasa el tamiz # 200	44
3.4.5.4 Contenido de materia orgánica por colorimetría	44
3.4.6 Ensayo de las propiedades mecánicas del concreto	45
3.4.6.1 Asentamiento	45
3.4.6.2 Resistencia la compresión	45
3.4.6.3 Módulo de Elasticidad	46
3.4.6.4 Resistencia a la flexión	46
3.4.6.5 Retracción o expansión	47

	Pag.
4. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS	48
4.1 Resultados del Asentamiento	49
4.2 Resultados de resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad a 7 días de edad	51
4.3 Resultados de resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad a 28 días de edad	62
4.4 Resultados de Retracción	73
4.5 Resultados de correlación módulo de rotura y compresión	78
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	83

	Pag.
LISTA DE TABLAS	
• Tabla 1.1.1 Valores de las constantes que representan la parte parabólica de la ecuación Fuller-Thompson	4
• Tabla 1.2.1 Valores de peso específico y absorción de las mezclas	20
• Tabla 1.2.2. Expresiones para la determinación del módulo de Rotura en función de la resistencia a compresión, según diversos códigos o autores	28
• Tabla 1.2.3. Tabla de resultados en porcentajes para las muestras curadas de los antecedentes	29
• Tabla 3.2.1.1. Propiedades Agregado Grueso Reciclado	33
• Tabla 3.2.1.2. Propiedades Agregado Grueso Natural	33
• Tabla 3.2.1.3. Propiedades Agregado Grueso Natural	34
• Tabla 3.3.1.1. Diseño de mezcla para resistencia de 21 MPA.	37
• Tabla 3.3.1.2. Cantidades necesarias para cada tipo de mezcla	37
• Tabla 3.3.1.3. Cantidades necesarias agregado grueso para tipo de mezcla natural.	37
• Tabla 3.3.1.4 Cantidades necesarias agregado grueso para tipo de mezcla 50% reciclado.	38
• Tabla 3.3.1.5. Cantidades específicas agregado grueso reciclado y natural para tipo de mezcla 50% reciclado.	38
• Tabla 3.3.1.6 Cantidades necesarias agregado grueso para tipo de mezcla 100% reciclado.	38
• Tabla 4.1. Resumen de los ensayos realizados en curado húmedo	79

	Pag.
• Tabla 4.2. Resumen de los ensayos realizados en curado seco	79
• Tabla 4.3. Resumen de los ensayos realizados con símbolos	80
• Tabla 4.4. Resumen de porcentajes de los ensayos	80
• Tabla 4.1.1. Registros de Asentamiento	49
• Tabla 4.2.1.1. Promedio de todas las mezclas para el ensayo a compresión a siete días.	51
• Tabla 4.2.1.2. Promedio en porcentaje para cilindros fallados a compresión a los siete días.	53
• Tabla 4.2.2.1 Promedio de todas las mezclas para el ensayo a flexión a siete días.	54
• Tabla 4.2.2.2. Promedio en porcentaje de todas las mezclas para el ensayo a flexión a siete días.	56
• Tabla 4.2.3.1. Módulo de elasticidad para muestras curadas a siete días para todas las mezclas.	58
• Tabla 4.2.3.2. Módulo de elasticidad no curado a siete días para todas las mezclas.	60
• Tabla 4.3.1.1. Promedio de todas las mezclas para el ensayo a compresión a veintiocho días.	62
• Tabla 4.3.1.2. Promedio en porcentaje de todas las mezclas para el ensayo a compresión a veintiocho días.	63
• Tabla 4.3.2.1. Promedio de todas las mezclas para el ensayo a flexión a veintiocho días.	65
• Tabla 4.3.2.2. Promedio en porcentaje de todas las mezclas para el ensayo a flexión a veintiocho días.	66
• Tabla 4.3.3.1. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.	69

	Pag.
• Tabla 4.3.3.2. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.	71
• Tabla 4.4.1. Tabla de resumen resultados de retracción	73
• Tabla 4.5.1. Relación entre la resistencia a compresión y el módulo de rotura concreto reciclado como agregado grueso	78
• Tabla I.1. Granulometría agregado grueso natural	86
• Tabla II.1. Ensayo a compresión de la mezcla natural a siete días.	87
• Tabla II.2. Ensayo a compresión de la mezcla 50% reciclado a siete días.	89
• Tabla II.3. Ensayo a compresión de la mezcla 100% reciclado a siete días.	89
• Tabla III.1. Ensayo a flexión de la mezcla natural a siete días.	90
• Tabla III.2. Ensayo a flexión de la mezcla 50% reciclado a siete días.	90
• Tabla III.3. Ensayo a flexión de la mezcla 100% reciclado a siete días.	91
• Tabla V.1. Ensayo a compresión de la mezcla natural agregado convencional a veintiocho días	98
• Tabla V.2. Ensayo a compresión de la mezcla 50% agregado reciclado a veintiocho días	99
• Tabla V.3. Ensayo a compresión de la mezcla 100% agregado reciclado a veintiocho días	100
• Tabla VI.1. Ensayo a flexión de la mezcla natural con agregado convencional a veintiocho días.	101

	Pag.
• Tabla VI.2. Ensayo a flexión de la mezcla 50% agregado reciclado a veintiocho días.	101
• Tabla VI.3. Ensayo a flexión de la mezcla 100% agregado reciclado a veintiocho días.	102
• Tabla VIII.1. Resultados del ensayo de retracción - 100% agregado reciclado	109
• Tabla IX.1. Resultados del ensayo de retracción - 50% agregado reciclado	110
• Tabla X.1. Resultados del ensayo de retracción - 0% agregado reciclado	111

LISTA DE GRAFICAS

• Grafica 1.1.1 Curva de gradación Fuller-Thompson (incluyendo el cemento)	5
• Grafica 1.1.2 Curva Típica de Esfuerzo vs. Deformación Unitaria de un Concreto Simple	12
• Grafica 1.2.1. Gráficas de los resultados de los ensayos de compresión de “The Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties”	22
• Grafica 1.2.2. Gráficas de los resultados de los ensayos de compresión de “Propiedades del concreto reciclado como agregado”	23
• Grafica 1.2.3. Gráficas de los resultados de los ensayos de flexión de “Propiedades del concreto reciclado como agregado”.	24
• Gráfica 1.2.4. Gráficas de los resultados de los ensayos de compresión de “Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading”	25

	Pag.
• Gráfica 1.2.5. Relación entre módulo de rotura y resistencia a compresión del concreto, según diversas fuentes	27
• Gráfica 4.1.1. Registros de asentamiento	49
• Gráfica 4.2.1.1. Ensayo a compresión para todas las mezclas curadas a los siete días.	52
• Gráfica 4.2.1.2. Ensayo a compresión para todas las mezclas no curadas a los siete días.	53
• Gráfica 4.2.2.1. Ensayo a flexión para todas las mezclas curadas a los siete días.	55
• Gráfica 4.2.2.2. Ensayo a flexión para todas las mezclas no curadas a los siete días.	56
• Gráfica 4.2.3.1. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los siete días.	57
• Gráfica 4.2.3.2. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los siete días	58
• Gráfica 4.2.3.3. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los siete días.	60
• Gráfica 4.2.3.4. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los siete días.	61
• Gráfica 4.2.3.5. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas y no curadas a los siete días.	61
• Gráfica 4.3.1.1. Ensayo a compresión para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.	62
• Gráfica 4.3.1.2. Ensayo a compresión para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.	64
• Gráfica 4.3.2.1. Ensayo a flexión para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.	66

	Pag.
• Gráfica 4.3.2.2. Ensayo a flexión para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.	67
• Gráfica 4.3.3.1. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.	68
• Gráfica 4.3.3.2. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.	69
• Gráfica 4.3.3.3. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.	70
• Gráfica 4.3.3.4. Módulo de elasticidad para las mezclas no curadas a los veintiocho días.	72
• Gráfica 4.3.3.5. Módulo de elasticidad para las mezclas curadas y no curadas a veintiocho días.	72
• Gráfica 4.4.1. Gráfica resultados retracción curado seco	74
• Gráfica 4.4.2. Resultados de retracción curado humedo	74
• Gráfica 4.4.3. Resultados de retraccion obtenidos por el Ing. Lozano	77
• Grafica IV.1. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado natural a los siete días.	92
• Grafica IV.2. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado natural a los siete días.	93
• Gráfica IV.3. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado 50% reciclado a los siete días.	94
• Grafica IV.4. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado 50% reciclado a los siete días.	95
• Gráfica IV.5. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado 100% reciclado a los siete días.	96

	Pag.
• Grafica IV.6. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado 100% reciclado a los siete días.	97
• Gráfica VII.1. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado convencional a los veintiocho días.	103
• Gráfica VII.2. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado convencional a los veintiocho días.	104
• Gráfica VII.3. Módulo de elasticidad para cilindros con 50% agregado reciclado a los veintiocho días.	105
• Gráfica VII.4. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con 50% agregado reciclado a los veintiocho días.	106
• Gráfica VII.5. Módulo de elasticidad para cilindros con 100% agregado reciclado a los veintiocho días.	107
• Gráfica VII.6. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con 100% agregado reciclado a los veintiocho días	108
• Gráfica VIII.2. Gráfica de resultados del ensayo de retracción – 100% agregado reciclado	109
• Gráfica IX.2. Gráfica de resultados del ensayo de retracción – 50% agregado reciclado	110
• Gráfica X.2. Gráfica de resultados del ensayo de retracción – 0% agregado reciclado	111

LISTA DE ANEXOS

• Anexo I – Granulometría	86
• Anexo II – Etapa I, Grupo 1	87
• Anexo III – Etapa I, Grupo 2	90

Noviembre de 2008

	Pag.
• Anexo IV – Etapa I, Grupo 3	92
• Anexo V – Etapa II, Grupo 1	99
• Anexo VI – Etapa II, Grupo 2	101
• Anexo VII – Etapa II, Grupo 3	103
• Anexo VIII – Resultados de los ensayos de retracción de concreto con 100% agregado reciclado	109
• Anexo IX – Resultados de los ensayos de retracción de concreto con 50% agregado reciclado	110
• Anexo X – Resultados de los ensayos de retracción de concreto con agregado natural	111
• Anexo XI – Ficha técnica del aditivo EUCON N	112
• Anexo XII – Mosaico del proceso de trituración de cilindros	114
• Anexo XIII – Mosaico del proceso de fundición de vigas y cilindros	115
• Anexo XIV – Mosaico de las muestras con agregado natural a 7 días de edad	116
• Anexo XV – Mosaico de las muestras con agregado natural a 28 días de edad	117
• Anexo XVI – Mosaico de las muestras con 50% agregado reciclado a 7 días de edad	118
• Anexo XVII – Mosaico de las muestras con 50% agregado reciclado a 28 días de edad	119
• Anexo XVIII – Mosaico de las muestras con 100% agregado reciclado a 7 días de edad	120
• Anexo XIX – Mosaico de las muestras con 100% agregado reciclado a 28 días de edad	121

Noviembre de 2008

	Pag.
• Anexo XX – Equipo de ensayos	122

INTRODUCCIÓN

En Colombia se generan toneladas de escombros provenientes de construcciones y demoliciones que son desechados en escombreras y rellenos sanitarios, creando así contaminación en el suelo, en el ambiente y reduciendo los recursos naturales. Considerando que muchas veces este material desechado es depositado clandestinamente en lugares no autorizados como quebradas, espacios públicos y otros lugares. Éste material que es enviado a las escombreras puede ser reutilizado para la generación de un nuevo concreto, con propiedades físicas y mecánicas similares a las del concreto convencional, y así disminuir la contaminación y la sobre acumulación en las escombreras.

A continuación se presenta una investigación experimental sobre la reutilización del concreto endurecido obtenido de cilindros desechados de un laboratorio, para fines prácticos no se obtiene diferencia entre los cilindros de laboratorio y el material proveniente de construcción, en cuanto a la edad del concreto este influye sólo en la superficie expuesta a la intemperie disminuyendo la porosidad del concreto por efecto de la carbonatación.

Los cilindros son triturados para obtener un agregado grueso y sustituir en la mezcla de concreto el agregado natural por el agregado reciclado. Se presentan tres tipos de mezclas con diferentes cantidades de agregado grueso reciclado: 0% de agregado reciclado, 50% de agregado reciclado y 50% de agregado natural; y 100% de agregado reciclado.

Se fundieron cilindros y vigas para ser sometidas a ensayos de compresión, de flexión, de módulo de elasticidad y de retracción. Para poner a prueba el efecto del curado en estos diseños se expusieron en ambientes favorables y desfavorables, similares a las que son sometidas las columnas y vigas fundidas en una obra.

GENERALIDADES

1.1 MARCO TEÓRICO

El concreto (hormigón) es un material de construcción producido por medio de la combinación de tres elementos fundamentales: el principal componente es el cemento que puede llegar a ocupar de un 7% un 15% de la mezcla y tiene propiedades de adherencia y cohesión que pueden suministrar una buena resistencia a la compresión, el segundo es el agua que ocupa entre un 14% y 18% de la mezcla que hidrata el cemento por medio de complejas reacciones químicas y el tercero es el agregado, definido como material inerte, de forma granular, naturales o artificiales, y se encuentra separado en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). El agregado ocupa entre el 59% y el 76% de volumen de la mezcla; así mismo puede tener otros materiales como adiciones (puzolánicas, escorias de altos hornos, etc.) y aditivos (reductores de agua, súper-plastificantes, entre otros) que ocupan entre un 1% y 7% de la mezcla. Se puede decir que el concreto es un material durable, resistente y adherente con forma indefinida, puesto que es una mezcla maleable¹.

La calidad del agregado, sean partículas finas o gruesas, juegan un importante papel en el comportamiento del concreto. Ésta se puede determinar mediante la evaluación de las características químicas y físicas del agregado.

La característica química más importante de un agregado es que se comporta químicamente inerte, es decir que éste no reacciona químicamente al ponerlo en contacto con el cemento y el agua, ya que si esto ocurre se puede presentar reacciones tales como la desintegración del concreto.

Las propiedades físicas, para tener en cuenta, de un agregado son varias, entre las cuales encontramos:

Peso Unitario

El peso unitario, también denominado peso volumétrico, es la relación existente entre un peso de una muestra de agregado, la cual debe tener una buena

¹ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Diseño de mezclas de concreto. V edición. Bogotá, 2001, Pág. 221

Noviembre de 2008

distribución de partículas, y el volumen de un recipiente en donde está depositada la muestra. Al poner la muestra del agregado dentro del recipiente, las partículas deberán tener un acomodamiento mínimo de volumen de espacios entre ellas y esto se logra al colocar la mayor cantidad de partículas posibles, lo cual depende del tamaño, la granulometría, la forma y la textura del agregado. El peso unitario, en realidad, es una densidad del material en conjunto que incluye el espacio entre partículas, los poros no saturables y los poros saturables. El valor del peso unitario se proporciona en kg/m^3 y se puede calcular con la ecuación 1.

$$\text{Peso unitario} = \frac{P_s}{V_r} \quad (1)$$

P_s : peso seco del material

V_r : volumen del recipiente

El volumen del recipiente incluye el volumen de las partículas, el volumen de los poros de las partículas (saturables y no saturables) y el volumen de los espacios entre partícula y partícula. El peso del material depende de que tan compactas y densas sean éstas. Por lo tanto, el peso unitario indica la calidad de un agregado y su capacidad para ser utilizado en la fabricación de concreto.

Existen dos tipos de pesos unitarios que se clasifica según su grado de compactación.

- **Peso Unitario Apisonado**

Es el peso unitario con un grado de acomodamiento de las partículas después de ser sometida a un apisonamiento o a vibración, ya que esto mejora el acomodamiento y aumenta el peso unitario.

Lo importante del peso unitario apisonado está en que con éste valor se determinan los volúmenes de agregados en el diseño de mezcla por lo que las partículas del agregado van a quedar confinadas dentro de la masa.

- **Peso Unitario Suelto**

Es el peso unitario cuando el material se encuentra en estado normal de reposo y el volumen que ocupa es mayor, por lo tanto éste peso unitario es menor que el apisonado.

El valor del peso unitario suelto es de suma importancia ya que hay que tener presente el hecho de que cuando se transportan los agregados se hace por volumen y en estado suelto. Luego, el volumen que se utiliza dentro del concreto a producir, colocar y compactar no es el mismo volumen de agregado a transportar.

Granulometría

La granulometría define la distribución de partículas en una cantidad de masa del material. Esto se puede determinar por medio del análisis granulométrico, que consiste en dividir una muestra de la masa en fracciones de igual tamaño y ver que proporción ocupa en la muestra de masa. Se han realizado una serie de investigaciones acerca de lo que puede considerarse una buena granulometría de agregados para concreto, entre esas encontramos el principio de gradación de Fuller y Thompson. Este principio trata de encontrar la mejor capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas para obtener la máxima densidad y, por consiguiente, la máxima resistencia en el concreto. Fuller y Thompson proponen que la curva de gradación ideal de cualquier masa presenta un comportamiento parabólico en su fracción fina, el cual converge con una línea recta tangente a la elipse (gráfica 1.1.1) en las siguientes fracciones. La ecuación 2 de la elíptica de la curva de gradación es la siguiente²:

$$\frac{(y - b)^2}{b_2} + \frac{(x - a)^2}{a_2} = 1 \quad (2)$$

Donde

y : porcentaje de material que pasa el tamiz de abertura x

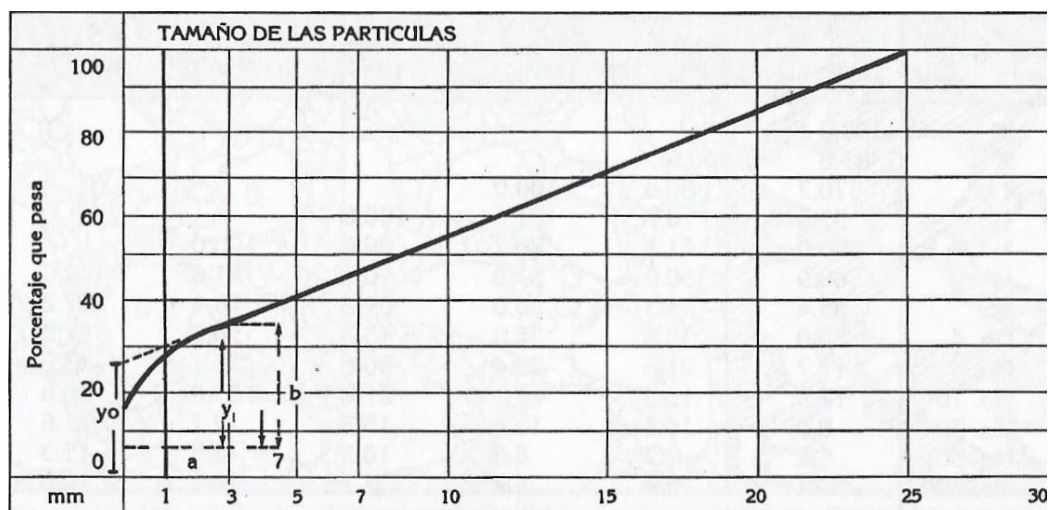
a, b : constantes que representan los ejes de la elipse (estos valores se muestran en la tabla 1.1.1)

Clase de material	A	B
Agregados de canto rodado	0,164 D*	28,6
Arena natural y grava triturada	0,150 D*	30,4
Arena y grava triturada	0,147 D*	30,8

Tabla 1.1.1 Valores de las constantes que representan la parte parabólica de la ecuación Fuller-Thompson

* D: tamaño máximo del agregado

² SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Los agregados o áridos – principio de gradación de Fuller y Thompson. Quinta edición. Bogotá DC., 2001. Pg. 79



Gráfica 1.1.1 Curva de gradación Fuller-Thompson (incluyendo el cemento)³

Cuando se desea obtener la curva del agregado únicamente, se debe restar la porción del cemento prevista en cada caso y tomar el resto como 100%. Al hacer esto se obtiene una parábola, la cual es llamada parábola de Fuller-Thompson, y está expresada con la siguiente fórmula

$$P = 100 \times \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (3)$$

Donde:

P: porcentaje de material que pasa por el tamiz de abertura d

D: tamaño máximo del agregado

d: Abertura de cada tamiz

³ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Los agregados o áridos – principio de gradación de Fuller y Thompson. Quinta edición. Bogotá DC., 2001. Pg. 79

Forma

Se pueden encontrar diferentes formas en el agregado grueso: redondeado, irregular, angular, laminar o escamoso, elongado, entre otras. La forma de las partículas del agregado juega un papel muy importante en la fabricación del concreto. Esto se debe a que la capacidad de compactación de una mezcla no solo depende de la granulometría sino también del grado de acomodamiento de las partículas.

Textura

La textura de los agregados puede afectar significativamente las propiedades del concreto, especialmente la adherencia entre las partículas del agregado y la pasta del cemento. Se puede encontrar diferentes texturas en una partícula: vítrea, lisa, granular, áspera, cristalina y aplanada.

Peso específico

El peso específico, o densidad, está definido como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada. Las partículas que componen ésta masa contienen cavidades o poros que pueden encontrarse vacíos, parcialmente saturados o llenos de agua; todo está definido por su permeabilidad interna. Dependiendo del estado en que se encuentren los poros se puede calcular diferentes pesos específicos, tales como

- Peso específico nominal

El peso específico nominal, también denominado densidad nominal, es la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos los poros no saturables. Para calcular el valor del peso específico nominal se utiliza la ecuación 4.

$$\text{peso específico nominal} = \frac{P_s}{V_m - V_{p_s}} \quad (4)$$

Donde:

P_s : peso seco de la masa m

V_m : volumen ocupado por la masa m

V_{p_s} : volumen de los poros saturables

- **Peso específico aparente**

El peso específico aparente, también denominado densidad aparente, es la relación que hay entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas. Éste volumen incluye todo los poros, los saturados y no saturados. Para obtener el valor del peso específico aparente se utiliza la siguiente ecuación

$$\text{peso específico aparente} = \frac{P_s}{V_m} \quad (5)$$

Donde

P_s : peso seco de la masa m

V_m : volumen ocupado por la masa m

Capacidad de absorción

La capacidad de absorción está definida por la porosidad que tienen las partículas del agregado, por su tamaño, por su continuidad y su volumen total. Estos factores nos señalan como se puede encontrar un agregado en su estado natural (contenido natural de humedad) y artificial; se pueden encontrar en estado seco, parcialmente saturado, saturado o superficialmente seco. Estos estados dependen del grado de absorción de las partículas, y se puede calcular con la diferencia de pesos.

$$\% \text{ absorcion} = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_s} \quad (6)$$

Donde

P_{SSS} : peso de la muestra saturada superficialmente seca

P_s : peso seco de la muestra

Contenido de finos y sustancias perjudiciales

La cantidad de material fino que tiene un agregado puede ser perjudicial para la resistencia del concreto, ya que éste material puede llegar a impedir los enlaces entre la pasta de cemento y las partículas del agregado. En éste grupo de material, denominado finos, podemos encontrar todas esas partículas con diámetros inferiores a 74 micras; este grupo incluye arcillas, limos y polvos procedentes de la trituración. Estos materiales mencionados anteriormente, no solo pueden impedir la adherencia entre la pasta del cemento y el agregado, sino que también pueden llegar a generar esfuerzos de tensión dentro de la masa del concreto y, por su alta finura y alta superficie específica, se requiere un aumento de agua y cemento para una relación agua-cemento ya determinada.

Como sustancias perjudiciales para el concreto encontramos la materia orgánica, la contaminación salina y las partículas deleznable (partículas blandas, terrones de arcilla, madera, carbón, lignito o mica). Para cada una de éstas sustancias existen especificaciones que limitan el máximo contenido que puede llegar a tener el agregado para ser utilizado en el desarrollo de concreto y una serie de ensayos que nos permiten fijar la cantidad de partículas finas que contiene el agregado. En ésta propiedad física del material hay que tener presente la sanidad del agregado, es decir, la capacidad de soportar cambios excesivos en volumen debido a cambios en las condiciones ambientales, como humedecimiento-secado, que pueden llegar a afectar la durabilidad del concreto. Ésta sanidad del agregado depende del origen, granulometría, forma, textura, porosidad y propiedades mecánicas del agregado a utilizar.

La propiedad ha considerar más importante es el peso unitario, ya que ésta propiedad recoge una serie de factores que están asociados a su calidad, desde el punto de vista de sus resistencia mecánica hasta la durabilidad.⁴

En el proceso de triturado para obtener agregado reciclado se genera un porcentaje importante de finos, el cual es recomendable no emplear para la elaboración de un concreto ya que este tiene una absorción extremadamente alta.

Para poder analizar la calidad del concreto hay que evaluar sus propiedades mecánicas básicas, entre las cuales están:

⁴ LEON RODRIGUEZ, Álvaro. Propiedades del concreto reciclado como agregado. Bogotá DC., 2001, p.4. Trabajo de Magister (Maestría en Construcción) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes – Departamento de Construcciones

Resistencia

La resistencia más importante del concreto es su resistencia a la compresión, puesto que es la que se utiliza para realizar los cálculos estructurales de puentes, edificios y demás estructuras. La resistencia a la compresión se puede definir como la resistencia máxima medida en un cilindro de concreto sometido a carga axial. Para determinar éstas resistencias se deben realizar pruebas en especímenes de concreto luego de 3, 7, 14 y 28 días de fraguado bajo condiciones controladas de humedad. Generalmente, ésta se expresa en MPa y kg/cm^2 y mediante el símbolo $f'c$.

La resistencia característica a la compresión de un concreto ($f'c$) se mide en términos probabilísticos, definiéndose que solamente un pequeño porcentaje de las muestras (normalmente un 5%) pueden tener resistencias inferiores a la especificada, lo que da lugar a que la resistencia media (f_m) de las muestras siempre sea mayor a la resistencia característica. Si se asume una distribución normalizada de los ensayos de rotura, la resistencia característica puede calcularse a partir de la resistencia media y la desviación estándar (σ), mediante la siguiente expresión

$$f'c = f_m - 1.65\sigma$$

La resistencia a la compresión se puede utilizar como índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión, también llamada módulo de ruptura (M.R.) para un concreto de peso normal se aproxima a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión medida en kg/cm^2 .

Aunque la resistencia a la tensión (módulo de rotura) del concreto es de poca importancia y se puede relacionar con la resistencia a compresión de la siguiente manera.

$$M.R. = k\sqrt{f'c} \quad (7)$$

Donde:

M.R: módulo de rotura

k: coeficiente de correlación

$f'c$: esfuerzo a compresión

El valor del módulo de rotura del concreto es aproximadamente de 10% a 20% de su resistencia a compresión⁵, y el coeficiente k es específico para cada tipo de concreto y debe ser determinado de forma experimental.

Los factores que afectan la resistencia de un concreto son:

- a) El contenido o proporción de cemento en la mezcla, ya que a medida que aumenta el contenido de éste aumenta la resistencia del concreto. Aunque hay que tener presente la relación agua-cemento con respecto a la proporción de cemento en la mezcla.
- b) La relación agua-cemento es el factor más importante en la resistencia del concreto con un adecuado grado de compactación. Debido a que diferentes tipos de agregado y de cemento pueden producir resistencias diferentes con la misma relación de agua-cemento, es necesario desarrollar la correspondencia entre la resistencia y la relación agua-cemento de los materiales.
- c) Se debe tener en cuenta el aire incluido en la mezcla, ya que el contenido de éste reduce la resistencia del concreto. Por tanto para obtener una resistencia deseada e introducir cierto contenido de aire se debe reducir la relación agua-cemento.
- d) Las propiedades del agregado que afectan la resistencia de un concreto son:
 - La granulometría, ya que de ésta depende su grado de compactación y por ende la densidad que el concreto pueda adquirir en el estado endurecido, y como resultado un alto grado de resistencia.
 - La forma y textura de las partículas del agregado influye mucho en la resistencia. Se puede encontrar partículas cúbicas y rugosas, y redondas y lisas. Las primeras características dan mejor adherencia entre las partículas de la matriz, aunque necesitan mayor cantidad de agua para una óptima manejabilidad.
 - La resistencia y la rigidez de las partículas influyen mucho en la resistencia del agregado; ésta resistencia y rigidez depende de la densidad y la porosidad que tengas las partículas.

⁵ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Resistencia del concreto. V edición. Bogotá D.C., 2001, Pág. 242.

Noviembre de 2008

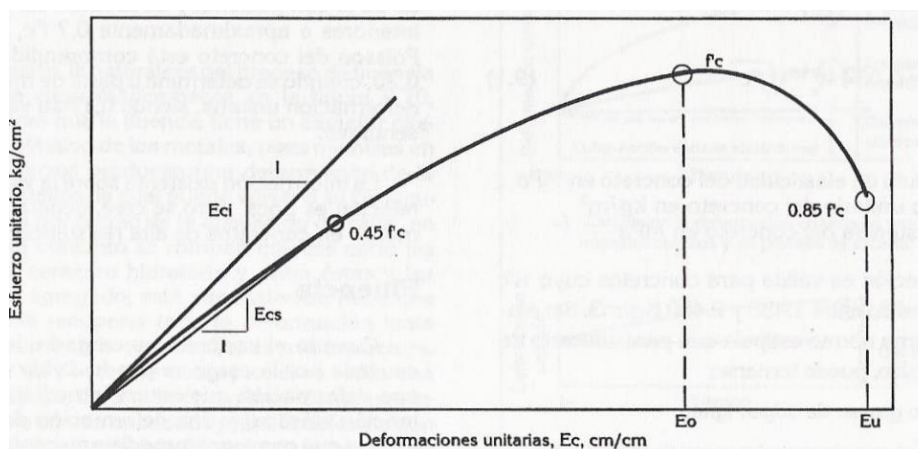
- La cantidad de cemento necesaria para producir una resistencia a la compresión máxima, a una cierta edad, con un determinado agregado, depende del tamaño máximo del agregado grueso de la mezcla.
- e) La velocidad de endurecimiento cuando el concreto pasa de estado plástico al endurecido, bajo ciertas condiciones de tiempo y temperatura. Esto es llamado el proceso de fraguado.
- f) La edad del concreto es muy importante ya que la relación entre la relación agua-cemento y la resistencia se aplica únicamente a un tipo de cemento y a una sola edad.
- g) La hidratación del concreto controlando la temperatura y los movimientos internos y externos de humedad es llamado el curado. Su objetivo es mantener el concreto tan saturado como sea posible para terminar de hidratar el cemento.
- h) La temperatura a la cual fue expuesto el concreto durante los proceso de curado y de fraguado afecta la resistencia del concreto.
- i) Los parámetros de carga, que incluyen los tipos de esfuerzo y la velocidad de aplicación de carga.

Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad, reconocido mediante el símbolo E_c , se define como la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente a esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material. En Colombia se rige por la norma NSR-98, éste módulo se puede aproximar a 3900 veces la raíz cuadrada del valor de la resistencia a la compresión, medida en MPa. Por lo que éste valor se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_c = 3900\sqrt{f'_c} \quad (8)$$

Cuando se dibujan la curva esfuerzo-deformación después de haber sometido a compresión la muestra del concreto, bajo las normas NTC establecidas, se obtiene una grafica que depende fundamentalmente de la resistencia a la rotura del material.



Gráfica 1.1.2 Curva Típica de Esfuerzo vs. Deformación Unitaria de un Concreto Simple⁶

Todos los concretos presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal (similar a una línea recta en la curva esfuerzo-deformación) y elástico (en la descarga recuperan la geometría previa a la carga) ante los incrementos de carga de compresión cuando las cargas son relativamente bajas (menores al 70% de la carga de rotura), y un segundo rango de comportamiento no lineal e inelástico (con una geometría curva en la curva esfuerzo-deformación) cuando las cargas son altas⁷.

La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de Módulo de Elasticidad. Este módulo puede calcularse mediante la siguiente fórmula

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (9)$$

El módulo de elasticidad es diferente para distintas resistencias a la compresión de los concretos, e incrementa el valor cuando la resistencia del concreto es mayor.

La mejor manera de calcular el módulo de elasticidad de un concreto después de ser sometido a una carga axial de compresión y con los resultados obtenidos del

⁶ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Los agregados o áridos – principio de gradación de Fuller y Thompson. Quinta edición. Bogotá DC., 2001. Pg. 79

⁷ Temas de Hormigón Armado – Capítulo I
Escuela Politécnica del Ejército (Ecuador) publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigón/temas-de-hormigón-armado/hormigón01.pdf

Noviembre de 2008

Ensayo para Módulo de Elasticidad Estático y la relación de Poisson en Concreto a Compresión, según la norma NTC 4025, es por medio de la siguiente formula:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{E_2 - 0,00005} \quad (10)$$

Donde,

E_c : módulo de elasticidad secante, en MPa

S_2 : esfuerzo correspondiente al 40% de la caga última

S_1 : esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal E_1 , en MPa

E_2 : deformación longitudinal producida por el esfuerzo S_2

Los factores que afectan el módulo de elasticidad del concreto son:

- Un mayor contenido de humedad lleva a un mayor módulo de elasticidad debido a que durante el secado se produce una microfisuración y debido a la capacidad portante del agua contenida.
- La velocidad de aplicación de la carga afecta el valor del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos. Entre menor sea la velocidad de aplicación se obtendrá un menor valor.
- El módulo de elasticidad de la pasta de cemento está determinado por la relación agua/cemento, de la presencia de adiciones minerales y del grado de hidratación del cemento.
- La calidad de la interfase afecta el valor del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos. Para un mayor contenido de vacíos, microfisuras y cristales de hidróxido de calcio orientados en la interfase, menor será el valor del módulo de elasticidad obtenido.
- Cuanto mayor sea el módulo de elasticidad del agregado y su contenido en el concreto, mayor será el valor del módulo de elasticidad obtenido.

