



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTABLECER LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO  
ADICIONADO CON VIDRIO RECICLADO PROVENIENTE  
DE BOMBILLOS AHORRADORES**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

Presentado ante la

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO**

Como parte de los requisitos para optar al título de

**INGENIERO CIVIL**

**REALIZADO POR**

**Gesaro Ramos, Rui Manuel**

**Montero Rocca, Jesús Alberto**

**PROFESOR GUÍA**

**Msc. Ing. Guillermo Bonilla**

**FECHA**

**Caracas, Junio de 2016**

## Índice

CAPÍTULO I .....	1
I) El problema .....	1
I.1) Planteamiento del problema .....	1
I.2) Antecedentes.....	3
I.3) Interrogantes del estudio .....	4
I.4) Objetivos .....	5
I.4.1) Objetivo general.....	5
I.4.2) Objetivos específicos.....	5
I.5) Alcances y limitaciones.....	5
CAPÍTULO II .....	7
II) Marco teórico .....	7
II.1) Aditivo y adiciones .....	7
II.2) Resistencia mecánica .....	8
II.3) Curvas tensión-deformación .....	8
II.4) Efecto de la edad del concreto.....	9
II.5) Absorción capilar.....	10
II.6) Vidrio reciclado de luminarias fluorescentes .....	10
II.7) Encapsulamiento de contaminantes .....	11
CAPÍTULO III.....	13
III) Marco metodológico.....	13
III.1) Naturaleza de la investigación .....	13

III.2) Tipo de investigación.....	13
III.3) Población .....	13
III.4) Muestra .....	14
III.5) Recolección de datos .....	14
III.6) Equipos de aplicación de carga .....	14
III.7) Equipos de medición y accesorios empleados .....	14
III.8) Variables en el ensayo .....	15
III.8.1) Variables dependientes .....	15
III.8.2) Variables independientes .....	15
III.8.3) Elementos a mantener constantes .....	15
III.9) Diseño experimental.....	15
III.10) Materiales utilizados. Propiedades y características. Dosificación .....	17
III.10.1) Concreto .....	17
III.10.1.1) Características del agregado grueso.....	17
III.10.1.2) Características del agregado fino .....	17
III.10.1.3) Características del cemento .....	17
III.10.1.4) Dosificación.....	17
III.11) Fases de ejecución .....	18
III.11.1) Logística y planificación .....	18
III.11.2) Elaboración de las probetas .....	21
III.11.3) Ejecución de ensayos .....	23
III.11.3.1) Propiedades y comportamiento mecánico.....	23
III.11.3.2) Absorción por capilaridad .....	24

CAPÍTULO IV.....	26
IV) Resultados y análisis .....	26
IV.1) Comportamiento mecánico en estado endurecido .....	26
IV.1.1) Relación tensión–deformación.....	26
IV.1.1.1) Dosis 490 kg de cemento/m <sup>3</sup> .....	26
IV.1.1.2) Dosis 420 kg de cemento/m <sup>3</sup> .....	28
IV.1.1.3) Dosis 350 kg de cemento/m <sup>3</sup> .....	29
IV.1.2) Modificación de la resistencia a la compresión mecánica .....	30
IV.1.2.1) 0% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	30
IV.1.2.2) 20% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	31
IV.1.2.3) 40% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	32
IV.1.2.4) 50% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	33
IV.1.2.5) 80% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	34
IV.2) Parámetros de absorción capilar en estado endurecido del concreto .....	35
IV.2.1) Porosidad.....	36
IV.2.1.1) Comportamiento según variación del porcentaje de vidrio para dosis de cemento .....	36
IV.2.1.1.1) Dosis 490 kg de cemento/ m <sup>3</sup> .....	36
IV.2.1.1.2) Dosis 420 kg de cemento/ m <sup>3</sup> .....	37
IV.2.1.1.3) Dosis 350 kg de cemento/ m <sup>3</sup> .....	38
IV.2.1.2) Comportamiento según variación de dosis cemento con base en el porcentaje vidrio añadido.....	39
IV.2.1.2.1) 0% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	39

IV.2.1.2.2) 20% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	40
IV.2.1.2.3) 40% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	40
IV.2.1.2.4) 50% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	41
IV.2.1.2.5) 80% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	42
V.2.2) Tiempo de colmatación por capilaridad .....	43
V.2.2.1) Comportamiento según variación del porcentaje de vidrio para dosis de cemento .....	43
V.2.2.1.1) Dosis 490 kg de cemento/m <sup>3</sup> .....	43
V.2.2.1.2) Dosis 420 kg de cemento/m <sup>3</sup> .....	44
V.2.2.1.1) Dosis 350 kg de cemento/m <sup>3</sup> .....	45
V.2.1.2) Comportamiento según variación de dosis de cemento con base en el porcentaje de vidrio añadido .....	46
V.2.1.2.1) 0% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	46
V.2.1.2.2) 20% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	47
V.2.1.2.3) 40% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	47
V.2.1.2.4) 50% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	48
V.2.1.2.5) 80% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores .....	49
CAPÍTULO V .....	50
V) Conclusiones .....	50
CAPÍTULO VI.....	52
VI) Recomendaciones.....	52
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXOS .....	55





**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTABLECER LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO  
ADICIONADO CON VIDRIO RECICLADO PROVENIENTE  
DE BOMBILLOS AHORRADORES**

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo, ha evaluado su contenido con el resultado: \_\_\_\_\_

**JURADO EXAMINADOR**

Nombre: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_ Firma: \_\_\_\_\_

**Caracas, Junio de 2016**

A mi familia, novia y amigos por su compañía  
y ser una fuente de felicidad día a día.

Jesús A. Montero R.

A mi familia y amigos  
por su compañía y apoyo incondicional en todo momento.

Rui M. Gesaro R.



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, porque sin su voluntad nada sería posible. Seguidamente al equipo del Laboratorio de Tecnología del Concreto, su jefe el Ing. Guillermo Bonilla, nuestro tutor por acompañarnos y guiarnos en este trabajo, a la Ing. Yelitza Sirit responsable de los ensayos de laboratorio, a el Sr. Luis Espinoza personal obrero del laboratorio, y a nuestros compañeros Luis Minuart, Vanessa Tovar, Wilson González, Anthony Cárdenas, Andreina Pernía, Jovina Cabanillas; por su apoyo incondicional en la realización de este trabajo especial de grado.

A nuestros familiares, amigos, novias, quienes nos ayudaron a lo largo de nuestra carrera universitaria y fueron pilar fundamental para la culminación de esta etapa.

A todos ustedes gracias.

## Índice de Figuras

Figura I-1 Grafica teórica de ensayo a compresión de cilindros.....	9
Figura II-2 Variación de la resistencia con la edad del concreto.....	10
Figura III-1 Fases de ejecución para la investigación. ....	18
Figura III-2 % Retenido / Pasante acumulado con relación a la abertura del tamiz.....	20
Figura III-3 Curva granulométrica del vidrio proveniente de bombillos ahorradores junto con los límites superiores e inferiores recomendados para una arena gruesa, especificados en el manual del concreto estructural.....	20
Figura III-4 Clasificación del material retenido en cada uno de los cedazos.....	21
Figura III-5 Secuencia de pasos para generar las probetas.....	23
Figura III-6 Ensayo de compresión simple de cilindro con curva tensión- deformación.....	24
Figura III-7 Resultado físico de la absorción por capilaridad de Fagerlund.....	25
Figura IV-1 Gráfica tensión-deformación, D1 (490 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	27
Figura IV-2 Gráfica tensión-deformación, D3 (420 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	28
Figura IV-3 Gráfica tensión-deformación, D2 (350 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	29
Figura IV-4 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 0% vidrio.....	30
Figura IV-5 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 20% vidrio.....	31
Figura IV-5 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 40% vidrio.....	32
Figura IV-6 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 50% vidrio.....	33
Figura IV-7 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 80% vidrio.....	34
Figura IV-8 Gráfica porosidad – Dosis 1 (490 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	36
Figura IV-8 Gráfica porosidad - Dosis 3 (420 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	37

Figura IV-9 Gráfica porosidad - Dosis 2 (350 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	38
Figura IV-10 Gráfica porosidad - Dosis de cemento, 0% vidrio.....	39
Figura IV-11 Gráfica porosidad - Dosis de cemento, 20% vidrio.....	40
Figura IV-12 Gráfica porosidad - Dosis de cemento, 40% vidrio.....	40
Figura IV-13 Gráfica porosidad - Dosis de cemento, 50% vidrio.....	41
Figura IV-14 Gráfica porosidad - Dosis de cemento, 80% vidrio.....	42
Figura IV-15 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - código de muestras, D1 (490 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	43
Figura IV-16 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - código de muestras, D3 (420 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	44
Figura IV-17 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - código de muestras, D2 (350 Kg de cemento/m <sup>3</sup> ).....	45
Figura IV-18 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de cemento, 0% vidrio.....	46
Figura IV-19 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de cemento, 20% vidrio.....	47
Figura IV-20 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de cemento, 40% vidrio.....	47
Figura IV-21 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de cemento, 50% vidrio.....	48
Figura IV-22 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de cemento, 80% vidrio.....	49

## Índice de tablas

Tabla II-1 Composición química típica de vidrio “Soda Lime” utilizado en lámparas fluorescentes.....	11
Tabla III-1 Nomenclatura de dosificaciones.....	16
Tabla III-2 Diseños de mezcla.....	18

## **SINOPSIS**

El aprovechamiento y reutilización de materiales no biodegradables como plástico, vidrio, aluminio; baja considerablemente el consumo de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y reduce la explotación de materias primas. En el caso particular del vidrio la experiencia ha llevado a que es un material que puede ser reutilizado indefinido número de veces. En Venezuela se ha venido haciendo un uso extensivo de los bombillos ahorradores fluorescentes, dado el ahorro de energía que ellos proporcionan, sin embargo su disposición final constituye un problema de tipo ambiental ya que contienen una pequeña cantidad de mercurio que debe ser extraída.

Como un aporte al desarrollo sustentable y primeros pasos para establecer criterios de encapsulamiento de los contaminantes, se propuso definir las propiedades del concreto adicionado con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores.

La investigación buscó conocer la variación de las propiedades mecánicas e hidráulicas de su masa, cuando en el concreto se usa el vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores como adición. Fueron utilizadas 45 muestras cilíndricas estandarizadas para el ensayo de compresión axial y 75 muestras para ensayos de absorción capilar siguiendo el método de Fagerlund.

De esto se encontró que; hay alta variabilidad en los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de probetas adicionadas con este tipo de vidrio. En cuanto a los ensayos de absorción también se obtuvo alta variabilidad, sin embargo se demostró el efecto inversamente proporcional de la cantidad de cemento en la porosidad.

## **CAPÍTULO I**

### **I) El problema**

#### **I.1) Planteamiento del problema**

El concreto es un material que se puede considerar constituido por dos partes: una es un producto pastoso y moldeable, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo, y la otra son trozos pétreos que quedan englobados en esa pasta. A su vez, la pasta está constituida por agua y un producto aglomerante o conglomerante, que es el cemento. El agua cumple la doble misión de dar fluidez a la mezcla y de reaccionar químicamente con el cemento dando lugar, con ello, a su endurecimiento. (Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, p.31)

Siendo uno de los principales y más utilizados materiales de construcción en el mundo, sus componentes básicos no han cambiado a lo largo de la historia, pero si se han ido desarrollando aditivos y adiciones que mejoran o modifican sus características mecánicas, químicas y físicas, todo ello con la finalidad de buscar que su uso se adapte mejor a las condiciones donde solo la mezcla tradicional no podría cumplir el comportamiento que desean los proyectistas.

El desarrollo de la infraestructura en la que habita el hombre ha sido objeto de innumerables reflexiones, estudios, precisiones, críticas y demás análisis, motivados a que han ocurrido en el mundo amplios procesos de transformación, donde las actividades constructivas resultan ser de las más invasivas en el ambiente, debido que estas modifican parcial o totalmente la biósfera, ya sea para la obtención de materias primas o para la ejecución de construcciones que impactan positivamente a una población, a pesar de tener un impacto en algunos casos negativos en el medio.

Este escenario de cambio continuo hace que la responsabilidad de los profesionales que intervienen en los procesos de construcción, busquen mitigar los efectos negativos que genera su actividad sobre el ambiente, el cual, si bien, no debe detenerse porque afectaría el crecimiento y desarrollo del ser humano, concibiéndose “desarrollo” como apertura y despliegue de potencialidades cualitativas y no solo crecimiento cuantitativo, tanto económico como social, pero sí debe ir en la búsqueda de nuevos métodos que reduzcan el daño al ambiente y hagan sostenible la actividad en todas sus dimensiones ecológicas. Lo anterior es conocido como desarrollo sustentable y fue definido con precisión por la Comisión Mundial del Ambiente y Desarrollo, en el informe denominado Nuestro Futuro Común (1987), como “el que satisface las necesidades del presente sin dañar la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”.

Dentro de este contexto el aprovechamiento y reutilización de materiales no biodegradables como plástico, vidrio, aluminio, baja considerablemente el consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y reduce la explotación de materias primas en el caso particular del vidrio la experiencia ha llevado a que es un material que puede ser reutilizado indefinido número de veces.

Ahora bien, en Venezuela para el año 2006 se popularizó la utilización de bombillos ahorradores fluorescentes, esto con el fin de la búsqueda de una reducción del consumo de energía eléctrica, pero algunas de estas bombillas contienen en su interior una pequeña cantidad de mercurio. Según Avendaño (2014) “la cantidad de mercurio en el interior de un foco fluorescente es capaz de contaminar el equivalente a 25.000 vasos de agua, por esta razón, cuando el foco cumple su vida útil o se quiebra es necesario tomar algunas precauciones” (parr.3).

