

**PROPUESTA DE CONCRETO MODIFICADO TRASLUCIDO NO  
ESTRUCTURAL UTILIZANDO VIDRIO Y FIBRA ÓPTICA**

**EDWIN HERNANDO PÉREZ SÁNCHEZ  
KAREN ANDREA TORRADO VERJEL**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**Bucaramanga**

**2009**

**PROPUESTA DE CONCRETO MODIFICADO TRASLUCIDO NO  
ESTRUCTURAL UTILIZANDO VIDRIO Y FIBRA OPTICA**

**EDWIN HERNANDO PÉREZ SÁNCHEZ  
KAREN ANDREA TORRADO VERJEL**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN, PRESENTADO COMO REQUISITO DE  
GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR:**

**RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ  
Ingeniero Civil Ph.D.**

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**Bucaramanga**

**2009**

*Quiero darle las gracias a Dios por darme la vida y la fuerza  
para culminar mis estudios y este proyecto.*

*Con todo mi corazón dedico este proyecto a mis padres Emiliano y Elsa, a mi  
abuelita Abigail, a mis hermanas Deisy y Eliana, a Karen por su apoyo y  
colaboración, Astrid por el amor y fuerza que siempre me brindó cuando mas lo  
necesité y a todos mis amigos de la universidad por estar conmigo en todo este  
largo camino.*

**Edwin Hernando Pérez Sánchez.**

*Con todo mi amor dedico este proyecto,  
a mis hijos Juan Esteban y Juan Nicolás  
por dejarme robarles un poco de su tiempo para terminar esta obra,  
a mi esposo Juan Carlos por su apoyo incondicional,  
por ser mi fortaleza mi mano derecha,  
a mis papas Diomar y Fabiola por estar siempre cerca de mi  
y a mi compañero Edwin por su paciencia y tolerancia.*

***Karen Andrea Torrado Verjel.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a todas aquellas personas que hicieron parte de este proyecto:

### **Director de proyecto**

RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ  
Ingeniero Civil Ph.D.

### **Técnicos Escuela de Ingeniería Civil**

T.A. Jairo Hernández Salazar

T.B. Germán Hernández

T.B. Jaime Alberto Cadena

### **Técnicos Escuela Ingeniería Metalúrgica**

T.A. Ambrosio Carrillo

T.B. Javier Gaitán

T.A. Daniel Garavito

T.A. Mario Alfonso Navarrete

### **Técnicos Escuela Ingeniería Química**

T.A. Eduardo Carreño

T.A. Wilson Carreño

### **Técnico Escuela Ingeniería Petróleos**

T.A. Félix Arenas

### **Técnicos Escuela Química**

T.A. Alejandro Torres

### **Docentes Escuela Física**

María del Carmen Lasprilla

Juan José Barrios

Vladimir Jerez

## RESUMEN

**TITULO: PROPUESTA DE CONCRETO MODIFICADO TRASLUCIDO NO ESTRUCTURAL UTILIZANDO VIDRIO Y FIBRA OPTICA.\***

**AUTORES: PÉREZ SÁNCHEZ EDWIN HERNANDO; TORRADO VERJEL KAREN ANDREA.\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Concretos, vidrios, fibra óptica, translucidez, propiedades físico-mecánicas, reacción álcali-sílice.

La incorporación de materiales no convencionales en la ingeniería civil tales como la fibra óptica, el vidrio, y el metacaolín se presentan como una alternativa novedosa en la fabricación de concretos con características arquitectónicas de brillo y translucidez. Además, contribuye con el medio ambiente utilizando materiales como el vidrio reciclado. De otra parte es interesante observar el comportamiento físico-mecánico de este nuevo material (concreto translucido) ya que debido a la adición de fibra óptica se observa un decremento en la resistencia comparado con el mismo material sin fibra.

El deterioro en el concreto se debe a acciones físicas, mecánicas y químicas, las cuales están relacionadas con las características del mismo, sus componentes, el proceso de elaboración, fraguado, curado y el medio ambiente al que puede llegar a ser expuesto.

La adición de una sustancia puzolánica como el metacaolín MK a este material mejora la resistencia a la reacción álcali-sílice, contribuyendo a la durabilidad del este, ya que dicha reacción se presenta después de varios años de uso del mismo y en condiciones severas de humedad, sequía, hielo deshielo, entre otras. Aunque este material no está propuesto para este tipo de condiciones debido a que su uso es meramente arquitectónico y decorativo se optó por buscar un aditivo que contribuyese a mitigar de alguna forma esta reacción ya que su composición es en gran parte sílice, la cual es una de las principales causas de la ocurrencia de este tipo de deterioro.