Asentamiento

Después de haber colocado y compactado el concreto éste inicia un proceso llamado segregación o asentamiento; donde las partículas del agregado, consideradas el componente más pesado, tienden a bajar y la pasta de cemento, considerado el componente menos denso, tiende a subir. La segregación es algo indeseable puesto que esto provoca la estratificación en la masa, en donde se forma en la superficie superior una capa menos resistente y menos durable por su mayor concentración de agua.

Los principales factores que influyen en el asentamiento del concreto son de orden intrínseco, y se relacionan con exceso de fluidez en la mezcla, en donde se puede observar características defectuosas de forma, textura superficial y granulometría en el agregado (particularmente falta de finos en la arena) y reducido consumo unitario y/o baja finura en el cementante. Consecuentemente, las prevenciones aplicables para moderar la segregación consisten en impedir la presencia de dichos factores, para lo cual es conveniente⁸:

- 1) Emplear mezclas de concreto con la consistencia menos fluida que pueda colocarse satisfactoriamente en la estructura, y que posea el menor contenido unitario de agua que sea posible, inclusive utilizando aditivos reductores de agua si es necesario.
- 2) Utilizar agregados con buena forma y textura superficial y con adecuada composición granulométrica; en especial, con un contenido de finos en la arena que cumpla especificaciones en la materia.
- 3) Ensayar el uso de un aditivo incorporador de aire, particularmente cuando no sea factible cumplir con la medida anterior.
- 4) Incrementar el consumo unitario de cemento y/o utilizar un cemento de mayor finura, como el portland tipo III o el portland-puzolana. En relación con ésta última medida, es un hecho bien conocido la manera como se reduce la velocidad de sangrado de la pasta al aumentar la superficie específica del cemento.

Pero también se puede encontrar el efecto opuesto en donde al incrementar la finura en el cemento, el concreto va a requerir de una mayor cantidad de agua de mezclado. Por esto es preferible aplicar ésta medida cautelosamente seleccionando el cemento apropiado.

⁸ Curso – Taller de Concreto – Fundación ICA (México DF) Marzo 2000
www.monografias.com/trabajos4/concreto/concreto.shtml

En cuanto a características, el concreto debe tener un asentamiento de 10 cm (si en el ensayo la mezcla ha sido compactada mediante vibrado) y de 13 cm (si la compactación realizada es diferente).

Retracción por secado

Durante el proceso de endurecimiento el concreto puede llegar a tener cambios volumétricos significantes ya que parte del agua de la mezcla se logra evaporar. La velocidad de ésta evaporación depende de la humedad relativa, la temperatura, la relación agua-cemento y el área de la superficie expuesta. Las retracciones o contracciones son parte de una deformación, y ésta deformación por retracciones depende del tiempo y no de la carga a la que es inducido el elemento.

Los factores que afectan la pérdida de humedad del concreto en la superficie que produce la retracción son categorizados en dos grupos: los externos y los internos.

Entre los factores externos encontramos:

- Condiciones ambientales

Aquí encontramos la temperatura del aire, la humedad relativa ambiental y la velocidad del viento; todos estos subfactores afectan la velocidad de evaporación. Se puede decir que se producen más contracciones en el concreto por secado en grandes periodos de tiempo expuestos a altas temperaturas ambientales, con la mayor humedad relativa ambiental y con mayor velocidad del viento.

- Geometría del elemento: forma y tamaño

Entre mas grande sea un elemento menos retracciones va a generar, ya que el núcleo se demora mas en secarse. El efecto de la geometría en la retracción es representada por el Espesor Teórico o Hipotético (e).

Donde

$$e = \frac{2 \times \text{Areas seccion transversal}}{\text{Perimetro de la seccion transversal}} \quad (11)$$

Se puede decir que entre mayor sea el espesor teórico (e) la retracción va hacer mucho menor.

Entre los factores internos encontramos:

Noviembre de 2008

1. Los componentes del concreto

- Cemento

El efecto que hace el contenido de C^3A y álcali que tenga el cemento en la retracción es influenciado por el contenido de yeso. Por esto se desarrollo un cemento llamado “cemento de contracción compensada” con características en función de la retracción. Hay que tener presente que el uso solo de éste cemento no garantiza una baja retracción en un concreto.

- El Agregado y sus propiedades

Es un hecho que el agregado tiene un efecto restrictivo en la retracción. Si el agregado se contrae más que la pasta de cemento, la contracción del concreto aumentará significativamente, lo cual es influenciado por la capacidad de absorción. Pero si el agregado se contrae menos que la pasta de cemento, entonces éste limita la retracción y esta disminuirá al incrementar la fracción del volumen del agregado.

Entre las propiedades de un agregado que afecta la retracción se encuentra la granulometría, el tamaño máximo, la forma y la textura del agregado; dependiendo de éstas propiedades puede variar la demanda de agua en una mezcla de concreto.

El efecto del agregado a limitar la retracción está regido por la fracción de volumen del agregado, el módulo de elasticidad del agregado y la contracción del agregado al secarse.

- Materiales Contaminantes

Hay que tener presente que estos materiales, tales como los sedimentos, arcillas, carbón, madera o materia orgánica, pueden llegar a incrementar la retracción en un concreto.

- Aditivo

Estos pueden llegar a influir en la retracción dependiendo de su formulación, su interacción con la pasta de cemento y otros aditivos en la mezcla. El aditivo que más afecta la retracción es el que contiene cloruro de calcio.

- Contenido de Agua

Un concreto con un buen comportamiento y una alta resistencia es caracterizado por tener un alto contenido de cemento, un bajo contenido de agua (por lo tanto una baja relación agua-cemento) y un agregado de buena calidad. Éste concreto puede tener características de baja retracción.

2. La elaboración del concreto

En estos factores encontramos la colocación, la compactación y el curado del concreto. Un concreto con buena compactación y un curado apropiado puede producir una densidad óptima de capilares reducidos y/o capilares continuos. Esto puede llevar a una menor pérdida de humedad y por ende baja retracción.

1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El agregado como resultado del reciclado de concreto endurecido, por medio de demoliciones o residuos de la construcción, utilizado para desarrollar un nuevo concreto convencional es un tema que viene desde hace más de una década. Todo comenzó después de la Segunda Guerra Mundial, donde muchas ciudades fueron destruidas por los múltiples combates militares que se desarrollaron dentro de éstas. La mayoría de edificaciones fueron demolidas y la cantidad de escombros sobrantes era enorme. Por lo tanto, sus gobiernos decidieron volver a construir utilizando el concreto demolido⁹.

En países desarrollados el tema ha avanzado a pasos de gigantes; entre este grupo de países se puede encontrar Dinamarca, Holanda, Gran Bretaña, y Alemania. En diversos estudios realizados a los países que conforman la Comunidad Europea, se obtuvo un valor total sobre la producción de residuos de construcción que se estiman en 175 millones de toneladas por año. Esto en función de una población de unos 350 millones y una media de producción de residuos de construcción de 500 kilos por habitante por año.¹⁰ Al ver éstas grandes cantidades de residuos, la contaminación que estos producen y la

⁹ LEON RODRIGUEZ, Alejandro. Propiedades del concreto reciclado como agregado. Generalidades. Antecedentes. Bogotá D.C., 2001, Pag 8-9.

¹⁰ TORRES FLECHAS, José H. Reciclaje de desechos sólidos de la construcción – Análisis comparativo para la elaboración de concreto con áridos reciclados. Bogotá DC., 2000, p. 20. Trabajo de Magister (Maestría en Construcción) Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Construcción

Noviembre de 2008

insuficiencia de materia prima natural para producir concreto, se vieron obligados a investigar y desarrollar nuevas tecnologías para reutilizar o reciclar éste material desechado.

Recopilando e investigando la normativa internacional, se encontraron las normas de los siguientes países acerca la utilización del concreto reciclado como agregado:

- Alemania

Los “Requisitos técnicos para el reciclado de residuos minerales” (5 de septiembre de 1995) establecen una serie de condiciones para el uso de residuos de construcción y demolición reciclados.

Los agregados y los suelos reciclados se utilizan principalmente en la construcción de carreteras. El uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras está reglamentado a través de los términos de entrega de materiales reciclados, en general, los productos reciclados han de cumplir las mismas especificaciones que los de origen natural.

De forma general la normativa alemana permite el empleo de hasta un 5% en peso de material reciclado sobre el total de agregados sin establecer restricciones adicionales al concreto. Para porcentajes mayores se establecen distintos usos en función del ambiente al que se vaya a estar cometido el concreto.

- Reino Unido

La Agencia de Autopistas para el Departamento de Transporte (Highways Agency for the Department of Transport) ha elaborado las “Especificaciones para trabajos de Autopistas” (Specification for Highway Works) que aplica tanto a materiales naturales como reciclados, y que determina el porcentaje máximo de material reciclado a utilizar. Por su parte, el Instituto de Estandarización Británica (BSI) ha elaborado la norma BS 6543 “Guía para el uso de subproductos industriales y residuos en edificación e ingeniería civil”. La norma inglesa BS8500:02 “Especificación para componentes materiales y concreto” (Specification for constituent materials and concrete) establece la clasificación del agregado según su origen, distinguiendo así entre los procedentes del concreto y los procedentes de materiales cerámicos o la mezcla de ambos. En esta norma no se establece un contenido máximo de material reciclado, aunque se

Noviembre de 2008

prescribe que el producto obtenido a partir de una combinación de material natural y reciclado debe cumplir las especificaciones generales que se establecen para el agregado de origen natural, además de requisitos adicionales para el material reciclado.

- Holanda

Holanda dispone de normativa que recoge la utilización de agregados reciclados NEN 5905:97. Esta norma recoge los criterios de calidad para los agregados gruesos reciclados procedentes del concreto. Existen también recomendaciones sectoriales sobre agregados gruesos para concreto y agregados finos para concreto. Por otra parte, cuentan con una certificación de los productores de estos materiales.

La normativa holandesa sobre la utilización de materiales reciclados permite su empleo en concretos en masa o armados, excluyendo su utilización en concretos pretensados. Para los agregados reciclados procedentes del concreto no se limita el porcentaje de agregados gruesos utilizados, mientras que para los provenientes de la mezcla de cerámica y concreto, se permite una sustitución máxima de 20% del agregado grueso. Desde 1997 hay una prohibición total de verter residuos de construcción y demolición.

- Suecia

Existen especificaciones técnicas, especialmente para concretos/ladrillos, para su uso en construcción como agregado para el concreto o para construcción de carreteras. Hay centros de investigación trabajando en especificaciones para materiales destinados a la construcción de carreteras a partir de ladrillos y asfalto, e incluso para la reutilización en edificación de madera y productos de hierro.

Una de las investigaciones más destacada internacionalmente fue "*The Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties*" que fue desarrollada por Keun-Hyeok Yang, Heon-Soo Chung y Ashraf F. Ashour, de nacionalidad coreana. En éste estudio, los investigadores diseñaron 9 mezclas de concreto con tres tipos diferentes de agregados reciclados. Los agregados fueron categorizados según su peso específico y su absorción, y escogieron tres proporciones de agregado reciclado que reemplazarían el agregado natural en la mezcla (30%, 50% y 100%).

Tipos de agregados reciclados		
Nomenclatura	Peso Especifico	Absorción (%)
RG I	2,53	1,9
RG III	2,4	6,2
RS II	2,36	5,4

Tabla 1.2.1 Valores de peso específico y absorción de los diferentes agregados

Para estudiar el efecto de la calidad y la cantidad de reemplazo del agregado reciclado sobre la manejabilidad y la resistencia a la compresión del concreto, propusieron una ecuación sobre la absorción relativa del agua perteneciente al agregado

$$Q_w = \frac{aQ_{NG} + bQ_{NS} + cQ_{RG} + dQ_{RS}}{a + b + c + d} \quad (12)$$

Donde:

Q_{NG} , Q_{NS} , Q_{RG} , Q_{RS} : son las absorciones de agua de los agregados (naturales y reciclados)

a, b, c, d: son las unidades de volúmenes del agregado grueso y fino mezclado (naturales y reciclados)

Con los resultados de los ensayos realizados obtuvieron como conclusión que la manejabilidad disminuye un 20% con mayor cantidad de absorción del agregado; la exudación decrece con el aumento de la absorción del agregado y la resistencia a la compresión del concreto con agregado reciclado y baja absorción es similar al del concreto con agregado natural. También pudieron observar que la resistencia a la compresión del concreto con agregado reciclado y alta absorción alcanza entre un 60% y 80% de la resistencia del concreto natural y mejora con el tiempo. Analizando los resultados de flexión concluyeron que esta es mayor con el incremento de la absorción del agregado. Con respecto a los módulos de rotura y de elasticidad, concluyeron que es menor entre un 3 y 30% cuando la absorción de los agregados es mayor del 2,5%. Es decir, que todas las propiedades mecánicas de un concreto dependen del nivel de absorción que tenga el agregado reciclado. En la grafica 1.2.1 se pueden observar las graficas obtenidas por los coreanos donde muestran los resultados de sus ensayos de compresión.

En Latinoamérica encontramos a México como el país con más investigaciones acerca de éste tema; una de ellas es la *“Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas”*¹¹ que

¹¹ DOMINGUEZ LEPE J.A. *Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas*. México, 2007, p 12.

Noviembre de 2008

logro demostrar que es posible reinsertar los residuos de la construcción a un nuevo ciclo de vida de vivienda en dicho país.

En Colombia las investigaciones acerca de éste tema no son muy amplias, aunque existen una serie ingenieros y arquitectos pos-ambientalistas que se han interesado en éste tema y han publicado artículos o ensayos de un interés específico con respecto al reciclado de residuos. Entre los cuales se encontraron en la Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín) unas investigaciones acerca del reciclado del material residual de construcciones llamadas "*El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles*"¹² y la "*Oferta y demanda de recursos minerales secundarios en Medellín*"¹³, las cuales se generaron en asociación con la Universidad de Zurich. En Bogotá se encuentran una serie de tesis desarrolladas en la Universidad de los Andes, como la "*Viabilidad técnica y económica del uso del concreto reciclado como agregado*"¹⁴ enfatizada en la industria de prefabricados, y en la Pontificia Universidad Javeriana, como la investigación titulada el "*Reciclaje de desperdicios de concreto y ladrillo*"¹⁵

En la Universidad Nacional, sede Bogotá, realizaron una investigación, llamada "*Propiedades del concreto reciclado como agregado*". Ésta fue realizada por Álvaro León Rodríguez, donde él fabricó diferentes muestras con tres diseños de mezclas, con una relación de agua-cemento diferente para cada una, en condiciones de curado favorables y desfavorables para el concreto y sus propiedades mecánicas. El ingeniero León logró concluir que el agregado reciclado tiene una capacidad de absorción de agua excesivamente alta, y esto se debe a la presencia de la pasta de cemento adherida al agregado y a la microfisuración producida por la trituración del concreto. También observó que el concreto con agregado reciclado presentó una mayor resistencia a la compresión

¹² BEDOYA, Carlos Mauricio. El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles. Medellín, 2003, p 98. Trabajo de Magíster (Arquitecto Constructor en Hábitats) Universidad Nacional de Medellín. Facultad de Arquitectura. Escuela de Habitats

¹³ OTT, Daniel. Oferta y Demanda de Recursos Minerales Secundarios en Medellín, Colombia. Medellín, 2006, p 11. Tesis de grado (Ingeniería Ambiental) Instituto de Ingeniería Ambiental de ETH Zúrich, Suiza. Facultad de Ingeniería Ambiental

¹⁴ ROMERO MENDOZA, Héctor Leonardo, Viabilidad técnica y económica del uso del concreto reciclado como agregado. Bogotá, 2004, p 141. Tesis de maestría (Ingeniero Civil). Universidad de los Andes, Colombia. Facultad de Ingeniería.

y a la flexión con respecto al concreto convencional; esto se debe a que el nivel de resistencia dependía de la relación agua – cemento y al agregado reciclado que cuenta con una forma y una textura favorable en comparación con el agregado natural extraído del río Tunjuelo. En la grafica 1.2.2 se pueden observar las gráficas obtenidas por Álvaro León donde muestran los resultados de sus ensayos de compresión; y en la gráfica 1.2.3 se pueden observar los resultados obtenidos en los ensayos de flexión.

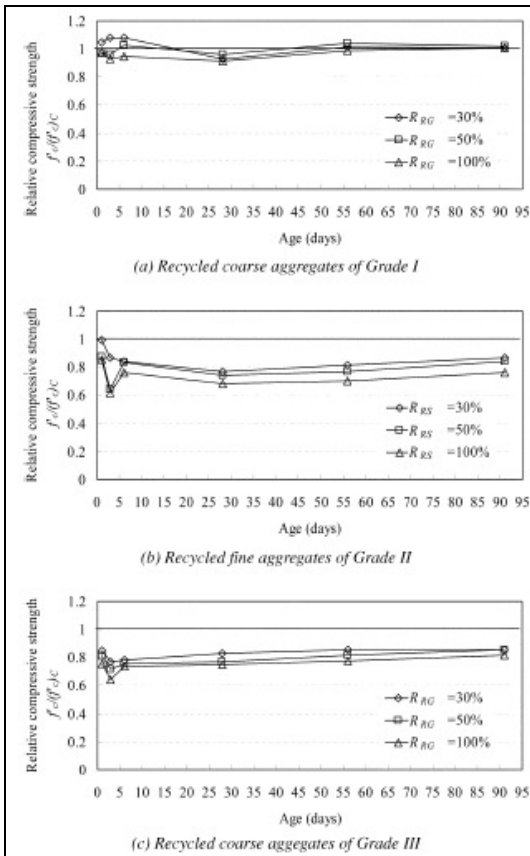


Fig. 5—Relative compressive strength of recycled aggregate concrete against age.

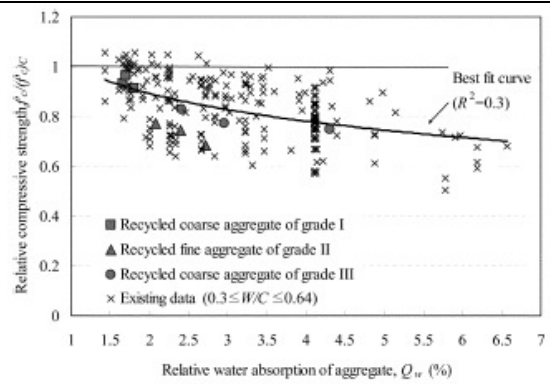


Fig. 6—Influence of Q_w on relative compressive strength at 28 days.

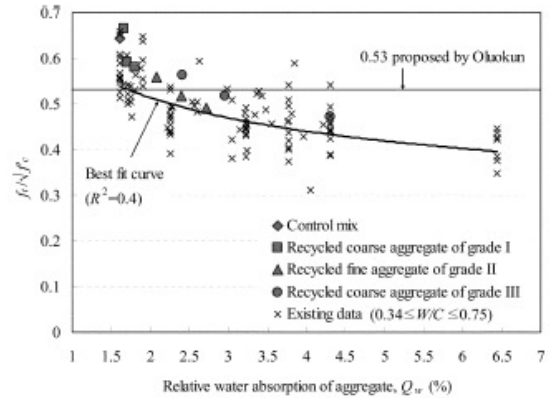
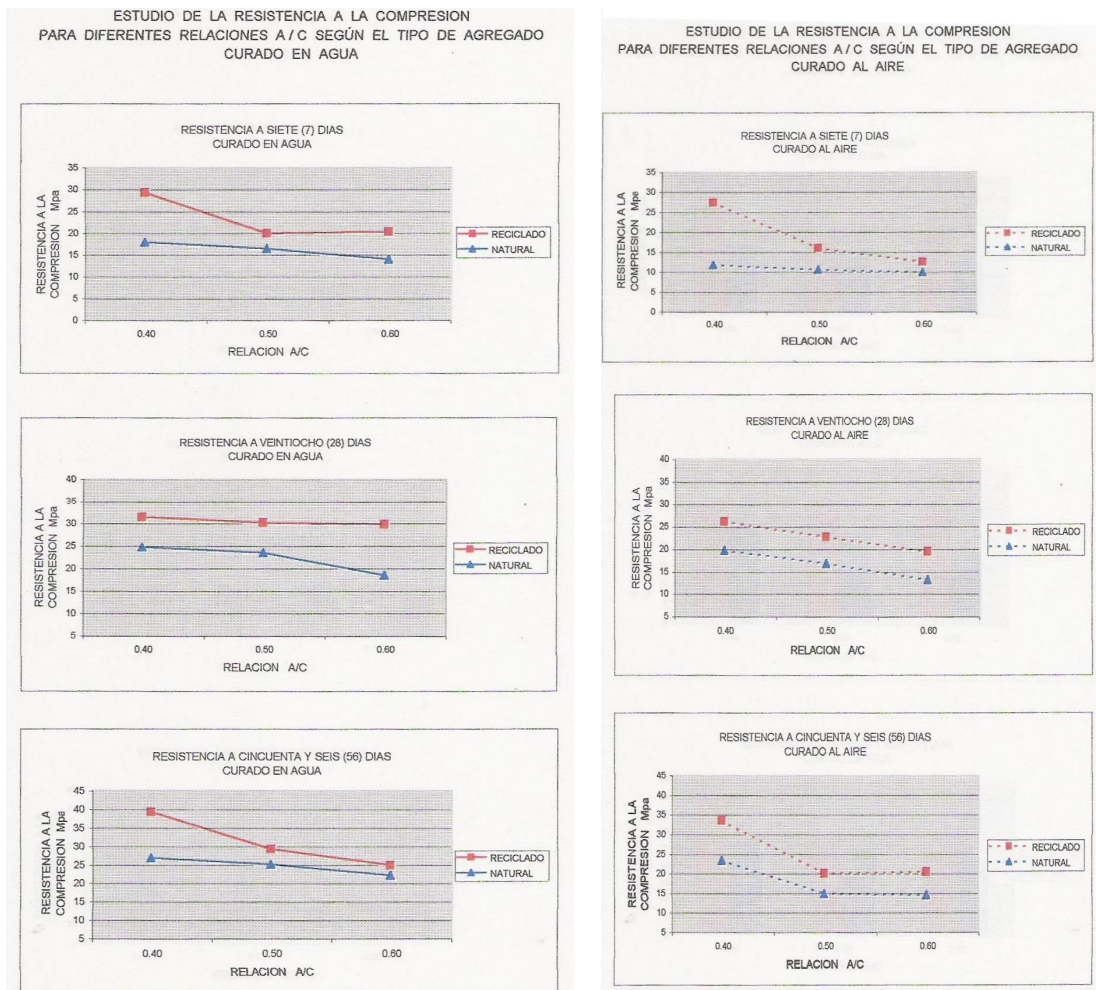


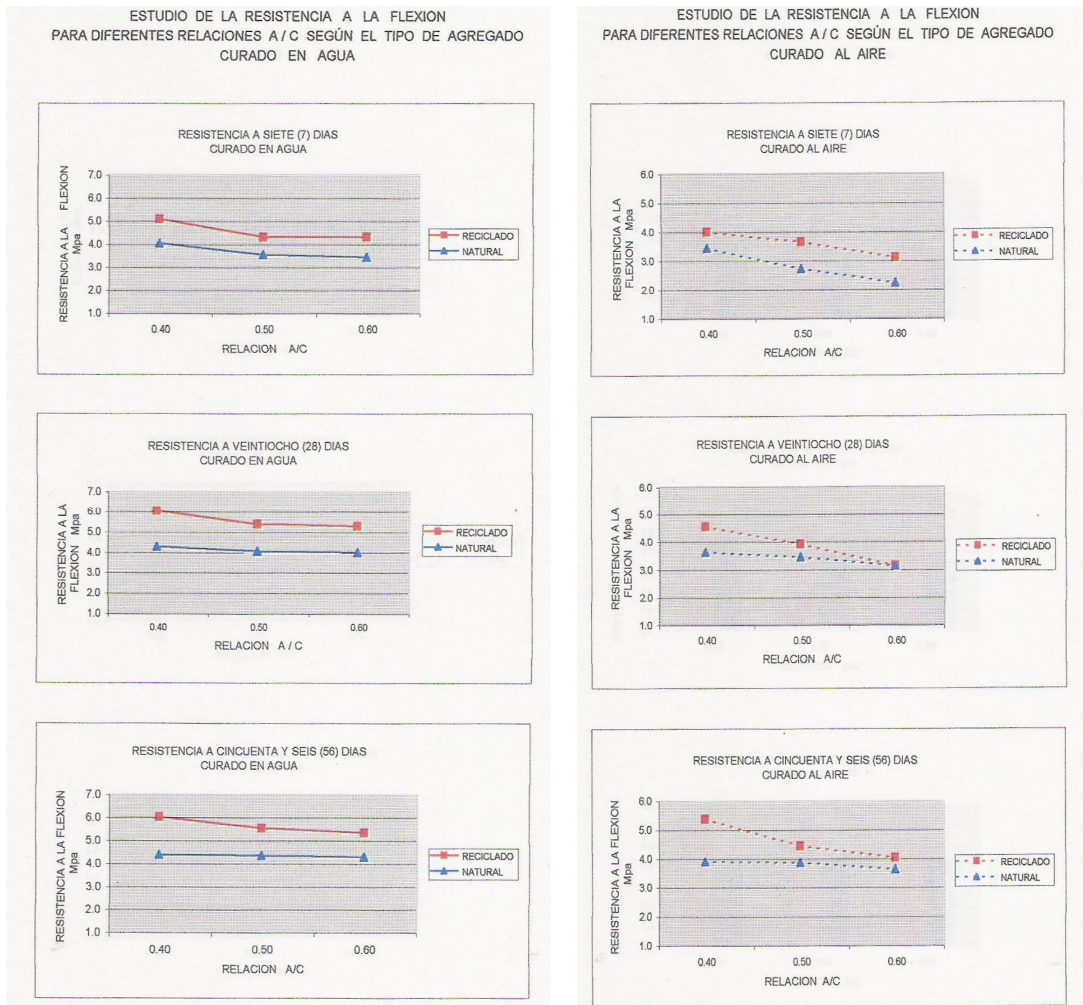
Fig. 7—Influence of Q_w on f_c/f'_c .

Grafica 1.2.1. Gráficas de los resultados de los ensayos de compresión de “The Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties”



Grafica 1.2.2. Gráficas de los resultados de los ensayos de compresión de “Propiedades del concreto reciclado como agregado”.

Noviembre de 2008



Grafica 1.2.3. Gráficas de los resultados de los ensayos de flexión de “Propiedades del concreto reciclado como agregado”.

Otra investigación, que se tomó como respaldo o base para éste estudio, fue la titulada “*Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading*” desarrollada por Jianzhuang Xiao, Jiabin Li y Ch. Zang de nacionalidad china. Estos ingenieros investigadores fabricaron y ensayaron, con la aplicación de una carga uniaxial, varias probetas con diferentes porcentajes de sustitución de agregado reciclado en el contenido del concreto (0%, 30%, 50%, 70% y 100%). Ellos se concentraron en estudiar la influencia que tiene el contenido de agregado sobre la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la tensión máxima y última del concreto. Al analizar los resultados obtenidos, llegaron a concluir que el porcentaje utilizado de agregado reciclado influye considerablemente en la curva esfuerzo-deformación; la resistencia a la compresión decrece con el aumento del contenido de agregado reciclado, el módulo de elasticidad del concreto con agregado reciclado es menor que el

módulo del concreto convencional y éste disminuye con el aumento del contenido de agregado reciclado. En la gráfica 1.2.4 se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos realizados en ésta investigación.

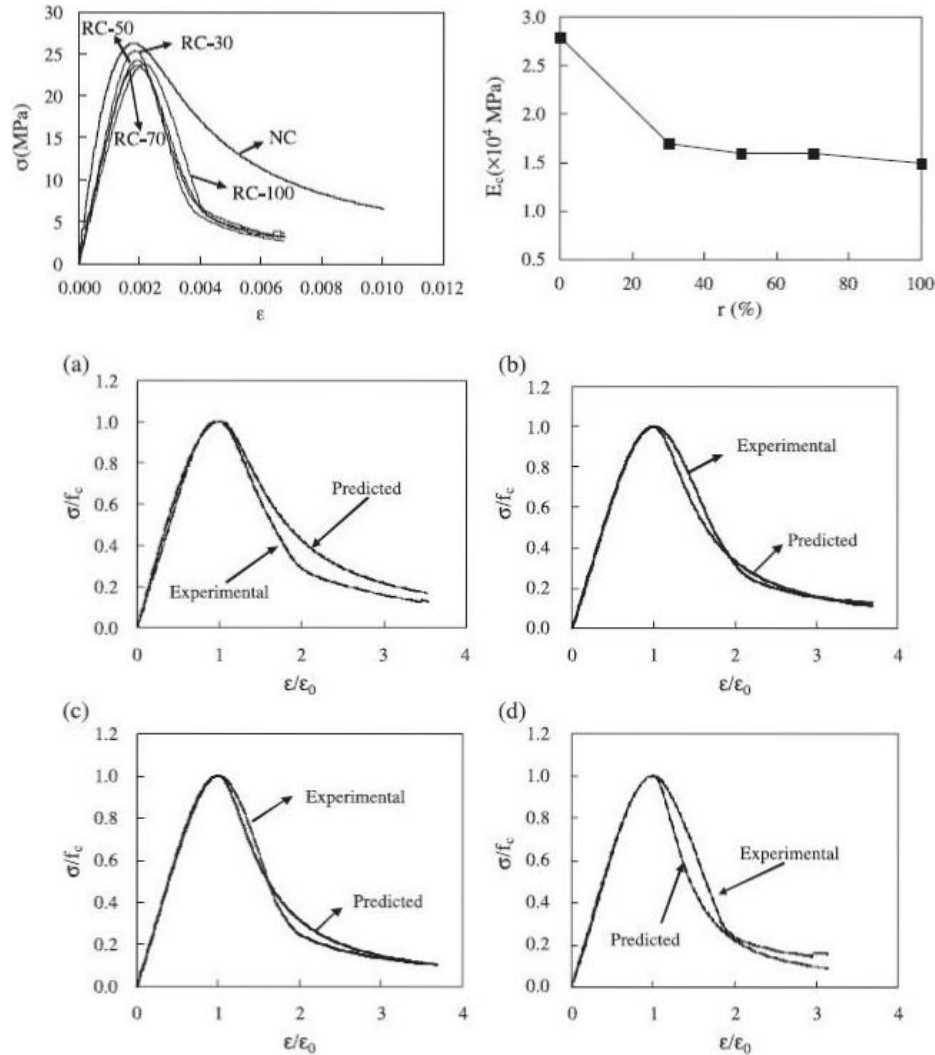


Fig. 9. Comparison of the normalized stress-strain curves. (a) $r=30\%$, (b) $r=50\%$, (c) $r=70\%$, (d) $r=100\%$.

Gráfica 1.2.4. Gráficas de los resultados de los ensayos de compresión de “Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading”

Para concretos donde predominan los esfuerzos de flexión, tales como los empleados en pisos industriales y vías de alto tráfico, es deseable conocer la relación existente entre la resistencia a compresión y el módulo de rotura. A pesar de que tales concretos se especifican por su resistencia a flexión (módulo de

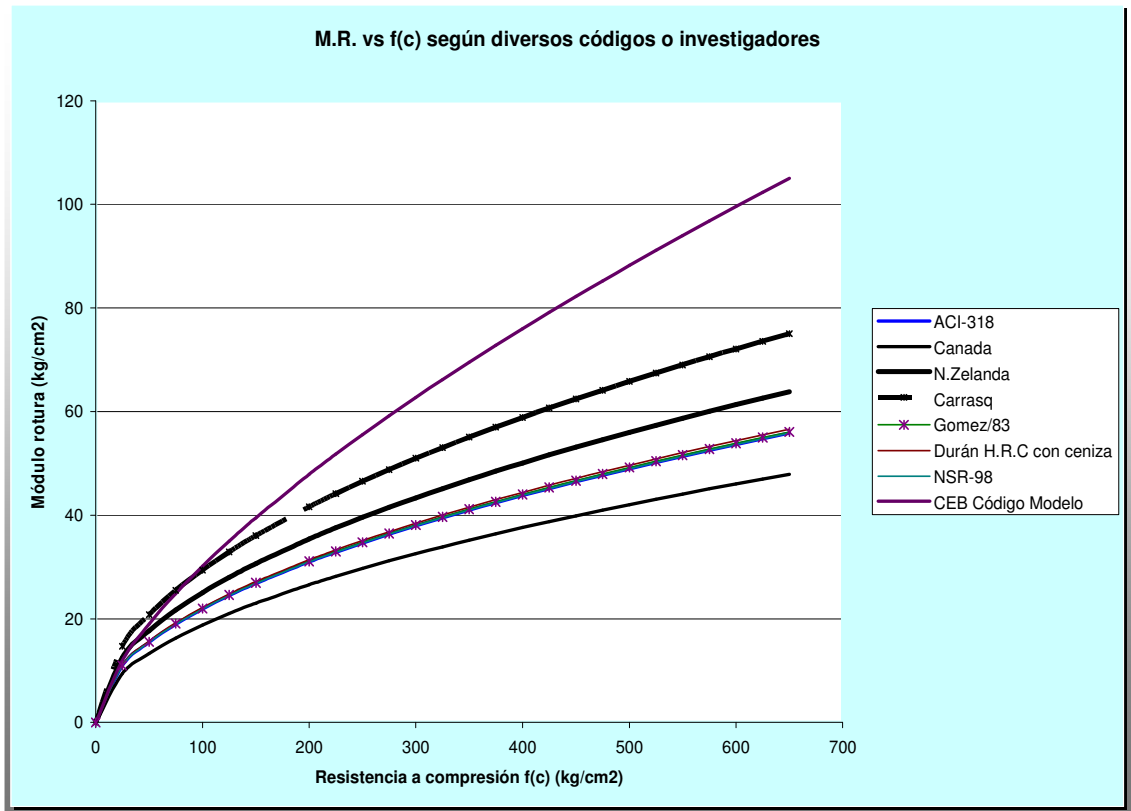
Noviembre de 2008

rotura) en muchas obras resulta más fácil y cómodo hacer ensayos de resistencia a compresión. Esta correlación cobra mayor importancia cuando se trata de evaluación en la obra, ya que en esta resulta sumamente difícil extraer viguetas, siendo necesario apelar a la extracción de núcleos.