Esta situación implicó la construcción de plantas para el tratamiento de estos desechos, que luego de extraérseles las trazas de mercurio, son dispuestos en rellenos sanitarios. Sin embargo, el proceso de tratamiento no es capaz de retirar el mercurio que reacciona con las

partículas de vidrio al romper las bombillas en el proceso de trituración y por ello debe tenerse especial cuidado con la disposición final de este desecho. En vista de esto como un aporte al desarrollo sustentable y como primera etapa de los estudios necesarios para encapsular los contaminantes, se ha propuesto determinar las propiedades mecánicas del concreto e hidráulicas de su masa, adicionado con vidrio proveniente de bombillos ahorradores.

## **I.2) Antecedentes**

**Garcia M., Maria L. y Morales R., Ana E (2014)**, presentaron un trabajo donde fue analizada la resistencia de un concreto  $f'c$  250 kgf/cm<sup>2</sup> sustituyendo 20% de cemento tipo portland por vidrio molido, usando un diseño de mezcla patrón establecido por una concretera local y comparando la resistencia a la compresión de una mezcla de concreto tradicional, con la mezcla de concreto a la que le fue sustituido el 20% del cemento por vidrio. Fue obtenido como resultado una disminución de la resistencia a la compresión del 43,5% de las muestras correspondientes a la mezcla que se le realizó la sustitución, respecto a la resistencia de la muestras de concreto tradicional.

**Catalan A., Carlos J., (2013)**, realizó un estudio sobre la influencia del vidrio molido en mezclas de concreto, donde propuso una sustitución parcial de la arena por vidrio en un porcentaje que se varió entre 0% y 20%. Sobre probetas cúbicas de 15 centímetros de lado, realizó ensayos de resistencia a la compresión, variación de la densidad y variación de la consistencia de la mezcla. De cada una de estas propiedades se realizaron gráficas donde se observó la variación de la tendencia en cada propiedad estudiada sobre las diferentes mezclas.

**C. Meyer, N. Egosi, and C. Andela, (2012)**, realizaron un trabajo que tuvo como objetivo evaluar los cambios de las propiedades mecánicas, resistencia a la abrasión y la permeabilidad, de muestras de concreto tradicionales y muestras de concreto en las que se sustituyó 25% del cemento por vidrio triturado. En dicho trabajo se obtuvieron curvas características de cada propiedad, ensayadas a diferentes edades, donde fue observado que la



diferencia en tendencia de las muestras de concreto tradicional y las de concreto con la sustitución de vidrio por cemento.

De la investigación realizada para el presente trabajo se demuestra que no existe experiencia previa en la ejecución de trabajos de investigación en los cuales se utilice el vidrio proveniente de bombillos ahorradores como adición o sustitución en la mezcla de concreto, es por ello que se propuso la utilización en el presente trabajo especial de grado de este desecho como adición en mezclas de concreto.

### **I.3) Interrogantes del estudio**

De todo lo expuesto, surgen una serie de interrogantes fundamentales de análisis sobre cómo modifica las propiedades del concreto el adicionar vidrio de desecho proveniente de los bombillos ahorradores con la finalidad de encapsularlos, las cuales se enumeran a continuación:

- 1.- ¿Cómo se comporta el concreto endurecido y cómo afecta el comportamiento mecánico a la compresión al añadirle vidrio proveniente de los bombillos ahorradores a la mezcla tradicional?
- 2.- ¿Cómo se ve afectada la resistencia a la compresión del concreto adicionado con vidrio proveniente de los bombillos ahorradores?
- 3.- ¿Al añadir el vidrio de los bombillos al concreto cómo pueden variar los parámetros de absorción capilar del mismo en estado endurecido?

## **I.4) Objetivos**

### **I.4.1) Objetivo general**

- Establecer las propiedades del concreto adicionado con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores.

### **I.4.2) Objetivos específicos**

- Determinar las leyes de comportamiento mecánico en estado endurecido del concreto dosificado con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores, sometido a tensiones de compresión axial.
- Establecer la modificación en la resistencia a la compresión mecánica en mezclas de concreto dosificado con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores.
- Establecer los parámetros de absorción capilar en estado endurecido del concreto dosificado con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores.

## **I.5) Alcances y limitaciones**

Este trabajo especial de grado estuvo referido a concreto elaborado con arena natural de río con una gradación de media a fina, piedra picada de tamaño máximo 1” proveniente de Premezclados Ávila C.A, adicionado con vidrio reciclado (sin trazas de mercurio) triturado proveniente de bombillos ahorradores con una gradación de media a gruesa, proporcionado por la empresa VITAAMBIENTE C.A. El cemento utilizado fue tipo Portland CPCA1 de la Corporación Socialista del Cemento.

Sus propiedades mecánicas fueron medidas sobre probetas cilíndricas estandarizadas de 15cm x 30cm, variando la cantidad de vidrio añadida, específicamente con porcentajes de 0%, 20%, 40%, 50% y 80%, con una carga máxima aplicada de 100 toneladas.

Las propiedades de absorción capilar fueron registradas sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 5 cm de altura, siguiendo los procedimientos indicados en el ensayo de Fagerlund.

Las limitaciones estuvieron constituidas por la cantidad de muestras utilizadas para cada ensayo, la edad máxima de las probetas fue de 60 días, la disponibilidad de vidrio por parte de la empresa y la carga máxima aplicable en el ensayo a compresión.

## **CAPÍTULO II**

### **II) Marco teórico**

Dado que este trabajo se centrará en el análisis de como se ve afectado el comportamiento mecánico, la resistencia a la compresión y la absorción capilar, del concreto endurecido al ser adicionado con vidrio proveniente de bombillos ahorradores, resulta fundamental dar cuenta de diversas definiciones:

#### **II.1) Aditivo y adiciones**

Reciben el nombre de aditivos aquellos productos químicos que se añaden en pequeña proporción a los componentes principales de los morteros o de los concretos, durante su mezclado, con el propósito de modificar algunas de las propiedades de las mezclas en estado fresco o endurecido.

Los aditivos representan un gran adelanto dentro de la industria de la construcción con concreto. Muchos de los concretos de los últimos veinte años no hubieran tenido cabida sin los aditivos. Si bien estos productos históricamente comenzaron con comportamientos erráticos y con una composición variable y mal conocida, en la actualidad se ha llegado a efectividades muy favorables y constantes, conociendo perfectamente los fundamentos en los que se basan. La industria de la construcción, que fue cautelosa en la aceptación de los aditivos, hoy día los emplea abundante y confiadamente (Porrero et al., 2009, p.165).

En la industria de la construcción en Venezuela el término aditivo se acuña a productos líquidos, es por ello que para esta investigación se utilizó la expresión adición que no es más que un aditivo en forma sólida.

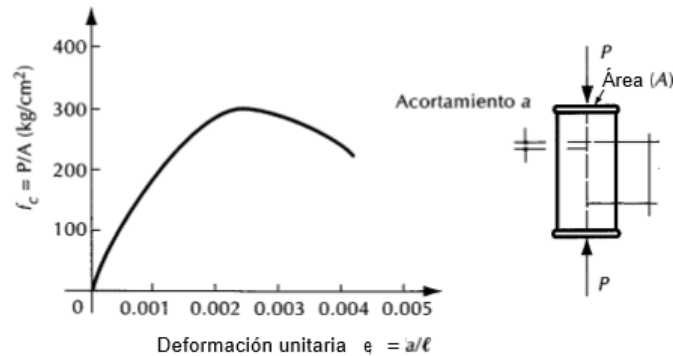
## **II.2) Resistencia mecánica**

En una estructura el concreto se encuentra sometido a sollicitaciones muy variadas (compresión, corte, tracción, flexotracción, agentes agresivos y otras). No es práctico llevar a cabo ensayos de control que analicen todos esos estados tensionales, por lo que se ha establecido la costumbre de realizar el ensayo destructivo a compresión simple, sobre probetas normalizadas e inferir, a partir de sus resultados, los valores de otras características mecánicas tales como resistencia a la tracción o al corte (Porrero et al., 2009, p.99-100).

## **II.3) Curvas tensión-deformación**

Las curvas esfuerzo-deformación se obtienen del ensayo de prismas sujetos a carga axial repartida uniformemente en la sección transversal mediante una placa rígida. Los valores del esfuerzo resultan de dividir la carga total aplicada,  $P$ , entre el área de la sección transversal del prisma,  $A$ , y representan valores promedio obtenidos bajo la hipótesis de que la distribución de deformaciones es uniforme y de que las características esfuerzo-deformación del concreto son constantes en toda la masa. El valor de la deformación, %, es la relación entre el acortamiento total,  $a$ , y la longitud de medición,  $l$ .

Puesto que el concreto es un material heterogéneo, lo anterior es una idealización del fenómeno. Según la distribución de la pasta y del agregado en la masa, los esfuerzos, considerados como la carga soportada, en un área diferencial, variarán de un punto a otro de una misma sección. Sin embargo esta variación no es significativa desde el punto de vista del diseño estructural (González Cuevas & Robles F.V, 1975, p.33).

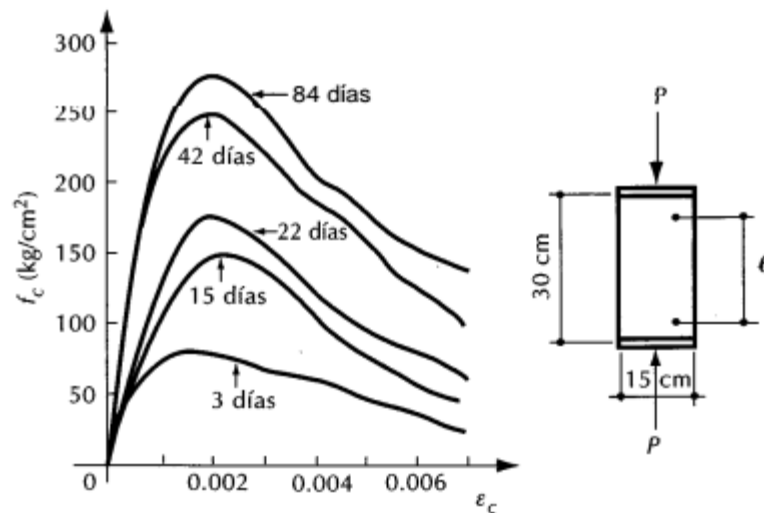


**Figura I-1 Gráfica teórica de ensayo a compresión de cilindros**

Fuente: González Cuevas & Robles F.V, Figura 2.2 Curva tensión-deformación en compresión axial de un espécimen sujeto a carga de corta duración., 1975, (p.34).

#### II.4) Efecto de la edad del concreto

Debido al proceso continuo de hidratación del cemento, el concreto aumenta su capacidad de carga con la edad. Este proceso de hidratación puede ser más o menos efectivo, según sean las condiciones de intercambio de agua con el ambiente, después del colado. Por lo tanto, el aumento de capacidad de carga del concreto depende de las condiciones de curado a través del tiempo. La Figura 2.3 Muestra curvas esfuerzo – deformación de cilindros de 15 x 30 cm, fabricados de un mismo concreto y ensayados a distintas edades (González Cuevas & Robles F.V, 1975, p.34).



**Figura II-2 Variación de la resistencia con la edad del concreto**

Fuente: González Cuevas & Robles F.V, Figura 2.3 Efecto de la edad al ensayar en la resistencia., 1975, (p.34).

## II.5) Absorción capilar

La penetración de agua al interior del concreto basado en el fenómeno de absorción capilar se considera como el mecanismo más frecuente de transporte de agua en las estructuras de concreto reforzado. La absorción capilar del concreto es mucho más rápida que la penetración bajo presión pero su velocidad va aminorando a medida que el concreto se satura, una vez la red porosa del material está saturada el movimiento del agua por absorción capilar se detiene (Hermida, 2013, p.8).

## II.6) Vidrio reciclado de luminarias fluorescentes

Es un sub-producto del proceso de disposición de los bombillos ahorradores que consiste en la extracción del mercurio y trituración al vacío de las luminarias, ejecutado por VITAAMBIENTE C.A. El vidrio reciclado es un producto más ligero que los agregados naturales, típicamente utilizados en construcción civil en Venezuela, con una densidad

picnométrica de  $2,28 \text{ g/cm}^3$  para el vidrio, la cual representa un 18,42% y 13,6% inferior a la piedra picada ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ) y la arena lavada ( $2,59 \text{ g/cm}^3$ ), respectivamente.

De acuerdo con la literatura, el vidrio reciclado de lámparas fluorescentes, es un vidrio tipo “Soda-Lime” (Tabla 1), el cual tiene una pintura fluorescente en polvo compuesta por fosfato de calcio dopados con ytrio, cerio, zirconio, selenio y elementos tierras raras (García, 2014, p.1).

**Tabla II-1 Composición química típica de vidrio “Soda Lime” utilizado en lámparas fluorescentes**

Componente	Formula Química	%
Oxido de silicio	$\text{SiO}_2$	72,7
Oxido de Aluminio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,4
Oxido de Calcio	$\text{CaO}$	4,9
Oxido de Magnesio	$\text{MgO}$	3,4
Oxido de Sodio	$\text{Na}_2\text{O}$	16,3
Oxido de potasio	$\text{K}_2\text{O}$	0,3
Oxido de boro	$\text{B}_2\text{O}_3$	1,0

Fuente: García, Tabla 1. Composición química típica de vidrio “Soda Lime” utilizado en lámparas fluorescentes, 2014, (p.1).

## **II.7) Encapsulamiento de contaminantes**

El encapsulamiento es un proceso por medio del cual el residuo es incorporado dentro de un material que lo aísla del medio ambiente, sin que los componentes del residuo se fijen químicamente al material utilizado. Entre los materiales de encapsulamiento están el vidrio, el metal, el concreto y el plástico. El vidrio es inerte a la agresión de muchas sustancias químicas, pero es bastante frágil y el proceso de encapsulamiento requiere altas temperaturas. El metal, principalmente en forma de cilindros, es más práctico; sin



embargo, se corroe fácilmente. El concreto armado ha sido utilizado para el encapsulamiento de residuos con PCBs (bifenilos policlorados) y otras sustancias orgánicas altamente tóxicas en casos donde no ha sido posible incinerarlos (WB/UNEP/WHO, 1989, como se cito en: Benavides, 1997, parr.1).