La translucidez fue medida a partir de los ensayos de Transmitancia y Espectrofotometría, dando como resultado un material translucido aunque no en gran medida según los aparatos usados para calcularla, pero como se puede observar en este estudio, la cantidad de luz que atraviesa los especímenes es suficiente para que el ojo humano la pueda captar.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández

## SUMMARY

**TITLE: PROPOSAL FOR NO STRUCTURAL CONCRETE MODIFIED TRANSLUCENT USING OPTICAL FIBER AND GLASS.\***

**AUTHORS: PÉREZ SÁNCHEZ EDWIN HERNANDO; TORRADO VERJEL KAREN ANDREA.\*\***

**KEYWORDS:** concretes, glass, optic fiber, translucency, physical and mechanical properties, alkali-silica reaction.

The incorporation of unconventional materials in civil engineering such as optical fiber, glass, and metacaolín are presented as a cutting edge alternative in the manufacturing of concrete with some architectural characteristics of brightness and translucency. Besides it helps the environment by using materials such as recycled glass. Furthermore it is interesting to observe the physical and mechanical performance of this new material because, due to the addition of fiber, it is shown a decrease in resistance, in comparison with the some material which does not contain fiber.

The deterioration in the concrete happens to be due to physical, mechanical and chemical properties, which are related to the concrete's characteristics, its components, the preparation, setting, curing and the environment it might be exposed to.

The addition of a substance such as pozzolana MK metacaolín this material enhances the resistance to alkali-silical reaction. It contributes the durability of the concrete itself given the fact that the reaction appears after several years of use; even in severe conditions such as moisture, droughts, frosts, thaw, among others. Although this material is not proposed for such conditions because its use is purely decorative and architectural its was agreed to seek an additive that helped to mitigate some of that reaction because of its mostly silical, which is one of the main causes of the occurrence of such deterioration.

Translucency was measured by the tests of spectrophotometry and transmittance, resulting in a translucent material; not as heavily used to calculate the aircraft, but as it was seen in this study, the amount of light passing through the specimens is enough for the human eye to capture it.

---

\* Project of Degree

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty. Civil Engineering School. Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernandez.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Planteamiento del Problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Objetivo General .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. Objetivos Específicos .....</b>	<b>4</b>
<b>2. MARCO TEORICO .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Concreto.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1. Definición:.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2. Componentes: .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.3. Propiedades de los Concretos.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3.1. Cualidades del Concreto Fresco:.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3.2. Cualidades en Estado Endurecido.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.4. Durabilidad del Concreto .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2. El Vidrio:.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2 Estructura del Vidrio:.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3 Propiedades Del Vidrio: .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3.1. Resistencia Física: .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.3.2. Resistencia Química:.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.4. Proceso de Fabricación del Vidrio:.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.5. Clasificación del Vidrio: .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.6. Utilización del Vidrio Reciclado:.....</b>	<b>22</b>

2.2.7.	Utilización de Vidrio en la Fabricación de Concreto:.....	22
2.3	El Metacaolín.....	24
2.3.1.	Definición:.....	24
2.3.2.	Propiedades del Cemento Mezclado con Metacaolín:.....	25
2.3.3.	Efecto Pozolánico del Metacaolín (MK):.....	26
2.3.4	Propiedades Mecánicas:.....	26
2.4	La Fibra Óptica .....	27
2.4.1	Definición:.....	27
2.4.2	Reseña Histórica:.....	28
2.4.3	Propiedades de la Fibra Óptica: .....	29
2.4.4	Tipos de Fibra Óptica: .....	29
3.	ETAPA EXPERIMENTAL.....	31
3.1.	Obtención Del Metacaolín: .....	31
3.2.	Diseño de Mezcla .....	33
3.3.	Ensayos de Laboratorio .....	35
3.3.1.	Ensayo de compresión: .....	36
3.3.2.	Ensayo De Flexión:.....	37
3.3.3.	Ensayo De Tracción:.....	38
3.3.4.	Ensayo de porosidad:.....	40
3.3.5.	Ensayo de Permeabilidad:.....	44
3.3.6.	Ensayo de Absorción Capilar:.....	46
3.3.7.	Ensayo para la Determinación de la Reactividad de los Agregados (Vidrio) Respecto a los Álcalis del Cemento y Mitigación de la Reacción Álcali-Sílice.....	48
3.3.8.	Transmitancia:.....	52