Se reconoce que la relación entre resistencia a compresión y el módulo de rotura es una expresión potencial, de la forma

$$M.R. = k\sqrt{f'c} \quad (7)$$

El valor del coeficiente “k” es específico para cada tipo de concreto y debe ser determinado de forma experimental. En general se ha establecido para nuestros concretos que los valores de k sugeridos en otros países no se cumplen, siendo en general menores para nuestro medio. En otras palabras, si se emplean para nuestros concretos los valores de k sugeridos por otros países, se tiende a sobreestimar el valor del módulo de rotura o, lo que es lo mismo, la resistencia a flexión de ese concreto. La variabilidad de la relación entre esas dos resistencias ha sido descrita por Gómez (Evaluación del módulo de rotura del concreto con base en su resistencia a compresión: Variabilidad de su correlación. Pontificia Universidad Javeriana. XV Simposio Ingeniería de Pavimentos Melgar, Marzo de 2005), como se muestra en las siguientes tabla y gráfica:



Gráfica 1.2.5. Relación entre módulo de rotura y resistencia a compresión del concreto, según diversas fuentes

Noviembre de 2008

Fuente	Expresiones		Comentario
	MPa	Kg/cm ²	
ACI 318-95	$0.62 (f'c)^{0.5}$	$1.94 (f'c)^{0.5}$	Para cálculo de deflexiones Concretos de peso unitario 2300-2400 kg/m ³
	$0.50 (f'c)^{0.5}$	$1.57 (f'c)^{0.5}$	Cálculo de resistencia al cortante elementos pretensados
Código Canadiense CSA A 23.3	$0.60 (f'c)^{0.5}$	$1.88 (f'c)^{0.5}$	$20 \leq f'c \leq 80$ MPa
Código Nueva Zelanda	$0.8 (f'c)^{0.5}$	$2.5 (f'c)^{0.5}$	Para módulo de Rotura promedio
	$0.6 (f'c)^{0.5}$	$1.88 (f'c)^{0.5}$	Elementos no pretensados
	$0.8 (f'c)^{0.5}$	$2.5 (f'c)^{0.5}$	Elementos pretensados
Carrasquillo ACI 363R-92	$0.94 (f'c)^{0.5}$	$2.94 (f'c)^{0.5}$	$20 \leq f'c \leq 83$ MPa
I.C.P.C Nota Tec.10	$0.8 (f'c)^{0.5}$	$2.5 (f'c)^{0.5}$	
Gómez Ref.	$0.705 (f'c)^{0.5}$	$2.2 (f'c)^{0.5}$	Agregados ciudad de Bogotá $21 \leq f'c \leq 35$ MPa
Durán Ref.	$0.701 (f'c)^{0.5}$	$2.19 (f'c)^{0.5}$	Concretos alta resistencia Bogotá adicionados con ceniza volante $40 \leq f'c \leq 60$ MPa
NSR-98 C.9.5.2.2.	$0.7 (f'c)^{0.5}$	$2.19 (f'c)^{0.5}$	Para control de deflexiones Ec. (C.9-4*)
Código Modelo CEB-90	$0.5 (f'c)^{2/3}$		

Tabla 1.2.2. Expresiones para la determinación del módulo de Rotura en función de la resistencia a compresión, según diversos códigos o autores

Por ultimo, se muestra la comparación de los resultados para cada uno de los antecedentes investigados para las muestras curadas a veintiocho días.

Tabla de Resultados en Porcentaje						
ENSAYO	THE INFLUENCE OF TYPE AND REPLACEMENT LEVEL OF RECYCLES AGGREGATES CON CONCRETE PROPERTIES		MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLES AGGREGATE CONCRETE UNDER UNIAXIAL LOADING		PROPIEDADES DEL CONCRETO RECICLADO COMO AGREGADO	
	Concreto Testigo	Concreto Reciclado	Concreto Testigo	Concreto Reciclado	Concreto Testigo	Concreto Reciclado
Asentamiento	-	-	100%	80% - 98%	-	-
Resist. Compresión	100%	88% - 94%	100%	60% - 80%	100%	112% - 147%
Resist. Flexion	-	-	100%	63% - 99%	100%	125% - 138%
Mod. Elasticidad	100%	55%	100%	74% - 96%	-	-

Tabla 1.2.3. Resultados en PORCENTAJE para las muestras curadas a 28 días

Noviembre de 2008

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Determinar algunas de las características físicas y mecánicas de tres combinaciones de concreto, empleando concreto reciclado como agregado grueso, comparándolo con un concreto de 21 Mpa de la misma dosificación con agregado convencional.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Determinar la resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad estático de concretos, empleando dos contenidos de concreto reciclado como agregado grueso, comparándolo con uno convencional.
- b) Determinar la manejabilidad y retracción de secado de tres tipos de concreto, utilizando concreto reciclado como agregado grueso, comparándolo con uno convencional.

3. EJECUCIÓN DE ENSAYOS

3.1 IMPLEMENTACIONES

3.1.1 VARIABLES

Las propiedades físicas primarias evaluadas de los agregados fueron:

- Absorción
- Peso Específico Aparente
- Peso Específico Nominal
- Peso Unitario Suelto
- Peso Unitario Apisonado
- Cantidad de material que pasa el tamiz #200
- Contenido de materia orgánica

Para poder evaluar de manera óptima el comportamiento del agregado reciclado con respecto al agregado natural, se diseñaron tres mezclas de concreto diferentes:

- I. Mezcla con 100% de agregado grueso natural
- II. Mezcla con 50% de agregado grueso natural y 50% de agregado grueso reciclado
- III. Mezcla con 100% de agregado grueso reciclado

Las muestras fabricadas, de cada mezcla, fueron curadas de dos maneras:

- En ambiente húmedo y a temperatura ambiente (CURADO)
- Al aire y a temperatura ambiente (NO CURADO)

Se determinó ensayar las muestras a las siguientes edades:

- Siete (7) días
- Veintiocho (28) días

Noviembre de 2008

Las propiedades mecánicas básicas evaluadas fueron:

- Resistencia a la compresión
- Resistencia a la flexión
- Módulo de elasticidad
- Retracción del concreto

3.1.2 CANTIDADES DE MUESTRAS: VIGUETAS Y CILINDROS

Para cada una de las mezclas, se fabricaron veinte (20) cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de largo destinados a los ensayos de resistencia a la compresión y para el ensayo de módulo de elasticidad, 12 viguetas de 7.5 cm de ancho por 7,5 cm de alto por 30 cm de largo destinadas para el ensayo de resistencia a la flexión y 6 vigas de 5 cm de ancho por 7,5 cm de alto por 28 cm de largo destinadas para el ensayo de retracción. A las viguetas de retracción se les introdujo en sus extremos unos tornillos que permitieron encajar la vigueta en el comparador de carátulas para medir cuanto se puede contraer. Ver fotos en el **anexo XIII** (mosaico de del proceso de fundida de viguetas y cilindros – desde foto 7 a foto 11).

3.2 DESCRIPCIÓN Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

3.2.1 AGREGADO GRUESO RECICLADO

Para las mezclas que incluyen agregado grueso reciclado se utilizó un agregado obtenido por la trituración de cilindros de prueba de concreto donados por un laboratorio con una resistencia de 140 y 210 kgf/cm². La trituración de este concreto dió como resultado un agregado grueso de forma angulosa e irregular, con una textura superficial áspera y porosa, y un tamaño máximo de partícula de 19,05 mm (3/4”). Éste material tiene una alta absorción gracias a la antigua pasta de cemento adherido a las partículas y a las microfisuraciones ocasionadas por la trituración. Las propiedades del agregado reciclado grueso son expuestas en la

Tabla 3.2.1.1 y se pueden observar fotos del agregado en el **anexo XII** (mosaico en el proceso de trituración de cilindros – desde foto 1 a foto 6).

Peso Unitario Apisonado	1278,13	kg/m3
Peso Unitario Suelto	1152,08	kg/m3
Peso Especifico Aparente	1,94	gr.
Peso Especifico SSS*	2,09	gr.
Peso Especifico Nominal	2,29	gr.
Absorción	7,74	%
Humedad natural	5.55	%
Contenido Materia Orgánica por colorimetría	1	
Mat. Pasa Tamiz #200	3,52	%

Tabla 3.2.1.1. Propiedades Agregado Grueso Reciclado
*SSS: saturada superficialmente seca

3.2.2 AGREGADO GRUESO NATURAL

El agregado grueso natural es obtenido de la cantera del río Tunjuelo; y éste agregado presenta una forma redonda, una textura superficial lisa y un tamaño máximo de partícula de 19,05 mm (3/4"). Las propiedades del agregado grueso natural son expuestas en la Tabla 3.2.2.1

Peso Unitario Apisonado	1508,95	kg/m3
Peso Unitario Suelto	1438,32	kg/m3
Peso Específico Aparente	2,43	gr.
Peso Específico SSS*	2,51	gr.
Peso Específico Nominal	2,63	gr.
Absorción	1,68	%
Humedad natural	2,38	%
Contenido Materia Orgánica por colorimetría	1	
Mat. Pasa Tamiz #200	3,00	%

Tabla 3.2.1.2. Propiedades Agregado Grueso Natural
*SSS: saturada superficialmente seca¹⁶

¹⁶ Los agregados y sus propiedades fueron obtenidos de la empresa Holcim S.A.

3.2.3 AGREGADO FINO

Para las tres mezclas de concreto se utilizó arena lavada de río obtenida de la cantera del río Tunjuelo. No se utilizó el agregado fino del concreto reciclado ya que éste tiene una absorción muy alta. Las propiedades de la arena son expuestas en la Tabla 3.2.3.1

Peso Unitario Apisonado	1688,75 kg/m ³
Peso Unitario Suelto	1593,28 kg/m ³
Peso Especifico Aparente	2,08 gr.
Peso Especifico SSS*	2,12 gr.
Peso Especifico Nominal	2,16 gr.
Absorción	1,03 %
Humedad natural	6,09 %
Contenido Materia Orgánica por colorimetría	1
Mat. Pasa Tamiz #200	3,00 %

Tabla 3.2.1.3. Propiedades Agregado Grueso Natural

*SSS: saturada superficialmente seca¹⁷

3.2.4 CEMENTO

El cemento utilizado es de tipo Portland I marca Boyacá. Cumple con las normas propiedades físicas (NTC121) y requisitos químicos (NTC321).

3.2.5 ADITIVO: EUCON N – TX40T019

Se utilizó un aditivo plastificante sólo para la mezcla con mayor porcentaje de agregado reciclado con el fin de mejorar su manejabilidad sin afectar la resistencia del concreto ni la relación agua cemento.

El Eucon N reduce el contenido de agua necesaria para concretos y morteros. Es una solución acuosa, concentrada y formulada para mejorar la manejabilidad de concretos y morteros, de acuerdo a las normas ASTM C-494 Tipo A o ICONTEC 1299.

¹⁷ Los agregados y sus propiedades fueron obtenidos de la empresa Holcim S.A.

Los resultados en el concreto al utilizar éste aditivo son:

- La reducción del agua de mezcla, incrementado las resistencias mecánicas.
- Mejora la consistencia, manejabilidad y plasticidad de las mezclas.
- Reduce la permeabilidad.
- Se obtiene mejores acabados.
- Se acelera la resistencia.
- Permite reducir el contenido de agua del concreto hasta un 12%.

Ver **Anexo XI** – Ficha técnica del aditivo Eucon N.

3.3 MEZCLAS Y EQUIPO

3.3.1 DISEÑO DE MEZCLAS

Para éste trabajo el diseño de mezcla no se realizó de manera tradicional sin que se apoyó en la tesis *“Propiedades del concreto reciclado como agregado”* desarrollado por el Ing. Álvaro León Rodríguez, quien trabajó con agregados extraídos del río Tunjuelo con propiedades similares a los de esta tesis, para una resistencia especificada. Todo esto se realizó con el fin de comparar nuestros resultados con los obtenidos por el Ing. León Rodríguez, ya que se utilizaron los mismos materiales que la anteriormente mencionada. Se observaron dos parámetros, el primero que cumpliera con un diseño tradicional para una resistencia de 21 MPA y el segundo que los resultados obtenidos en estos documentos mostraran un buen desempeño del material.

Con la guía del director se adoptó el diseño a utilizar¹⁸ y se realizaron unas modificaciones con respecto al parámetro agua cementante. Adicionalmente, la granulometría del agregado grueso fue ajustada a la establecida por el criterio de Fuller Thompson, con el fin de eliminar la incidencia de diferentes granulometrías

¹⁸LEON RODRIGUEZ, Álvaro. Propiedades del concreto reciclado como agregado. Bogotá DC., 2001, p.94. Trabajo de Magister (Maestría en Construcción) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes – Departamento de Construcciones

en el comportamiento del material y la relación agua – cemento fue determinada como un 55% de la cantidad de cemento.

La granulometría de Fuller-Thompson se basó en el porcentaje retenido de la granulometría realizada para el agregado grueso natural en el laboratorio.

El procedimiento para utilizar Fuller-Thompson fue:

- 1) Realizar la granulometría del agregado grueso natural.
- 2) Acorde con el primer paso, se estableció las cantidades de agregado grueso necesario para cada una de las mezclas, con el fin de saber las cantidades necesarias por cada tamiz de agregado natural y reciclado dependiendo del tipo de mezcla. Para lograr dichas cantidades, se obtuvo el porcentaje retenido por cada tamiz según la granulometría.
- 3) Una vez se tuvieron éstas cantidades, se calculó la cantidad de agregado grueso según el diseño de mezcla y con base en éstos datos se multiplicaron las cantidades necesarias por cada porcentaje obtenido en la granulometría, de ésta forma se logró saber la cantidad de agregado necesario para cada tamiz.

Para poder realizar la mezcla se debía tener el agregado grueso tamizado e identificado según el tamaño de las partículas con el fin de llegar a pesar únicamente la cantidad necesaria de material para la mezcla. Basándose en la experiencia, es mejor tener tres veces más material reciclado que natural, pues al tener en cuenta la idea de Fuller-Thompson la cantidad de material reciclado es mayor, debido a que éste material pasa por un proceso de triturado en el cual se obtiene gran cantidad de material en los tamices 3/8" y N4.

Con el material grueso ya pesado se lleva al trompo, donde se hecha el agregado fino y el cemento pesado según el diseño. Los materiales se mezclan hasta lograr una masa homogénea, una vez adquirido esto se vierte el agua calculada bajo el diseño de mezcla y se deja revolver hasta obtener la textura del concreto.

Los resultados obtenidos de la granulometría se pueden observar en el **Anexo I**, el diseño de mezcla seleccionado fue:

DISEÑO DE MEZCLA GENERAL		
CANTIDADES PARA 1 M3		
Cemento	350	kg/m3
Agregado Fino	755	kg/m3
Agregado Grueso	825	kg/m3
Relación Agua – Cemento	0.55	192.5 lts

Tabla 3.3.1.1. Diseño de mezcla para resistencia de 21 MPA.

Para cada fundida se necesitaba fabricar 20 cilindros correspondientes a dos edades, 12 viguetas para ensayo de flexión y 6 viguetas pequeñas para retracción. Para cada mezcla se necesitó: Se puede observar los cilindros y viguetas en el **Anexo XIII** (mosaico y proceso de fundidas de viguetas y cilindros)

CUADRO RESUMEN TODAS LAS MEZCLAS		
Cemento	22.00	kg
Agregado Fino	47.00	kg
Agregado Grueso	51.00	kg
Relación A/C	0.55	

Tabla 3.3.1.2. Cantidades necesarias para cada tipo de mezcla.

Con base en la cantidad de agregado grueso se determino por medio de la idea de Fuller-Thompson (porcentaje que pasa óptimo = $(d/D)^{0.5} \times 100$) los siguientes resultados:

Granulometría Fuller-Thompson Natural	
TAMIZ	Cantidad (kg)
3/4"	20.99
1/2"	21.77
3/8"	3.09
N°4	0.36

Tabla 3.3.1.3. Cantidades necesarias agregado grueso para tipo de mezcla natural.

Granulometría Fuller-Thompson 50% Reciclado	
TAMIZ	Cantidad (kg)
3/4"	22.52
1/2"	23.30
3/8"	4.62
N°4	0.36

Tabla 3.3.1.4 Cantidades necesarias agregado grueso para tipo de mezcla 50% reciclado.

Tamiz	Agregado Reciclado (Kg)	Agregado Natural (Kg)
3/4"	11.26	11.26
1/2"	11.65	11.65
3/8"	2.31	2.31
N°4	0.18	0.18

Tabla 3.3.1.5. Cantidades específicas agregado grueso reciclado y natural para tipo de mezcla 50% reciclado.

Granulometría Fuller-Thompson 100% Reciclado	
TAMIZ	cantidad (kg)
3/4"	22.52
1/2"	23.51
3/8"	4.62
N°4	0.36

Tabla 3.3.1.6 Cantidades necesarias agregado grueso para tipo de mezcla 100% reciclado.

Para la mezcla de agregado natural, la primera fundida, no se tuvo en cuenta el 100% del material retenido pues se desprecia el porcentaje del fondo, generando una disminución en la mezcla de concreto, por tal motivo la cantidad de cilindros realizados no fueron los esperados.

Éste error se corrigió distribuyendo en las demás fundidas el porcentaje omitido de la primera fundida, se repartió equitativamente en cada tamiz.

3.4 DESCRIPCIÓN DE PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS

3.4.1 TRITURACION DE CONCRETO

Para obtener el agregado grueso de concreto reciclado se procedió a triturar 10 cilindros, con resistencias de 2000 y 3000 psi, desechados del laboratorio Dapcil Ltda. Los cilindros desechados, con dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, fueron demolidos a golpes con un mazo hasta obtener fracciones con tamaños de orden de mitad de ladrillo. Una vez fraccionados los cilindros, se continuó el procedimiento introduciéndolos en la boquilla de una trituradora de mandíbulas pequeñas con motor de gasolina. Previamente a esto, la trituradora debía tener sus mandíbulas graduadas para que al triturar los pedazos de concreto obtuviéramos partículas de agregado con un tamaño máximo de 19.05 mm ($\frac{3}{4}$ ").

Pedazo a pedazo se introduce el concreto en la trituradora, y con ayuda de una bandeja rectangular localizada en la parte inferior de la salida de la boquilla de esta maquina, se fue recolectando el agregado con diferentes tamaños de partículas que iba saliendo y se iba almacenando el material en lonas. En total se acumularon 10 lonas, cada una con 30 kilos de material reciclado. Este procedimiento se puede ver en las fotos expuestas en el **Anexo XII**. (Mosaico del proceso de trituración de cilindros – desde foto 1 a foto 6)

Se debe aclarar que los ensayos descritos a continuación se desarrollaron de la misma manera para todas las muestras de cada una de las tres mezclas (0%, 50% y 100%) de concreto en dos edades de fallas (7 y 28 días).

3.4.2 FABRICACION DE CILINDROS Y VIGAS

Esta tesis se realizó en tres primeras etapas y cada etapa estaba designada para una mezcla de concreto (mezcla de 100% agregado natural, mezcla de 50% de agregado natural y 50% de agregado reciclado, mezcla de 100% agregado reciclado). Cada una de las etapas se realizaba en un periodo de una semana, y ésta consistía en fundir las muestras de concreto necesarias para los ensayos determinados previamente. Se realizó de ésta manera, ya que la cantidad de moldes disponibles eran exactamente los suficientes para obtener 38 muestras por mezcla. Este procedimiento se efectuó cumpliendo la norma NTC 560.

Para lograr fundir las 38 muestras de cada mezcla se debió separar y pesar el agregado, según la granulometría de Fuller-Thompson, para cada cantidad determinada de tamaño de partículas contenida en el agregado grueso, fuera natural o reciclado. Una vez pesadas todas las cantidades se mezclaron de manera manual, por medio de paladas, o con ayuda de un trompo. Primero se reunieron el agregado grueso (reciclado y/o natural), con la arena y el cemento, y se pre mezcló un poco antes de introducir el agua. Al incorporar el agua dentro de nuestra premezcla se debió revolver hasta obtener un concreto homogéneo. Pero para la mezcla que contenía un 100% de agregado grueso reciclado se le tuvo que añadir un aditivo de tipo plastificante llamado Eucon N obsequiado por la compañía Euclid-Toxement, en una dosificación del 0,02% en peso del cemento. Éste se premezcló con la mitad del agua designada de la mezcla y se distribuyó por partes iguales en toda la mezcla de concreto.

Teniendo lista la mezcla se prosiguió a elaborar los cilindros en los moldes especiales de acero, con dimensiones de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. El interior de estos moldes debía estar previamente engrasados para así evitar que el concreto se adhiriera al metal. Es importante no dejar la capa de aceite muy gruesa y que en el fondo del molde no se encuentre ninguna acumulación de aceite, ya que esto puede alterar la mezcla del concreto diseñado.

Para desarrollar una compactación normalizada de la mezcla, el molde se llenó en tres capas de igual altura y cada capa fue apisonada con la parte semiredondeada de una varilla lisa de 16 mm (5/8") de diámetro. Ésta varilla debe apisonar cada capa 25 veces por toda la superficie del concreto, siguiendo una ruta de afuera hacia adentro en forma de espiral. Es importante tener presente que la varilla solo debe atravesar la capa que se está compactando, sin pasar a la capa inferior. Después de utilizar la varilla se suministraban 25 golpes alrededor del molde con un mazo de caucho, esto se debe hacer para cada una de las tres

Noviembre de 2008

capas. Al final de la compactación se completa el llenado del molde con más mezcla y se alisa la superficie con la ayuda de un palustre o la misma varilla utilizada para la compactación. Una vez terminados los cilindros, se llevaron a un cuarto donde realizarían su curado en donde se procuró tener una temperatura de más o menos 23° C.

En los ensayos de flexión se utilizaron vigas de menores dimensiones que las vigas estándares, ya que esto nos ahorraría material. Para desarrollar vigas de dimensiones pequeñas, se construyeron divisiones en madera con que nos permitieran obtener 4 vigas de de 7,5 cm de ancho por 7,5 cm de alto por 30 cm de largo por cada molde de acero con dimensiones de 15 cm de ancho por 15 cm de alto por 60 cm de largo. El proceso de fundición de estas vigas es similar al proceso de los cilindros. Se colocaron las divisiones de madera adentro de los moldes antes de introducir la mezcla de concreto; las divisiones y los moldes deben de estar previamente engrasados. Se procuró que la las divisiones estén bien ajustadas dentro de los moldes, ya que sino las vigas pequeñas pueden obtener una forma no deseada. Se introdujo la mezcla fresca de concreto en dos capas para cada una de las vigas pequeñas, y cada capa fue apisonada con la parte semiredondeada de una varilla lisa de 9.6 mm de diámetro, procurando que la varilla no se pasara a la capa inferior. Se suministraron 10 golpes al molde contra el piso, en donde se levanta a una altura de 5 cm el molde y se deja caer contra el piso en cada extremo a lo largo del molde. También una vez terminado este proceso, las muestras se llevaron a un cuarto con temperatura de más o menos 23°C para realizar su curado. Éste procedimiento se puede ver en las fotos expuestas en el **Anexo XIII** (Mosaico del proceso de trituración de cilindros – desde foto 7 a foto 11).

3.4.3 PROCESO DE DESENCOFRADO

Se espera un tiempo de 3 días (más o menos 72 horas) para desencofrar los cilindros y las vigas designadas al ensayo de flexión, ya que ha ésta edad las muestras han alcanzado una dureza suficiente para no modificar su forma sin los moldes. Enseguida se tomaron las dimensiones de las muestras y se almacenaron estos datos.

Para las vigas designadas al ensayo de retracción, el desencofrado se tuvo que hacer 2 días (más o menos 48) después de ser fundidos ya que ha ésta edad

Noviembre de 2008

alcanzan una dureza mínima que nos permitió trabajar sin peligro de que éstas se fracturaran durante el proceso del ensayo.

Al terminar el desencofrado los moldes deben ser limpiados del concreto restante lo más pronto posible para así prevenir que este termine su fraguado y se adhiera por completo y de manera permanente al molde, y consecuentemente dañándolo.

3.4.4 PROCESO DE CURADO: AL AIRE LIBRE Y EN AMBIENTE HUMEDO

De cada grupo de 38 muestras se destinaron la mitad para cumplir su curado al aire libre y a temperatura ambiente y la otra mitad fueron destinados para cumplir su curado en un ambiente húmedo y a temperatura ambiente, tratando así de lograr un curado parecido al que se realiza en obra. El curado en ambiente húmedo se logró humedeciendo cada unas de las muestras e introduciéndolas en bolsas plásticas en donde se procuró dejar toda burbuja de aire y exceso de agua por fuera de la bolsa. Se humedecieron las bolsas antes de introducir las muestras, así éstas se adherían mejor al concreto ayudando a retirar todas las burbujas de aire. Previniendo que la bolsa adherida al concreto se rompiera y se escapara algo de agua se recubrió con una segunda bolsa, así tendríamos doble seguridad para prevenir el escape de agua. Éstas fueron selladas por medio de un alambre metálico recubierto de plástico, el mismo alambre que se utiliza en el sellado de pan para que éste no se endurezca por la filtración del aire. Una vez que las muestras estaban humedecidas, cubiertas y selladas, se llevaron a un lugar bajo techo en el patio de mezclas y cada día de por medio se retiraban las muestras de su lugar de curado, se les quitaban las bolsas y se volvían a humedecer. En éste mismo lugar fueron ubicadas las muestras curadas al aire libre.

Las vigas para el ensayo de retracción fueron curadas con el mismo método mencionado anteriormente (tanto curado al aire libre como curado en ambiente húmedo), con la diferencia que éstas fueron localizadas dentro del laboratorio para evitar transportarlas desde el patio de mezclas hasta su lugar de ensayo todos los días. Estas vigas, una vez ensayadas, volvían a ser humedecidas e insertadas en las bolsas para continuar con su curado en un ambiente húmedo hasta el día siguiente que se debía repetir el ensayo.

3.4.5 ENSAYOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO

3.4.5.1 PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN

Para obtener el valor del peso específico de un material, se tomó una muestra de más o menos 5 kg, se lavó para quitarle todas las partículas finas y polvo que contenga y se llevó al horno para eliminar toda el agua del lavado. Una vez logrado esto, se sacó el recipiente con la muestra y se dejó enfriar hasta obtener una temperatura ambiente. A continuación se pesó la muestra seca y se archivó éste valor. Después se saturó el material sumergiéndolo en agua por 24 horas. Pasado el tiempo, se sacó el material sumergido y se eliminó la capa superficial de agua que queda por encima de las partículas con un trapo. Éste estado de la piedra se identifica como saturado superficialmente seco (SSS) y se debe archivar el peso del material en éste estado. Se introdujo el material SSS en una canastilla hecha de una malla con apertura de 5mm (malla #4). Se pesa la canastilla, con el material, sumergiéndola en un recipiente lleno de agua por medio de una balanza que permite enganchar la canastilla e introducirla en el recipiente. Se determinó el peso en aire y el peso en el agua. Finalmente se puso a secar el agregado y se volvió a pesar. Éste procedimiento y sus respectivos cálculos de peso específico aparente, peso específico nominal y el porcentaje de absorción están establecidos por la norma Peso Especifico y Absorción de Agregados Gruesos (INV 223).

3.4.5.2 PESO UNITARIO

Existen varios pesos unitarios que se pueden determinar, dos de ellos son el peso unitario suelto y el peso unitario apisonado. Para determinar cualquiera de estos se debe utilizar un recipiente metálico, cilíndrico, preferiblemente provistos de agarraderas, a prueba de agua, con el fondo y el borde superior pulido, plano y suficientemente rígido, con volumen y peso conocido.

Para obtener el peso unitario suelto se llenó el recipiente, anteriormente mencionado, por medio de paladas a una altura de más o menos 50 mm (2"). Después de llenarlo se enrazó y se pesó.

Para obtener el peso unitario apisonado se llenó el recipiente en tres capas de igual volumen. Cada una de estas capas se enrazó con la mano y se apisonó con 25 golpes de varilla, distribuidos uniformemente en cada capa,

utilizando el extremo semiesférico de la varilla. Una vez que se haya enraizado el cilindro, se prosiguió a obtener el peso del material dentro del recipiente.

Este procedimiento y sus respectivos cálculos de peso unitario apisonado y suelto están establecidos por la norma Peso Unitario y Porcentaje de Vacíos de los Agregados (INV 217).

3.4.5.3 MATERIAL QUE PASA EL TAMIZ #200

Se sabe que el material que pasa el tamiz #200 no es un agregado que se quiere utilizar en la mezcla de un concreto, ya que éste podría afectar significativamente su resistencia. Para obtener la cantidad de éste material indeseado que se encuentra adherido a los agregados útiles para una mezcla, se introdujo la muestra en un recipiente, se tomó el peso inicial del agregado con material fino, se vertió agua en la muestra y se lavó. Esto se debe repetir hasta que el agua desechada del lavado salga limpia y transparente. Una vez alcanzado esto, se introdujo el material en el tamiz #200 y con suaves movimientos al agregado se logró desprender y desechar el material indeseado que no se logró retirar en la primera lavada. Después se llevó la muestra al horno, se eliminó el agua absorbida por el agregado, se retiró del horno y se dejó enfriar hasta una temperatura ambiente. Éste procedimiento y sus respectivos cálculos están establecidos por la norma Material que pasa el Tamiz de 75 μm para los Agregados (INV 214).

3.4.5.4 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA POR COLORIMETRIA

Se separó una cierta cantidad de material utilizando el tamiz #4. El material que pasó éste tamiz es colocado en un recipiente de vidrio donde se lograron ver los resultados de éste ensayo. Ya introducido el material, se le agregó un reactivo, que normalmente se utiliza una solución de hidróxido de sodio, hasta que el volumen ocupado por el reactivo mas el agregado llegó a ser el doble del volumen del material insertado en el recipiente de vidrio. Se tapó el recipiente, se agitó vigorosamente y se dejó reposar el material hasta que se asiente o mínimo 24 horas. Una vez terminado el proceso, se comparó el color que adquirió el reactivo con una tabla colorimétrica por las normas. Éste procedimiento está establecido

en la norma Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas usadas en la preparación de Morteros o Concretos (INV 212).

3.4.6 ENSAYO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO

3.4.6.1 ENSAYO DE ASENTAMIENTO

Una vez terminada la mezcla de concreto, se prosiguió a tomar el cono de Abrams y la varilla de punta redonda con diámetro de 16 mm (5/8") para así poder realizar el ensayo de asentamiento. Primero se rellenó el cono de Abrams en tres capas del mismo volumen. A cada una de las capas se le proporcionó 25 apisonadas para así compactar el material. Una vez terminado esto, se enrasó el cono y se desmoldó. Después se colocó el cono de Abrams junto a la mezcla y se situó la varilla de punta semiredondeada en la parte superior del cono. Con un flexómetro se midió la distancia que había entre la varilla y la parte superior de la mezcla, esto se realizó en el punto central de la muestra. Éste procedimiento está establecido por la norma Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto (NTC 396), establecidas por el ICONTEC.

3.4.6.2 ENSAYO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Éste ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a un cilindro, a una velocidad de carga constante, hasta que éste presente una falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo entre la sección transversal del cilindro.

Para realizar éste ensayo se retiraron los cilindros de su lugar de curado y se llevaron al laboratorio donde se encuentra la maquina universal. Ahí se les retiraron las bolsas designadas para desarrollar el curado, y se prosiguió a ensayar los cilindros. Cada uno de los cilindros fueron denominados con un numero del 1 al 16, seguido de dos siglas CH (compresión curado húmedo), CA (compresión curado aire), MH (módulo de elasticidad curado húmedo), o MA (módulo de elasticidad curado aire).

Para colocar la muestra en la maquina de ensayo, se posicionó el cilindro entre el bloque de apoyo inferior y el bloque de carga superior, procurando que el eje del

cilindro quedara alineado con el centro del bloque de carga superior. Al realizar el ensayo, se intentó que la velocidad de carga fuera continua y ésta carga se aplicó hasta que la muestra fallara; después se registró la carga máxima a la cual falló la muestra. Éste procedimiento se debe seguir para cada uno de los cilindros y es obtenido de la norma INV 410 o la Ensayo de la compresión a cilindros normales para concreto NTC 673.

3.4.6.3 ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD

Éste ensayo consiste en determinar el módulo de Young (módulo de elasticidad) de cilindros de concreto cuando estos están bajo esfuerzos de compresión longitudinal.

Para introducir una muestra en la maquina de ensayo se colocó el cilindro, con el equipo de medición de deformación bien acoplado, en el bloque de apoyo inferior. Después, cuidadosamente, se alineó el eje del cilindro con el centro del bloque superior de apoyo. A medida que el bloque esférico de asentamiento se lleva lentamente a asentarse sobre la muestra, se rota la parte móvil del bloque suavemente a mano hasta que se obtenga un apoyo uniforme. Se tomó una esfuerzo del 40% del promedio de las cargas de falla obtenidos en los Ensayo de Resistencia a la Compresión del mismo diseño de mezcla y de la misma fecha de falla (7 o 28 días). Al cargar los cilindros se tomaron las medidas dadas por los deformímetros acoplados a las muestras y se calculó el módulo de elasticidad. Éste procedimiento y sus cálculos se efectuaron según la norma Método de ensayo para determinar el Módulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en concreto a compresión NTC 4025.