## **CAPÍTULO III**

### **III) Marco metodológico**

#### **III.1) Naturaleza de la investigación**

El enfoque de la investigación fue evaluar la influencia que presentaba la adición del vidrio proveniente de bombillos ahorradores en las mezclas de concreto, variando el porcentaje de vidrio en relación a la cantidad de cemento, en donde se mantuvieron las cantidades de piedra y arena constantes, variando únicamente la cantidades de cemento utilizado para cada uno de los tres (3) diseños de mezcla que se plantearon, y poder determinar sus efectos sobre el concreto al ser sometido a tensiones axiales y su capacidad de absorción de agua en estado endurecido.

#### **III.2) Tipo de investigación**

La investigación fue de tipo experimental exploratoria, “ya que a través de la manipulación de las variables independientes (supuestas causas), en una situación controlada por el experimentador, a fin de detectar sus efectos sobre las variables dependientes (supuestos efectos) determinando así sus relaciones y los resultados que produce cada variable sobre el objeto” (Balestrini, 2002, p.131-132).

#### **III.3) Población**

La población estuvo conformada por 45 probetas cilíndricas estandarizadas con una sección de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, junto con 75 discos cuyas sección fue de 15 cm de diámetro y 5 cm de altura, estas se subdividieron en tres (3) grupos con distintas dosis de cemento, y cada uno con cinco (5) dosificaciones de vidrio que varían desde 0% a 80% en relación a la masa de cemento utilizada en cada grupo. Cada sub-grupo constó de tres (3) probetas o cilindros y cinco (5) discos.

#### **III.4) Muestra**

La muestra estuvo constituida por 45 probetas cilíndricas y 60 discos; estas muestras se subdividieron en 3 grupos con distintas dosificaciones de cemento que varían entre  $490 \text{ kg/m}^3$  y  $350 \text{ kg/m}^3$ , junto con sus respectivas variaciones de vidrio desde el 0% a 80%. Las probetas cilíndricas fueron sometidas a cargas axiales de compresión hasta generarse la falla, y los discos fueron sometidos a ensayos de absorción por capilaridad. Los 15 discos restantes se utilizaron para realizar una evaluación visual, cortándolos a la mitad, y examinando la disposición del vidrio en la muestra y su porosidad.

#### **III.5) Recolección de datos**

Los datos experimentales se reportaron mediante el uso del potenciómetro digital; fueron captados por una unidad de adquisición de datos marca ANDITEST SERIE T. El procesamiento de los datos se llevó a cabo a través de una computadora dotada con el programa de registro ANDISOFT. Los valores obtenidos de los ensayos de absorción por capilaridad y densidad, se registraron de manera manual.

#### **III.6) Equipos de aplicación de carga**

Se usó una máquina de ensayo universal marca Baldwin, con capacidad de 100 toneladas, ubicada en el Laboratorio de Tecnología del Concreto de la Universidad Católica Andrés Bello, la cual cumple con el protocolo de calibración siendo la más reciente en Diciembre 2015.

#### **III.7) Equipos de medición y accesorios empleados**

- Potenciómetro lineal de deformación, marca AEO Transducers con 2,54cm (1”) de recorrido.
- Equipo de sujeción para el potenciómetro lineal la cual permite determinar deformaciones axiales en cilindros a compresión.
- Balanza marca Citizen con apreciación  $\pm 0,1 \text{ gr}$ .

- Vernier marca Mitoyo  $\pm 0,02$  mm.

### **III.8) Variables en el ensayo**

#### **III.8.1) Variables dependientes**

- Absorción por capilaridad ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ ).
- Resistencia del concreto ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ).
- Porosidad ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

#### **III.8.2) Variables independientes**

- Aplicación de carga ( $\text{kgf}$ ).
- Contenido de vidrio ( $\text{kg}$ ).

#### **III.8.3) Elementos a mantener constantes**

- Tiempo de colmatación por capilaridad (días).
- Velocidad de aplicación de carga ( $\text{kgf}/\text{seg}$ ).
- Masa de arena ( $\text{kg}$ ).
- Masa de piedra ( $\text{kg}$ ).
- Asentamiento de la mezcla, 8 cm.

### **III.9) Diseño experimental**

Para poder elaborar un diseño experimental que permitiera evaluar de manera adecuada el comportamiento que presenta el concreto, al momento de adicionarle un material como lo es el desecho proveniente de bombillos ahorradores, se establecieron tres (3) distintas dosis de cemento, en donde las cantidades de arena y piedra se mantuvieron iguales para estas dosis.

Posteriormente se instauraron cinco (5) sub-diseños en donde se les adicionaron las cantidades de vidrio en función de las dosis de cemento correspondientes a cada una de las tres (3) dosis iniciales; estos sub-diseños variaban en cantidades de vidrio que se fijaron comunes

en todos los grupos 0%, 20%, 40%, 50% y 80%, manteniendo de manera constante un asentamiento patrón de 8 cm al momento de ejecutar las quince (15) diferentes mezclas.

Para este fin se implementó el uso de las gráficas tensión-deformación y la absorción por capilaridad según Fagerlund; estos métodos permitieron generar correlaciones y tendencias presentes entre las muestras patrón de cada una de las tres (3) dosis, con cada una de las cuatro (4) variaciones de vidrio.

Se evaluaron 45 probetas cilíndricas sometidas a fuerzas axiales de compresión, llevadas a la falla y determinando su correspondiente gráfica tensión-deformación, y 60 discos los cuales fueron sometidos al ensayo de absorción de agua por capilaridad.

A continuación se presenta una tabla donde se indica la nomenclatura implementada para las distintas probetas, en relación a cada una de las tres (3) dosificaciones de cada uno de los diseños y cinco (5) de los sub-diseños:

**Tabla III-1 Nomenclatura de dosificaciones**

Cantidad de Vidrio	Dosificación (D)		
	1	2	3
0% de Vidrio (patrón)	D1	D2	D3
20% de Vidrio	Dv-20	Dv2-20	Dv3-20
40% de Vidrio	Dv-40	Dv2-40	Dv3-40
50% de Vidrio	Dv-50	Dv2-50	Dv3-50
80% de Vidrio	Dv-80	Dv2-80	Dv3-80

Fuente: Elaboración Propia.

En la tabla III-1 Los porcentajes de vidrio, están expresados con relación a la cantidad de cemento para cada uno de los tres (3) diseños patrón (D1, D2 y D3). La explicación de la nomenclatura de las dosificaciones patrón D1, D2 y D3 se mostrará en la Tabla III-2.

### **III.10) Materiales utilizados. Propiedades y características. Dosificación**

#### **III.10.1) Concreto**

##### **III.10.1.1) Características del agregado grueso**

- Piedra picada con tamaño máximo 1”.
- Densidad específica: 2,65 Kg/m<sup>3</sup>.
- Densidad específica saturada con superficie seca: 2,68 kg/m<sup>3</sup>.
- Absorción 1,11%.
- Humedad 0,08%.

##### **III.10.1.2) Características del agregado fino**

- Arena natural de río pasante tamiz #4.
- Densidad específica: 2,60 Kg/m<sup>3</sup>.
- Densidad específica saturada con superficie seca: 2,65 kg/m<sup>3</sup>.
- Absorción 1,78%.
- Humedad 0,23%.

##### **III.10.1.3) Características del cemento**

- Cemento Portland Tipo CPCA1 Compuesto distribuido por la Corporación Socialista del Cemento S.A.

##### **III.10.1.4) Dosificación**

Las cantidades se encuentran expresadas por m<sup>3</sup> de concreto.

**Tabla III-2 Diseños de Mezcla**

	Cemento (kg)	Arena (kg)	Piedra (kg)	Agua (lts)	Vidrio (kg)*
Dosificación 1 (D1)	490	990,24	773,41	243	
Dosificación 2 (D2)	350			245	
Dosificación 3 (D3)	420			236	

Fuente: Elaboración Propia.

\*Las dosificaciones para las cantidades de vidrio vienen expresadas en un porcentaje (%) de la cantidad de cemento por mezcla y varían según sea el sub-diseño para cada dosificación patrón.

### III.11) Fases de ejecución



**Figura III-1 Fases de Ejecución para la Investigación**

Fuente: Elaboración Propia

#### III.11.1) Logística y planificación

Para la realización de este trabajo previamente se hizo una investigación y recaudación documental con la finalidad de determinar hacia dónde sería orientada la investigación, se fijaron los parámetros a mantener constantes; se estableció que la investigación se ejecutaría sobre probetas cilíndricas estandarizadas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura y discos conformados por una sección de 15 cm de diámetro por 5 cm de altura.

Se contempló la obtención de los materiales tanto fino (arena natural), como grueso (piedra picada), y su preparación, la cual consistió en cernir el fino por el tamiz #4 y el grueso

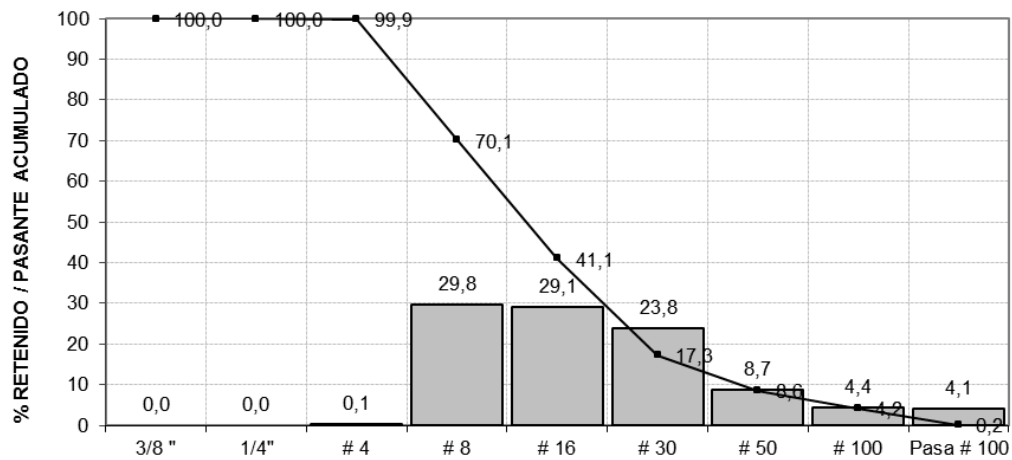
por el tamiz 1", obteniendo de ambos el pasante por dichos cedazos; esta última fracción de los materiales se secó al horno para disminuir su humedad hasta 0% para alcanzar una humedad hidrosférica. Adicionalmente se obtuvo el cemento portland tipo CPCA 1.

Fijando la logística para la ejecución de los vaciados, se contemplaron los horarios y cantidad de mezclas diarias, los tiempos en la ejecución de los ensayos, todo con la finalidad de disminuir las variables externas y posibles errores sistemáticos que pudieran presentarse durante la ejecución de la investigación.

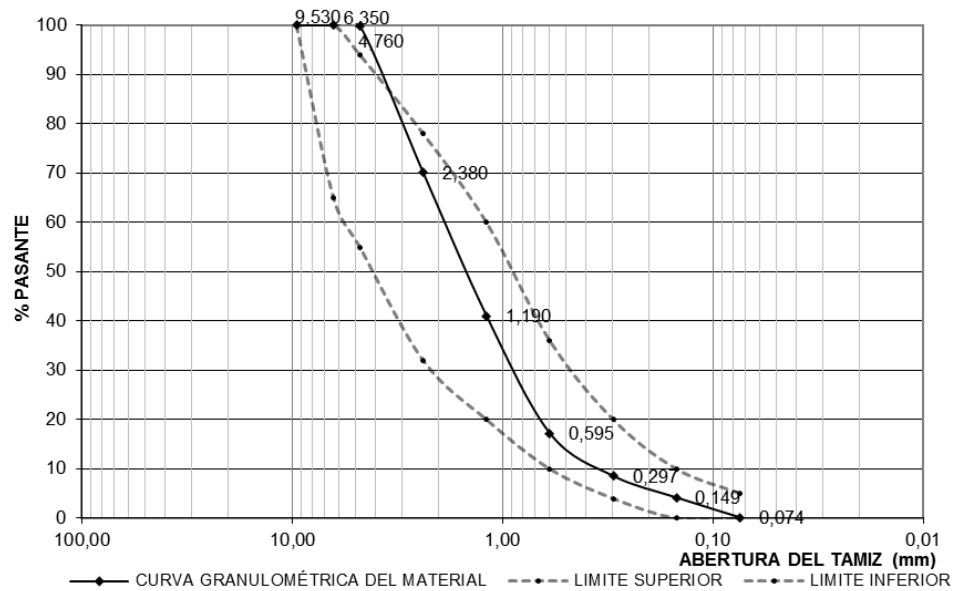
Se procedió a establecer las proporciones de cada uno de los materiales a ser usados, en donde se mantuvieron constantes las cantidades de arena y piedra para todos los diseños, de esta manera se pudo obtener la totalidad del material a ser usado y poder así eliminar una variación de este en el transcurso de la investigación.

Se procedió a la caracterización del material a ser usado como adición (vidrio proveniente de bombillos ahorradores); para este fin se realizó un ensayo granulométrico, en donde se determinó que este desecho presenta un módulo de finura de 3,6 lo cual lo ubicaba de manera relativa como una arena gruesa, con distribución monogranular, es decir, poca gradación de partículas como se observa en las siguientes gráficas:





**Figura III-2 %Retenido / Pasante acumulado con relación a la abertura del tamiz**  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura III-3 Curva granulométrica del vidrio proveniente de bombillos ahorradores junto con los límites superiores e inferiores recomendados para una arena gruesa, especificados en el manual del concreto estructural (Porrero et al., 2009, p.126.)**  
Fuente: Elaboración Propia.