3.3.9.	Espectrofotometría: .....	54
4.	<b>PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS</b> .....	58
4.1.	Ensayo de compresión: .....	58
4.2.	Ensayo de Flexión.....	61
4.3.	Ensayo de Tracción.....	63
4.4.	Ensayo de Porosidad.....	65
4.5.	Ensayo de Permeabilidad.....	69
4.6.	Ensayo de Absorción Capilar:.....	72
4.7.	Ensayo para la Determinación de la Reactividad de los Agregados (Vidrio) Respecto a los Álcalis del Cemento Y Mitigación de la Reacción Alkali-Sílice.....	75
4.8.	Ensayo de Transmitancia:.....	80
4.9.	Espectrofotometría: .....	83
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	86
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	88
	<b>REFERENCIAS</b> .....	90

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Dosificación de la Mezcla de Concreto para 1 m <sup>3</sup> de volumen .....	33
Tabla 2 Dosificación de la Mezcla para un volumen de 0,0025m <sup>3</sup> .....	33
Tabla 3 Características Químicas del Cemento Blanco .....	49
Tabla 4 Espectro Visible.....	56
Tabla 5 Resultados de Porosidad. Porosímetro de gas Ruska.....	67
Tabla 6 Resultados de Porosidad. Método de porosidad propuesto por Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Assia Djerbi y Mariusz Kaczmarek. ....	68
Tabla 7 Resultados de Permeabilidad. Permeámetro de gas Ruska.....	70
Tabla 8 Absorción de agua en el tiempo. Datos de laboratorio.....	73
Tabla 9 Capacidad de Absorción Capilar en el Tiempo.....	73
Tabla 10 Agua absorbida en función de la raíz cuadrada del tiempo. ....	74
Tabla 11 Porcentaje de Expansión en el Tiempo .....	76
Tabla 12 Comparación Entre Expansión de las Muestras sin Adicionar y Adicionadas.....	77
Tabla 13 Intensidad de los Láseres y Cantidad de Luz que Transmiten las Muestras .....	81
Tabla 14 Valores de Transmitancia para la Muestras M1, M2 y M3.....	81

## LISTA DE FOTOS

Foto 1 Vidrio Reciclado .....	15
Foto 2 Metacaolín obtenido en el laboratorio .....	24
Foto 3 Fibra Óptica Usada.....	27
Foto 4 Molino Para Obtención del MK.....	32
Foto 5 Horno De Calcinación Del Caolín y Temperatura Promedio de 800 grados .....	32
Foto 6 Metacaolín Usado .....	33
Foto 7 Máquina Universal de Ensayos TREBEL .....	37
Foto 8 Montaje del Ensayo de Compresión.....	37
Foto 9 Montaje Ensayo de Flexion .....	38
Foto 10 Montaje Ensayo de Tracción .....	39
Foto 11 Porosímetro de Campo Ruska .....	40
Foto 12 Probetas Cubicas Ensayo de Porosidad .....	43
Foto 13 Permeámetro de Gas Ruska .....	44
Foto 14 Probetas Cubicas Ensayo de Permeabilidad.....	46
Foto 15 Probetas ensayo absorción capilar.....	48
Foto 16 Montaje Metálico Hermético .....	50
Foto 17 Montaje de Recirculación de agua y Condensación de los Vapores Liberados en el Proceso.....	51
Foto 18 Fotómetro.....	53
Foto 19 Intensidad de luz proveniente de las muestras .....	53
Foto 20 Intensidad de luz proveniente de las muestras 2 .....	54
Foto 21 Montajes de laser .....	54
Foto 22 Espectrofotómetro UV-2401 PC.....	57
Foto 23 Moldes Para Ensayo de compresión.....	58
Foto 24 Elaboración Probetas Ensayo de compresión .....	59