3.4.6.4 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Éste ensayo consiste en determinar la resistencia a la flexión del concreto por medio del uso de una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de su luz.

Para realizar éste ensayo se retiraron las vigas de su lugar de curado y se llevaron al laboratorio donde se encuentra la maquina universal. Ahí se les retiraron las bolsas designadas para desarrollar el curado, y se prosiguió a ensayar las vigas. Cada uno de los vigas fueron denominados con un numero del

1 al 6, seguido de dos siglas FH (flexión curado húmedo) o FA (compresión curado aire).

Para localizar las vigas en los apoyo, se dividió la longitud de la viga en tres partes iguales, se marcaron éstas longitudes en una de las caras de la viga para así poder colocar correctamente los bloques de apoyo en los puntos $L/3$ desde los extremos de la viga hacia el centro. Teniendo correctamente localizadas las vigas, se prosiguió a colocar una carga puntual en el centro de la viga auxiliar que luego la distribuía mediante una viga auxiliar a los tercios de la vigueta a ensayar de manera constante hasta llegar a la falla. Éste procedimiento y sus cálculos se efectuaron según la norma INV 414 o la Ensayo de la flexión del hormigón usando la viga simple con carga en los tercios (NTC 2871).

3.4.6.5 ENSAYO DE RETRACCION

Éste ensayo consiste en determinar la variación de longitud (expansión o retracción) del concreto durante su fraguado.

Para realizar éste ensayo se retiraron las viguetas de su ambiente de curado y se llevaron a practicarles el ensayo. Consecutivamente se verificó si los tornillos estaban bien ajustados. Se midió la longitud entre los tornillos y se denominó longitud efectiva. También se tomó una lectura de referencia en el deformímetro con una varilla de referencia para que siempre se comience con el mismo dato cada vez que se va realizar el ensayo. Se continúa el proceso colocando el tornillo de uno de los extremos en el apoyo inferior del aparato y el otro tornillo se ubicó en el extremo del deformímetro para tomar una lectura de la contracción o de la expansión. Se giró la muestra hasta que el deformímetro suministre la mínima lectura, se realizó una marca para recordar en que cara nos dio la menor lectura y se archivó el dato. Una vez terminado el ensayo, se debe devolver las muestras a su estado de curado. Se debe tener presente que los datos pueden ser alterados si el comparador de caratulas es manipulado y modificado por otras personas en tiempos externos de los ensayos realizados.

Éste ensayo se realizó para 4 edades diferentes: a las 48 horas, 72 horas, 96 horas y 144 horas. El procedimiento para medir la retracción o expansión del concreto fue basado en la norma Expansión del cemento en el autoclave (INV 304-07).

4. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos se dividen en tres etapas. Dos etapas de tres grupos cada una y una etapa con los resultados de retracción, la primera etapa son los resultados obtenidos para siete días y la segunda a veinte ocho días.

Con relación a los grupos, el primero contiene los resultados del ensayo a compresión, en el cual se fallaron entre tres a cinco cilindros de 10 cm x 20 cm para cada una de las mezclas, dentro de estos cilindros se toman los valores de compresión obtenidos del ensayo de módulo de elasticidad.

Para obtener la resistencia se falló el cilindro en la máquina universal una vez tomados las dimensiones y el peso del mismo, para hallar el esfuerzo resistente se dividió la capacidad máxima del cilindro en el área de éste.

El segundo grupo es: los ensayos a flexión el cual se realizó con seis viguetas de 5 cm x 5 cm x 30cm para cada tipo de mezcla; de éstas seis viguetas se dividieron en dos grupos, las curadas y no curadas respectivamente, con el fin de mostrar las diferencias entre éstas.

Para hallar el módulo de rotura se aplicó la fórmula de la flexión $\sigma = M \cdot C / I$ que en últimas implica que se multiplicó la carga última de la vigueta, arrojada por la máquina universal, por su largo y éste resultado se dividió en la multiplicación del ancho por el cuadrado de la altura.

Por último, se muestran los ensayos de módulo de elasticidad, relacionando las muestras curadas y no curadas; para éste ensayo se tomaron cuatro cilindros para cada una de las mezclas.

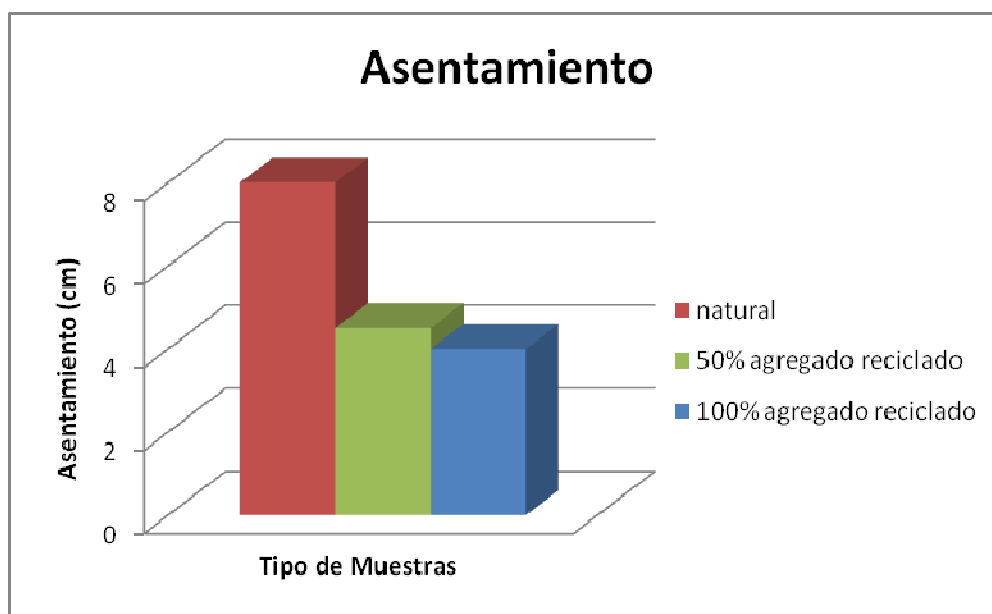
La obtención del módulo se obtiene luego del proceso de cargar y descargar de manera constante el cilindro generando un desplazamiento, sin embargo para hallar dicha propiedad se debe dividir el esfuerzo entre la deformación.

4.1 RESULTADOS DE ASENTAMIENTO

Como se puede ver en la tabla 4.1.1, obtuvimos un asentamiento óptimo en la mezcla con un contenido del 100 % de agregado natural, mientras que en las otras dos mezclas, que tenían agregado reciclado en su composición, obtuvieron más o menos mitad del asentamiento que tuvo la mezcla con todo su contenido en agregado natural.

Mezcla	Asentamiento (cm)
Natural (0%, testigo)	8
50% agregado natural y 50% agregado reciclado	4.5
100% agregado reciclado con mejora de aditivo Eucon N	4

Tabla 4.1.1. Registros de asentamiento



Gráfica 4.1.1. Registros de asentamiento

El asentamiento de la mezcla natural fue de 8 cm, las mezclas con agregado reciclado lograron un menor valor que la testigo, para 50% reciclado se obtuvo 4.5 cm y para 100% agregado reciclado se logró 4 cm con ayuda de un aditivo,

Noviembre de 2008

debido a que la absorción de este agregado es mucho mayor pues gran cantidad de agua de la mezcla fue absorbida por el agregado disminuyendo la manejabilidad y por ende la compactación de la mezcla con alto contenido de agregado.

Se empleó un aditivo plastificante a la mezcla de 100% agregado reciclado llamado Eucon N, ya que los resultados obtenidos en la mezcla de 50% reciclado mostró una disminución del 50% en el asentamiento lo que dificultaría la fundida de los cilindros, viguetas y mini-viguetas de la mezcla de 100% reciclado. Por tal razón, se optó por utilizar el aditivo a la mezcla con mayor cantidad de agregado reciclado con una dosificación del 0.02% de la cantidad de cemento con el fin de mejorar su manejabilidad y no tener problemas de compactación, de lo contrario hubiera sido muy complicado fundir y lo más probable es que se produjera una gran cantidad de vacíos en los cilindros o viguetas, debido a que el agua de ésta mezcla se evaporaría y absorbería rápidamente y no permitiría la compactación adecuada.

En nuestros resultados podemos ver que el asentamiento del concreto con agregado reciclado disminuyó casi en un 50% comparado con el asentamiento del testigo, esto se ve afectado por la alta absorción del agregado reciclado. Aunque no disminuyó mucho con el incremento de agregado reciclado (de un 50% a un 100%), lo que concuerda con lo expuesto por la investigación de los coreanos Yang y Chung¹⁹.

-
- ¹⁹ KEUN-HYEOK Yang, HEON-SOO Chung, and ASHRAF F. Ashour. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties ACI Materials Journal V 105, No. 3. pag. 292 Jun 2008.

4.2 RESULTADOS A 7 DIAS DE EDAD

4.2.1 ETAPA I, GRUPO 1

Ensayo a Compresión para cilindros

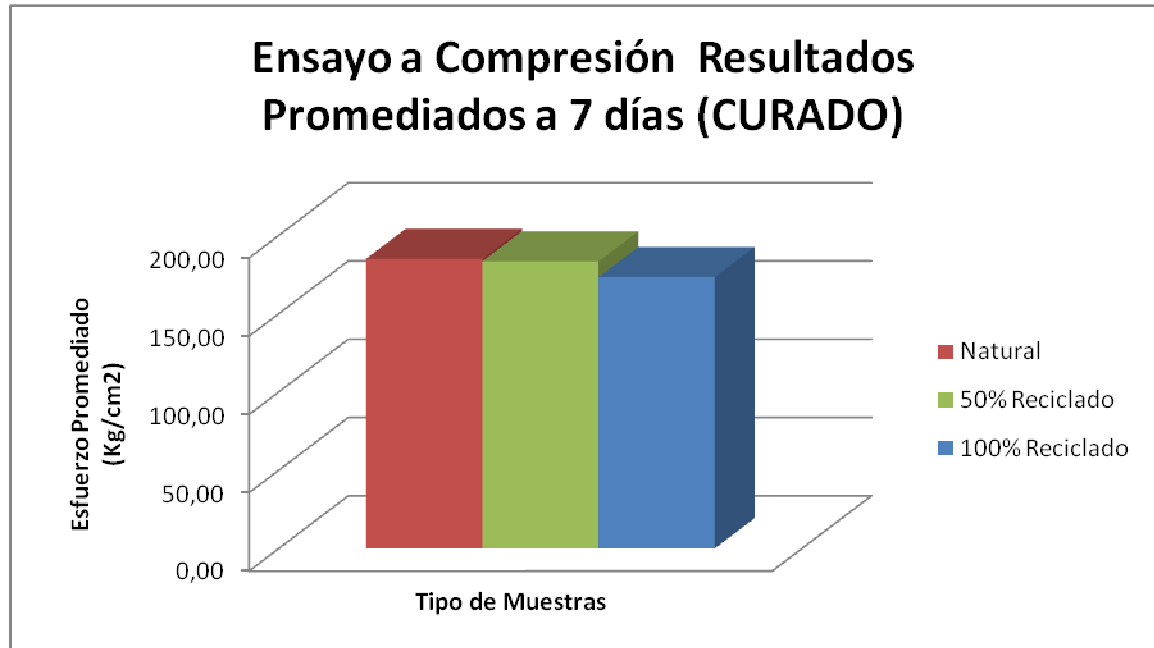
El ensayo a compresión se realizó bajo el procedimiento de la norma técnica colombiana (NTC 673 - Ensayo de la compresión a cilindros normales para concreto), debido a que aún no existe ninguna norma a nivel nacional que involucre el agregado reciclado.

Por motivos prácticos los resultados mostrados a continuación son los promedios de cada mezcla, excluyendo algunos de los datos por criterio del rango máximo. Los datos para cada uno de los cilindros, así como las medidas y resultados individuales de cada mezcla, se pueden observar detalladamente en el anexo Etapa I, grupo1.

Promedio Esfuerzo (kg/cm²)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural (testigo)	185.04	169.29
50% Reciclado	183.38	177.61
100% Reciclado	173.31	148.87

Tabla 4.2.1.1. Promedio de todas las mezclas para el ensayo a compresión a siete días.

Como se observa en la tabla, se relacionan las tres mezclas con los resultados promediados curados y no curados. A continuación se muestra en la gráfica 4.2.1.1 los resultados curados obtenidos en cilindros para cada una de las mezclas falladas a siete días.

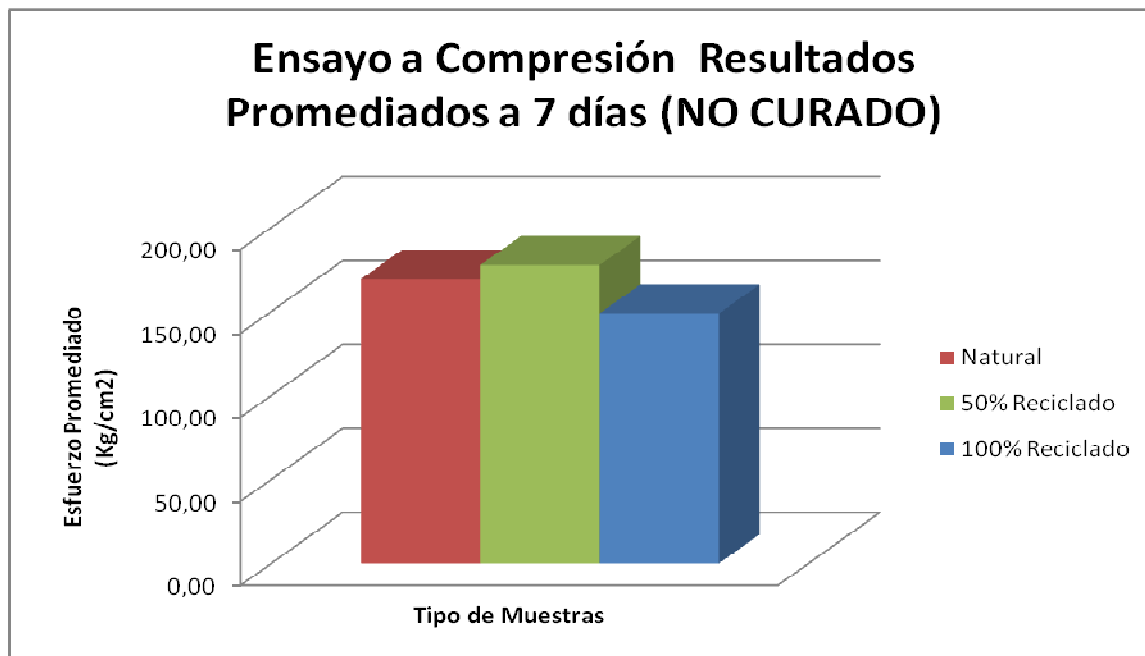


Gráfica 4.2.1.1 Ensayo a compresión para todas las mezclas curadas a los siete días.

El comportamiento de las tres mezclas se manifiesta bajo los siguientes resultados: para la natural 185.04 kg/cm^2 correspondiente a la mayor resistencia equivalente al 100%, todos los resultados se compararán con ésta mezcla (testigo), en segundo lugar se encuentra 50% reciclado con una resistencia de 183.38 kg/cm^2 correspondiente al 99.11% de la testigo mientras que para 100% reciclado se obtuvo 173.31 kg/cm^2 (93.66%) de la testigo.

Una de las posibles condiciones que pueden alterar estos resultados es la manera de curar, debido a que la norma precisa una temperatura de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ en un cuarto con una humedad adecuada para todas las muestras. El proceso de curado se realizó cubriendo cada cilindro en dos bolsas plásticas totalmente ajustadas al mismo y posteriormente fueron selladas con un alambre. Estas muestras estuvieron expuestas al aire libre durante el tiempo especificado para cada etapa.

En la gráfica 4.2.1.2 se muestran los resultados a compresión para las mezclas no curadas.



Gráfica 4.2.1.2. Ensayo a compresión para todas las mezclas no curadas a los siete días.

Para las muestras no curadas, se obtuvo un mejor comportamiento de la mezcla 50% agregado reciclado con una resistencia de 177.61 kg/cm² (104.92%), le sigue 169.29 kg/cm² (100%) correspondiente a la mezcla natural y 148.87 kg/cm² (87.94%) para 100% reciclado, generando así una diferencia alrededor de un 12% con la natural y cerca del 17% de la mayor resistencia.

Todos los cilindros denominados no curado estuvieron expuestos a los diferentes cambios de temperatura durante el día y la noche, aunque los cambios más bruscos se presentan en la madrugada debido al frío intenso. Sin embargo, ninguno de los cilindros fue expuesto al agua lluvia ya que estos estaban bajo techo.

El resultado de cada mezcla en porcentaje se observa en la tabla 4.2.1.2., de esta manera se obtiene:

Promedio Esfuerzo para cada mezcla (%)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural (testigo)	100.00	100.00
50% Reciclado	99.11	104.92
100% Reciclado	93.66	87.94

Tabla 4.2.1.2. Promedio en porcentaje para cilindros fallados a compresión a los siete día

4.2.2 ETAPA 1, GRUPO 2

Ensayo a Flexión para viguetas

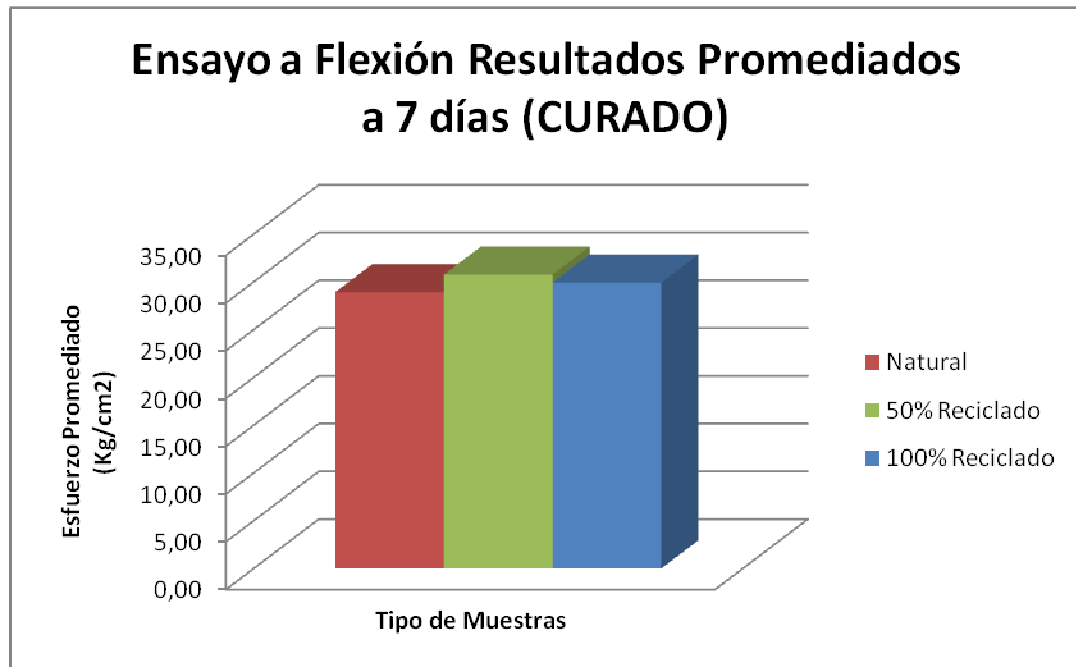
Para las viguetas se siguió el mismo procedimiento de los cilindros, respecto al curado y no curado de los mismos, con la diferencia que estos en el momento de fallar se ubicaron de manera que los puntos de apoyo quedaran en los tercios de estas, evitando el apoyo en el centro de la muestra donde los esfuerzos son mayores.

Los resultados promediados son mostrados a continuación para cada una de las mezclas, curados y no curados, mientras que los resultados individuales de cada vigueta se puede observar en el anexo Etapa I, Grupo2 para cada una de las mezclas.

Promedio Módulo de Rotura (kg/cm²)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural (testigo)	28.92	25.03
50% Reciclado	30.77	29.65
100% Reciclado	29.93	25.06

Tabla 4.2.2.1 Promedio de todas las mezclas para el ensayo a flexión a siete días.

De esta forma, se grafican estos valores obtenidos para cada una de las mezclas curadas, con el fin de comparar la resistencia de cada una de éstas.

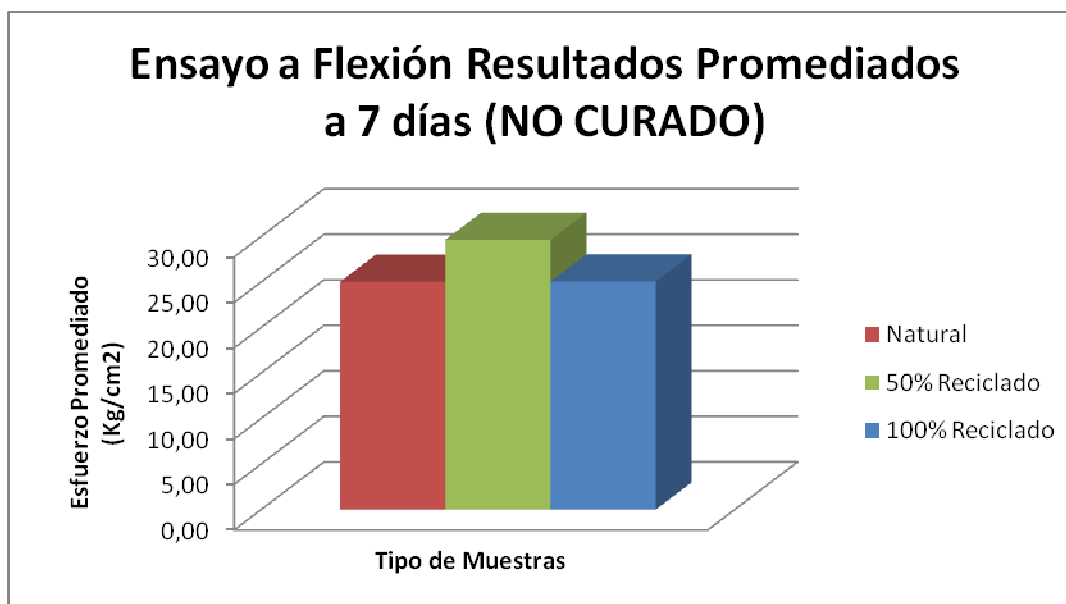


Gráfica 4.2.2.1. Ensayo a flexión para todas las mezclas curadas a los siete días.

Se puede visualizar en la gráfica que la mejor resistencia se obtuvo para la mezcla que contiene ambos agregados, dicha resistencia fue de 30.77 kg/cm^2 correspondiente a 106.37% de la mezcla testigo, seguida por 100% reciclado con un valor de 29.93 kg/cm^2 (103.49%) y por último la natural con un valor 28.92 kg/cm^2 (100%).

Con relación al ensayo de flexión para las mezclas no curadas la gráfica muestra un patrón similar al obtenido en las viguetas curadas, a diferencia que en estas, 100% reciclado se ve más afectada que en la anterior. Los resultados de módulo de rotura para 50% reciclado fue 29.65 kg/cm^2 (118.46%), para 100% reciclado fue 25.06 kg/cm^2 (100.13%) y para natural fue 25.03 kg/cm^2 (100%).

El comportamiento obtenidos para 50% agregado reciclado fue sin duda el mejor en las muestras curadas y no curadas, entre estas la diferencia es de sólo 1.85 kg/cm^2 y 4.59 kg/cm^2 respectivamente; con respecto a 100% reciclado la diferencia es de 1.01 kg/cm^2 para las muestras curadas y 0.03 kg/cm^2 para las no curadas, las expectativas son buenas aunque faltaría revisar la segunda etapa a los 28 días.



Gráfica 4.2.2.2. Ensayo a flexión para todas las mezclas no curadas a los siete días.

Al analizar estos resultados con la falla generada en las viguetas, se puede inferir que el agregado reciclado tuvo una mejor adherencia que el natural, puesto que al revisar el corte generado en la falla se visualizó cómo el agregado reciclado se adhiere al concreto, cumpliendo así con una excelente adherencia entre el concreto y dicho agregado, mientras que en las muestras realizadas con agregado natural, tienen una menor adherencia con el concreto y vemos que la falla se genera por la superficie del agregado. Esto se puede observar en los mosaicos de fotos desde el Anexo XIII al Anexo XIX.

Promedio Módulo de Rotura (%)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural (testigo)	100.00	100.00
50% Reciclado	106.37	118.46
100% Reciclado	103.49	100.13

Tabla 4.2.2.2. Promedio en porcentaje de todas las mezclas para el ensayo a flexión a siete días.

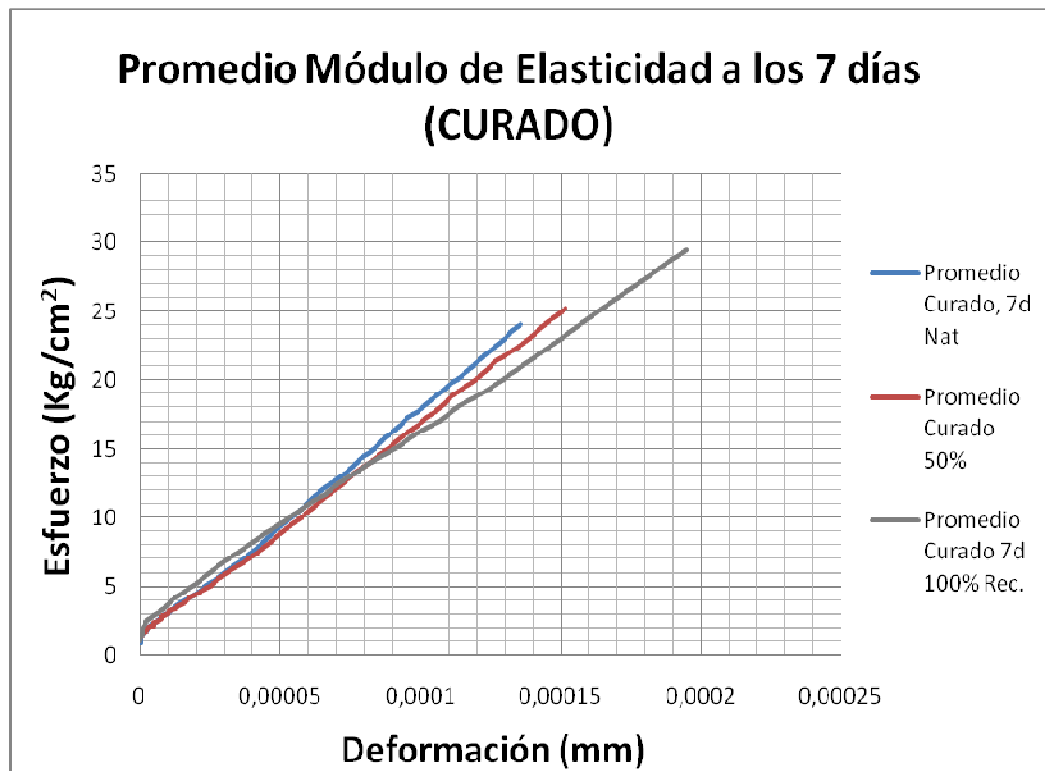
Otra manera de observar los resultados es por medio de los porcentajes para las mezclas que contienen agregado reciclado se logra la mayor resistencia, superando así a la mezcla testigo es decir a la de agregado natural.

4.2.3 ETAPA 1, GRUPO 3

Ensayo Módulo de Elasticidad para cilindros

Los resultados de módulo se muestran, al igual que los anteriores, con base en los promedios obtenidos para cada uno de los cilindros. Hay que recordar que cada cilindro necesitaba dos anillos a su alrededor con una separación entre ellos de diez centímetros, por tal motivo cada uno genera dos gráficas que correlacionan dichos anillos, estas gráficas se pueden observar en el anexo Etapa I, grupo 3 para cada uno de los cilindros de su respectiva mezcla.

A continuación se muestra el promedio para cada mezcla curada y posteriormente una tabla en la cual se especifica el esfuerzo y la deformación en milímetros, con el fin de hallar el módulo práctico de cada una de estas:

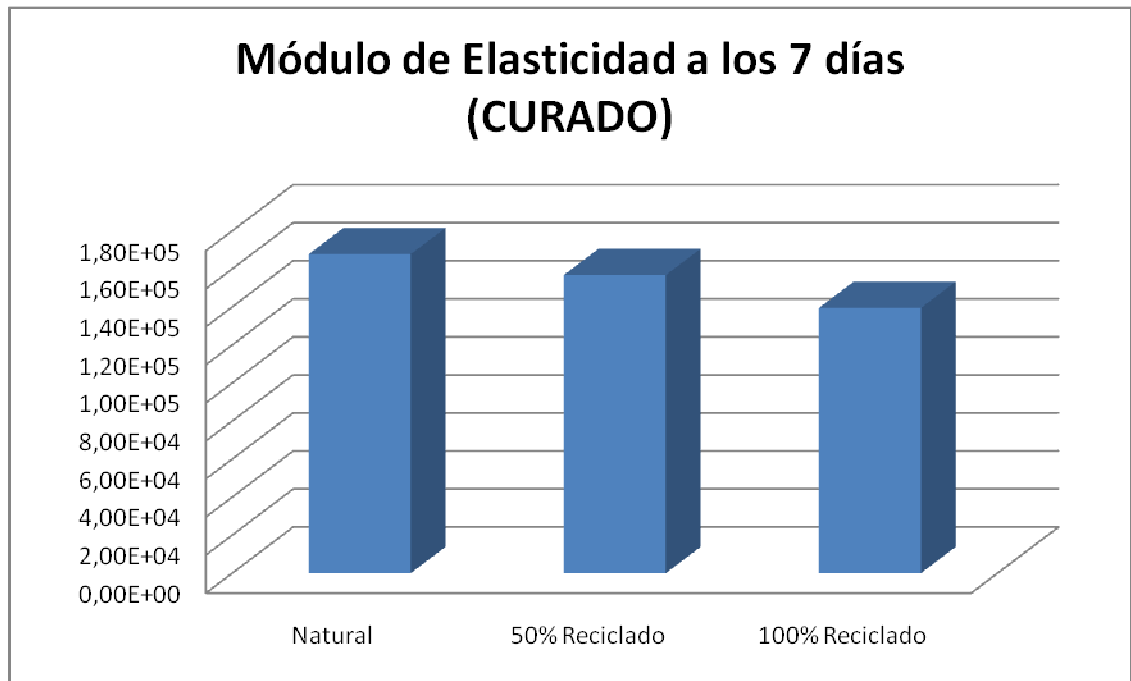


Gráfica 4.2.3.1. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los siete días.

Módulo de Elasticidad a 7 días (Curado)						
Muestra	σ_2 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	ϵ_2 (mm)	ϵ_1 (mm)	$E_{practico}$ (kg/cm ²)	%
Natural	20	5	0.000111	2.12515E-05	1.68E+05	100
50% Reciclado	20	5	0.000118	2.25011E-05	1.57E+05	93.47
100% Reciclado	20	5	0.000123	1.56258E-05	1.39E+05	83.15

Tabla 4.2.3.1. Módulo de elasticidad para muestras curadas a siete días para todas las mezclas.

Analizando los resultados, se visualiza que la pendiente tiende a bajar dependiendo de la mezcla, puesto que la natural obtuvo un módulo mayor al de 50% reciclado y este a su vez fue mayor al de 100% reciclado ahora el módulo práctico para dichas muestras es 1.68E+05 kg/cm² (100%), 1.57E+05 kg/cm² (93.47%) y 1.39E+05 kg/cm² (83.15%) respectivamente, como se muestra en la gráfica 4.2.3.2.



Gráfica 4.2.3.2. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los siete días.

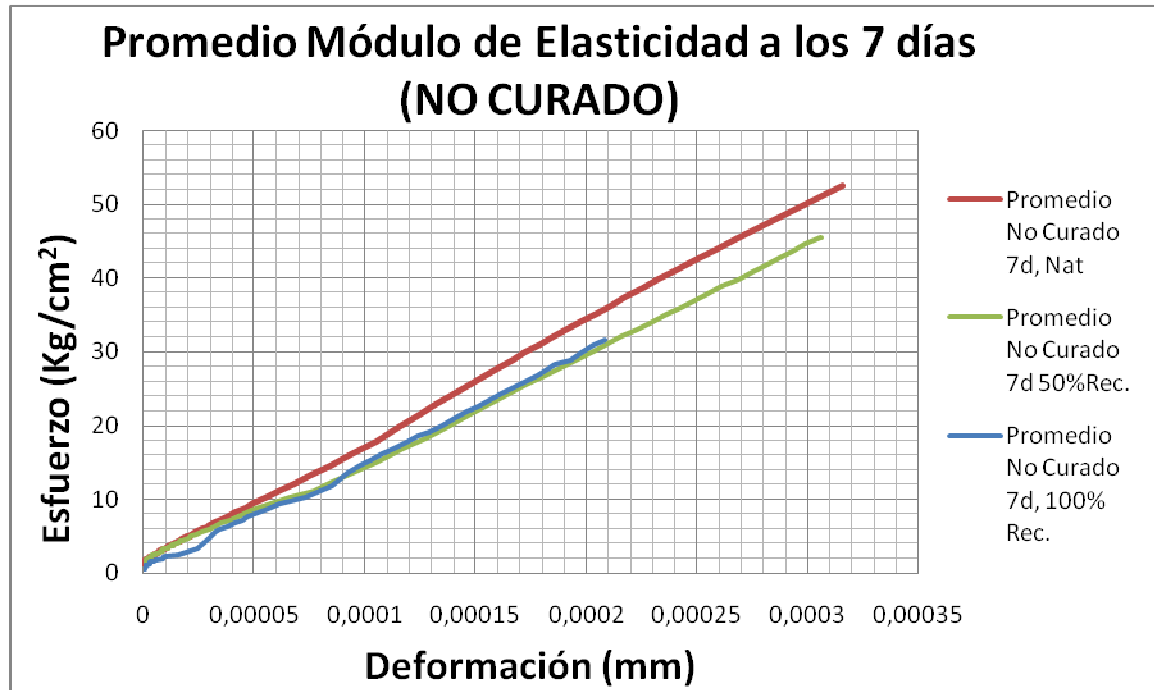
Noviembre de 2008

La diferencia que se genera entre la testigo y la mezcla con 50% agregado reciclado es de $0.11E+05 \text{ kg/cm}^2$ (6.53%), para 100% reciclado la diferencia es $0.29E+05 \text{ kg/cm}^2$ (16.85%), donde para los esfuerzos altos la dispersión de los valores respecto a las mezclas es mayor mientras que a esfuerzos bajos es prácticamente igual.