**Figura III-4 Clasificación del material retenido en cada uno de los cedazos**  
Fuente: Elaboración Propia.

Con relación a la composición química del material y para poder determinar cómo este reaccionaría al ser añadido a la mezcla de concreto, se realizó un ensayo químico donde se obtuvieron componentes que afectan la durabilidad del mismo. Se determinó que las muestras a usar presentaron 0 ppm en contenido de Cloruro, 5 ppm (mg/kg) de Sulfatos, y se utilizó el resultado de la investigación de García (2015) donde se midió la presencia de 50 ppm (mg/kg) de mercurio (p.5); este último es el agente que se propuso encapsular dentro de mezcla de concreto, con el fin de garantizar una disposición segura del material.

### III.11.2) Elaboración de las probetas

Para poder garantizar un control adecuado en las variables de estudio y disminuir la dispersión en el resultado final, se contó con un proceso sistemático al momento de ejecutar los vaciados, asegurando mantener unas condiciones similares entre la ejecución de un vaciado y otro; esto se pudo lograr generando un cronograma y lista de control con los respectivos pasos a seguir, la cual constaba en la adecuación del espacio, materiales de trabajo y los controles al momento de generar la mezcla.

Luego de organizar el material y lugar de trabajo se procedió a generar la mezcla, con base en los siguientes parámetros:

- 1) Humedecer delicadamente la tolva para evitar que esta absorba agua de la mezcla.
- 2) Se agregó la arena y piedra a la tolva, procediendo a un mezclado inicial.

- 3) Luego se procedió a colocar el cemento cuidadosamente y se continuó mezclando.
- 4) Se comenzó a colocar el agua en la mezcla paulatinamente, hasta obtener un asentamiento constante de 8 cm medido mediante el cono de Abrams; si la mezcla generada era patrón, es decir de 0 % de contenido de vidrio, se proseguía con el paso 8, sino, se continúa con el paso 5.
- 5) Para las dosis que contenía algún porcentaje de vidrio, luego de haber obtenido el asentamiento de 8 cm, se le procedía a añadir de manera cuidadosa la adición de vidrio.
- 6) Una vez añadido el vidrio se dejaba mezclar todo y procedía a la medición del asentamiento obtenido por el cono de Abrams.
- 7) Si este asentamiento era menor a 8 cm, se ajustaba añadiendo agua en la mezcla, esto con el fin de lograr nuevamente un asentamiento de 8 cm ya que este corresponde al asentamiento patrón.
- 8) Luego de haber obtenido el asentamiento esperado, según haya sido el caso, si contenía vidrio o no la mezcla, se procedía a generar el vaciado de las probetas en los moldes.



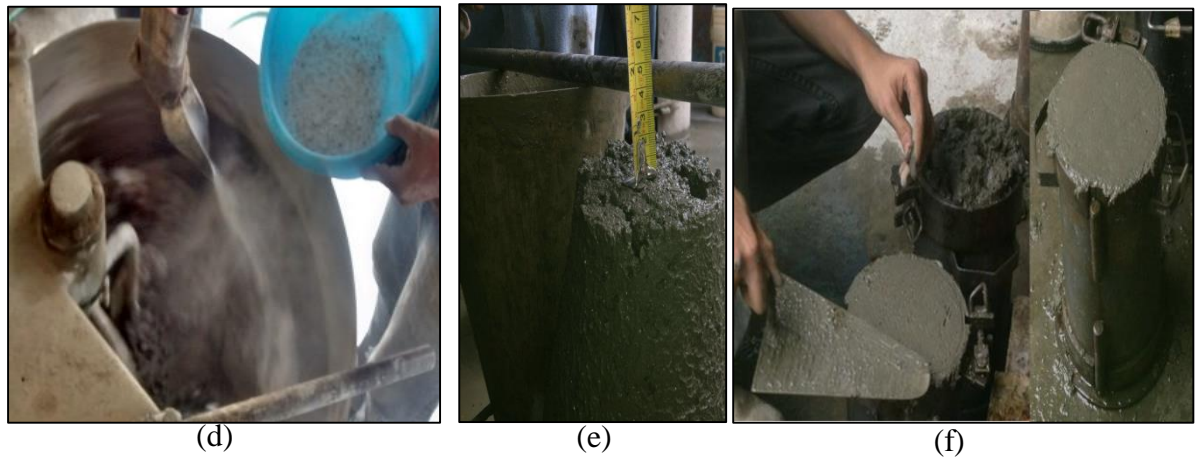
(a)



(b)



(c)



**Figura III-5** Secuencia de pasos para generar las probetas.

Fuente: Elaboración Propia.

Transcurridas 24 horas de haberse generado la mezcla, se prosiguió según el protocolo a desencofrar las probetas ya endurecidas; una vez extraídas de los moldes se colocó cada elemento sumergido en agua dentro de una cámara de curado, y se procedió a la limpieza y adecuación de los materiales y áreas de trabajo para poder así repetir nuevamente la secuencia.

### III.11.3) Ejecución de ensayos

Esta etapa constó de dos partes:

#### III.11.3.1) Propiedades y comportamiento mecánico

En la búsqueda del comportamiento mecánico del concreto adicionado con vidrio se sometieron las probetas al ensayo de compresión simple, una vez que estas alcanzaran un tiempo de maduración de 28 días en las cámaras de curado.

Una vez determinado que las probetas cumplieron el tiempo requerido se procedió con los preparativos para poder llevar a cabo el ensayo consistió en:

- Retirar de la cámara de curado dos (2) cilindros por cada familia, dejando el tercero como testigo.
- Una vez secos, se procedió a obtener la masa y dimensiones finales de cada uno.

- Luego se determinó, marcando cuidadosamente el plano que pasa por el diámetro de la sección transversal (el plano longitudinal de mayor sección), la mitad de la altura de la probeta. En este plano se colocaron los instrumentos de medición correspondientes a la deformación axial por aplastamiento de la muestra.
- Se procedió a instalar los equipos de sujeción para los potenciómetros lineales de deformación a una distancia constante entre puntos de medición de 15 cm.

Una vez cumplidos estos pasos se procedió a colocar la muestra en la prensa universal, con la cual se aplicó la carga a una tasa constante hasta obtener la tensión de rotura y poder así generar las curvas tensión-deformación para cada una de las probetas.



**Figura III-6 Ensayo de compresión simple de cilindro con curva tensión-deformación**  
Fuente: Elaboración Propia.

### III.11.3.2) Absorción por capilaridad

En la ejecución de este ensayo se dispuso de los discos de concreto que fueron secados al horno durante 24 horas a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para asegurar la evaporación de toda forma de humedad y poder obtener la masa seca de la muestra.

El método utilizado fue el de absorción por capilaridad según Fagerlund, que consiste en sumergir en una película de agua constante de 5 mm de espesor los discos de concreto, donde el 95% de la sección transversal sumergida debe encontrarse en contacto con agua, para lo cual son usados unos separadores entre el fondo del recipiente y las muestras.

Luego de obtener la masa inicial y de haber introducido las probetas en agua, se procedió a pesar las muestras en intervalos de tiempo estipulados en la norma, hasta que la masa en dos pesadas consecutivas, luego de haber transcurrido un período de 24 horas, no excediera el 1% de diferencia entre ellas.



**Figura III-7 Resultado físico de la absorción por capilaridad de Fagerlund**  
Fuente: Elaboración Propia.

## **CAPÍTULO IV**

### **IV) Resultados y análisis**

En este trabajo los porcentajes señalados serán siempre en referencia a la adición de vidrio en la muestra, salvo que puntualmente se indique lo contrario.

#### **IV.1) Comportamiento mecánico en estado endurecido**

##### **IV.1.1) Relación tensión–deformación**

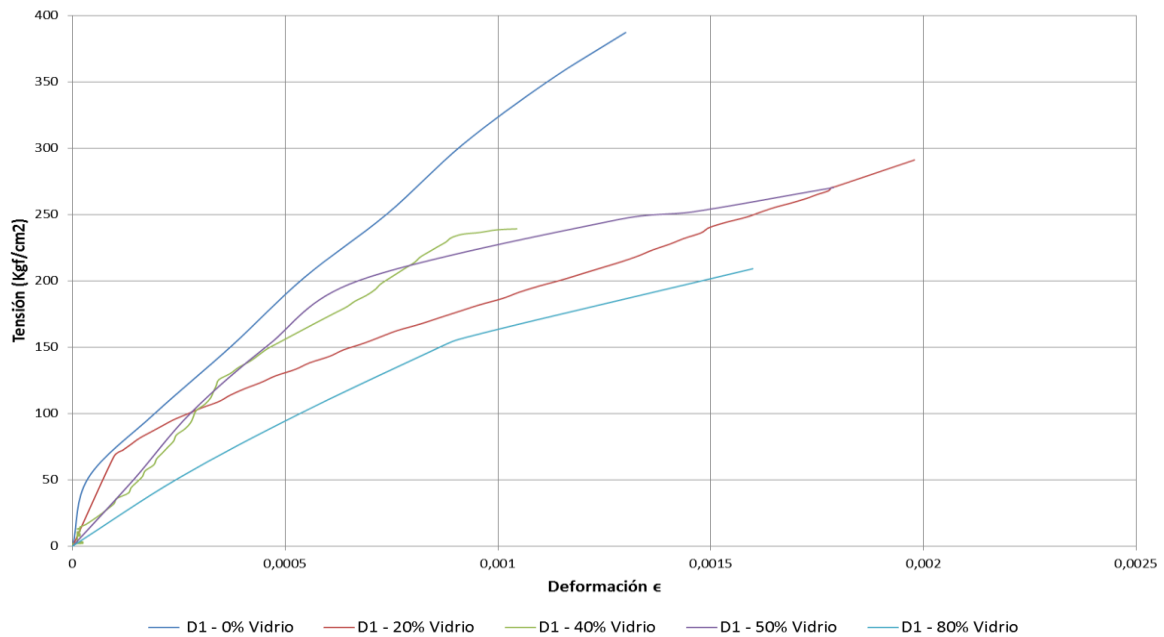
A continuación se muestran las gráficas tensión–deformación, desarrolladas en función del promedio de los registros obtenidos sobre cada familia de cilindros, clasificadas según la dosis de cemento utilizada por diseño.

El comportamiento mecánico en general estuvo caracterizado como se indica a continuación:

##### **IV.1.1.1) Dosis 490 kg de cemento/m<sup>3</sup>**

Se observó que el valor mínimo de resistencia correspondió a las muestras de 80% de vidrio y el máximo correspondió al 0%. Las gráficas con 20%, 40% y 50% de vidrio, se cruzaron y no mostraron tendencia clara entre sí, a diferencia de las 0% y 80% de adición que, aunque no fueron paralelas, revelaron los límites entre los cuales idealmente debieran estar las tendencias sin cruzarse.





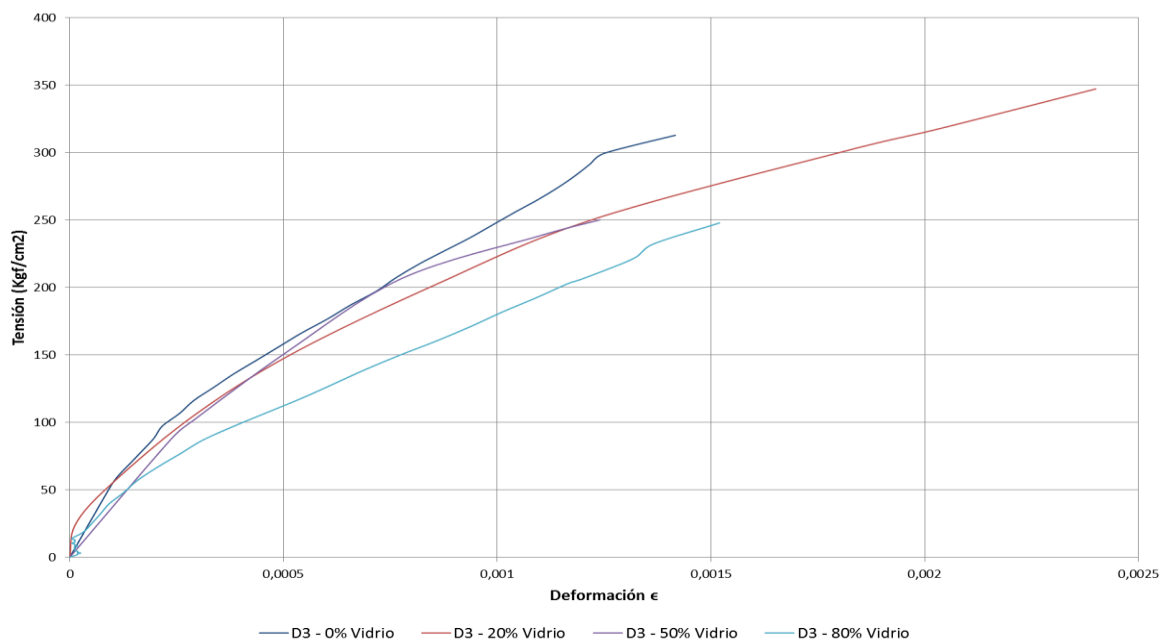
**Figura IV-1 Gráfica tensión- deformación, D1 (490 Kg de cemento/m³)**

Obsérvese en la figura IV-1, cómo la curva del 20%, presentó un comportamiento atípico debido a que sufrió una degradación brusca en un valor pequeño de tensión, comprendido entre 50 kgf/cm<sup>2</sup> y 100 kgf/cm<sup>2</sup>, comportamiento esperable en valores de tensiones cercano a la falla; lo esperado hubiese sido que dicha curva continuase entre las curvas 0% y 50%. La curva 40% presentó una variación brusca de tensiones en valores cercanos a los 150 kgf/cm<sup>2</sup>. Estas diferencias con respecto a las otras curvas pueden indicar variables no controladas durante la ejecución del ensayo, posiblemente error en el registro del potenciómetro.