Foto 25 Probeta sometida a compresión y Probeta Fallada .....	59
Foto 26 Ensayo a Flexión del Concreto.....	62
Foto 27 Falla por Flexión del Concreto.....	62
Foto 28 Montaje Ensayo de Tracción .....	64
Foto 29 Falla de las probetas del Ensayo de Tracción .....	64
Foto 30 Porosímetro de campo Ruska y Muestras de porosidad. ....	66
Foto 31 Muestras de Porosidad.....	66
Foto 32 Permeámetro de gas Ruska .....	69
Foto 33 Tabla de calibración. ....	70
Foto 34 Ensayo de Absorción Capilar .....	72
Foto 35 Montaje de recirculación.....	78
Foto 36 probetas ensayadas 1.....	78
Foto 37 Deformaciones que Sufren los Modelos Despues del Ensayo .....	78
Foto 38 Fisura que Muestra la Probeta después del Ensayo .....	79
Foto 39 Desmonte del Ensayo y Probetas Ensayadas.....	79
Foto 40 Corrosión que Presenta la Tapa Hermética. ....	79
Foto 41 Intensidad de luz Laser proveniente de las muestras .....	82
Foto 42 Intensidad de Luz Solar que Proviene de las Muestras.....	83

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1 Resistencia Vs Relación Agua/ Cemento .....	34
Gráfica 2 Espectro Visible.....	56
Gráfica 3 Resistencia a la Compresión vs. Tiempo.....	60
Gráfica 4 Esfuerzo Vs. Deformación.....	60
Gráfica 5 Resistencia a la Flexión vs. Tiempo .....	62
Gráfica 6 Resistencia a la Tracción vs. Tiempo .....	64
Gráfica 7 Porosidad Muestras 1, 2 y 3. ....	67
Gráfica 8 Porosidad Muestras 1, 2 y 3. Método de Saturación. ....	68
Gráfica 9 Permeabilidad de las Muestras 1, 2 y 3 en Dirección Paralela y Perpendicular a las Fibras. ....	71
Gráfica 10 Absorción de Agua en el Tiempo .....	73
Gráfica 11 Capacidad de Absorción Capilar en el Tiempo.....	74
Gráfica 12 Agua absorbida en función de la raíz cuadrada del tiempo.....	74
Gráfica 13 Expansión vs. Edad.....	77
Gráfica 14 Cantidad de Luz que Transmiten las Muestras .....	81
Gráfica 15 Transmitancia de las Muestras 1, 2 y 3 .....	82
Gráfica 16 Longitud de Onda del Espectrofotómetro sin las Muestras .....	83
Gráfica 17 Energía Vs Longitud de Onda1 .....	84
Gráfica 18 Energía Vs Longitud de Onda2 .....	84
Gráfica 19 Energía Vs Longitud de Onda 3 .....	84

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades, las nuevas construcciones y la necesidad de nuevos materiales arquitectónicos, en un tiempo donde el medio ambiente es primordial, nos ha llevado a innovar y probar con materiales poco usuales en la construcción y arquitectura tradicional, como la mezcla de vidrio con concreto, concretos y polímeros, ferro-cementos, entre otros. Los cuales interactúan con el ambiente, siendo materiales reutilizables y reciclables.

La gran cantidad de desechos producidos por el Hombre en este momento es prácticamente incontrolable y la acumulación de basuras en los rellenos sanitarios está casi a tope de colmatación, es por esto que debemos de alguna manera contribuir en el manejo de basuras e incluirlas en algún tipo de material que se pueda utilizar en la construcción de obras civiles y arquitectónicas.

La propuesta para mejorar este inconveniente con respecto a los desechos de vidrio, los cuales generan una contaminación muy grande en las ciudades y centros urbanos, es utilizarlo como agregado para la obtención de un nuevo material al combinar estos desechos con cemento, metacaolín y fibra óptica.

En este estudio se presenta una descripción de los materiales a utilizar como el cemento blanco, el metacaolín, el vidrio y la fibra óptica, se muestra también los resultados del diseño de la mezcla, de los ensayos físico-mecánicos, la porosidad, permeabilidad, absorción capilar, la transmisibilidad de luz en porcentaje y por último la durabilidad del material.

También se presenta en detalle las propiedades más significativas del concreto, tanto en estado plástico como endurecido y su importancia dentro de los materiales de construcción de acuerdo al papel que desempeña. Se muestra un informe de la obtención de la puzolana utilizada como aditivo en la fabricación del concreto modificado y adicionado.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.1 Planteamiento del Problema

Los materiales utilizados en la construcción están día a día en constante evolución y transformación, por lo que en el diseño de nuevos materiales se emplean diferentes materias primas y agregados, con los cuales se pretende mejorar las propiedades físicas, químicas y de durabilidad, disminuir costos e involucrarse más con el medio ambiente, obteniendo elementos arquitectónicamente más agradables y amigables con la naturaleza.