Con relación a los cilindros no curados, el comportamiento es totalmente aleatorio respecto al visto anteriormente, el mayor valor de módulo fue $1.71E+05 \text{ kg/cm}^2$ (100%) para la mezcla natural, el segundo valor, mas alto fue el de 100% reciclado con un módulo de $1.52E+05 \text{ kg/cm}^2$ (89.04%) y finalmente 50% reciclado logra un módulo de $1.36E+05 \text{ kg/cm}^2$ (79.23%).

En todos los casos estudiados a compresión, flexión y módulo existe un parámetro en común al comparar los resultados curados con los no curados, dicho parámetro muestra que el curado es un factor necesariamente importante y debe ser contemplado para mejorar la resistencia última del concreto.

A continuación están las gráficas obtenidas para las mezclas no curadas, falladas a los siete días. Igualmente se encuentra la tabla relacionando los esfuerzos y las deformaciones para cada una de dichas mezclas con el fin de conocer el valor práctico del módulo.

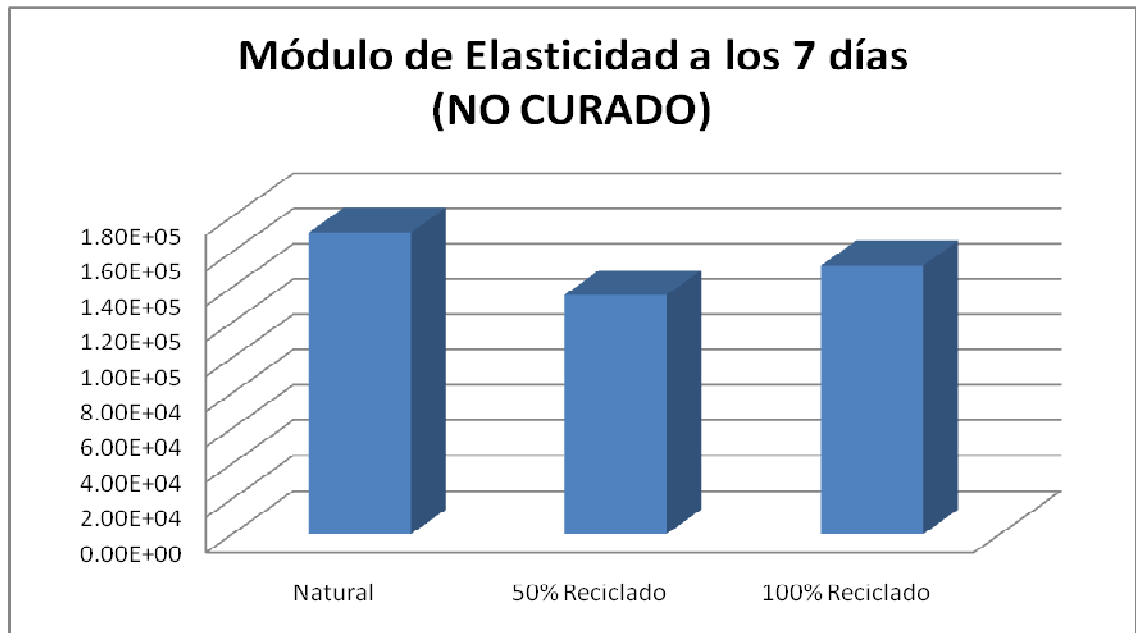


Gráfica 4.2.3.3. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los siete días.

Módulo de Elasticidad a 7 días (No Curado)						
Muestra	σ_2 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	ϵ_2 (mm)	ϵ_1 (mm)	$E_{practico}$ (kg/cm ²)	%
Natural	30	10	0.00017	5.00033E-05	1.71E+05	100
50% Reciclado	30	10	0.0002	5.563E-05	1.36E+05	79.23
100% Reciclado	30	10	0.00019	6.12605E-05	1.52E+05	89.04

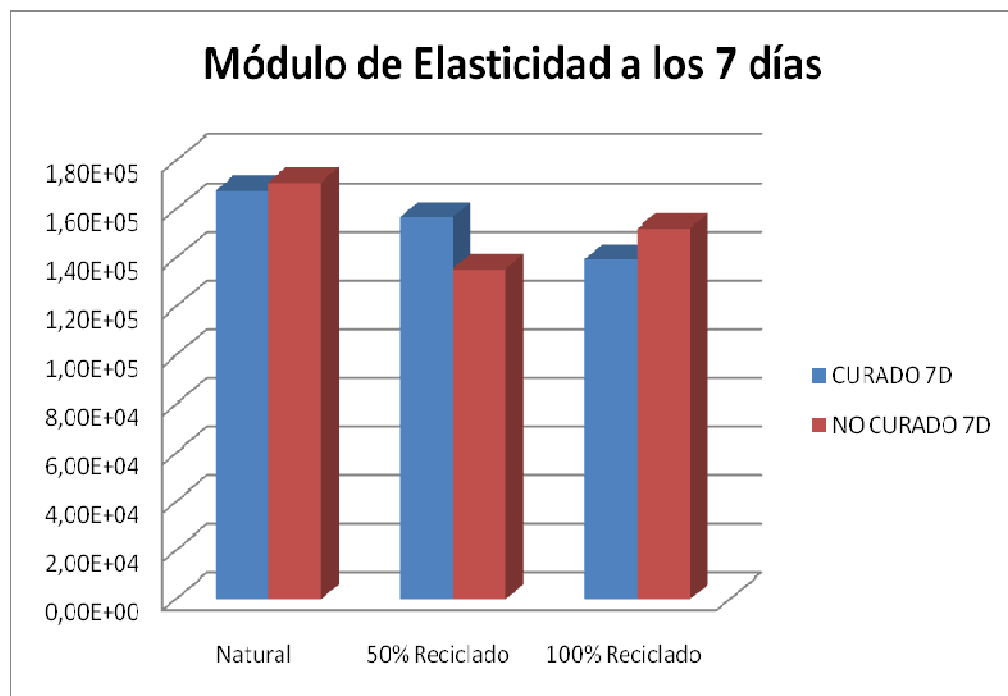
Tabla 4.2.3.2. Módulo de elasticidad no curado a siete días para todas las mezclas.

Para el módulo no curado el menor valor lo tuvo la mezcla de 50% reciclado con una diferencia de 20.77% con respecto a la mezcla testigo, en el intermedio se encuentra 100% agregado reciclado con una diferencia de 10.96%.



Gráfica 4.2.3.4. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los siete días.

Por último, se muestra una comparación entre los módulos obtenidos para las muestras no curadas y curadas a siete días



Gráfica 4.2.3.5. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas y no curadas a los siete días.

4.3 RESULTADOS A 28 DÍAS DE EDAD

4.3.1 ETAPA II, GRUPO1.

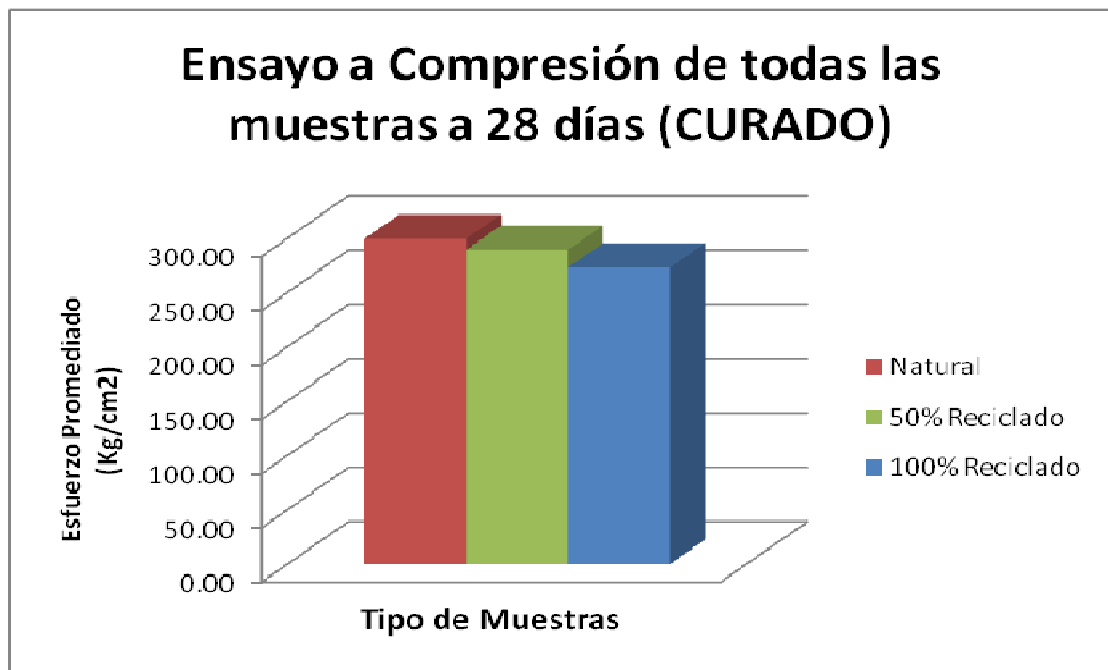
Ensayo a Compresión para cilindros

Los resultados promediados para veintiocho días son:

Promedio Esfuerzo a los 28 días (kg/cm ²)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural	299.35	273.41
50% Reciclado	289.23	272.21
100% Reciclado	272.94	258.59

Tabla 4.3.1.1. Promedio de todas las mezclas para el ensayo a compresión a veintiocho días.

Los datos de cada uno de los cilindros, así como las medidas y resultados individuales de cada mezcla, se pueden observar detalladamente en el anexo Etapa II, grupo1.



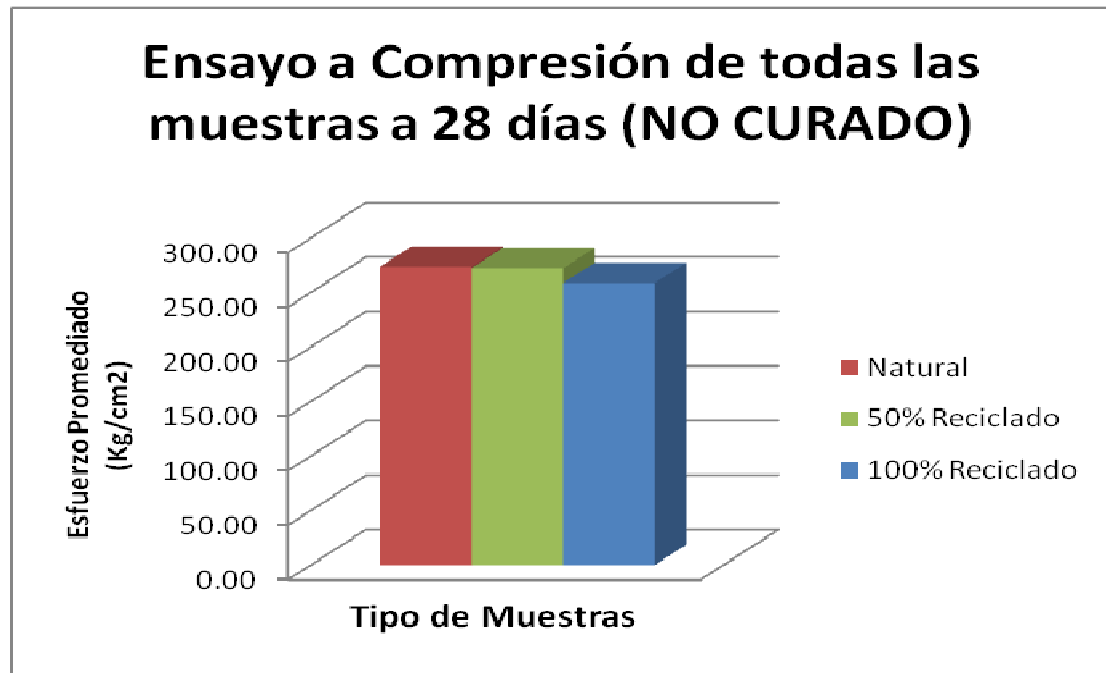
Gráfica 4.3.1.1. Ensayo a compresión para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.

En general para veintiocho días se reafirma que la resistencia máxima es para la mezcla natural, con un esfuerzo de 299.35 kg/cm^2 correspondientes al 100%, mientras que para 50% reciclado se logró 289.23 kg/cm^2 (96.62%) y para 100% reciclado un resistencia de 272.94 kg/cm^2 (91.18%), dichas muestras con una relación agua-cementante del 55%.

Promedio Esfuerzo para cada una de las mezclas (%)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural	100.00	100.00
50% Reciclado	96.62	99.56
100% Reciclado	91.18	94.58

Tabla 4.3.1.2. Promedio en porcentaje de todas las mezclas para el ensayo a compresión a veintiocho días.

El comportamiento de las mezclas con contenido de agregado reciclado muestran una diferencia de 3.38% para 50% reciclado y 8.82% para 100% reciclado, por lo cual se puede concluir que todas las mezclas alcanzan resistencia casi iguales logrando ser utilizadas en la construcción de estructuras.



Gráfica 4.3.1.2. Ensayo a compresión para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.

Las muestras no curadas tuvieron un comportamiento muy similar a las curadas con la desventaja que su resistencia se ve afectada entre un 5 - 10% de la máxima dependiendo de la mezcla, por lo tanto la mezcla natural fue la más afectada al alcanzar una disminución de 8.67% mientras que 50% con agregado reciclado tuvo una disminución mucho menor de 5.88% y la de 100% agregado reciclado fue la menos afectada con 5.25% de diferencia.

De esta manera, se afirma que el agregado reciclado es una posibilidad bastante aplicable a los usos generados en una obra, por su buena resistencia y por el curado, pues en las obras este generalmente no se hace con los cuidados necesarios adicionalmente, estos están expuestos a los bruscos cambios de temperatura.

Con relación a los resultados obtenidos en la tesis del Ingeniero Álvaro León donde el concreto de agregado reciclado para una relación agua/cemento de 60% presentó una resistencia a la compresión ligeramente mayor (12%) a la natural, y una resistencia notablemente mayor (47%) para una relación agua/cemento del 40%, mientras que los estudios de los coreanos exponen que la resistencia máxima alcanzada es del 60% de la natural, comparado estos resultados con la

tesis desarrollada se observa que la resistencia máxima para una mezcla con 50 % agregados reciclado alcanza el 96% de la testigo.

4.3.2. ETAPA II, GRUPO2.

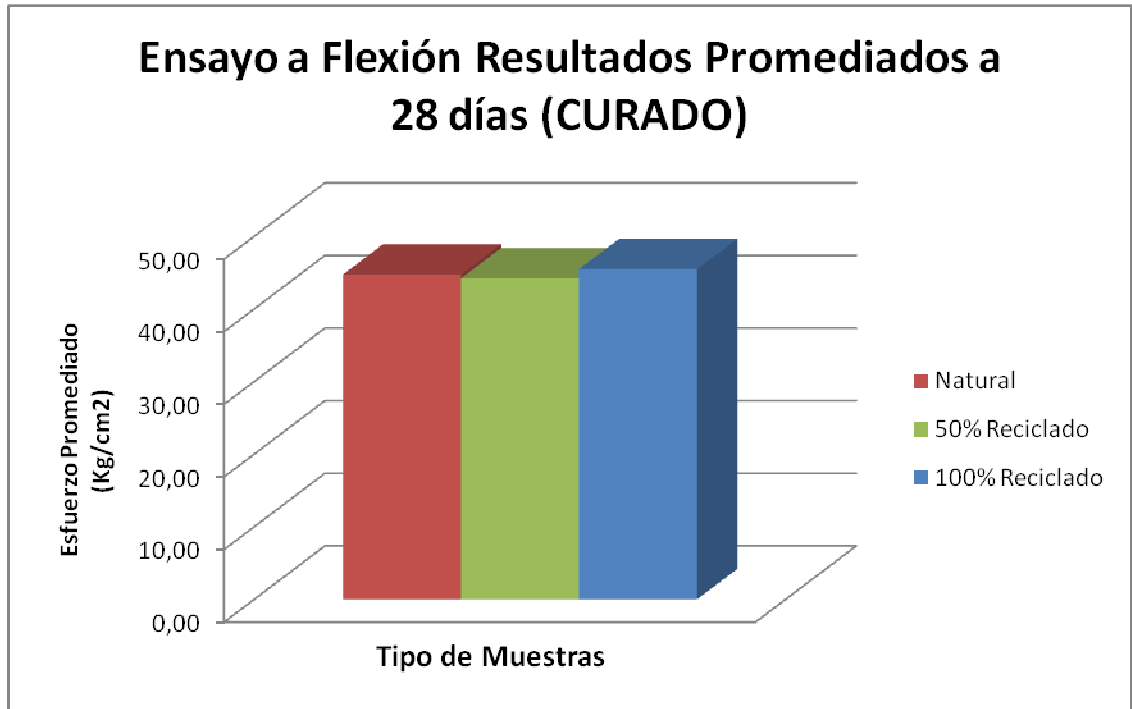
Ensayo a Flexión para viguetas

Las viguetas falladas a los veintiocho días arrojaron resultados que fueron resumidos en la siguiente tabla, con los valores promediados de todas las muestras para cada una de las mezclas, sin embargo los datos de cada una de estas se pueden observar en el anexo Etapa II, Grupo2.

Promedio Módulo de Rotura a los veintiocho días. (kg/cm²)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural	44.72	38.42
50% Reciclado	44.19	35.40
100% Reciclado	45.47	38.09

Tabla 4.3.2.1. Promedio de todas las mezclas para el ensayo a flexión a veintiocho días.

Estos resultados se pueden observar mas claramente en la siguiente gráfica, en la cual la mayor resistencia la obtuvo la mezcla de 100% agregado reciclado, con una diferencia de 1.6% por encima de la testigo, mientras que 50% agregado reciclado estuvo por debajo con una diferencia de 1.18%, comparando estos resultados con la tesis del Ingeniero Álvaro se confirma que el agregado reciclado obtiene mejor comportamiento a flexión, opuesto a los resultados de los coreanos.



Gráfica 4.3.2.1. Ensayo a flexión para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.

En términos generales todas las mezclas cumplen las expectativas esperadas a nivel de resistencia, sin embargo comparando los datos obtenidos a siete días no se puede establecer un patrón definido en los datos, no obstante las mezclas con contenido de agregado reciclado generan una opción favorable en el uso de concreto convencional.

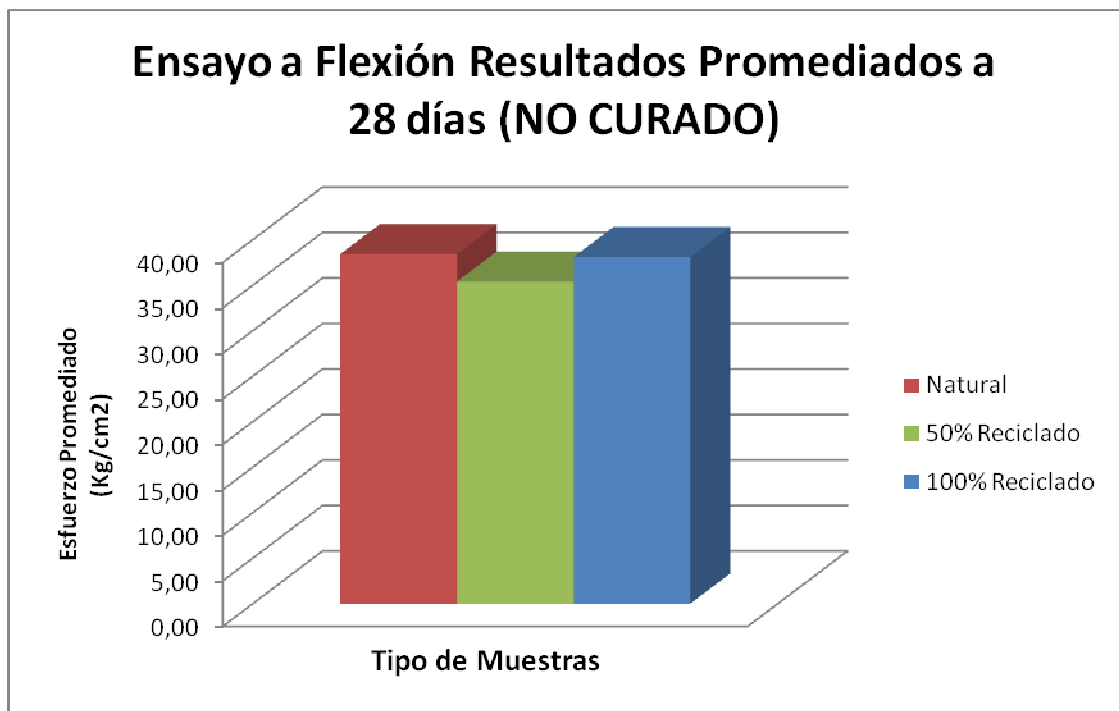
Promedio Módulo de Rotura para las mezclas (%)		
Mezcla	Curado	No Curado
Natural	100.00	100.00
50% Reciclado	98.82	92.14
100% Reciclado	101.68	99.15

Tabla 4.3.2.2. Promedio en porcentaje de todas las mezclas para el ensayo a flexión a veintiocho días.

Con relación a las muestras no curadas, se reafirma que no hay variación definida en los datos con respecto a los resultados a siete días, ya que para 50% reciclado

la variación fue de 7.86% mientras que para 100% fue de 0.85% con respecto a la testigo.

La resistencia es menor en una proporción mucho mayor a la obtenida en los cilindros a compresión, pues esta oscila entre 14 – 20% dependiendo de la mezcla, para la natural hubo una disminución del 14%, para la de 100% agregado reciclado un 16% y la más afectada con un valor de 20% fue la de 50% agregado reciclado con respecto a su capacidad máxima.



Gráfica 4.3.2.2. Ensayo a flexión para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.

Comparando el resultado obtenido a los siete días se aprecia que hay similitud en el comportamiento de las mezclas natural y 100% reciclado, pues ambas se mantuvieron estables, sin embargo al combinar agregados tanto natural como reciclado a los siete días se obtiene una mayor resistencia para las muestras no curadas, mientras que con el pasar del tiempo esta se ve afectada pues pasa de tener la mayor resistencia a ser la de menor resistencia.

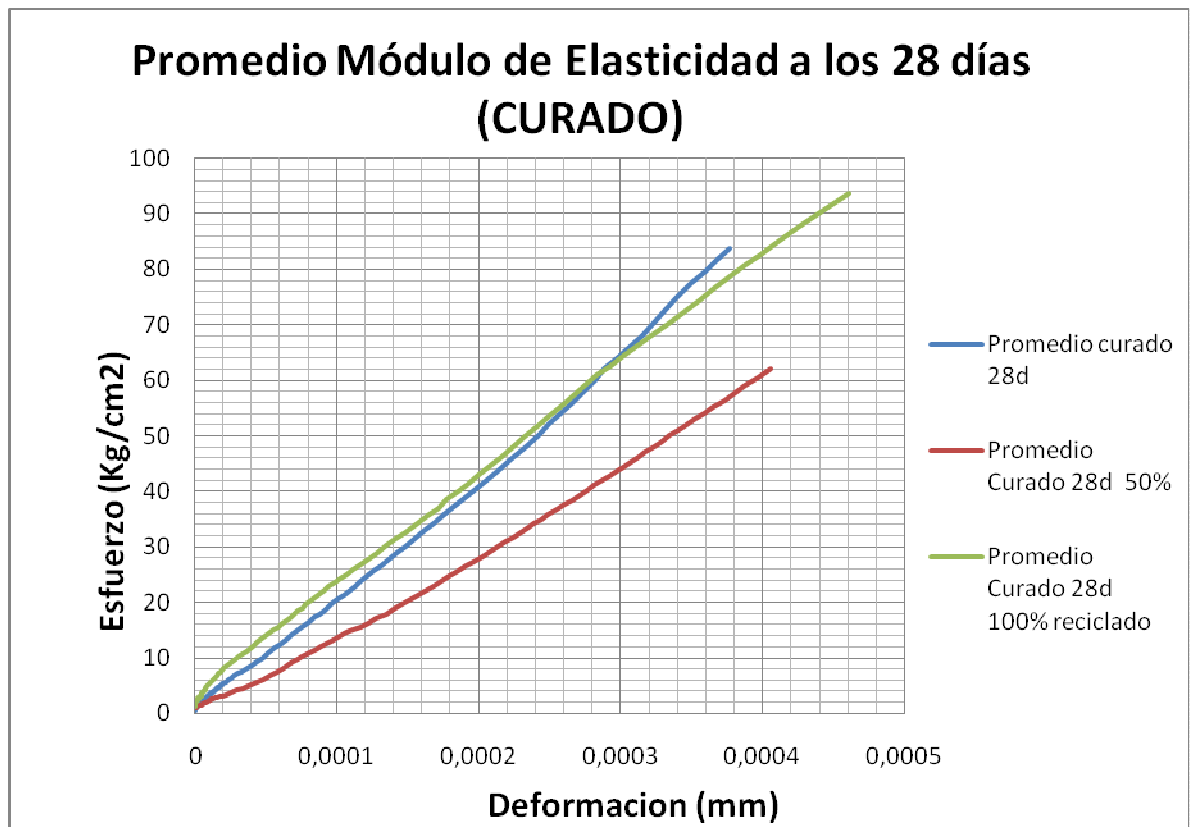
Con respecto a las muestras curadas se observa una situación similar con relación a la mezcla 50% agregado reciclado, aunque esta no se ve tan afectada,

mientras que la mezcla natural y 100% agregados reciclados muestran el mismo patrón.

4.3.3. ETAPA II, GRUPO 3.

Ensayo Módulo de Elasticidad para cilindros

A los veintiocho días se graficó el promedio para cada una de las mezclas con sus muestras curadas y no curadas, posteriormente se muestra una tabla en la cual se especifica el esfuerzo y la deformación en milímetros, con el fin de hallar el módulo práctico de cada una de éstas:



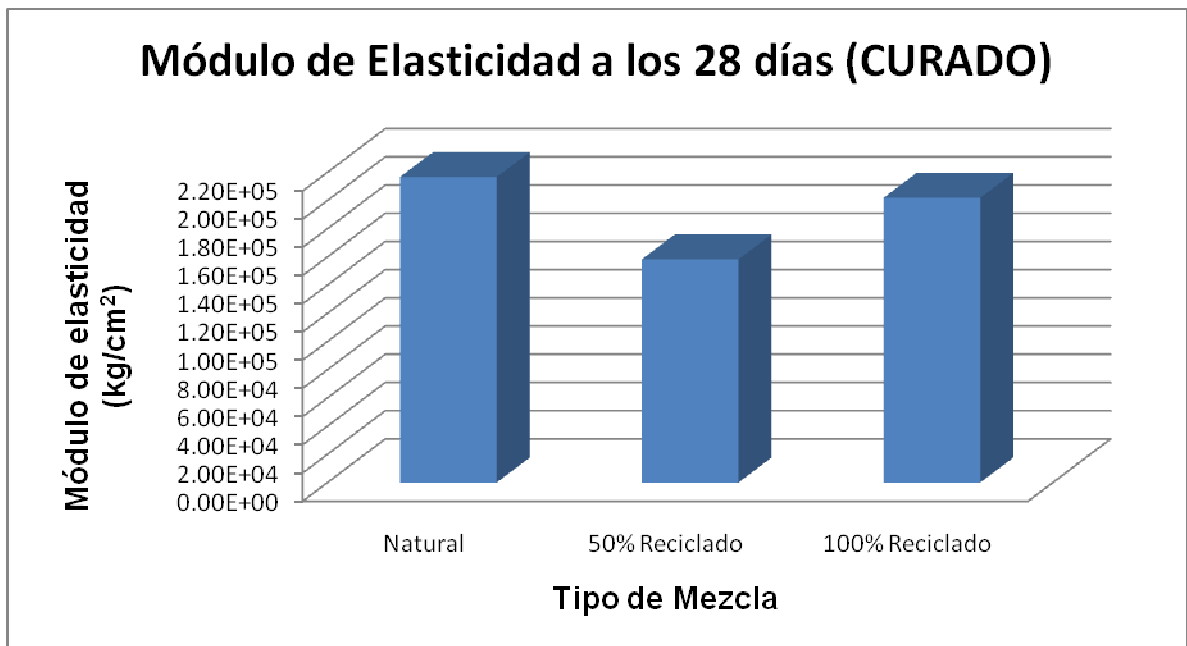
Gráfica 4.3.3.1. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.

Módulo de Elasticidad a 28 días (Curado)						
Muestra	σ_2 (kg/cm²)	σ_1 (kg/cm²)	ϵ_2 (mm)	ϵ_1 (mm)	E_{practico} (kg/cm²)	%
Natural	60	10	0.000274	4.375E-05	2.17E+05	100
50% Reciclado	60	10	0.000388	7.189E-05	1.58E+05	73.05
100% Reciclado	60	10	0.0002745	2.688E-05	2.02E+05	93.18

Tabla 4.3.3.1. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.

Los valores obtenidos a los veintiocho días para las mezclas estudiadas se resumen así, la de mayor módulo fue la testigo con 2.17E+05 kg/cm² (100%), cerca de ese mismo valor está 100% agregado reciclado con 2.02E+05 kg/cm² logrando sólo un 6.82% de diferencia, mientras que la mezcla de 50% agregado reciclado tiene 1.58E+05 kg/cm² con una diferencia del 26.95% con la testigo, debido a la interacción de ambos agregados.

Por parte de los chinos (Xiao, Li y Zhang) en sus estudios muestran que el módulo de elasticidad para concreto con agregado reciclado disminuye en un 40% en ambiente curado, lo cual es congruente con los resultados obtenidos.



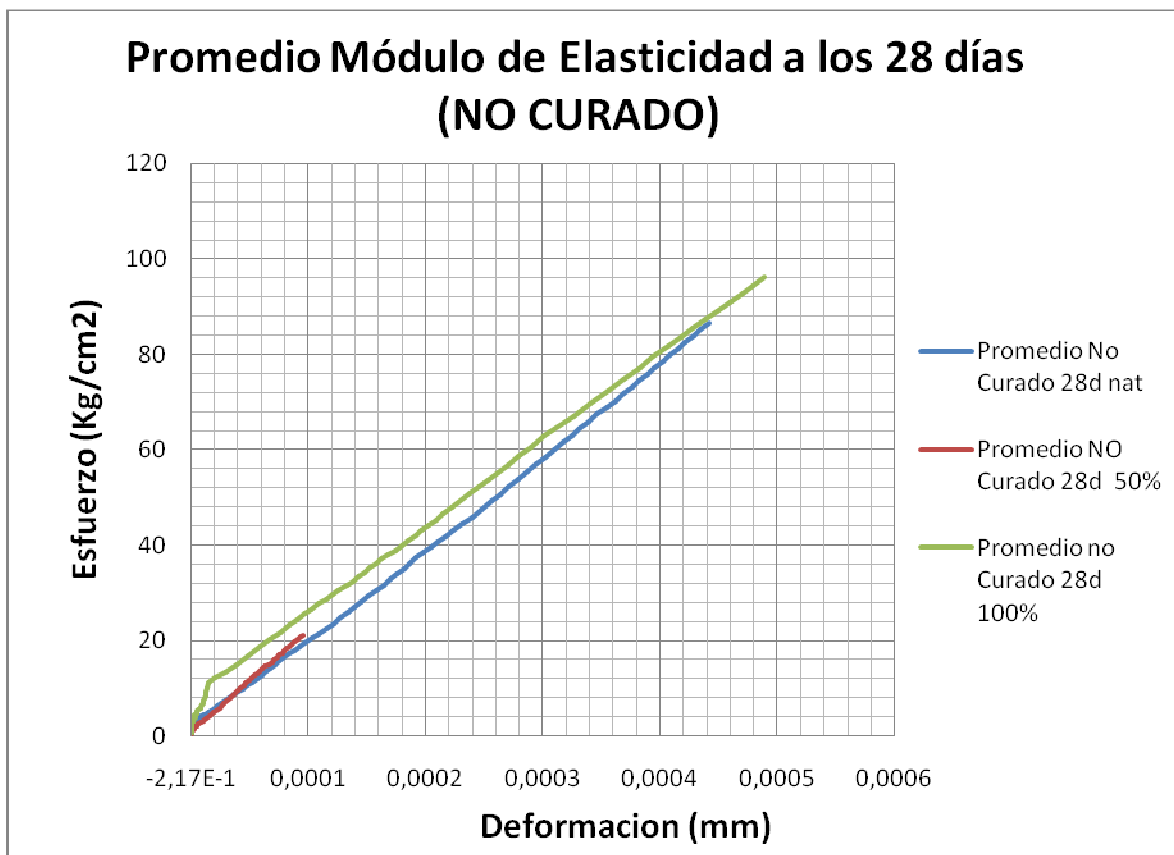
Gráfica 4.3.3.2. Módulo de elasticidad para todas las mezclas curadas a los veintiocho días.