### IV.1.1.2) Dosis 420 kg de cemento/m<sup>3</sup>

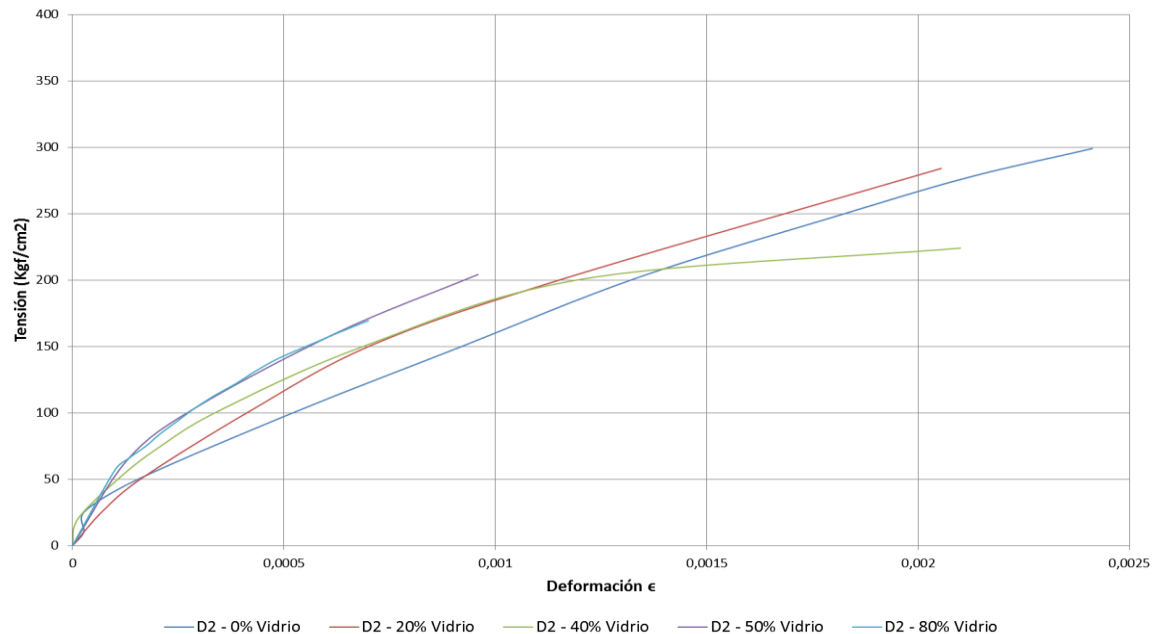
En lo que respecta a la Figura IV-2 se observó que las gráficas correspondientes a 0% y 80% de adición constituyeron los límites de la banda del comportamiento. Cabe destacar que la resistencia máxima obtenida para esta familia de probetas corresponde a la de 20% y el valor mínimo pertenece al 80%. La curva representativa a la muestra 40% fue retirada de la gráfica por presentar un comportamiento atípico, al encontrarse fuera de un intervalo real de estudio.



**Figura IV-2 Gráfica tensión- deformación, D3 (420 Kg de cemento/m<sup>3</sup>)**

Las gráficas correspondientes a 20% y 50% se cortan en dos puntos y no presentan un comportamiento que permita estimar alguna tendencia destacable.

### IV.1.1.3) Dosis 350 kg de cemento/m<sup>3</sup>



**Figura IV-3 Gráfica tensión-deformación, D2 (350 Kg de cemento/m<sup>3</sup>).**

La Figura IV-3 muestra de nuevo como las curvas de 0% y 80% representan los límites del comportamiento, pero de manera inversa, ya que la pendiente mayor caracteriza al concreto que carece de adición. El valor máximo de resistencia a la compresión queda referenciado por la curva de 0% y el mínimo a las muestras con 80%; esto muestra la influencia del contenido vidrio en este parámetro estudiado en el concreto.

Respecto a la gráfica de 40%, presentó un cambio de pendiente cercano a los 200 kgf/cm<sup>2</sup>, esto pudo deberse a un reacomodo interno de las partículas de la muestra que se evidenció de esta forma. Este grupo de gráficas no define un comportamiento que permita estimar alguna tendencia.

### IV.1.2) Modificación de la resistencia a la compresión mecánica

Los valores mostrados a continuación corresponden al promedio de las resistencias a la compresión obtenidas en las probetas estandarizadas por cada familia que fueron ensayadas a igual edad, clasificadas por el porcentaje de adición usado.

#### IV.1.2.1) 0% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores

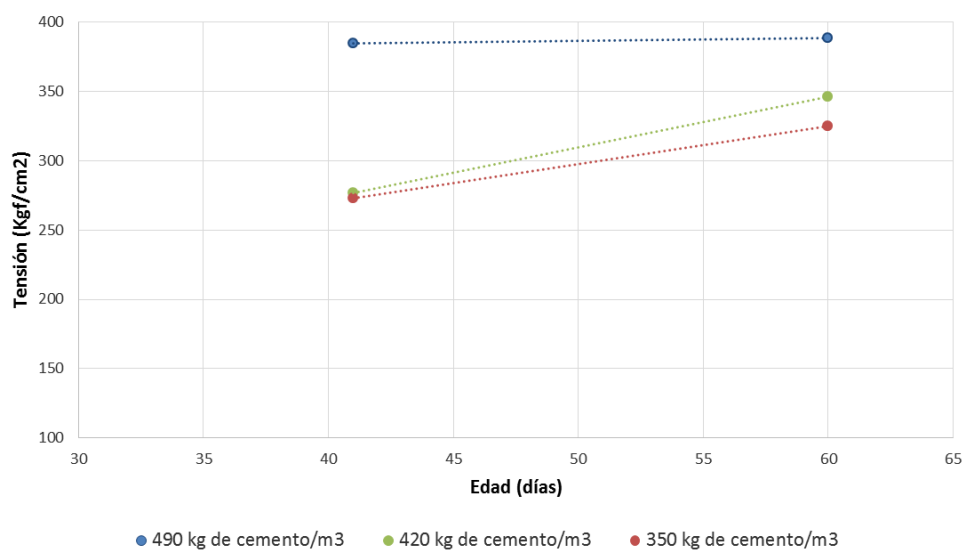
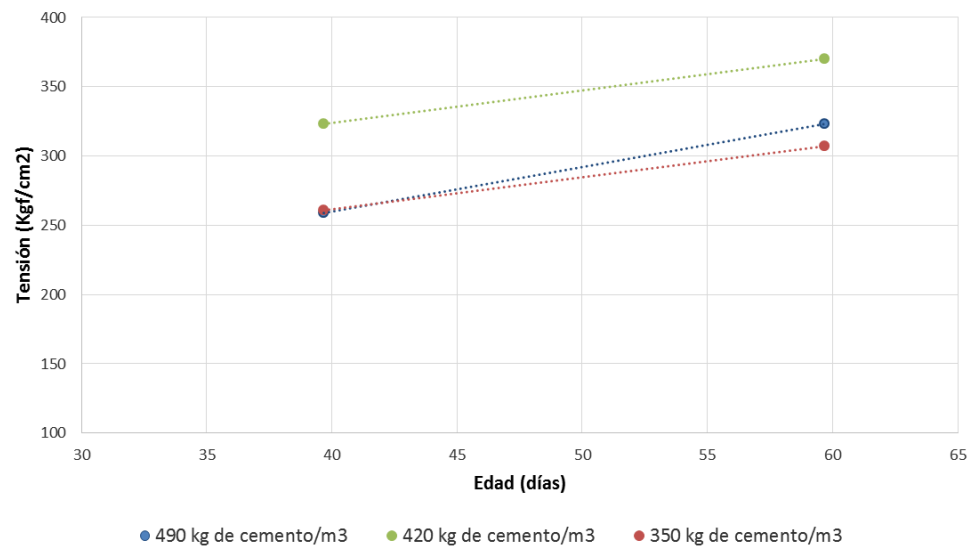


Figura IV-4 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 0% vidrio

En las muestras de concreto patrón (0% vidrio) se observaron dos tendencias, una el mantenimiento de la resistencia para la familia de 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y la otra el aumento de la resistencia para las familias 420 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y 350 Kg de cemento/m<sup>3</sup>; lo cual se corresponde con el comportamiento esperado en la madurez de una muestra de concreto.

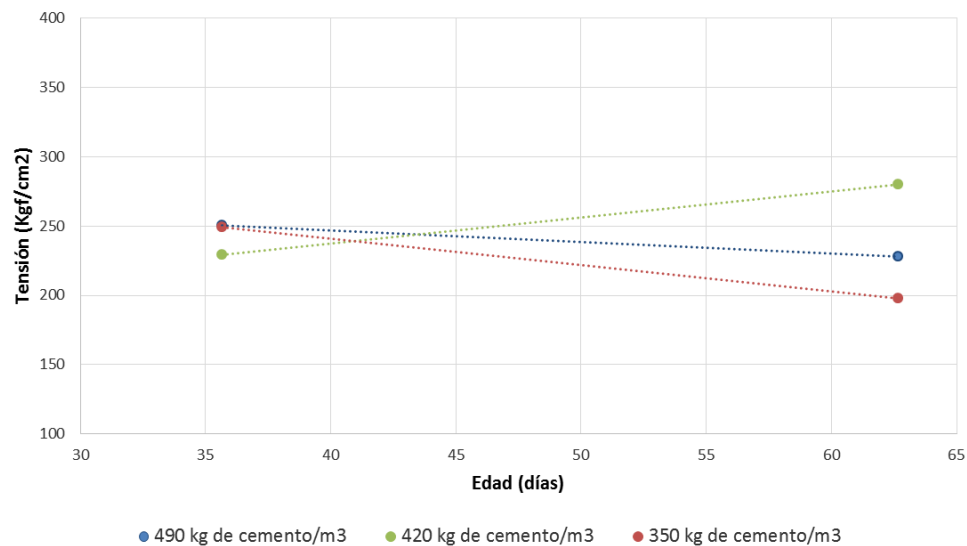
#### IV.1.2.2) 20% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-5 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 20% vidrio**

Aquí se observó que las mezclas que contienen 20% de adición presentan un mejoramiento de la resistencia cumpliendo, con lo que se espera en la madurez del concreto. Los valores máximos de resistencia fueron obtenidos por las muestras de 420 Kg de cemento/m<sup>3</sup>.

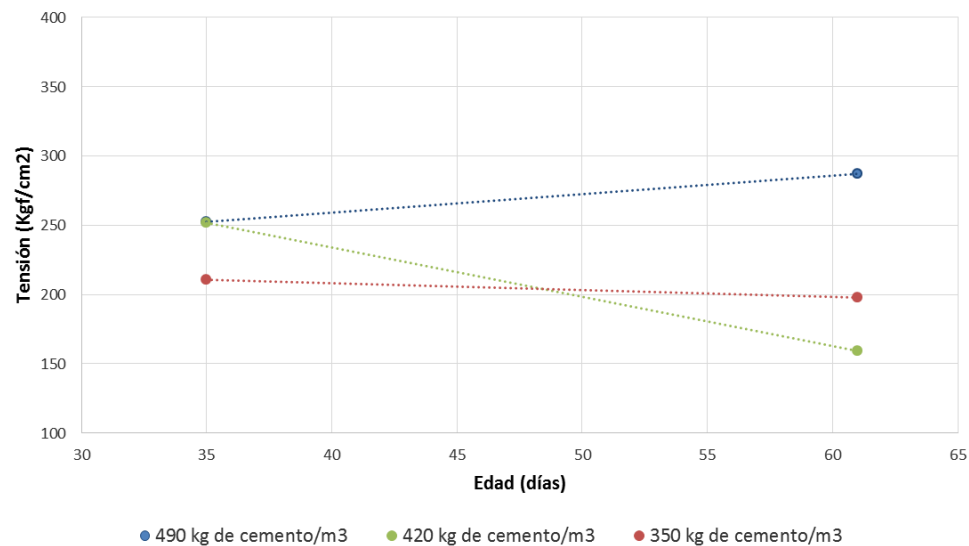
### IV.1.2.3) 40% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-5 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 40% vidrio**

Esta gráfica muestra dos tendencias, una correspondiente a 420 Kg de cemento/m<sup>3</sup> donde se observó un aumento de la resistencia. Y la otra para las muestras de 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y 350 Kg de cemento/m<sup>3</sup> donde se constató que ocurrió un deterioro de la resistencia a la compresión en pocos días.

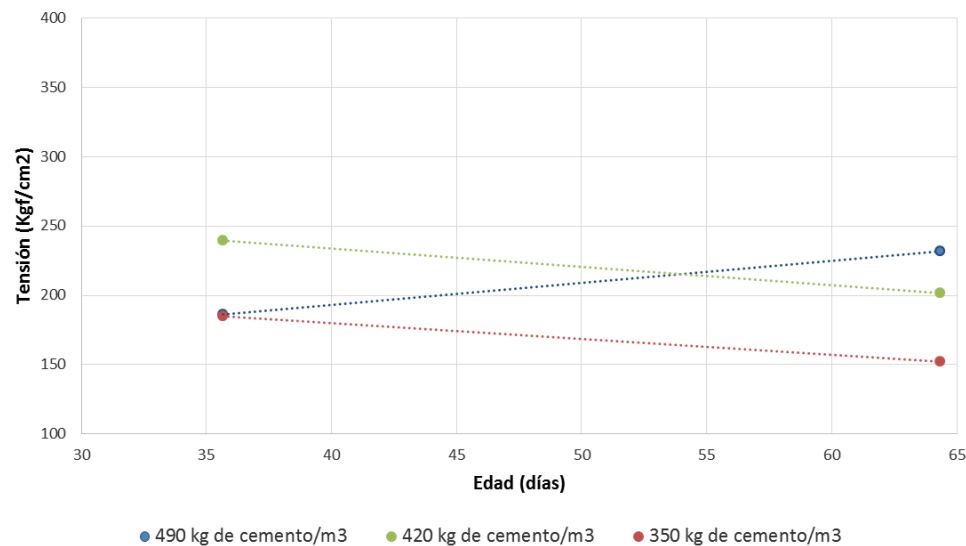
#### IV.1.2.4) 50% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-6 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 50% vidrio**

Se observa de nuevo que para este porcentaje de adición se tiene un descenso de la resistencia a la compresión en el tiempo, esta vez para las dosis de 350 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y 420 Kg de cemento/m<sup>3</sup>. Para 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup> se evidencia un mejoramiento de la resistencia. Los valores máximos de este parámetro fueron obtenidos por las muestras 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>.