La grave contaminación ambiental y el calentamiento global nos lleva a pensar en cómo contribuir desde la ingeniería civil, a mejorar un poco la calidad de vida del planeta, involucrando materiales que se puedan reutilizar y reciclar como materia prima para nuevos materiales de construcción, es por tal razón que se propone reciclar el vidrio y usarlo como agregado en concretos no estructurales, debido a la gran cantidad de desechos de este tipo que se generan a diario en nuestras ciudades.

En este trabajo se busca proponer un material que interactúe con el entorno y que a su vez cumpla con los mínimos requerimientos de resistencia, manejabilidad, dureza, etc., de un concreto no estructural, trabajando con materiales que se pueden obtener del reciclado de vidrio, procesamiento de caolín y un material muy difícil de conseguir en Colombia y con el que se quiere innovar, LA FIBRA ÓPTICA, sin recubrimiento y solo para transmisión de luz.

El vidrio se utilizará en tamaños muy pequeños para lograr acabados arquitectónicos de brillo y color, por lo que se emplearán algunas tonalidades.

Paralelo a esto se tratará de solucionar el problema de reacción álcali-sílice que se produce al mezclar el sílice del agregado (vidrio) con el álcali del cemento. Para esto se empleará metacaolín derivado de la calcinación de caolín con el que se pretende mitigar esta reacción.

## **1.2 Objetivo General**

Proponer un concreto no estructural modificado con metacaolín, con características de translucidez mediante la adición de vidrio y fibra óptica.

### **1.2.1. Objetivos Específicos**

- Proponer una dosificación de metacaolín, vidrio y fibra óptica para el concreto no estructural, que proporcione características de translucidez.
- Evaluar las características físico-mecánicas, tracción, compresión y flexión del concreto modificado y adicionado.
- Estimar la translucidez de la matriz de concreto modificado mediante el ensayo de transmitancia usando un foto-sensor.
- Evaluar la durabilidad del concreto modificado, a través del ensayo álcali-agregado.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1. Concreto

En el desarrollo de esta investigación es fundamental conocer las características de un concreto tradicional para poderlas comparar con el concreto modificado propuesto, descubriendo las ventajas y desventajas que se logren al adicionar vidrio, metacaolín y fibra óptica a cemento blanco obteniendo otro tipo de concreto.

#### 2.1.1. Definición:

Antes de definir el concreto es necesario saber algunas otras definiciones anteriores y de igual importancia:

- ✓ Pasta o pegante: esta es una mezcla de cemento y agua también llamada lechada.
- ✓ Mortero: mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos y agua, y también, posibles aditivos; la mezcla de esos materiales es fina, no se le adiciona agregado grueso lo que la hace una pasta más fluida.

El concreto es el resultado de una mezcla de cemento, arena y grava que, unidos con agua, forman una masa resistente y de consistencia compacta que al fraguar y endurecer adquiere una resistencia similar a la de las mejores rocas naturales.

El hormigón es uno de los materiales más tradicionales empleados en la construcción.

El cemento junto a una fracción del agua del concreto componen la parte pura cuyas propiedades dependen de la naturaleza del cemento y de la cantidad de agua utilizada.

Esta pasta pura desempeña un papel activo: envolviendo los granos inertes y rellenando los huecos de los áridos, otorgando al concreto sus características:

- De resistencia mecánica.
- De contracción.
- De fisurabilidad.

### **2.1.2. Componentes:**

El concreto está constituido por una mezcla, en proporciones definidas de:

- Cemento.
- Agua.
- Áridos.

Los áridos los forman arenas y gravas generalmente no mayores de 5 cm; el cemento es de fraguado lento, generalmente Portland. El agua debe estar limpia y libre de limos y sales. En el concreto, la grava y la arena constituyen el esqueleto, mientras que la pasta que se forma con el cemento, rellena los huecos uniendo y consolidando los granos de los áridos. Al concreto se le puede añadir aditivos para mejorar algunas de sus propiedades.

Para conseguir propiedades especiales del hormigón (mejor trabajabilidad, mayor resistencia, baja densidad, etc.), se pueden añadir otros componentes como aditivos químicos, micro-sílice, limaduras de hierro, etc., o se pueden reemplazar sus componentes básicos por componentes con características especiales como agregados livianos, agregados pesados, cementos de fraguado lento, etc.