De igual manera se puede graficar los resultados de las mezclas para ver el comportamiento de cada una.

Con estos resultados, el módulo de elasticidad a los 28 días se obtiene que para las muestras curadas, la natural (testigo) y 100% agregado reciclado, el módulo mejora mientras que para la que contiene 50-50 de agregado el módulo disminuye sensiblemente su valor.

Estos se pueden observar en el anexo ETAPA II, GRUPO3, así mismo como las gráficas de cada una de las muestras curadas y no curadas según el tipo de mezcla.

A continuación se muestran las gráficas con las muestras no curadas promediadas a veintiocho días.



Gráfica 4.3.3.3. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.

Módulo de Elasticidad a 28 días (No Curado)						
Muestra	σ_2 (kg/cm ²)	σ_1 (kg/cm ²)	ϵ_2 (mm)	ϵ_1 (mm)	$E_{practico}$ (kg/cm ²)	%
Natural	80	40	4.08E-04	1.51E-04	1.56E+05	100.00
50% Reciclado	20	15	8.82E-05	6.31E-05	2.00E+05	128.46
100% Reciclado	80	40	3.94E-04	1.80E-04	1.87E+05	120.19

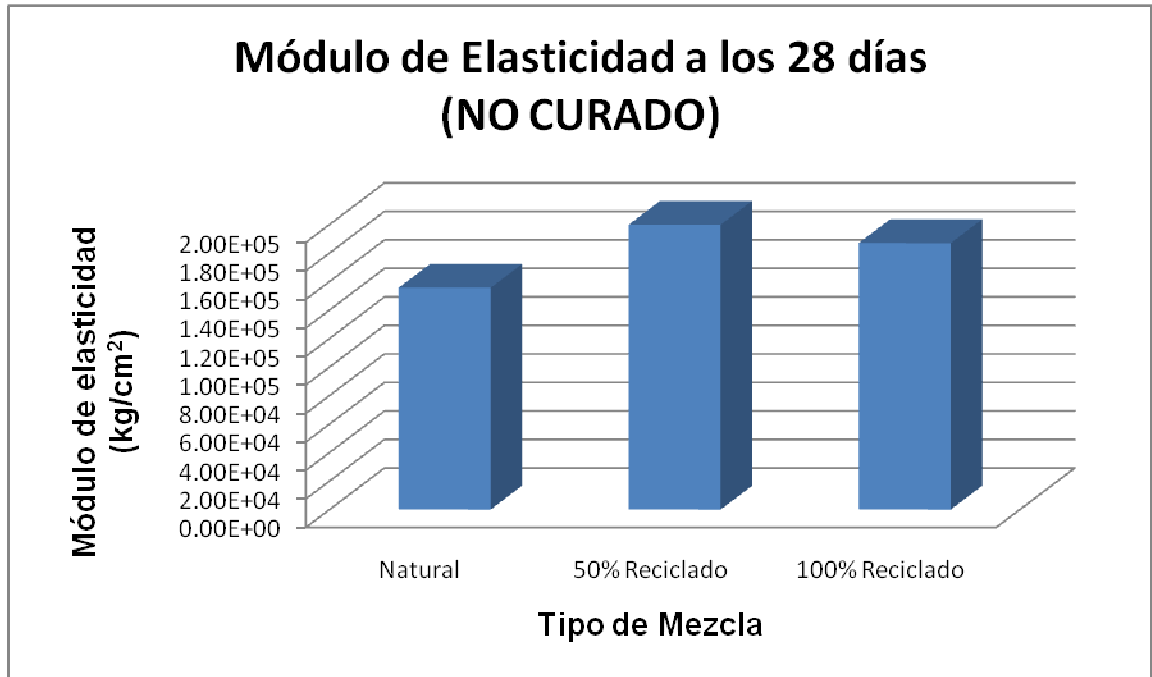
Tabla 4.3.3.2. Módulo de elasticidad para todas las mezclas no curadas a los veintiocho días.

De las muestras no curadas es importante resaltar que el comportamiento para las tres mezclas es comparable hasta un esfuerzo de 20 kg/cm² según la NTC-98, sin embargo para este caso concreto a mayor esfuerzo vemos que el comportamiento cambia para cada mezcla por tal motivo los valores de esfuerzo estudiados fueron establecidos por criterio.

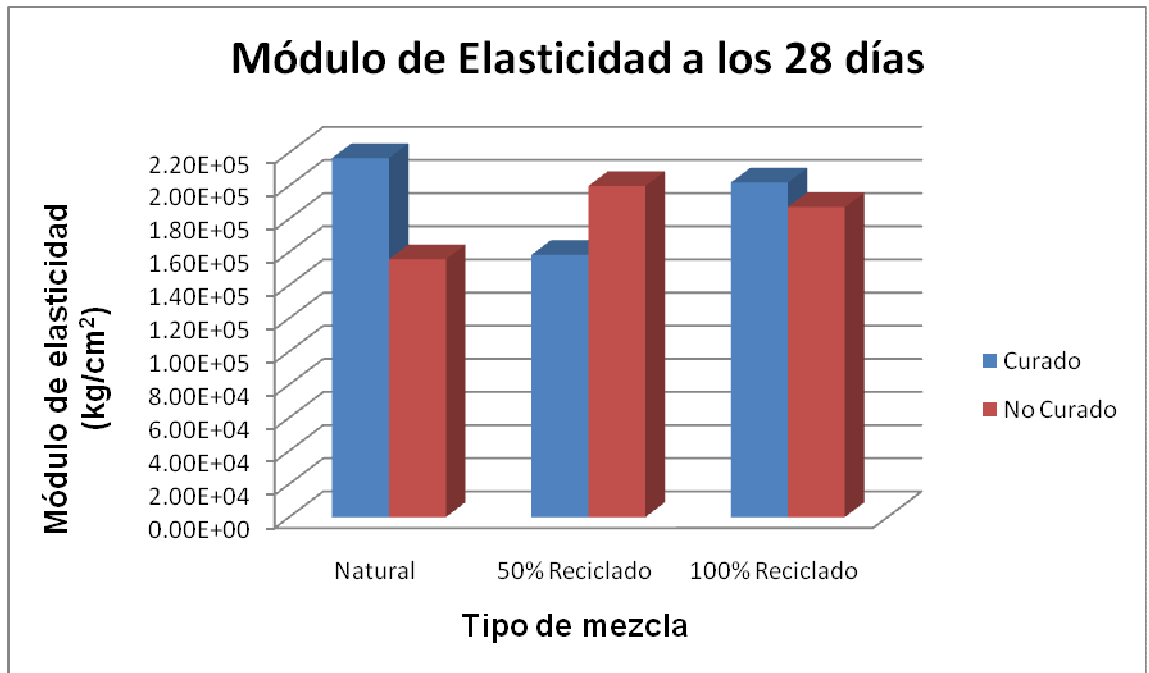
Se observa que para la mezcla testigo el valor de módulo fue de 1.56E+05 kg/cm² (100%), el de 50% agregado reciclado fue de 2.00E+05 kg/cm² (128.46%) y para 100% reciclado se obtuvo 1.87E+05 kg/cm² (120.19%), de tal modo, el comportamiento es mayor para las mezclas con agregado reciclado respecto a la mezcla natural.

Del análisis del conjunto de resultados de módulo de elasticidad se aprecia que en la mayoría de los casos los valores obtenidos son menores a los predichos por las ecuaciones planteadas por la Norma Sismo Resistente $E=3900(f''c)^{0.5}$.

Noviembre de 2008



Gráfica 4.3.3.4. Módulo de elasticidad para las mezclas no curadas a los veintiocho días.



Gráfica 4.3.3.5. Módulo de elasticidad para las mezclas curadas y no curadas a los veintiocho días.

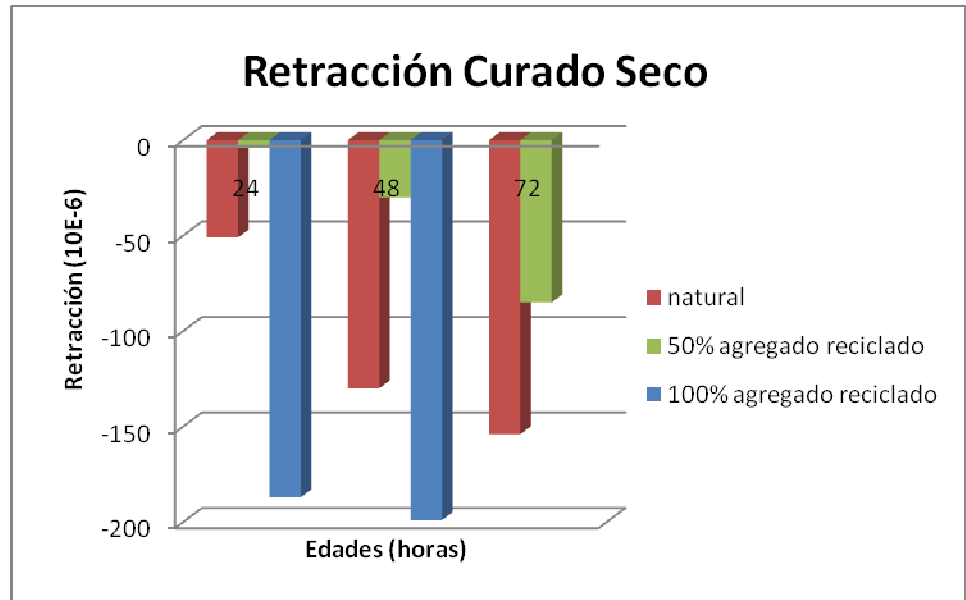
4.4 RESULTADOS DE RETRACCION

La retracción o expansión de un concreto está determinado por el ambiente en que se encuentren los elementos, el agua de la mezcla, algunas propiedades de los agregados y su proceso de elaboración. Por eso hay que mencionar que las vigas fueron almacenadas en el laboratorio donde la temperatura se encuentra a 20° C y la humedad relativa del ambiente es más alta que al aire libre ya que el laboratorio se encuentra en un sótano. También hay que tener presente que el tamaño máximo de partícula de los agregados fue de 3/4", lo cual se considera una partícula muy grande para las dimensiones de la viga, lo que puede llevar a una inapropiada compactación.

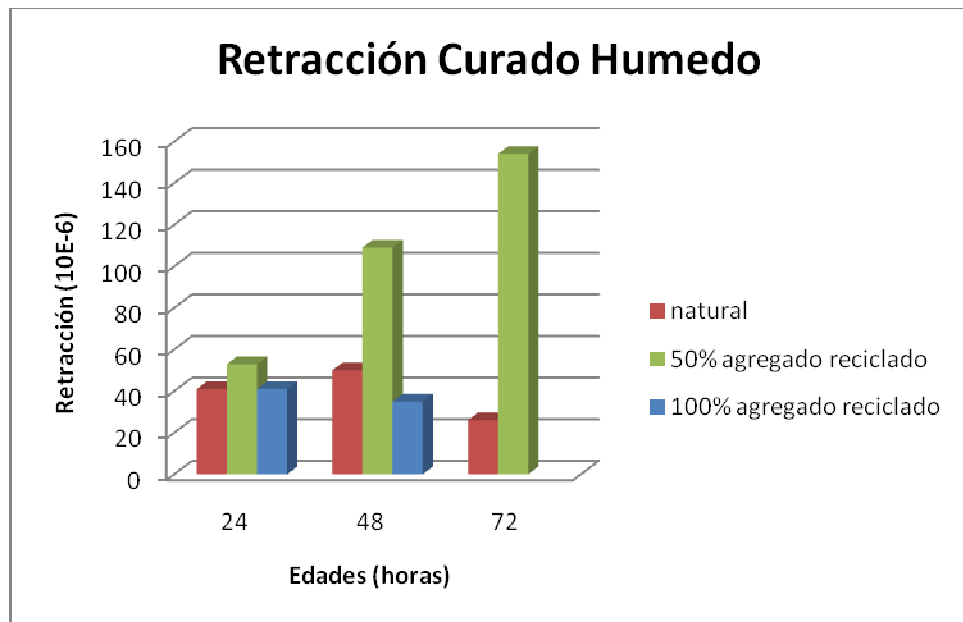
A pesar de que se fabricaron 6 vigas para éste ensayo, solo se pudieron tomar 4 de ellas pues las 2 restantes no tenían la longitud efectiva necesaria para ser ubicadas en el comparador de carátulas, ya sea por causa de un mayor o menor introducción a la estipulada de los tornillos en el concreto.

		Deformación				
		Cantidad agregado	24 h	48 h		72 h
Seco	100% agregado reciclado		-187	-199	-	(10XE-6 mm/mm)
	50% agregado reciclado		-4	-30	-85	
	Natural		-51	-130	-154	
Húmedo	100% agregado reciclado		41	35	-	(10XE-6 mm/mm)
	50% agregado reciclado		53	109	154	
	Natural		41	50	26	

Tabla 4.4.1. Resumen resultados de retracción



Gráfica 4.4.1. Resultados de retracción curado seco



Gráfica 4.4.2. Resultados de retracción curado húmedo

Los resultados obtenidos de los ensayos de retracción muestran una gran dispersión, lo cual es relativamente común en este tipo de determinaciones. Se puede ver esto en los datos del concreto natural en curado húmedo (Anexo X) por

el contrario, la dispersión es baja para el mismo porcentaje de reciclado expuesto a curado seco.

Independiente de los resultados obtenidos, la mayoría de las muestras no curadas tendieron a retraerse. Aunque hay que tener presente que para toda regla hay una excepción, y en éste caso la probeta 2 con 50% de agregado reciclado en curado seco se expandió a 24 horas (Anexo IX). En cambio, todas las muestras curadas tendieron a expandirse, con la excepción de la probeta 6 con todo agregado natural en curado húmedo a 72 horas (Anexo X). Ésta situación ha sido expuesta por otras investigaciones reportadas en la bibliografía, que reconocen que el curado húmedo no favorece la retracción. También están de acuerdo de que la expansión y retracción no muestran tendencias definidas y sus valores son aleatorios.

Para las viguetas no curadas con 50% de agregado reciclado y la testigo se puede observar un comportamiento similar, ya que la proporción de retracción con un delta 24 horas (ensayado hasta 96 horas) aumentaba con el paso del tiempo, posteriormente el comportamiento ira disminuyendo y llegará a un punto limite donde no se contrae mas. Mientras que el concreto con 100% de agregado reciclado tuvo un comportamiento de retracción con un promedio de 1.1% cada 24 horas, posteriormente la retracción disminuirá hasta llegar a su punto limite. Este análisis se obtuvo de las tablas expuestas en los anexos VIII, IX y X.

Las viguetas en curado húmedo no mostraron un patrón de comportamiento regular en la expansión del concreto. Aunque las muestras con 100% de agregado reciclado y la probeta 3 de 50% de agregado reciclado aumentaban el doble su proporción de expansión con un delta de 24 horas (ensayado hasta 144 horas), e igual que las viguetas expuestas ha no curado su comportamiento irá disminuyendo hasta llegar a su punto limite.

Para el curado seco, se muestra una gran diferencia de retracción entre el contenido de 100% de agregado reciclado, que muestra valores altos, y el testigo con contenido de todo agregado natural, que muestra valores menores. El contenido del 50% muestra valores de retracción intermedios, no mostrando una tendencia con respecto a los otros dos contenidos.

Para el curado húmedo, comparado con el curado seco, los mayores valores de expansión los presenta el contenido del 50% y los menores el del 100%.

Noviembre de 2008

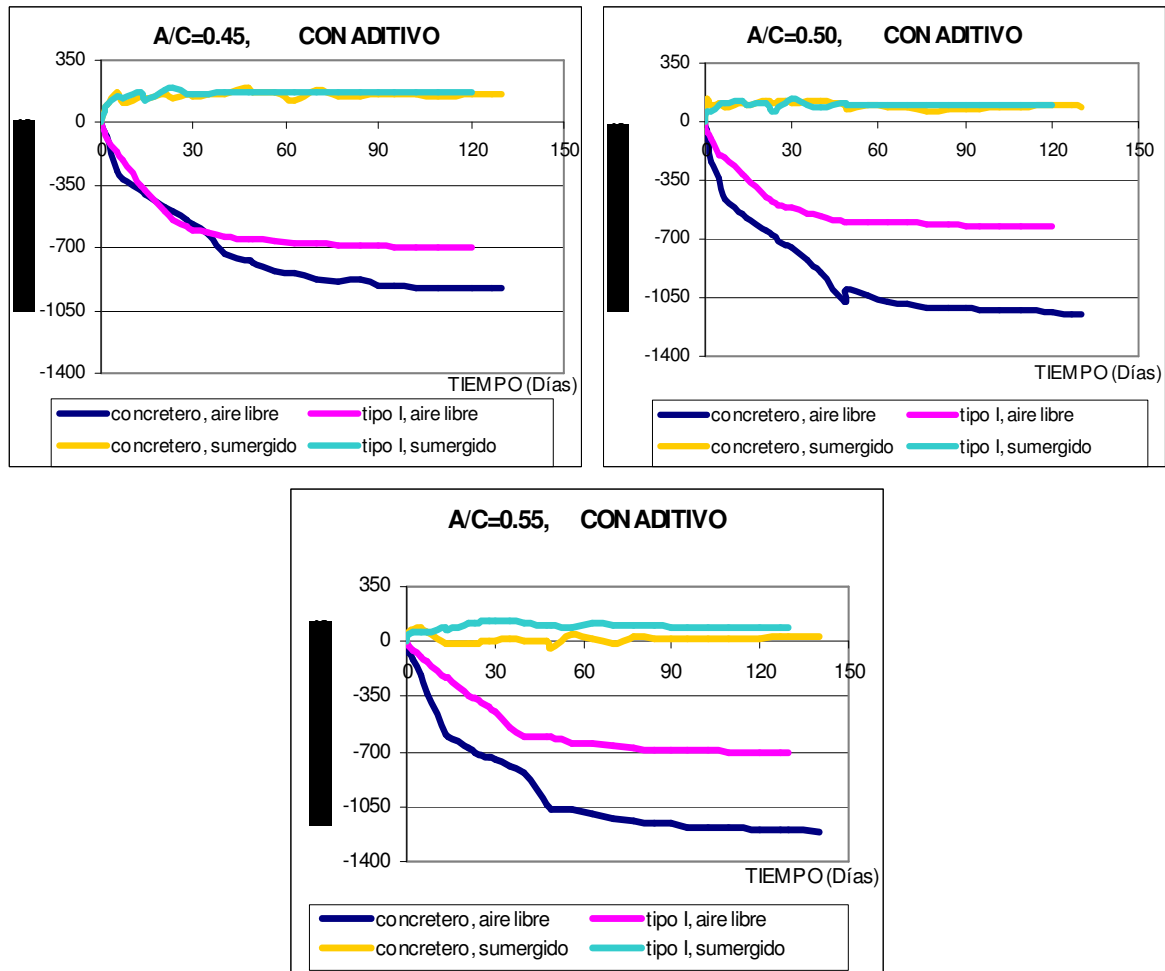
No todos los resultados muestran un aumento relativo de la retracción con el tiempo para las muestras curadas en seco, como era de esperarse, en una variación del tipo exponencial, como lo reportan las antiguas investigaciones sobre el tema. De hecho, una probeta (3 seco 100% - Anexo VIII) muestra una ligera mayor expansión a 24 horas respecto a la determinada a 48 horas (244 y 236 millonésimas respectivamente) y otra (2 seco 50% - Anexo IX) muestra una leve expansión para 24 horas (cuatro millonésimas) y luego si contracción a 48 y 96 horas.

Los valores de retracción determinados son mayores que los obtenidos por otros investigadores (Lozano, Mejia, U.N. 2004)²⁰ como se puede concluir del examen de la gráfica anexada.

Al contrario de lo concluido por los coreanos Yang y Chung, el concreto con 50% de agregado reciclado y con una absorción del 7,74% logró obtener una menor retracción y una mayor expansión que el concreto testigo. Pero el concreto con 100% de agregado reciclado y con una absorción del 7,74% si obtuvo mayor retracción y menor expansión que el testigo.

²⁰ "RETRACCIÓN DE SECADO EN CONCRETOS DE 21,28 Y 35 MPa".Autores: MARTHA LILIANA MEJIA ARÉVALO, JUAN GUILLERMO LOZANO ROLDAN . Director Ing Gabriel Gómez C. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.BOGOTÁ D.C. OCTUBRE DE 2003

Noviembre de 2008



Gráfica 4.4.3. Resultados de retracción obtenidos por el Ing. Lozano²¹

²¹ RETRACCIÓN DE SECADO EN CONCRETOS DE 21,28 Y 35 MPa".Autores: MARTHA LILIANA MEJIA ARÉVALO, JUAN GUILLERMO LOZANO ROLDAN . Director Ing Gabriel Gómez C. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.BOGOTÁ D.C. OCTUBRE DE 2003

4.4 RESULTADOS DE LA CORRELACION DEL MÓDULO DE ROTURA Y LA COMPRESIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación, tanto para resistencia a compresión como módulo de rotura y el valor del coeficiente “k” se muestran en la tabla No.

Del análisis de los mismos se puede concluir que no existe un valor único de k, oscilando entre unos valores promedio de 2.06 a 2.64. Igualmente, se observa que el curado tiene un marcado efecto sobre el mismo, mostrando siempre mayores valores de k el curado en ambiente húmedo respecto del seco; en otras palabras, la resistencia a flexión acusa más el efecto del curado que la resistencia a compresión. Igualmente, se aprecia que los valores de k muestran un aumento importante (19% para curado y 11% para no curado) entre 7 y 28 días de edad, es decir no existe la misma tasa de ganancia de resistencias para la de compresión y la de flexión, siendo mayor el aumento con el tiempo para la resistencia a la flexión.

Edad	Tipo de Concreto	Resistencia compresión	Módulo Rotura	Coeficiente “k”	Resistencia compresión	Módulo Rotura	Coeficiente “k”
		Curado			No Curado		
7 d	Natural	185.04	28.92	2.12	169.29	25.03	1.92
	50%	183.38	30.77	2.27	177.61	29.65	2.22
	100%	173.31	29.93	2.27	148.87	25.06	2.05
	Promedio			2.22			2.06
28 d	Natural	299.35	44.72	2.58	273.41	38.42	2.32
	50%	289.23	44.19	2.6	272.21	35.4	2.14
	100%	272.94	45.47	2.75	258.59	38.09	2.37
	Promedio			2.64			2.28

Tabla 4.5.1. Relación entre la resistencia a compresión y el módulo de rotura concreto reciclado como agregado grueso

Noviembre de 2008

Por último, se muestra un resumen de tablas con los resultados obtenidos de cada ensayo realizado de manera general, ilustrativa y porcentual.

Ensayos		CURADO					
		Testigo (0%)		50% A. Reciclado		100% A. Reciclado	
		Valor	% respecto testigo	Valor	% respecto testigo	Valor	% respecto testigo
Compresión (kg/cm ²)	7 días	185,04	100	183,38	99,11	173,31	93,66
	28 días	299,35	100	289,23	96,62	272,94	91,18
Flexión (kg/cm ²)	7 días	28,92	100	30,77	106,37	29,93	103,49
	28 días	44,72	100	44,19	98,82	45,47	101,68
M. de Elasticidad (kg/cm ²)	7 días	1,68E+05	100	1,57E+05	93,47	1,39E+05	83,15
	28 días	2,17E+05	100	1,58E+05	73,05	2,02E+05	93,18
Retracción (10xE-6 mm)	24 horas	41	100	53	129,27	41	100,00
	48 horas	50	100	109	218,00	35	70,00
	96 horas	26	100	154	592,31	-	-

Tabla 4.1 Resumen general de los ensayos realizados en curado húmedo

Ensayos		NO CURADO					
		Testigo (0%)		50% A. Reciclado		100% A. Reciclado	
		Valor	% respecto testigo	Valor	% respecto testigo	Valor	% respecto testigo
Compresión (kg/cm ²)	7 días	169,29	100	177,61	104,92	148,87	87,94
	28 días	273,41	100	272,21	99,56	258,59	94,58
Flexión (kg/cm ²)	7 días	25,03	100	29,65	118,46	25,06	100,13
	28 días	38,42	100	35,40	92,14	38,09	99,15
M. de Elasticidad (kg/cm ²)	7 días	1,71E+05	100	1,36E+05	79,23	1,52E+05	89,04
	28 días	1,56E+05	100	2,00E+05	128,46	1,87E+05	120,19
Retracción (10xE-6 mm)	24 horas	-51	100	-4	7,84	-187	366,67
	48 horas	-130	100	-30	23,08	-199	153,08
	96 horas	-154	100	-85	55,19	-	-

Tabla 4.2 Resumen general de los ensayos realizados en curado seco

Noviembre de 2008

CUADRO RESUMEN ILUSTRATIVO DE LOS ENSAYOS							
Ensayos		CURADO			NO CURADO		
		Testigo (0%)	50% Agr. Reciclado	100% Agr. Reciclado	Testigo (0%)	50% Agr. Reciclado	100% Agr. Reciclado
Compresión	7 días	=	↓	↓	=	↑	↓
	28 días	=	↑	↓	=	↓	↓
Flexión	7 días	=	↓	↑	=	↑	↑
	28 días	=	↓	↑	=	↓	↓
Módulo de Elasticidad	7 días	=	↓	↓	=	↓	↓
	28 días	=	↓	↓	=	↑	↑
Retracción	24 horas	=	↑	=	=	↓	↑
	48 horas	=	↑	↓	=	↓	↑
	96 horas	=	↑	-	=	↓	-

Tabla 4.3. Resumen ilustrativo de los ensayos con símbolos

CUADRO RESUMEN PORCENTAJES DE LOS ENSAYOS							
Ensayos		CURADO			NO CURADO		
		Testigo (0%)	50% Agregado Reciclado	100% Agregado Reciclado	Testigo (0%)	50% Agregado Reciclado	100% Agregado Reciclado
Compresión	7 días	100	99.11	93.66	100	104.92	87.94
	28 días	100	96.62	91.18	100	99.56	94.58
Flexión	7 días	100	106.37	103.49	100	118.46	100.13
	28 días	100	98.82	101.68	100	92.14	99.15
Módulo de Elasticidad	7 días	100	93.47	83.15	100	79.23	89.04
	28 días	100	73.05	93.18	100	128.46	120.19
Retracción	24horas	100	129.27	100.00	100	7.84	366.67
	48horas	100	218.00	70.00	100	23.08	153.08
	96horas	100	592.31	-	100	55.19	-

Tabla 4.4. Resumen de porcentajes de los ensayos

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para concluir, se determinó que la manejabilidad se ve afectada por el tipo de agregado y sus características (humedad, absorción). En la medida que aumenta el contenido de agregado reciclado disminuye la manejabilidad de la mezcla. Por tanto, se recomienda utilizar un aditivo plastificante cuando se emplee un concreto con alto contenido de agregado reciclado.

Con respecto al ensayo a compresión, se determinó que las mezclas con agregado reciclado obtuvieron una leve disminución en la resistencia con respecto a la testigo. Una probable explicación a esto, resulta la diferencia de textura en los agregados naturales anteriormente utilizados con los actuales (liso en los previos y liso-rugoso en la actual).

Se logró del ensayo a flexión determinar que la mezcla con mayor porcentaje de agregado reciclado tuviera una mayor resistencia con respecto a la testigo, mientras que la mezcla con cincuenta por ciento logro una resistencia semejante a la testigo.

Los valores de módulo de elasticidad disminuyen al emplear agregado reciclado y son menores a los predichos por las ecuaciones planteadas en la Norma Sismo Resistente $E=3900(f'c)^{0.5}$.(MPa). Para veintiocho días las muestras no curadas lograron valores mayores de módulo con respecto a la testigo.

Con respecto al ensayo de retracción se determinó que para las muestras no curadas hubo retracción mientras que las curadas mostraron expansión, ratificando la importancia del curado.

Se concluye para la correlación entre el módulo de rotura y la resistencia a compresión que no existe un valor único de k para el concreto, se encontró una oscilación de los valores en promedio entre 2.06 y 2.64.

De las anteriores conclusiones y por medio de los resultados obtenidos se determinó que es viable el uso de concreto reciclado como nuevo agregado, sin deterioro importante de las propiedades analizadas.

A los siete días se observó que los cilindros y viguetas alcanzaron el 63% y 66% de la resistencia máxima para la condición curada, mientras que la no curada los

porcentajes son para compresión 55 a 67 por ciento y para flexión entre un 65 y 83 por ciento.

Recomendaciones:

En la elaboración del concreto fue necesario utilizar tres veces más cantidad de agregado reciclado que de material natural, pues con la granulometría de Fuller-Thompson se genera una igualdad de condiciones al manejar las mismas proporciones de agregado por tamiz, generando mayor desperdicio del agregado reciclado en los tamices número 4 y 3/8".

Para mejorar la manejabilidad de las muestras con alto contenido de agregado reciclado se recomienda emplear un aditivo plastificante.

Esta tesis es apenas una semilla de una gran investigación acerca de la reutilización del concreto como agregado reciclado en Colombia, para trabajos futuros queda mucho por hacer, se podrían hacer concretos empleando normas internacionales con el fin de ajustarlas a nuestro país o utilizar agregados reciclados provenientes de fuentes diferentes a cilindros de laboratorio y con diferentes edades y resistencias.

Nota: El método empleado para el curado fue por medio de bolsas plásticas que fueron dejadas bajo techo y a temperatura ambiente, con el fin de semejar el curado de obra.

Noviembre de 2008

BIBLIOGRAFIA

- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE: Review of selected waste streams. Sewage sludge, construction and demolition waste, waste oils, waste from coal-fired power plants and biodegradable municipal waste. Enero 2002. Y datos publicados en su página web: www.eea.eu.int
- BEDOYA, Carlos Mauricio. El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles. Medellín, 2003, p 98. Trabajo de Magíster (Arquitecto Constructor en Hábitats) Universidad Nacional de Medellín. Facultad de Arquitectura. Escuela de Habitats
- BEDOYA, Carlos Mauricio. Panorama del concreto reciclado en Colombia. Bogota, 2008. p 22-24. Revista ConstruVision
- Curso – Taller de Concreto – Fundación ICA (México DF) Marzo 2000 www.monografias.com/trabajos4/concreto/concreto.shtml
- DOMINGUEZ LEPE J.A. Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas. México, 2007, p 12.
- Evaluación del módulo de rotura del concreto con base en su resistencia a compresión: Variabilidad de su correlación. Pontificia Universidad Javeriana. XV Simposio Ingeniería de Pavimentos Melgar, Marzo de 2005
- HERRERA TORRES, Fernando. Reciclaje de desperdicios de concreto y ladrillo. Bogotá, 2001, p 26. Tesis (Especialista en gerencia de construcciones). La Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Facultad de Ingeniería.
- Hormigon – (USA) Junio 2008 - es.wikipedia.org/wiki/Hormig%C3%B3n
- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO (imcyc). Contracción por secado del concreto (México) Agosto 2006. www.imcyc.com/revistact06/ago06/PROBLEMAS.pdf.
- KEUN-HYEOK Yang, HEON-SOO Chung, and ASHRAF F. Ashour. Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties ACI Materials Journal V 105, No. 3. Jun 2008.

Noviembre de 2008

- Legislación vigente sobre gestión de residuos sólidos. Capítulo 3. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/cortina_r_jm/capitulo_3.pdf
- LEON RODRIGUEZ, Álvaro. Propiedades del concreto reciclado como agregado. Bogotá DC., 2001. Trabajo de Magister (Maestría en Construcción) Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes – Departamento de Construcciones
- NIXON P.J. (1978). Recycled Concrete as an Aggregate for Concrete – A Review, RILEM TC–37–DRC. *Materials and Structures* (RILEM)
- Operativo de limpieza en Moravia. (Medellín, Colombia). Junio 2008 http://www.eltiempo.com/nacion/medellin/9dejunio/ARTICULO-WEB-NOTA_INTERIOR-4241370.html
- OTT, Daniel. Oferta y Demanda de Recursos Minerales Secundarios en Medellín, Colombia. Medellín, 2006, p 11. Tesis de grado (Ingeniería Ambiental) Instituto de Ingeniería Ambiental de ETH Zúrich, Suiza. Facultad de Ingeniería Ambiental
- Propiedades del Hormigón Endurecido – Unidad 7. Universidad Tecnológica Nacional (Argentina) 2007 www.frsf.utn.edu.ar
- Recycling concrete and other Materials – ACI Symposium publication 219 - 2004
- Removal and reuse of hardened concrete- ACI 555R-01
- Resistencia del concreto. (Republica Dominicana) 2006 <http://www.arqhys.com/resistencia-concreto.html>
- RETRACCIÓN DE SECADO EN CONCRETOS DE 21,28 Y 35 MPa”.Autores: MARTHA LILIANA MEJIA ARÉVALO, JUAN GUILLERMO LOZANO ROLDAN . Director Ing Gabriel Gómez C. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.BOGOTÁ D.C. OCTUBRE DE 2003
- ROMERO MENDOZA, Héctor Leonardo, Viabilidad técnica y económica del uso del concreto reciclado como agregado. Bogotá, 2004, p 141. Tesis

Noviembre de 2008

de maestría (Ingeniero Civil). Universidad de los Andes, Colombia.
Facultad de Ingeniería.

- SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bogota, Ed. Pontificia Universidad Javeriana, 2001, Pág. 221 – 227.
- S. Nagataki, A. Gokce, and T. Saeki. Effects of Recycled Aggregate Characteristics on Performance Parameters of Recycled Aggregate Concrete. A.C.I. SP 192-4
- Temas de Hormigo Armado – Capitulo I. Escuela Politécnica del Ejercito (Ecuador). publiespe.espe.edu.ec/librosvirtuales/hormigón/temas-de-hormigon-armado/hormigón01.pdf
- XIAO Jianzhan, LI Jiabin, y ZHANG Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading – Cement and concrete research 35 (2005) 1187– 1194. Shanghai (China). Septiembre 2004
- Y. Dosho, M. Kikuchi, M. Narikawa, A. Ohshima, A. Koyama y T . Miura. Application of Recycled Concrete for Structural Concrete- Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. A.C.I. SP179-61^a

Anexos I – Granulometría

Granulometría agregado grueso NATURAL		
peso inicial	5734.7	Gr

	peso retenido (g)	% retenido	% acumulado	% pasa
1"	344.6	6.009	6.009	93.991
3/4"	2360.7	41.165	47.174	52.826
1/2"	2448.1	42.689	89.863	10.137
3/8"	346.9	6.049	95.913	4.087
N4	40	0.698	96.610	3.390
Fondo	194.4	3.390	100.000	0.000

Tabla I.1. Granulometría agregado grueso natural

Anexos II - Etapa I, Grupo1.

Ensayo a Compresión para cilindros con edad de siete días:

ENSAYOS A 7 DÍAS FUNDIDA 100 % AGREGADO NATURAL				
	Compresión			
	Curado		No Curado	
Muestra	1	2	3	4
Diámetro (cm)	10.64	10.2	10.17	10.11
Alto (cm)	19	19	20	21
Peso (gr)	3934.4	3728.9	3556.2	3670.6
Área (cm ²)	88.91	81.71	81.23	80.28
resistencia 7dias (kg)	13490	15410	13030	14560
Esfuerzo (kg/cm ²)	151.72	188.59	160.40	181.37
	Módulo de Elasticidad			
	Curado		No Curado	
Muestra	5	6	7	8
Diámetro (cm)	10.19	10.2	10.23	10.55
Alto (cm)	21	19	19	20
Peso (gr)	3787.9	3678.1	3798.9	3663.8
Área (cm ²)	81.55	81.71	82.19	87.42
resistencia 7dias (kg)	14950	14970	14900	13470
Esfuerzo (kg/cm ²)	183.32	183.20	181.28	154.09

Tabla II.1. Ensayo a compresión de la mezcla natural a siete días.

Noviembre de 2008

ENSAYOS A 7 DÍAS FUNDIDA 50 % AGREGADO NATURAL					
	Compresión				
	Curado			No Curado	
Muestra	1	2	3	4	5
Diámetro (cm)	10.075	10.23	10.2	10.5	10.26
Alto (cm)	20.2	20.1	20.4	19.5	20.1
Peso (gr)	3684.1	3658.1	3680.9	3762.9	3679.3
Área (cm ²)	79.72	82.19	81.71	86.59	82.68
resistencia 7días (kg)	14820	14490	12800	14840	14910
Esfuerzo (kg/cm ²)	185.90	176.29	156.65	171.38	180.34
	Módulo de Elasticidad				
	Curado		No Curado		
Muestra	6	7	8	9	
Diámetro (cm)	10.26	10.17	10.22	10.27	
Alto (cm)	19	20	19.8	20.1	
Peso (gr)	3591.7	3626.8	3660.3	3753.8	
Área (cm ²)	82.68	81.23	82.03	82.84	
resistencia 7días (kg)	15720	14720	14950	14620	
Esfuerzo (kg/cm ²)	190.14	181.21	182.24	176.49	

Tabla II.2. Ensayo a compresión de la mezcla 50% reciclado a siete días.

ENSAYOS A 7 DÍAS FUNDIDA 100 % AGREGADO RECICLADO						
	Compresión					
	Curado			No Curado		
Muestra	1	2	3	4	5	6
Diámetro (cm)	10.2	10.1	10.1	10.3	10.2	10.5
Alto (cm)	20.4	20	20.6	20	20.2	20
Peso (gr)	3700	3630	3655	3580	3555	3730
Área (cm ²)	81.71	80.12	80.12	83.32	81.71	86.59
resistencia 7dias (kg)	12490	13890	13880	12640	11910	13130
Esfuerzo (kg/cm ²)	152.85*	173.37	173.24	151.70	145.75	151.63
	Módulo de Elasticidad					
	Curado			No Curado		
Muestra	7	8		9	10	
Diámetro (cm)	10.2	10.2		10.6	10.3	
Alto (cm)	20.4	20		19.9	20.3	
Peso (gr)	3675	3580		3835	3610	
Área (cm ²)	81.71	81.71		88.25	83.32	
resistencia 7dias (kg)	13660	12890		12710	12600	
Esfuerzo (kg/cm ²)	167.17	157.75		144.03	151.22	

Tabla II.3. Ensayo a compresión de la mezcla 100% reciclado a siete días.

*Desechado por atípico

Anexo III - Etapa I, Grupo2.

Ensayo a Flexión para viguetas con edad de siete días:

ENSAYOS A 7 DÍAS FUNDIDA 100 % AGREGADO NATURAL						
	Flexión					
	Curado			No Curado		
Muestra	9	10	11	12	13	14
Ancho (cm)	7.6	7.1	7.2	7.2	7.14	7.1
Alto (cm)	7.1	7.6	7.5	7.7	7.12	7.9
Largo (cm)	30	29	30	30	29	30
Peso (gr)	3752.7	3623.9	3634	3521.3	3574.3	3433.1
resistencia 7dias (kg)	316	389	466	319	397	308
Módulo Rotura	24.74	27.51	34.52	22.42	31.81	20.85

Tabla III.1. Ensayo a flexión de la mezcla natural a siete días.

ENSAYOS A 7 DÍAS FUNDIDA 50 % AGREGADO NATURAL						
	Flexión					
	Curado			No Curado		
Muestra	10	11	12	14	15	16
Ancho (cm)	7.81	8.9	8.48	8.1	6.6	6.9
Alto (cm)	7.11	6.4	7.71	6.98	7.57	7.7
Largo (cm)	30	30	29.8	29.8	30	30
Peso (gr)	3717.8	4210	4312	3601.5	3315.3	3452.6
Resistencia 7dias (kg)	413	496	510	180	288	497
Modulo Rotura	31.38	40.82	30.15	13.59	22.84	36.45

Tabla III.2 . Ensayo a flexión de la mezcla 50% reciclado a siete días.

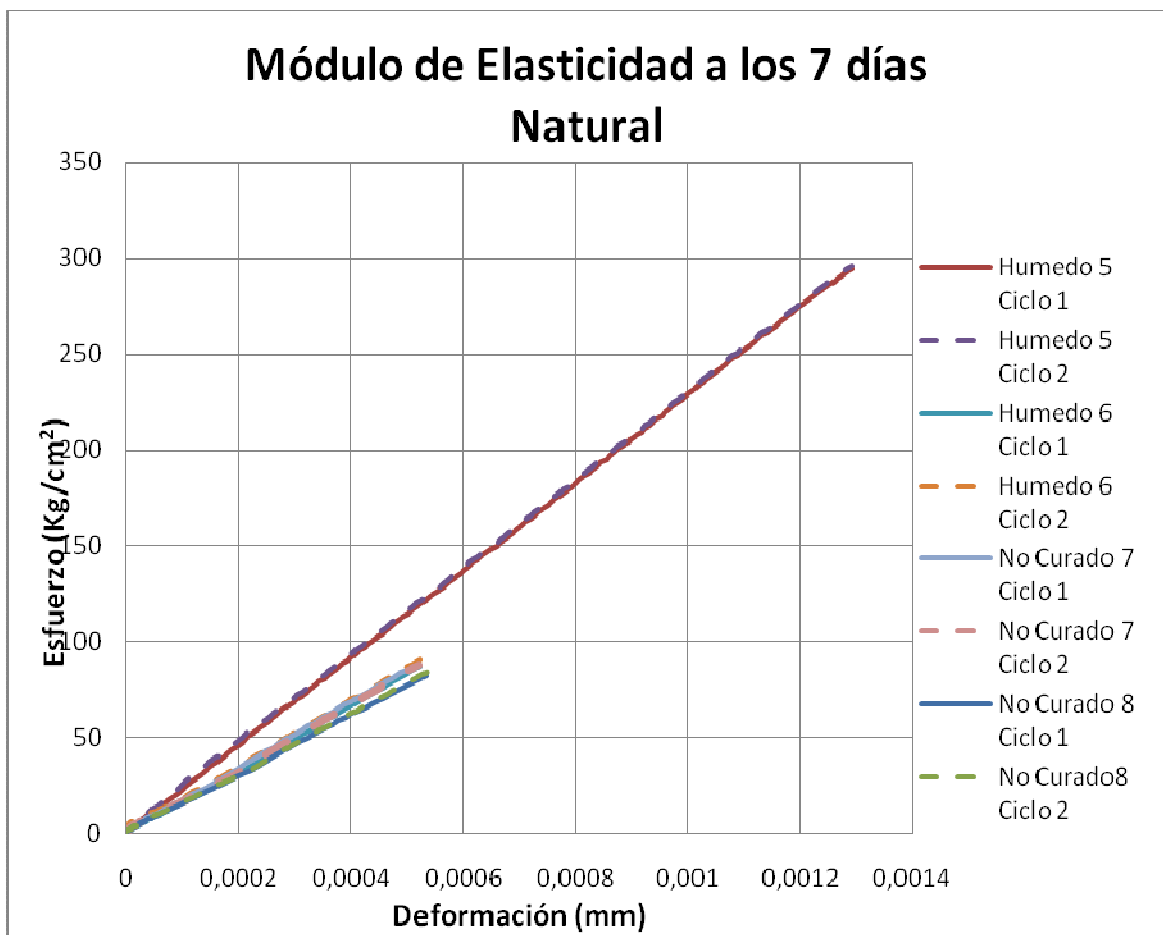
Noviembre de 2008

ENSAYOS A 7 DÍAS FUNDIDA 100 % AGREGADO RECICLADO						
	Flexión					
	Curado			No Curado		
Muestra	11	12	13	14	15	16
Ancho (cm)	7.2	6.8	7.2	7.3	7	6.9
Alto (cm)	7.6	7.8	7.9	7.6	7.7	8.1
Largo (cm)	30	30.1	30	30	30	30
Peso (gr)	3.56	3.395	3.365	3.595	3.55	3.59
Resistencia 7días (kg)	445	392	437	371	376	326
Modulo Rotura	32.10	28.52	29.18	26.40	27.18	21.60

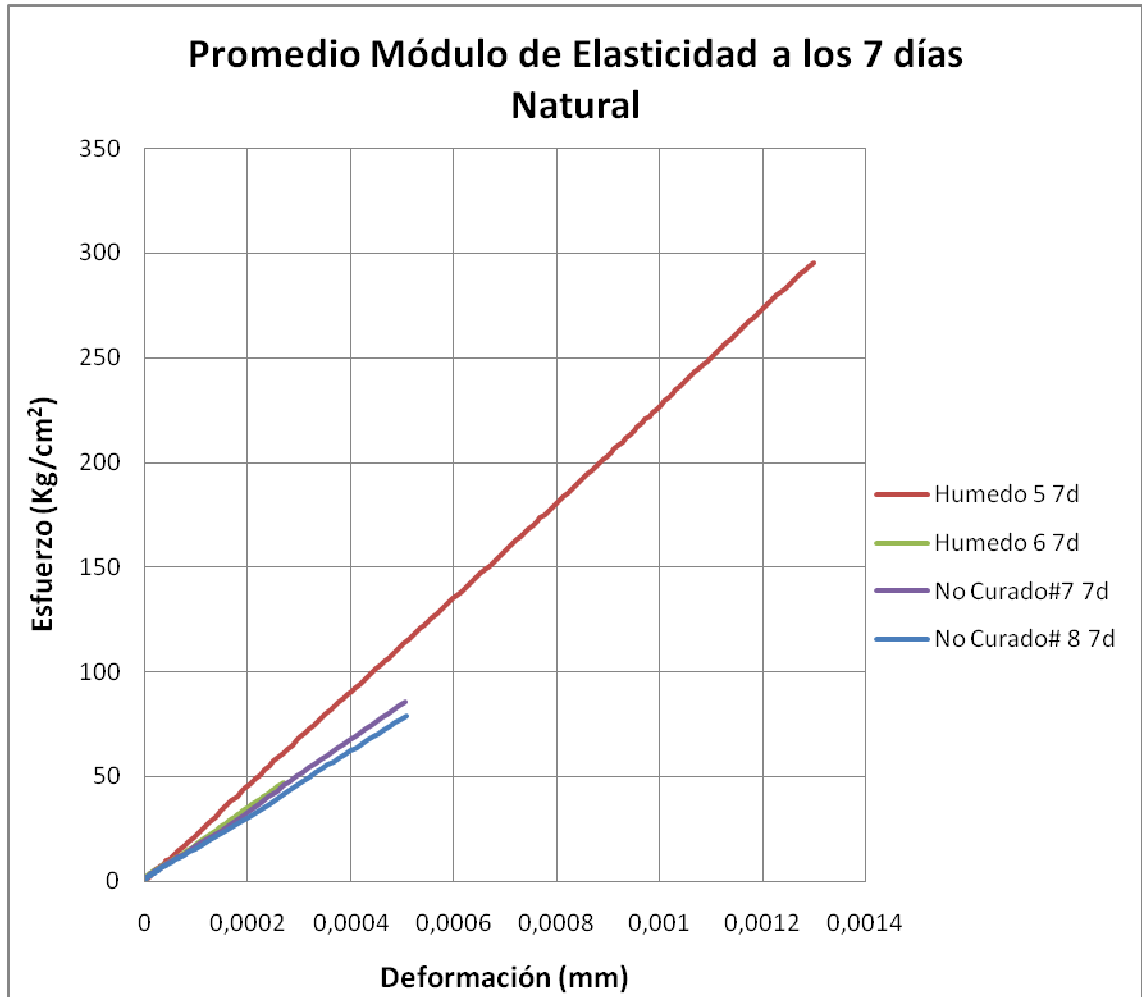
Tabla III.3. Ensayo a flexión de la mezcla 100% reciclado a siete días.

Anexo IV - Etapa I, Grupo3.

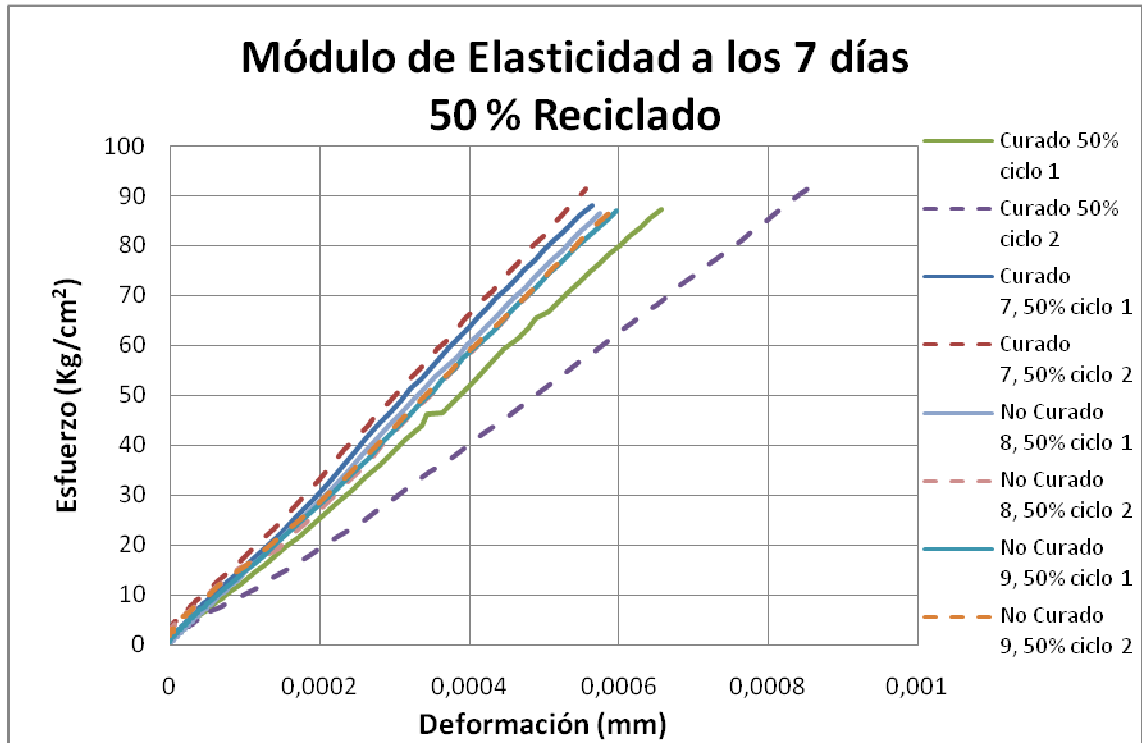
Ensayo Módulo de Elasticidad para cilindros con edad de siete días:



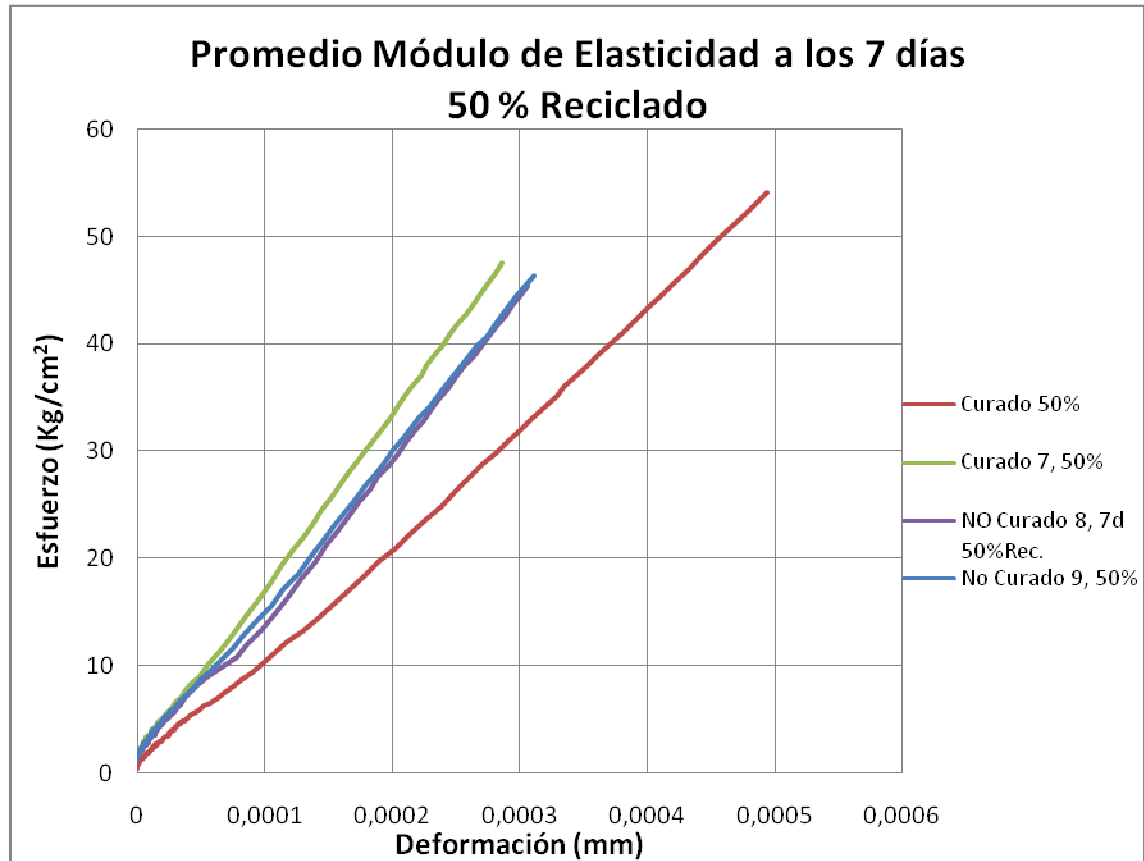
Grafica IV.1. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado natural a los siete días.



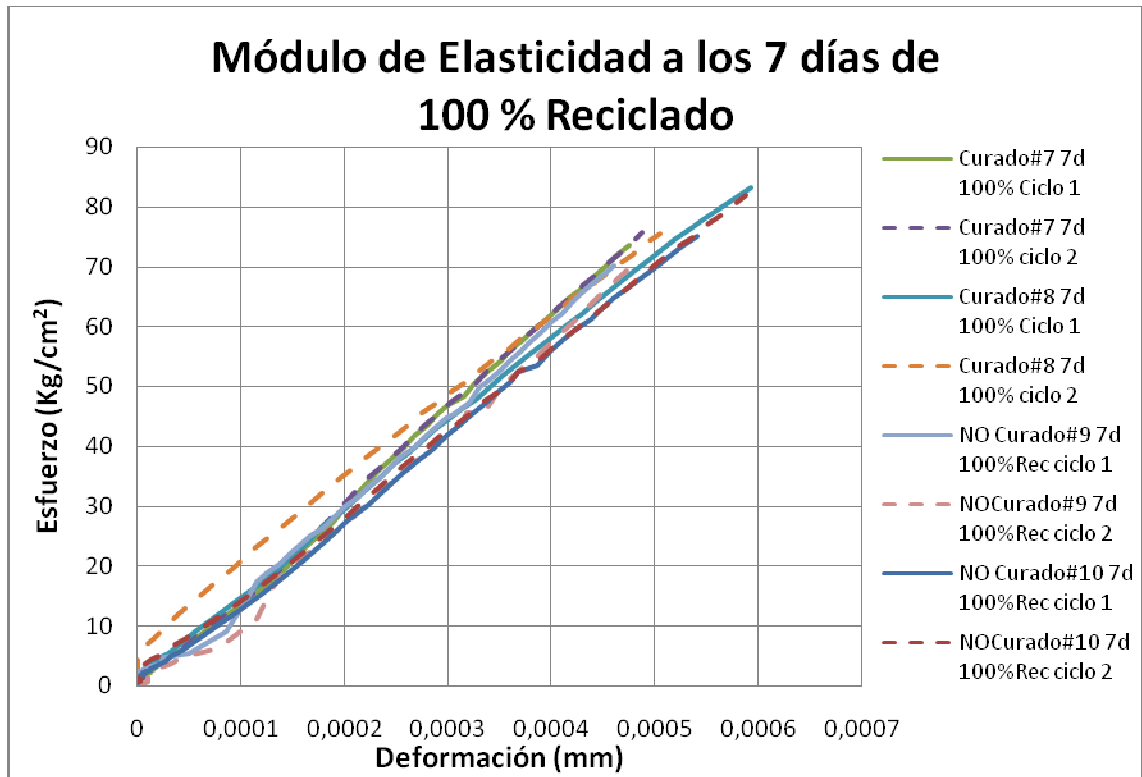
Gráfica IV.2.Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado natural a los siete días.



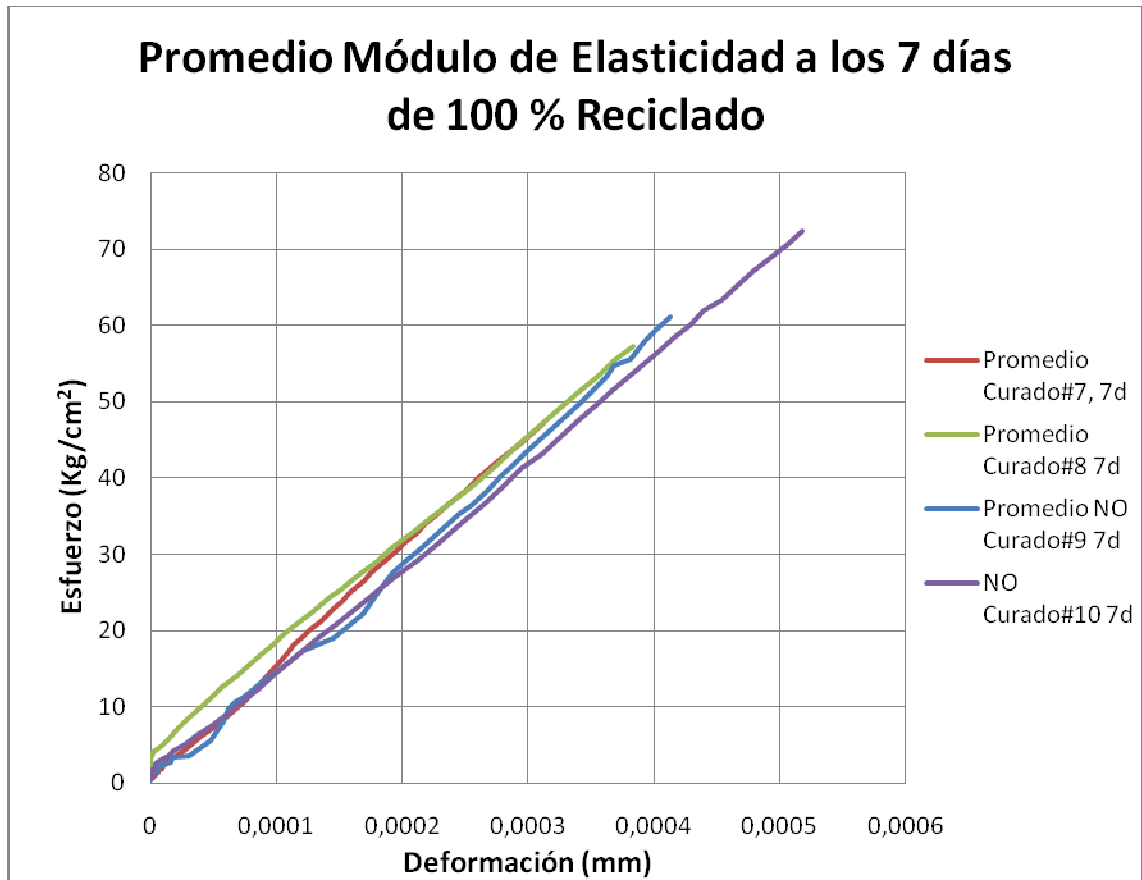
Gráfica IV.3. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado 50% reciclado a los siete días.



Grafica IV.4. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado 50% reciclado a los siete días.



Gráfica IV.5. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado 100% reciclado a los siete días.



Grafica IV.6. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado 100% reciclado a los siete días.

Anexo V - ETAPA II, GRUPO1

Ensayo a Compresión para cilindros con edad de veintiocho días:

ENSAYOS A 28 DÍAS FUNDIDA NATURAL AGREGADO CONVENCIONAL					
	Compresión				
	Curado		No Curado		
Muestra	1	2	3	4	41
Diámetro (cm)	10.45	10.14	10.5	10.29	10.22
Alto (cm)	19.8	19.9	19.8	19.9	19.85
Peso (gr)	3956.5	3700.8	3880.9	3692.5	3659.5
Área (cm ²)	85.77	80.75	86.59	83.16	82.03
resistencia 28 días (kg)	22950	24370	24120	22520	22220
Esfuerzo (kg/cm ²)	267.58	301.78	278.55	270.80	270.86
	Módulo de Elasticidad				
	Curado		No Curado		
Muestra	5	6	7	8	
Diámetro (cm)	10.13	10.23	10.26	10.25	
Alto (cm)	20	21	21	18.95	
Peso (gr)	3788.4	3858.3	3741.4	3687.8	
Área (cm ²)	80.60	82.19	82.68	82.52	
resistencia 28 días (kg)	24650	23870	24120	22220	
Esfuerzo (kg/cm ²)	305.85	290.41	291.74	269.28	

Tabla V.1. Ensayo a compresión de la mezcla natural agregado convencional a veintiocho días

ENSAYOS A 28 DÍAS FUNDIDA 50 % AGREGADO RECICLADO						
	Compresión					
	Curado			No Curado		
Muestra	1	2	3	4	5	6a
Diámetro (cm)	10.4	10.2	10.2	10.4	10.5	10
Alto (cm)	20.1	20.3	20	20.1	19.8	20.2
Peso (gr)	3935	3705	3630	3675	3820	3620
Área (cm ²)	84.95	81.71	81.71	84.95	86.59	78.54
resistencia 28 días (kg)	25000	20520	24840	23520	22850	22170
Esfuerzo (kg/cm ²)	294.30	251.12	303.99	276.87	263.89	282.28
	Módulo de Elasticidad					
	Curado			No Curado		
Muestra	6	7	8	9		
Diámetro (cm)	10.5	10.6	10.1	10.3		
Alto (cm)	20.1	19.7	20	20.2		
Peso (gr)	3920	3935	3595	3640		
Área (cm ²)	86.590	88.247	80.118	83.323		
resistencia 28 días (kg)	24470	24360	21500	22470		
Esfuerzo (kg/cm ²)	282.596	276.042	268.353	269.674		

Tabla V.2. Ensayo a compresión de la mezcla 50% agregado reciclado a veintiocho días

ENSAYOS A 28 DÍAS FUNDIDA 100 % AGREGADO RECICLADO					
	Compresión				
	Curado			No Curado	
Muestra	1	2	3	4	5
Diámetro (cm)	10.6	10.17	10.22	10.235	10.25
Alto (cm)	20.4	19.8	19.9	20	24
Peso (gr)	3885	3629.8	3669.5	3530.5	3643
Área (cm ²)	88.25	81.23	82.03	82.27	82.52
resistencia 28 días (kg)	18780	21300	23270	21200	19470
Esfuerzo (kg/cm ²)	212.81	262.21	283.66	257.67	235.95
	Módulo de Elasticidad				
	Curado		No Curado		
Muestra	7	8	9	10	
Diámetro (cm)	10.245	10.25	10.5	10.54	
Alto (cm)	19.8	20.2	19.7	20.1	
Peso (gr)	3683.2	3648.7	3716.5	3772.6	
Área (cm ²)	82.44	82.52	86.59	87.25	
resistencia 28 días (kg)	22770	22500	22310	24700	
Esfuerzo (kg/cm ²)	276.22	272.67	257.65	283.09	

Tabla V.3. Ensayo a compresión de la mezcla 100% agregado reciclado a veintiocho días

Noviembre de 2008

Anexo VI - ETAPA II, GRUPO2.

Ensayo a Flexión para viguetas con edad de veintiocho días:

ENSAYOS A 28 DÍAS FUNDIDA NATURAL AGREGADO CONVENCIONAL						
	Flexión					
	Curado			No Curado		
Muestra	9	10	11	12	13	14
Ancho (cm)	7.55	7.64	7.67	7.65	7.59	7.6
Alto (cm)	7.08	7.04	7.04	6.94	7.07	7.2
Largo (cm)	30	30	30	30	31	30
Peso (gr)	3728.8	3696.3	3655.6	3403.7	3442.5	3548.3
Resistencia 28 días (kg)	600	590	505	485	480	480
Módulo de Rotura	47.56	46.74	39.85	39.49	39.22	36.55

Tabla VI.1. Ensayo a flexión de la mezcla natural con agregado convencional a veintiocho días.

ENSAYOS A 28 DÍAS FUNDIDA 50 % AGREGADO RECICLADO						
	Flexión					
	Curado			No Curado		
Muestra	10	11	12	14	15	16
Ancho (cm)	7	7.3	7	7.5	7.5	7
Alto (cm)	7.8	8.1	8.7	7.5	7.8	8.1
Largo (cm)	30	30	30	29.9	30	30.1
Peso (gr)	3380	4225	3895	3650	3835	3550
Resistencia 28 días (kg)	578	761	646	550	533	491
Módulo de Rotura	40.72	47.67	36.58	38.98	35.04	32.18

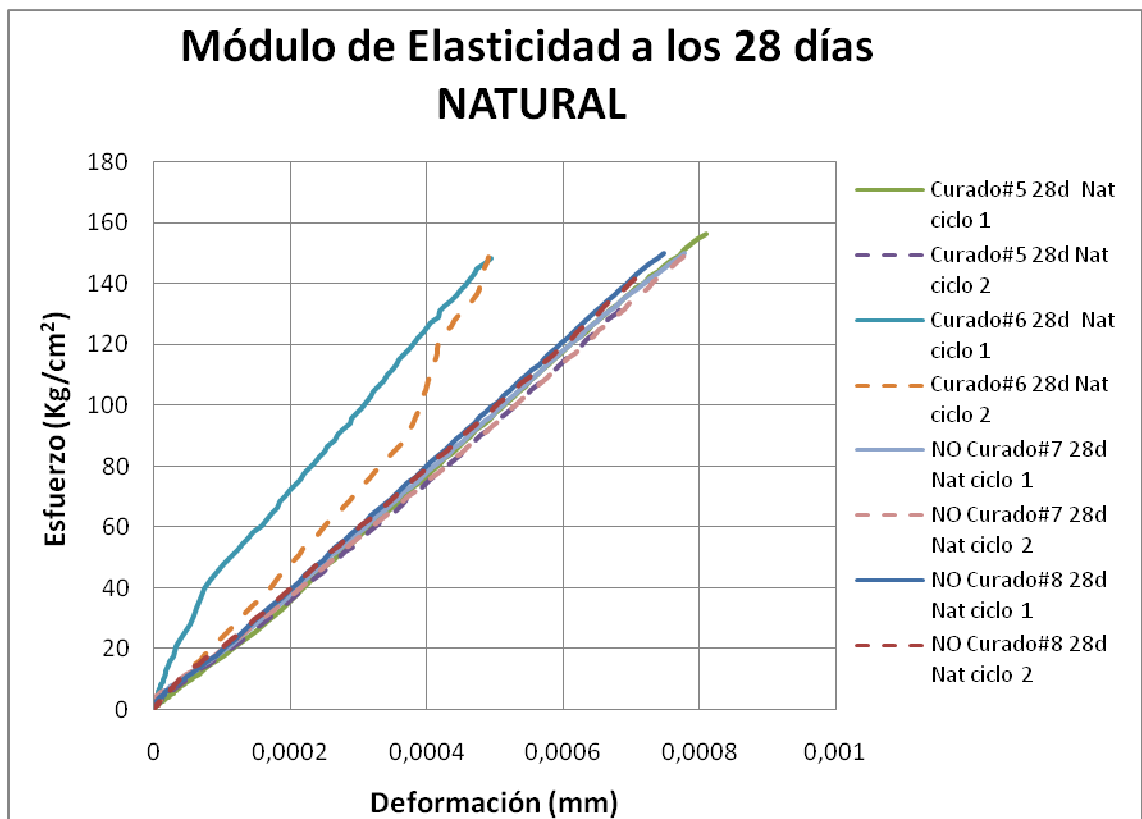
TablaVI.2. Ensayo a flexión de la mezcla 50% agregado reciclado a veintiocho días.