#### IV.1.2.5) 80% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-7 Gráfica tensión promedio-edad de las probetas, 80% vidrio**

Nuevamente se observó un comportamiento similar a las muestras correspondientes al 50% de adición. Desmejoramiento de la resistencia para las que corresponden a las muestras 420 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y 350 Kg de cemento/m<sup>3</sup>, mientras que se evidenció un mejoramiento para las muestras 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>.

De las curvas mostradas para este parámetro, es preciso aclarar que el deterioro de la resistencia a la compresión es un comportamiento erróneo, ya que esta debe aumentar en la madurez de las probetas durante los lapsos de tiempo estudiados, por lo que solo se analizaron aquellas que no presentaron desmejora en este parámetro. Esto permite evidenciar un comportamiento creciente en cuanto al parámetro estudiado en las probetas que fueron añadidas con 20% de vidrio con sus distintas variaciones de cemento, 40% de vidrio con 420 Kg de cemento/m<sup>3</sup>, 50% de vidrio con 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y 80% de vidrio con 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>.

Se debe recordar que los valores de resistencia a la comprensión de muestras de concreto responden a un proceso aleatorio que sigue la tendencia de una distribución normal; este proceso puede verse evidenciado en los casos donde se obtuvo una disminución de resistencia y ser uno de los causantes de valores atípicos. Además la disposición inhomogénea del polvo de vidrio en la muestra de concreto afecta el Shear Bond (Fuerza de adherencia pasta de concreto, agregados), causando fallas prematuras en alguna de las probetas ensayadas y generando un comportamiento errático.

#### **IV.2) Parámetros de absorción capilar en estado endurecido del concreto**

Cada parámetro concerniente a absorción capilar fue representado en sus gráficas como el promedio de los resultados de la familia de probetas correspondientes en cada caso. Se dividieron en dos grupos, el primero según la dosis de cemento utilizada y el segundo por la cantidad de vidrio añadida.



## IV.2.1) Porosidad

### IV.2.1.1) Comportamiento según variación del porcentaje de vidrio para dosis de cemento

#### IV.2.1.1.1) Dosis 490 kg de cemento/ m<sup>3</sup>

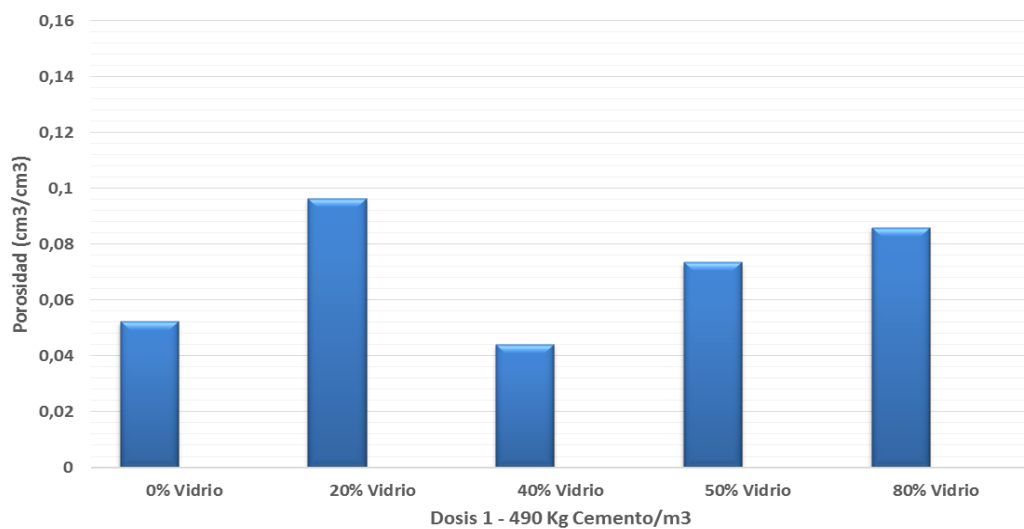
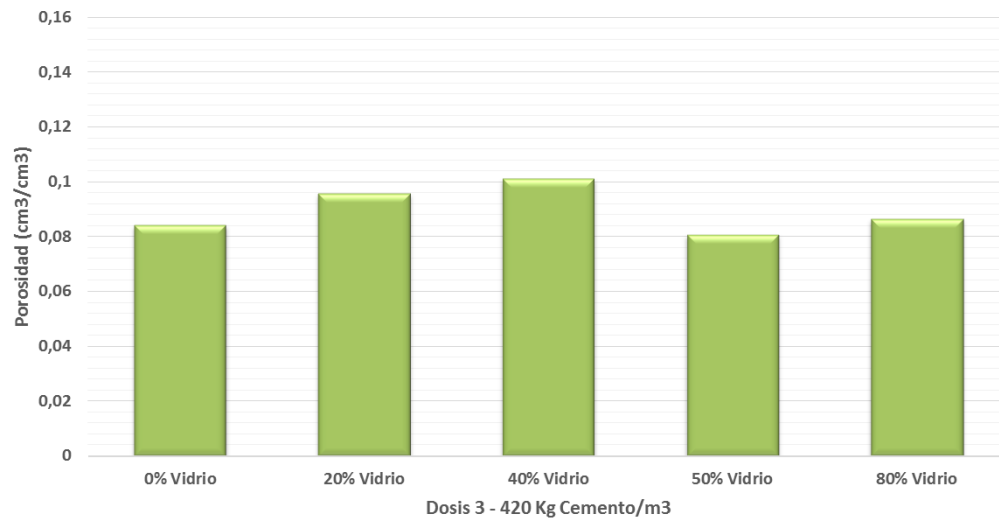


Figura IV-8 Gráfica Porosidad – Dosis 1 (490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>)

Se obtuvo un valor máximo de la porosidad con los especímenes correspondientes a 20% y un valor mínimo para 40%. Comparando con la muestra de 0% de vidrio logra evidenciarse que en este caso la adición de vidrio afecta aleatoriamente la porosidad del concreto endurecido.

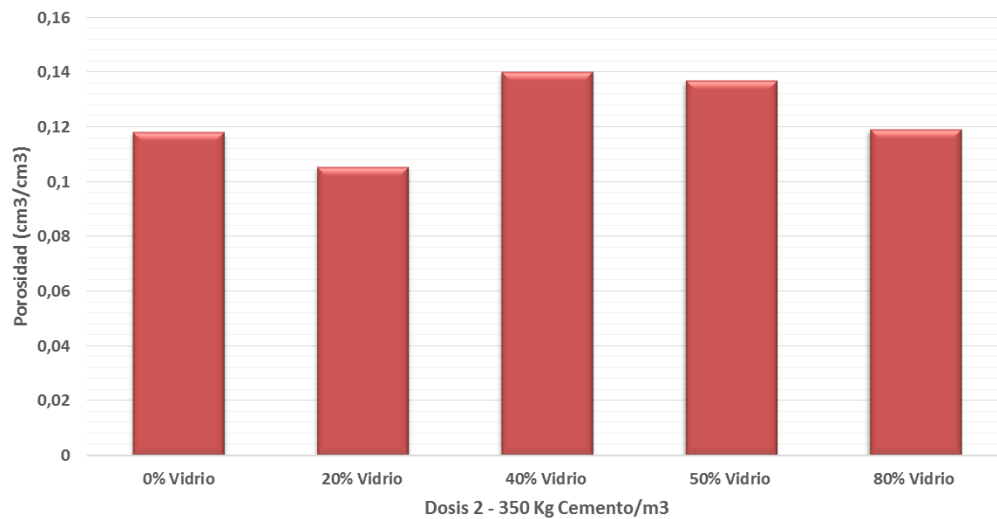
#### IV.2.1.1.2) Dosis 420 kg de cemento/ m<sup>3</sup>



**Figura IV-8 Gráfica Porosidad - Dosis 3 (420 Kg de cemento/m<sup>3</sup>)**

En este caso el valor máximo corresponde a la familia de muestras con 40% de vidrio y el valor mínimo las que utilizaron 50% de vidrio. Observando el comportamiento de las muestras con adición respecto al patrón (0% vidrio) se corrobora que no hay tendencia respecto a la afectación de la porosidad al añadir vidrio.

#### IV.2.1.1.3) Dosis 350 kg de cemento/ m<sup>3</sup>



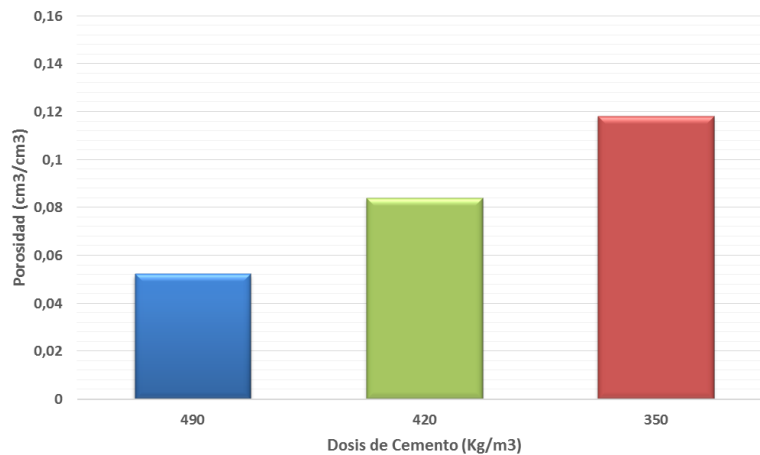
**Figura IV-9 Gráfica Porosidad - Dosis 2 (350 Kg de cemento/m<sup>3</sup>)**

Se observa que el valor máximo corresponde a la familia de muestras con 40% de adición y el valor mínimo a las que contiene 20% de vidrio. Nuevamente se constata que no hay tendencia con relación a la porosidad al añadir vidrio a una muestra de concreto.

Al analizar el comportamiento visto hasta el momento se observa que la adición de vidrio en los diferentes porcentajes, manteniendo la cantidad de cemento constante, presenta un comportamiento atípico, ya que no define una tendencia que se repita en alguno de los tres grupos.

### IV.2.1.2) Comportamiento según variación de dosis cemento con base en el porcentaje vidrio añadido

#### IV.2.1.2.1) 0% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-10 Gráfica Porosidad - Dosis de Cemento, 0% vidrio**

Esta gráfica tiene un valor mínimo que corresponde a los especímenes de 490 kg de cemento/m<sup>3</sup> y un valor máximo que corresponde a la dosis de 350 kg de cemento/ m<sup>3</sup>. Si observa el comportamiento de la gráfica pareciera que el valor de porosidad está asociado con la cantidad de cemento en la muestra.

#### IV.2.1.2.2) 20% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores

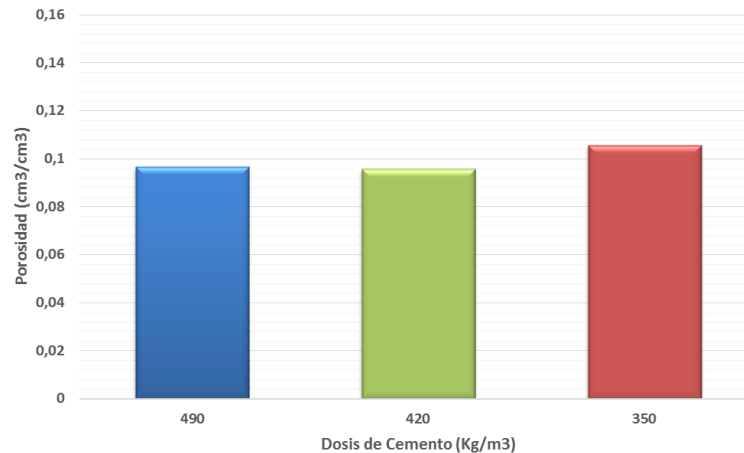


Figura IV-11 Gráfica Porosidad - Dosis de Cemento, 20% vidrio

Se observa que el valor máximo corresponde a las muestras que contienen menor cantidad de cemento por metro cúbico; en cuanto a los valores de porosidad de las dosis de 490 y 420 kg de cemento/m<sup>3</sup> poseen valores muy similares.

#### IV.2.1.2.3) 40% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores

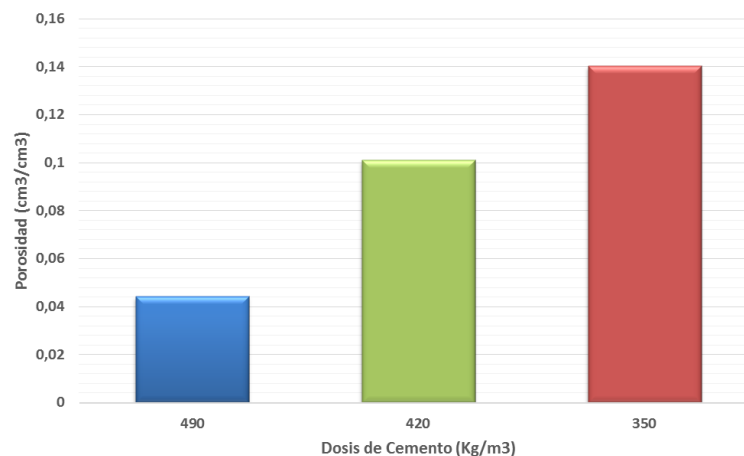
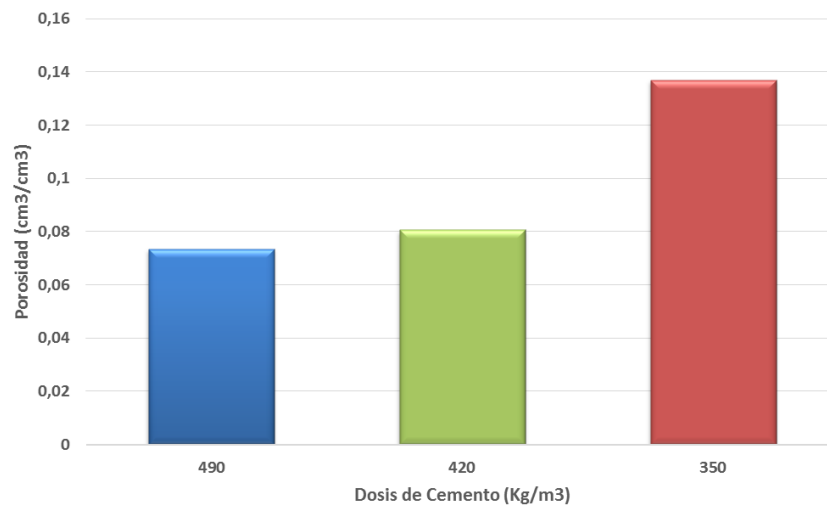


Figura IV-12 Gráfica Porosidad - Dosis de Cemento, 40% vidrio

Para este caso el valor mínimo del parámetro estudiado corresponde a las probetas que contienen 490 kg de cemento/m<sup>3</sup>, y el valor máximo donde se usó menor cantidad de cemento. La tendencia observada es creciente al disminuir la cantidad de cemento.

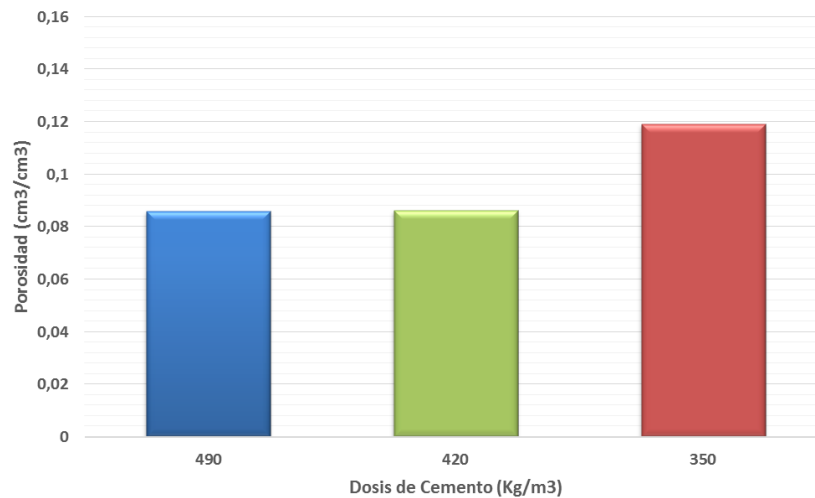
#### IV.2.1.2.4) 50% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-13 Gráfica Porosidad-Dosis de Cemento, 50% vidrio**

Aquí se observó que el valor mínimo corresponde a la dosis de 490 kg de cemento/m<sup>3</sup>, y el valor máximo corresponde a la dosis de menor cantidad de cemento. La tendencia ascendente se mantiene en este caso.

#### IV.2.1.2.5) 80% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-14 Gráfica Porosidad - Dosis de Cemento, 80% vidrio**

La diferencia de porosidad entre la dosis de 490 kg de cemento/m<sup>3</sup> y 420 kg de cemento/m<sup>3</sup> es muy pequeña. Se observa que los valores máximos y mínimos corresponden a la dosis de menor y mayor cantidad de cemento usada respectivamente.

Las gráficas mostradas con relación al parámetro de la porosidad permiten decir que existe una relación entre el parámetro estudiado con la cantidad de cemento presente en una mezcla y que mientras mayor sea la cantidad de cemento usada menor será la porosidad, sin importar el uso de la adición de vidrio.

## V.2.2) Tiempo de colmatación por capilaridad

### V.2.2.1) Comportamiento según variación del porcentaje de vidrio para dosis de cemento

#### V.2.2.1.1) Dosis 490 kg de cemento/m<sup>3</sup>

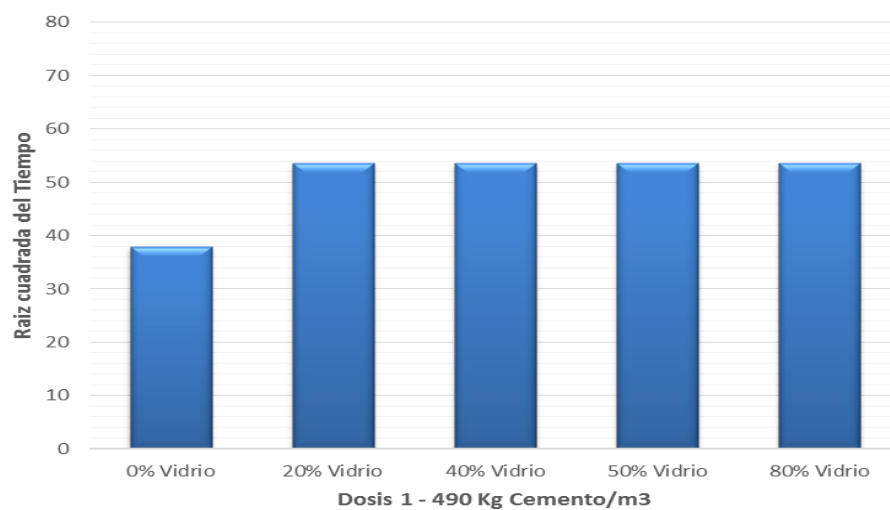


Figura IV-15 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Código de muestras, D1 (490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>).

El valor mínimo corresponde a las muestras que contienen 0% de vidrio; respecto a las muestras adicionadas con vidrio el tiempo de colmatación se mantiene constante para todos los porcentajes estudiados. Se reveló que la adición generó cambios en este parámetro respecto a la muestra patrón.



V.2.2.1.2) Dosis 420 kg de cemento/m<sup>3</sup>

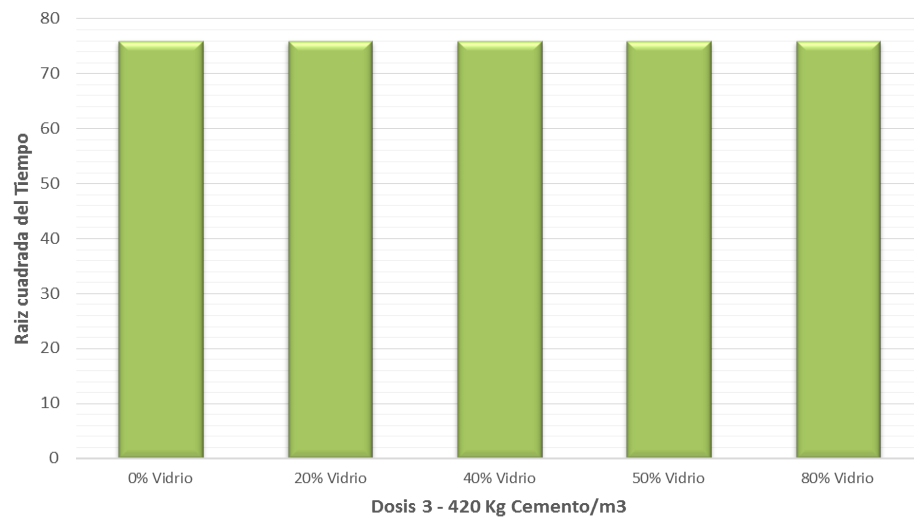


Figura IV-16 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Código de muestras, D3 (420 Kg de cemento/m<sup>3</sup>)

En esta grafica no se observó perturbación del tiempo de colmatación capilar a pesar de presentar distintos porcentajes de vidrio, mostrando que el vidrio no generó modificaciones en este caso.

### V.2.2.1.1) Dosis 350 kg de cemento/m<sup>3</sup>

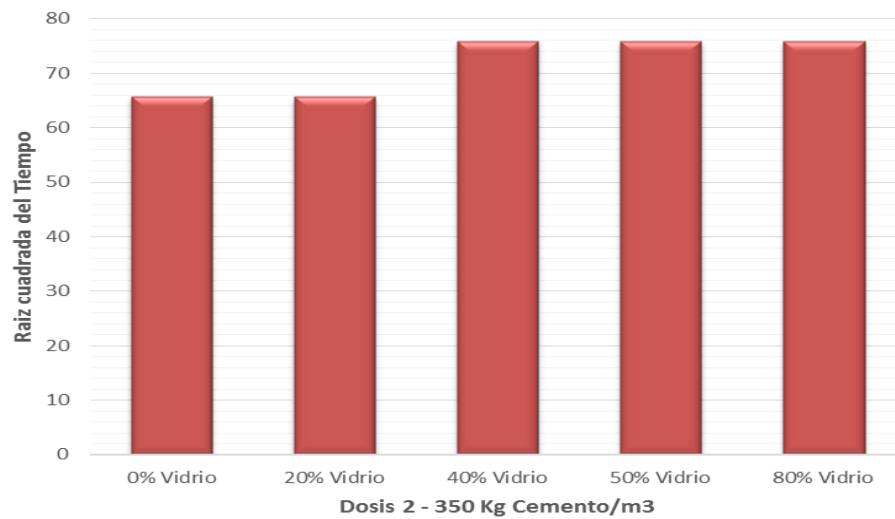


Figura IV-17 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Código de muestras, D2 (350 Kg de cemento/m<sup>3</sup>).

En este caso los valores mínimos corresponden a las probetas que contienen 0% y 20% de vidrio agregado; para porcentajes mayores o iguales a 40% el parámetro permaneció constante, evidenciándose que el vidrio generó afectación del tiempo de colmatación en este caso.

Por ende no hay un comportamiento en los resultados obtenidos que mantenga una tendencia que muestre de forma clara la variación de este parámetro respecto a la adición del vidrio proveniente de bombillos ahorradores en las mezclas de concreto.

### V.2.1.2) Comportamiento según variación de dosis de cemento con base en el porcentaje de vidrio añadido

#### V.2.1.2.1) 0% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores

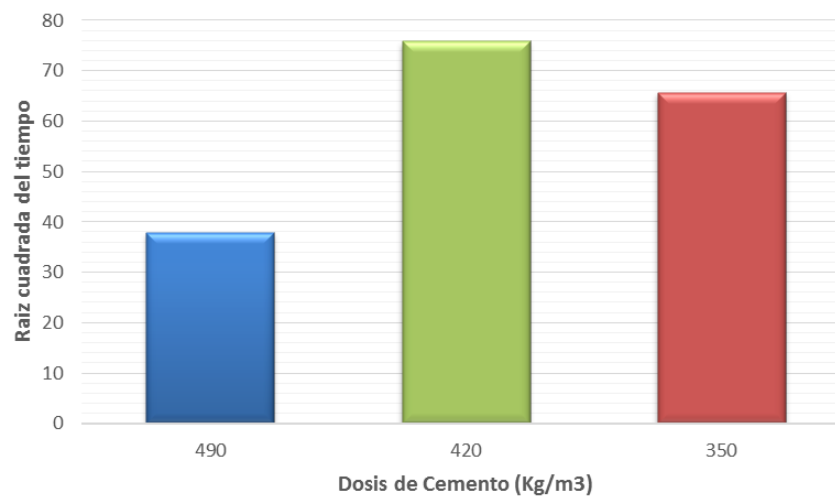


Figura IV-18 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de Cemento, 0% Vidrio

La gráfica mostrada permite apreciar que el valor máximo corresponde a la dosis de 420 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y el valor mínimo a 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>. No se observa alguna tendencia acerca de la cantidad de cemento con este parámetro.

### V.2.1.2.2) 20% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores

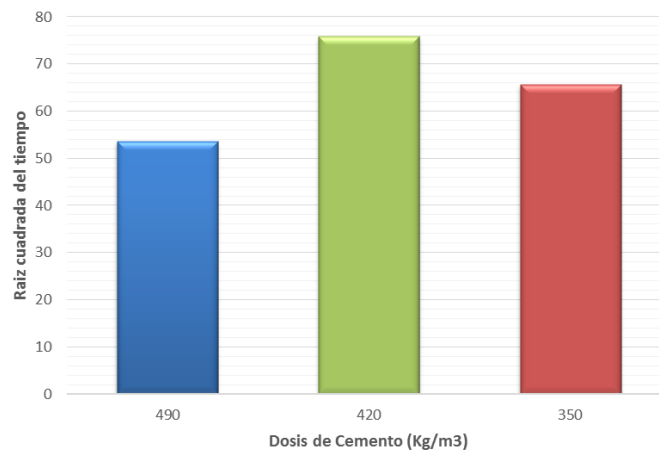


Figura IV-19 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de Cemento, 20% Vidrio.

Se observó un comportamiento similar al anterior; el valor mínimo corresponde a los especímenes que contienen 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup> y el máximo a los de 350 Kg de cemento/m<sup>3</sup>. Nuevamente no se describe una tendencia clara respecto a la variación del cemento.

### V.2.1.2.3) 40% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores

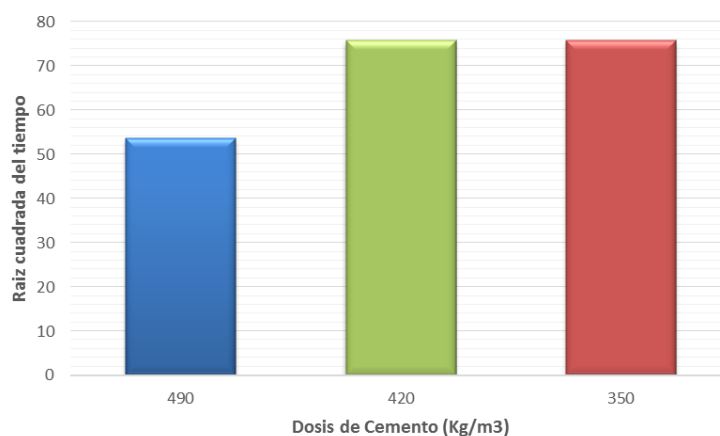


Figura IV-20 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de Cemento, 40% Vidrio.