ENSAYOS A 28 DÍAS FUNDIDA 100 % AGREGADO RECICLADO						
	Flexión					
	Curado			No Curado		
Muestra	11	12	13	14	15	16
Ancho (cm)	6	7	7.02	7.37	7.59	7.44
Alto (cm)	7.11	8.17	7.86	7.76	8.025	7.97
Largo (cm)	29.93	29.94	30	30	30.1	29.96
Peso (gr)	3386.6	3652.2	3568.2	3544.5	3706.4	3677.5
Resistencia 28 días (kg)	602	580	576	595	657	530
Módulo de Rotura	59.40	37.17	39.84	40.22	40.46	33.60

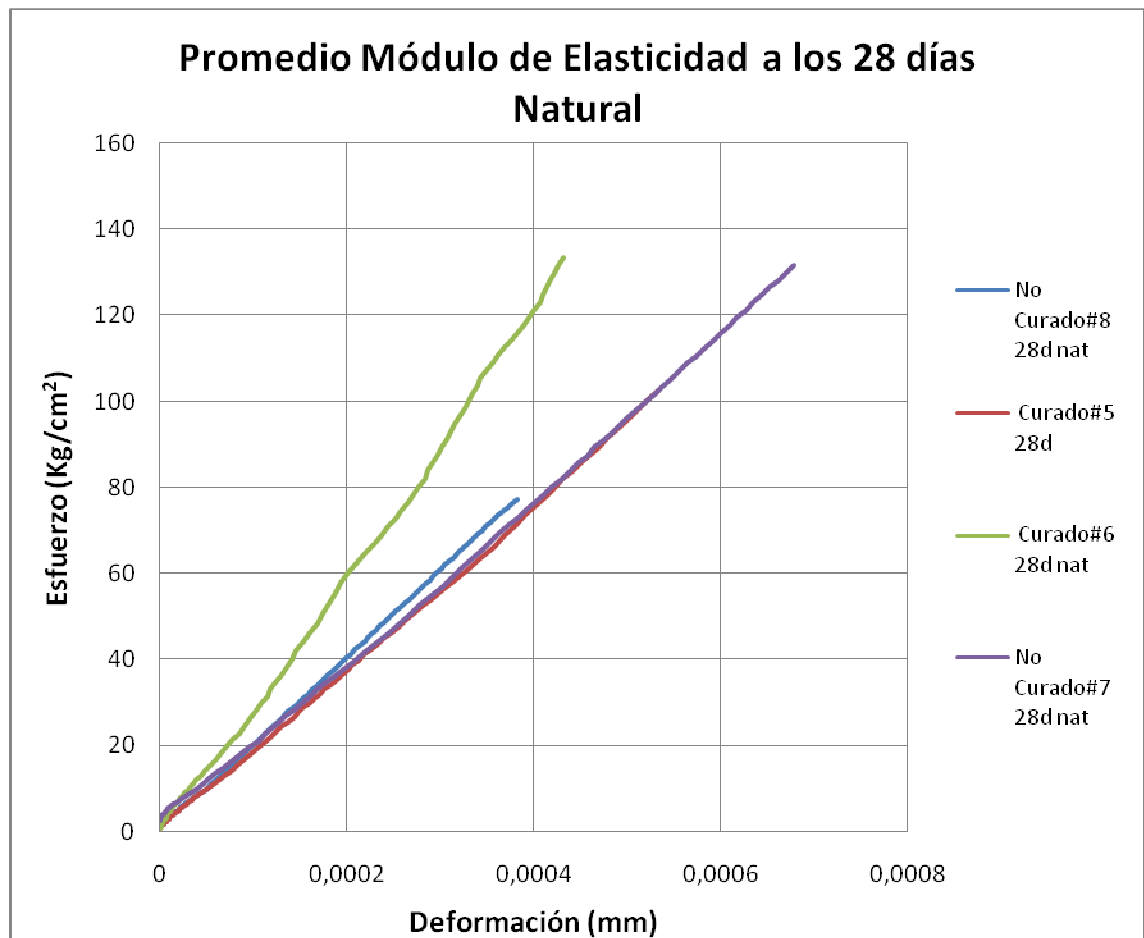
Tabla VI.3. Ensayo a flexión de la mezcla 100% agregado reciclado a veintiocho días.

Anexo VII - ETAPA II, GRUPO 3.

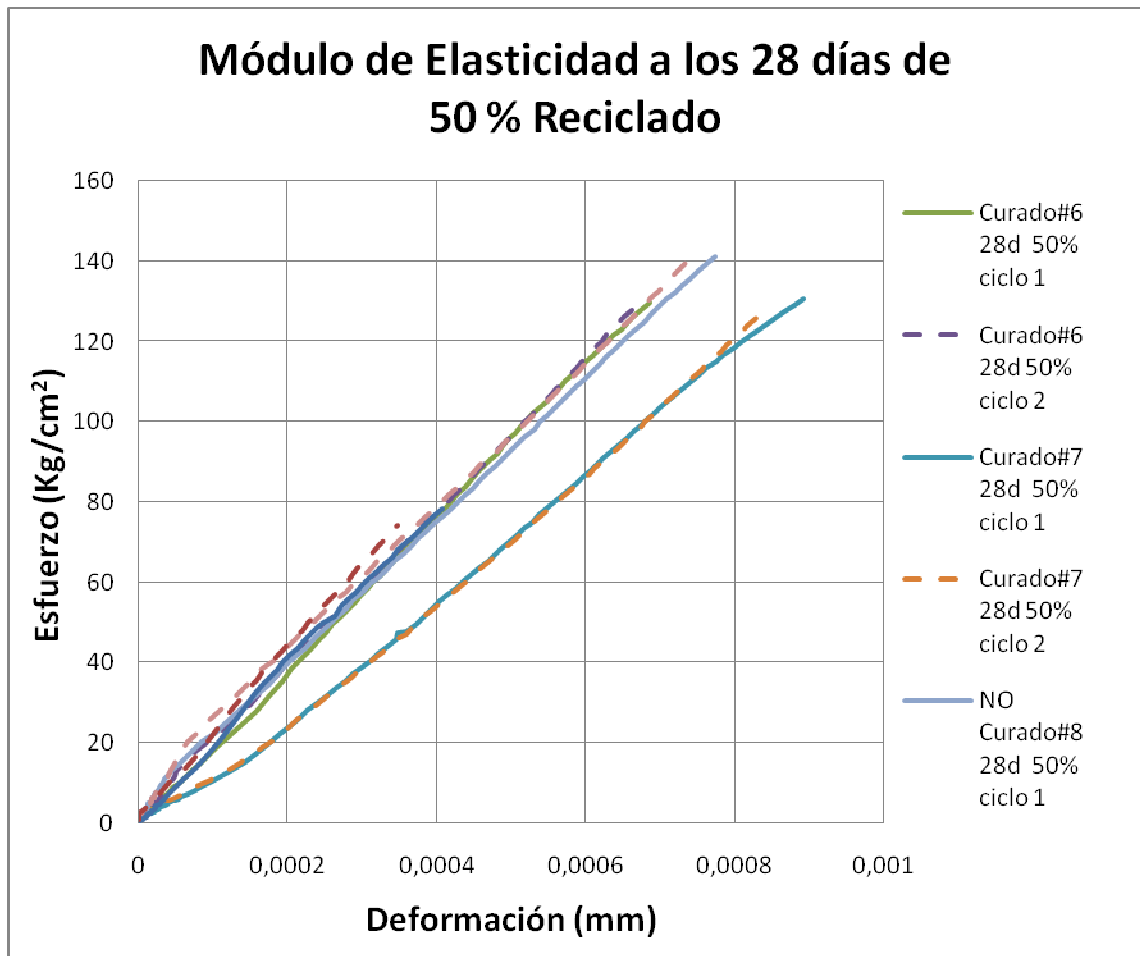
Ensayo Módulo de Elasticidad para cilindros con edad de veintiocho días:



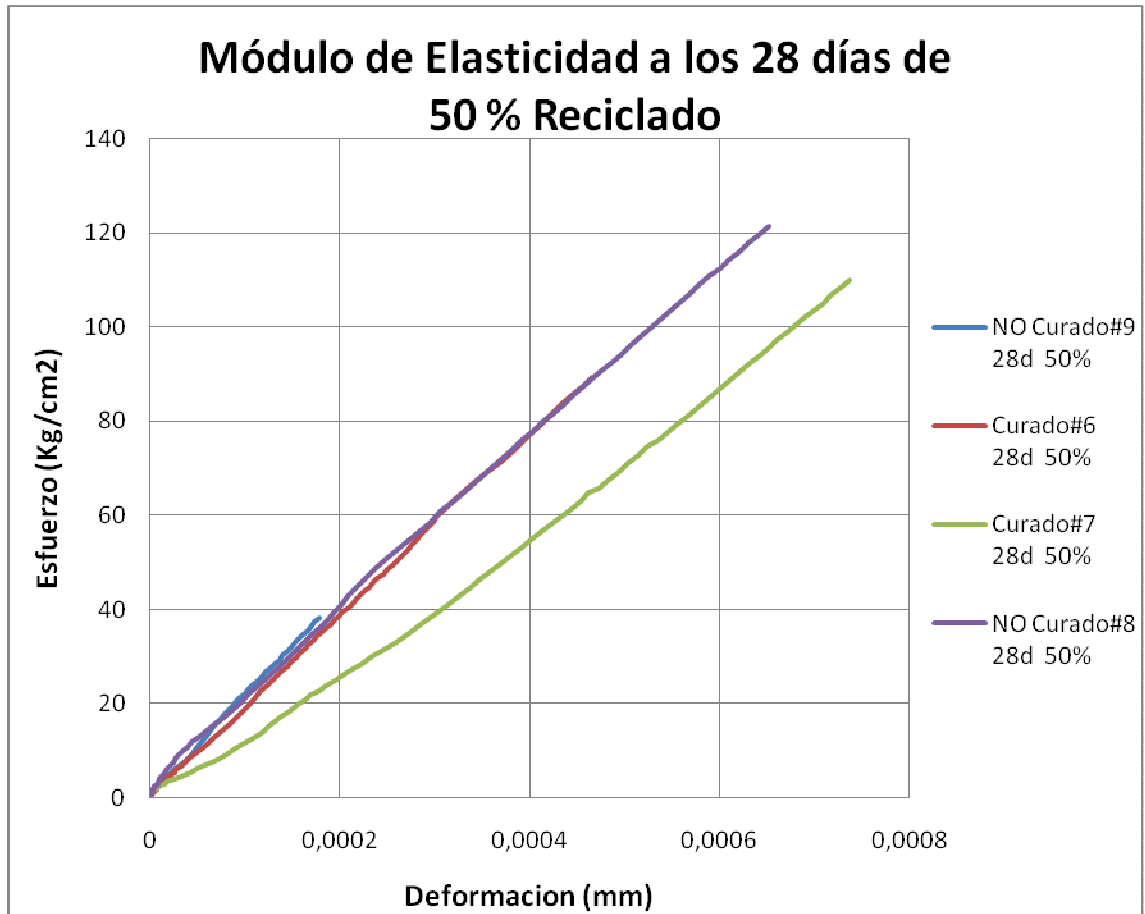
Gráfica VII.1. Módulo de elasticidad para cilindros con agregado convencional a los veintiocho días.



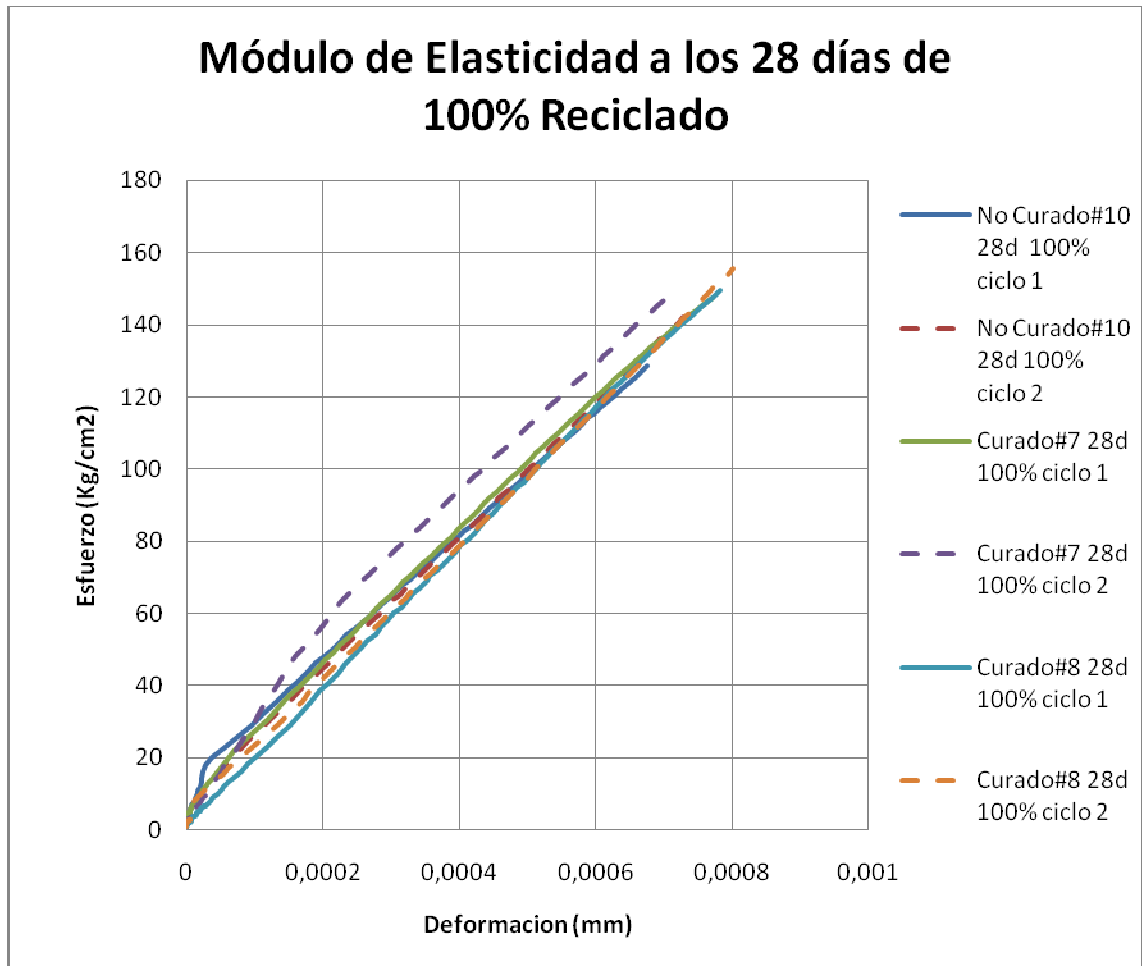
Gráfica VII.2. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con agregado convencional a los veintiocho días.



Gráfica VII.3. Módulo de elasticidad para cilindros con 50% agregado reciclado a los veintiocho días.



Gráfica VII.4. Promedio módulo de elasticidad para cilindros con 50% agregado reciclado a los veintiocho días.



Gráfica VII.5. Módulo de elasticidad para cilindros con 100% agregado reciclado a los veintiocho días.

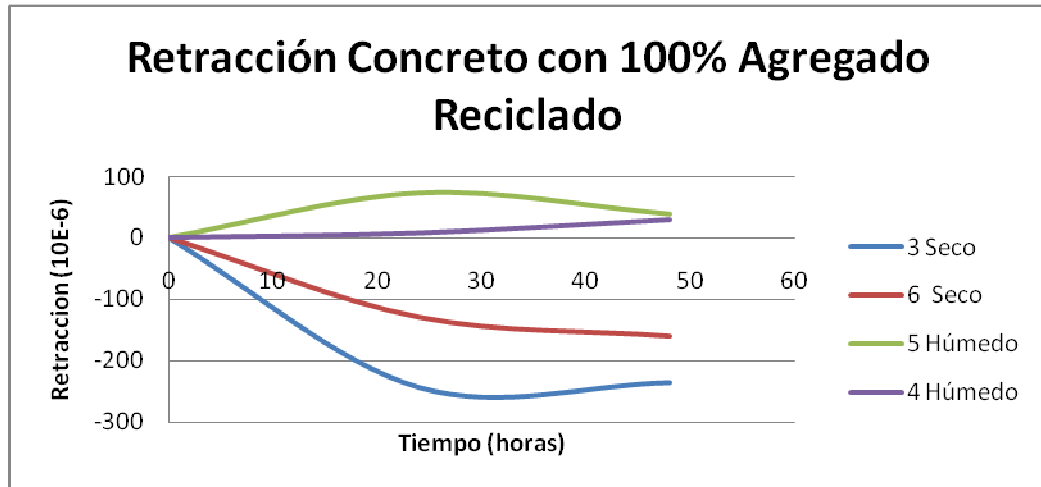


Gráfica VII.6 . Promedio módulo de elasticidad para cilindros con 100% agregado reciclado a los veintiocho días

Anexo VIII - Resultados de los ensayos de retracción de concreto con 100% agregado reciclado

Porcentaje A.reciclado	Tipo de curado	Lecturas (0.001 mm)				Δ de longitud (0.001 mm)			Deformación (10XE-6)		
		48 h	72 h	96 h	144 h	24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
100%	3 Seco	4690	4628	4630	-	-62	-60	-	-244	-236	-
	6 Seco	4160	4127	4119	-	-33	-41	-	-130	-161	-
	5 Húmedo	3845	3847	3853	-	19	10	-	74	39	-
	4 Húmedo	3830	3849	3840	-	2	8	-	8	31	-
Long. Ref.	5600	0,001 mm									
Long. Efec.	254	mm									

Tabla VIII.1. Resultados del ensayo de retracción - 100% agregado reciclado

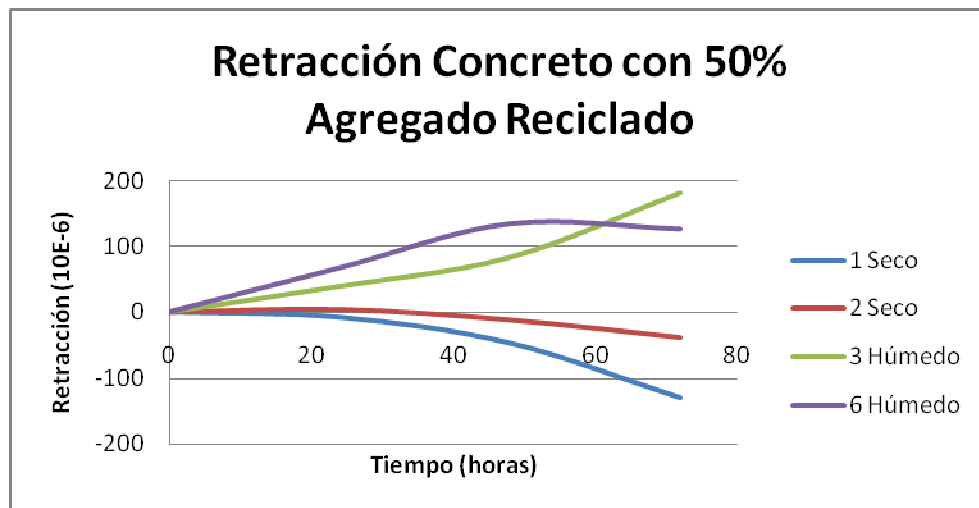


Gráfica VIII.2. Gráfica de resultados del ensayo de retracción – 100% agregado reciclado

Anexo IX - Resultados de los ensayos de retracción de concreto con 50% agregado reciclado

Porcentaje A.reciclado	Tipo de curado	Lecturas (0.001 mm)				Δ de longitud (0.001 mm)			Deformación (10XE-6)		
		48 h	72 h	96 h	144 h	24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
50%	1 Seco	3705	3703	3693	3672	-2	-12	-33	-8	-47	-130
	2 Seco	3234	3235	3237	3224	1	-3	-10	4	-12	-39
	3 Húmedo	3748	3758	3769	3794	10	21	46	39	83	181
	6 Húmedo	4604	4621	4638	4636	17	34	32	67	134	126
Long. Ref.	6400	0,001 mm									
Long. Efec.	254	mm									

Tabla IX.1. Resultados del ensayo de retracción - 50% agregado reciclado

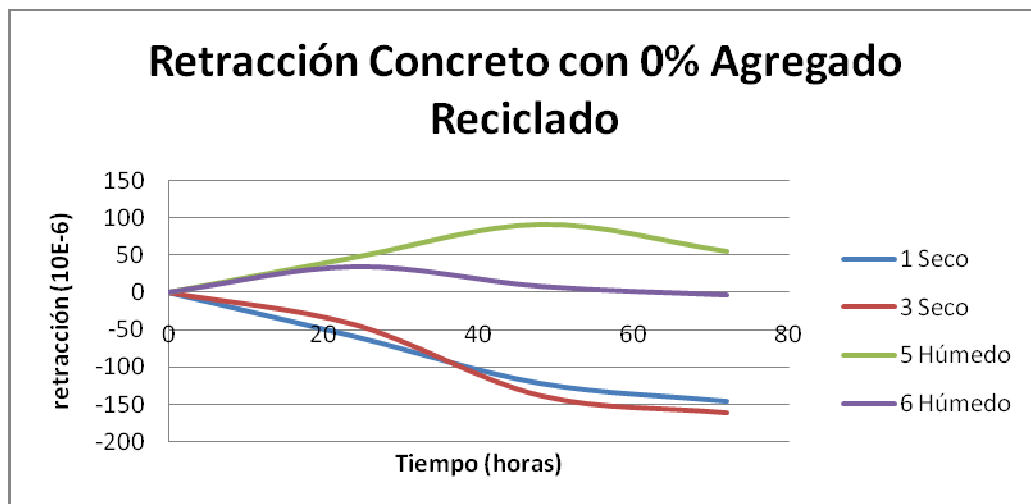


Gráfica IX.2. Gráfica de resultados del ensayo de retracción – 50% agregado reciclado

Anexo X - Resultados de los ensayos de retracción de concreto con agregado natural

Porcentaje A.reciclado	Tipo de curado	Lecturas (0.001 mm)				Δ de longitud (0.001 mm)			Deformación (10E-6)		
		48 h	72 h	96 h	144 h	24 h	48 h	72 h	24 h	48 h	72 h
natural	1 Seco	3555	3540	3524	3518	-15	-31	-37	-59	-122	-146
	3 Seco	4262	4251	4227	4221	-11	-35	-41	-43	-138	-161
	5 Húmedo	3284	3296	3307	3298	12	23	14	47	91	55
	6 Húmedo	5209	5218	5211	5208	9	2	-1	35	8	-4
Long. Ref.	6300	0,001 mm									
Long. Efec.	254	mm									

Tabla X.1. Resultados del ensayo de retracción - 0% agregado reciclado



Gráfica X.2. Gráfica de resultados del ensayo de retracción – 0% agregado reciclado

Anexo XI. Ficha técnica del aditivo EUCON-N



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
www.toxement.com.co

EUCON N

Reductor de agua para hormigón y mortero

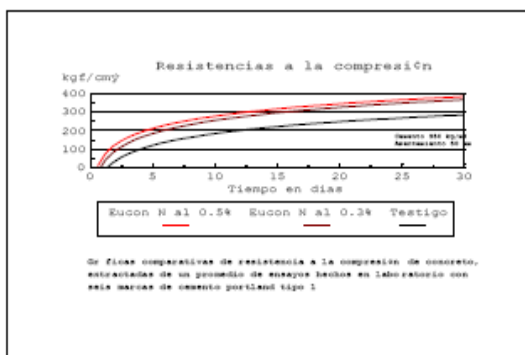
TX40T019

DESCRIPCION

EUCON N es un aditivo reductor de agua para concretos y morteros. Es una solución acuosa, concentrada y formulada para mejorar la manejabilidad de concretos y morteros, de acuerdo a las normas ASTM C-494 Tipo A o ICONTEC 1299.

INFORMACION TECNICA

Apariencia : Líquido de baja viscosidad
Color : Café oscuro
Contenido de cloruros : Ninguno
Contenido de azúcares : Ninguno
Densidad : 1.17 kg/l +/- 0.03 kg/l



USOS

EUCON N es recomendado en todo tipo de obras de concreto o de mortero donde se requiera:

- Reducir el agua de amasado incrementando las resistencias mecánicas.
- Mejorar la consistencia, manejabilidad y plasticidad de las mezclas.
- Reducir la permeabilidad.
- Obtener mejores acabados.
- Acelerar resistencias.
- Permite tener reducciones de agua hasta de 12%.

VENTAJAS

El uso de EUCON N aporta grandes ventajas al concreto tanto en su estado plástico como en su estado endurecido.

CONCRETO EN ESTADO FRESCO:

- Mejora las características de terminado.
- Aumenta la trabajabilidad.
- Reduce los requerimientos de agua.
- Reduce la segregación.

CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO:

- Incrementa las resistencias mecánicas iniciales y finales.
- Reduce la permeabilidad.
- Reduce el agrietamiento.
- Permite desencofrar más rápidamente.
- Acelera las resistencias.

DOSIFICACION

La dosificación de EUCON N, varía entre el 0,2% y el 0,5% del peso del cemento empleado en la mezcla, o sea de 100 g a 250 g (de 86 ml a 216 ml) por saco de cemento de 50 kg, según la reducción de agua recomendada para la resistencia deseada o el aumento en manejabilidad que se desee obtener.

APLICACION

EUCON N se suministra listo para su uso. Se adiciona a las mezclas húmedas diluido en el agua de amasado, preferiblemente por medio de un dosificador, o directamente sobre la mezcla, homogeneizándola nuevamente para su completa incorporación. EUCON N es compatible con el agente inclusor de aire AIRMIX D de EUCLID - TOXEMENT, cuando se hace necesario producir concretos o morteros con aire incluido. En este caso es necesario adicionarlos por separado a la mezcla, reduciendo la dosis del agente inclusor, para obtener el mismo porcentaje de aire incluido.

Si se desea acelerar y aumentar las resistencias del concreto y reducir la permeabilidad, deberá disminuirse el agua de amasado y realizar ensayos de asentamiento. La máxima cantidad de agua a reducir se logra cuando se llegue al mínimo asentamiento permitido.

Noviembre de 2008



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
www.toxement.com.co

RECOMENDACIONES ESPECIALES

Cuando se utilice con otros aditivos, cada uno de ellos debe dosificarse por separado.

MANEJO Y ALMACENAMIENTO

EUCON N debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado y bajo techo.

Vida útil en almacenamiento: 1 año.

PRESENTACION

Garrafa plástica: 20 kg.
Tambor metálico: 230 kg.

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web www.toxement.com.co para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los substratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

Agosto 1 de 2008

Anexo XII – Mosaico del proceso de trituración de cilindros



Foto 1. Partiendo cilindros en mitad de ladrillo



Foto 4. Resultado despues de la trituracion



Foto 2. Trituradora de mandibulas pequeñas



Foto 5. Pedazo de cilindro en la boquilla



Foto 3. Boquilla de la trituradora



Foto 6. Cargando las lonas

Anexo XIII – Mosaico del proceso de fundida de viguetas y cilindros



Foto 7. Moldes de las viguetas y cilindros



Foto 10. Viguetas y cilindros fundidos



Foto 8. Moldes de las viguetas y cilindros



Foto 11. Viguetas y cilindros fraguando



Foto 9. Viguetas fundidas

Anexo XIV - Mosaico de las muestras con agregado natural a 7 días de edad

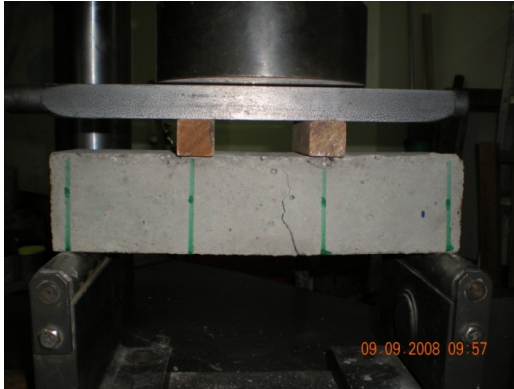


Foto 12. Resultado de flexion – vigueta 11



Foto 15. Resultado de compresion – cilindro 1



Foto 13. Resultado de flexion – vigueta 12



Foto 16. Resultado de compresion – cilindro 2



Foto 14. Antes del ensayo a flexion



Foto 18. Antes del ensayo a compresion

Anexo XV – Mosaico de las muestras con agregado natural a 28 días de edad



Foto 19. Resultado de compresion – cilindro 1

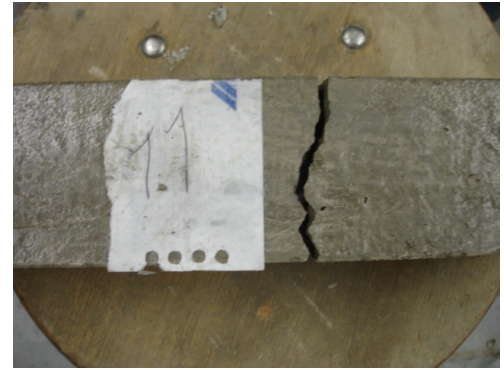


Foto 22. Resultados de flexion – vigueta 11



Foto 20. Resultado de compresion – cilindro 2



Foto 23. Resultado de flexion – vigueta 10



Foto 21. Resultado de compresion – cilindro 4



Foto 24. Resultado de flexion – vigueta 13

Anexo XVI – Mosaico de las muestras con 50% agregado reciclado a 7 días de edad



Foto 25. Resultado de flexion – vigueta 11



Foto 28. Resultado de compresion – cilindro 3



Foto 26. Resultado de compresion – cilindro 2



Foto 29. Resultado a flexión – vigueta 1



Foto 27. Resultado de compresion – cilindro 1

Anexo XVII – Mosaico de las muestras con 50% agregado reciclado a 28 días de edad



Foto 30. Resultado de compresion – cilindro 2



Foto 33. Resultado de compresion – cilindro A6



Foto 31. Resultado de compresion – cilindro 4

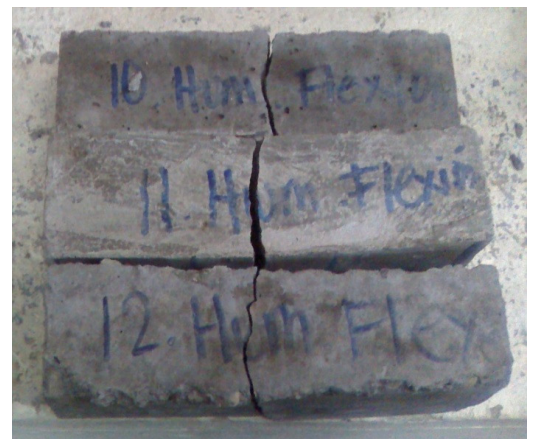


Foto 34. Resultado de flexion



Foto 32. Resultados de flexion



Foto 35. Resultados de flexion

Anexo XVIII – Mosaico de las muestras con 100% agregado reciclado a 7 días de edad



Foto 36. Resultado de compresion – cilindro 2



Foto 39. Resultados de flexion



Foto 37. Resultado de compresion – cilindro 3



Foto 40. Resultados de flexion



Foto 38. Resultado de compresion



Foto 41. Resultados de flexion

Anexo XIX – Mosaico de las muestras de 100% agregado reciclado a 28 días de edad



Foto 42. Resultados de compresion



Foto 45. Resultados de flexion



Foto 43. Resultados de compresion



Foto 46. Resultados de flexion



Foto 44. Resultados de compresion



Foto 47. Resultados de flexion

Anexo XX – Equipos de ensayos

Maquina Universal

Los cilindros y viguetas fueron ensayados en una maquina con aplicación de carga controlada, de tipo hidráulico con capacidad máxima de 100 toneladas y las lecturas de carga se hicieron indirectamente utilizando una celda de carga de capacidad 20 toneladas y precisión de 0,01 kg. En la foto 3.3.2.1 se puede observar dicha maquina.



Foto 48. Maquina Universal de Ensayos

Comparador de caratulas

Para cuantificar la contracción que tiene la masa de concreto se uso un comparador de carátula ajustable con un deformímetro con aproximación a milésima de milímetro (0,001 mm). Se necesita que el deformímetro este calibrado de manera correcta por la Superintendencia de Industria y Comercio. En la Foto 3.3.2.1 se puede observar el dispositivo.



Foto 49. Comparador de Caratulas