La gráfica muestra que el valor mínimo corresponde a las muestras que contienen 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>; para los valores de 420 y 350 Kg de cemento/m<sup>3</sup> el valor del tiempo de colmatación capilar se mantiene constante.

#### V.2.1.2.4) 50% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores

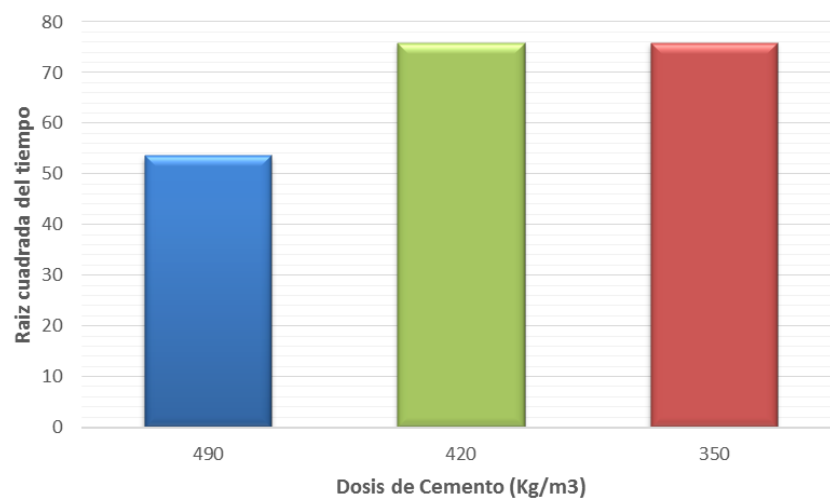
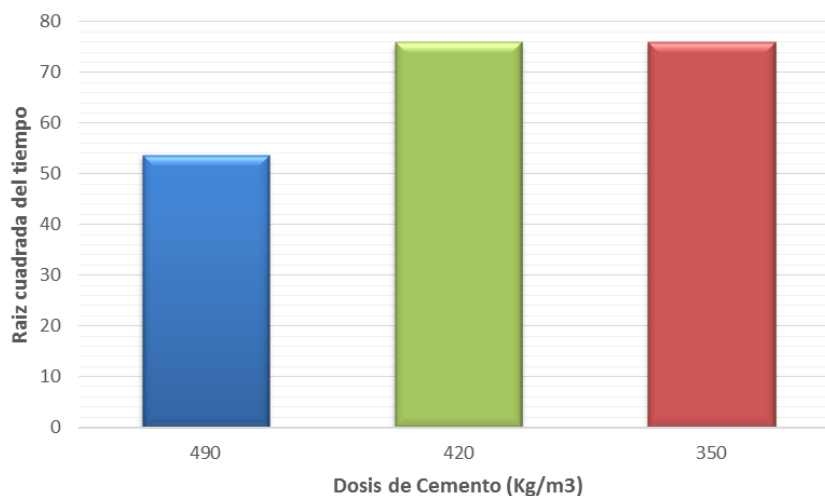


Figura IV-21 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de Cemento, 50% vidrio

El comportamiento de esta gráfica es similar al caso anterior; se encuentra un valor mínimo para la dosis que utilizó mayor cantidad de cemento y para las otras dos la colmatación por capilaridad ocurrió en igual tiempo.

### V.2.1.2.5) 80% de vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores



**Figura IV-22 Gráfica raíz cuadrada del tiempo - Dosis de Cemento, 80% vidrio.**

Se mantiene el comportamiento de las dos últimas gráficas; el tiempo de colmatación fue mayor para las dosis que contienen menor cantidad de cemento, y menor tiempo de colmatación para la que utilizó 490 Kg de cemento/m<sup>3</sup>.

En estas gráficas se observaron dos comportamientos, las correspondiente a 0 y 20% de vidrio añadido (véase figura IV-18 y figura IV-19), presentan tendencias similares, un valor mínimo que corresponde a la dosis de 490 de cemento/m<sup>3</sup>, seguida por la correspondiente a 350 kg de cemento/m<sup>3</sup>, y por último un valor máximo que corresponden a las muestras que contienen 420 kg de cemento/m<sup>3</sup>.

Para las probetas que contienen 40%, 50% y 80% de adición de vidrio, se encontró un segundo patrón de comportamiento que tuvo un valor mínimo para las muestras que tienen la mayor cantidad cemento. Las correspondientes a 420 kg de cemento/m<sup>3</sup> y 350 kg de cemento/m<sup>3</sup> tuvieron un valor constante. Con esto no puede estimarse alguna relación, ya que los comportamientos no se mantuvieron constantes para todos los ensayos realizados.

## **CAPÍTULO V**

### **V) Conclusiones**

Se realizó el estudio de las propiedades del concreto adicionado con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores, variando el porcentaje de adición en diferentes mezclas de concreto. A continuación se exponen las conclusiones de los resultados obtenidos:

Las gráficas tensión-deformación muestran el comportamiento mecánico en estado endurecido donde se evidenció, una degradación de las tangentes a las curvas al añadir vidrio en mezclas de concreto. También pudo diferenciarse que las curvas que limitan el comportamiento son las que contienen 0% y 80% de adición, aunque las curvas intermedias no presentan alguna tendencia destacable.

En las probetas de concreto adicionado con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores se observó que solo para las mezclas adicionadas con 20% de vidrio, hubo un mejoramiento de las resistencias a la compresión. Para los demás porcentajes de vidrio los resultados tuvieron alta variabilidad.

Los resultados de ensayos a compresión axial de probetas estandarizadas responden a un proceso aleatorio que tiende a una distribución normal y es probable que los valores de disminución de la resistencia se deban a que se obtuvieron resultados que se alejan de la media característica correspondiente a cada mezcla. También la disposición no homogénea del vidrio y el polvo fosforado que él contiene en la mezcla de concreto, que pudo afectar de manera aleatoria la interacción entre la pasta de mortero y los agregados (shear bond), generó quizás, en algunos casos una falla prematura de los especímenes, hecho que no estuvo dentro de los objetivos de estudio de este trabajo pero pudiera dar pie a futuras investigaciones.

Tradicionalmente el comportamiento a la compresión de concreto tradicional puede ser estimado a través del ensayo de tres muestras, pero en el caso de concreto con adición de vidrio tres muestras no fueron suficientes.

Por otra parte, en la evaluación de las propiedades hidráulicas, se observó alta variabilidad de los resultados obtenidos en muestras de concreto adicionadas con vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores. En las muestras patrón (concreto con 0% de adición), el aumento de la cantidad de cemento presente en la mezcla afecta la porosidad del concreto endurecido, debido a que, la función del cemento es servir como aglomerante de los agregados, y la cantidad de pasta contenida tiene una relación directa con los poros que puedan comunicarse a lo largo de una muestra, y puedan facilitar o no el paso del agua por el medio poroso.

En cuanto al tiempo de colmatación capilar, en la muestra patrón y la dosis de 20% de vidrio se obtuvo un comportamiento que no permite estimar alguna tendencia. Para valores iguales y superiores al 40% se observó un aumento del tiempo de colmatación, evidenciándose la influencia del vidrio en la absorción capilar de las muestras, dificultando el paso del agua a través de sus poros internos.

Como resultado de la presente investigación, el concreto pudiera ser una forma de disposición final de este desecho, siempre y cuando se refuercen los resultados obtenidos de esta investigación.



## **CAPÍTULO VI**

### **VI) Recomendaciones**

Según los resultados obtenidos, para estudios futuros, debe considerarse aumentar la cantidad de muestras para la realización de ensayos a compresión, para así lograr definir el comportamiento del concreto al adicionársele vidrio proveniente de bombillos ahorradores y conocer la variación existente de este parámetro a largo plazo.

A su vez, deberá medirse la influencia en la resistencia, de los diferentes tamaños de partículas del vidrio añadido y así determinar cuál de estos es el más beneficioso para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto. Se recomienda también realizar sobre las muestras ensayadas a compresión, un estudio microscópico de barrido adecuado para poder apreciar la interacción, disposición del vidrio en el concreto, su incidencia en la variación de las tensiones máximas obtenidas y el modo de fractura de las muestras.

Para el estudio de parámetros hidráulicos de absorción capilar se debe considerar aumentar la cantidad de muestras utilizadas, por las mismas consideraciones explicadas anteriormente e implementar un sistema de compactación mecánico que permita obtener densidades similares en todas las muestras realizadas, para poder medir la influencia del vidrio sobre esta variable. Igualmente se propone el estudio de otros parámetros que tengan influencia sobre los resultados de este ensayo.

Para el uso del concreto como encapsulador del vidrio reciclado proveniente de bombillos ahorradores, deben realizarse otras investigaciones para que se pueda garantizar la calidad del producto desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas e hidráulicas, como también los ensayos químicos correspondientes para medir la efectividad de la capacidad encapsulante del concreto.

En vista de todo lo presentado anteriormente es evidente el interés de la investigación de este tema en trabajos futuros, debido a la cantidad de incógnitas a despejar en el mismo. Los esfuerzos en este ámbito serán justificados con la mejora del ambiente a través de la disposición final de materiales contaminantes cuyo efecto, al ir a parar a rellenos sanitarios, significaría un impacto negativo sobre las condiciones del ambiente.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Avendaño, E. (15 de Julio de 2014). *Bombillos Ahorradores no es Basura Doméstica. El Nacional*. Obtenido en Noviembre de 2015 desde: <http://www.el-nacional.com/sociedad/Bombillos-ahorradores-basura-domestica-0-445755577.html>

Benavides, L. (7 de Noviembre de 1997). *Biblioteca Virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental*. Obtenido en Noviembre de 2015 desde: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/gtz/grespel/guiatrat.html>

Gonzales Cuevas, O.M y Robles, F (1975) *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*. Editorial Limusa.

Porrero, J., Ramos, C., Grases, J. & Velazco, G. (2009). *Manual del Concreto Estructural*, Tercera Edición. Caracas.

Ph.D Hermida. G. (Diciembre 2013), *Concreto de baja permeabilidad, algo más de disminuir A/C. Presupuesto & Construcción*, Pág., 8-12.

Ing Reiner Garcia, D.P. (2014). *Características Generales del Vidrio Reciclado de Laminarias Fluorescentes* Producido por la empresa VITAAMBIENTE C.A. Edo. Miranda. Universidad Simón Bolívar.

## ANEXOS

Las dos primeras figuras presentadas a continuación fueron obtenidas de un barrido de microscopía óptica realizado en el Laboratorio de Materiales II de la Universidad Católica Andrés Bello. El equipo utilizado no es el que correspondería a este tipo de material; el trabajo realizado fue de tipo exploratorio. Existen equipos en otros laboratorios que son los adecuados para la evaluación de estas muestras.

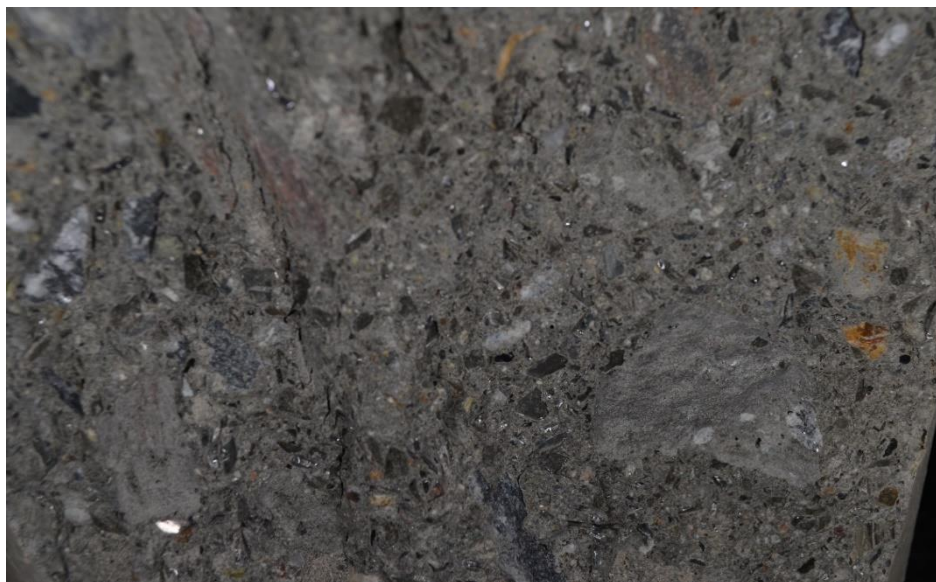


**Figura A-1 Microscopía óptica de la interacción pasta de cemento y agregados "Shear Bond" de una muestra de concreto con 0% de vidrio proveniente de bombillos ahorradores (patrón) y una dosis de cemento de 420 Kg/m<sup>3</sup> (Zoom 100X)**



**Figura A-2** Microscopía óptica de la interacción pasta de cemento y agregados “Shear Bond” de una muestra de concreto con 80% de vidrio proveniente de bombillos ahorradores y una dosis de cemento de  $420 \text{ Kg/m}^3$  (Zoom 100X)

Las figuras mostradas a continuación se obtuvieron de fotografiar un cilindro después de la falla y la comparación de tamaños entre la arena y el vidrio utilizado.



**Figura A-3** Imagen de cilindro a la falla con una dosis de  $420 \text{ Kg/m}^3$  y 80% de adición



**Figura A-4 Imagen comparativa entre los tamaños de partículas del vidrio proveniente de bombillos ahorradores y arena natural de río utilizada en las mezclas de concreto.**