El hormigón es de gran importancia como material estructural debido a que puede adaptarse fácilmente a una gran variedad de moldes, adquiriendo formas arbitrarias, de dimensiones variables, gracias a su consistencia plástica en estado fresco.

Al igual que las piedras naturales no deterioradas, el hormigón es un material sumamente resistente a la compresión, pero extremadamente frágil y débil a sollicitaciones de tracción. Para aprovechar sus fortalezas y superar sus limitaciones, en estructuras se utiliza el hormigón combinado con barras de acero resistente a la tracción, lo que se conoce como hormigón armado.

### **2.1.3. Propiedades de los Concretos**

#### **2.1.3.1. Cualidades del Concreto Fresco:**

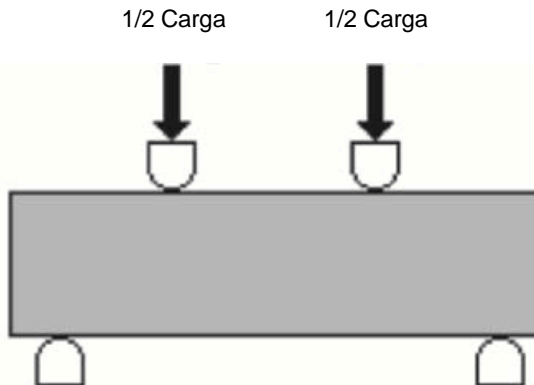
- **Consistencia:** La facilidad con que un concreto fresco se deforma nos da idea de su consistencia. Los factores más importantes que producen esta deformación son la cantidad de agua de amasado, la granulometría y la forma y tamaño de sus áridos.
- **Docilidad:** La docilidad puede considerarse como la aptitud de un concreto para ser empleado en una obra determinada; para que un concreto tenga docilidad, debe poseer una consistencia y una cohesión adecuada, así, cada obra tiene un concepto de docilidad, según sus medidas y características.
- **Densidad:** Es un factor muy importante a tener en cuenta para la uniformidad del concreto pues el peso varía según la granulometría, y humedad de los áridos, agua de amasado y modificaciones en el

asentamiento. Varía dependiendo de sus aditivos entre 2.4 t/m<sup>3</sup> con acero y 2.2 t/m<sup>3</sup> sin acero.

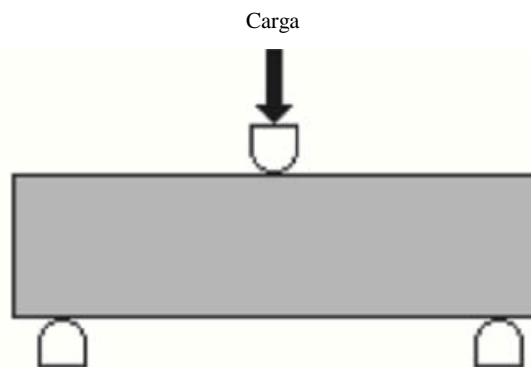
### 2.1.3.2. Cualidades en Estado Endurecido

- **Compresión:** La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en Mega Pascales (Mpa). Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas a especímenes de mortero o de concreto, en nuestro caso realizamos ensayos sobre probetas cubicas de 5cm X 5cmX 5 cm. La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de estructuras [1].
- **Flexión:** La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Determina la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto. La resistencia a la flexión se expresa como Módulo de Rotura (MR) en Mpa y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios) o ASTM C293 (cargada en el punto medio).

El Módulo de Rotura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado, sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio para los materiales dados y el diseño de la mezcla. El Módulo de Rotura determinado por la viga cargada en los puntos tercios es más bajo que el módulo de rotura determinado por la viga cargada en el punto medio, en algunas ocasiones tanto como en un 15% [26, 27, 28, 29, 30, 31 y 32]



ASTM C78. Cargas en los puntos tercios. La mitad de la carga se aplica en cada tercio de la luz. El módulo de rotura es más bajo que en el caso de la carga en el punto medio. La tensión máxima en el tercio medio de la viga.



ASTM C293. Carga en el punto medio. Toda la carga se aplica en el centro de la luz. El módulo de rotura será mayor que en caso de la carga en los puntos tercios. La tensión máxima sólo en el centro de la viga.

- **Modulo de Elasticidad:** Es la pendiente de la parte inicial de la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto y aumenta con la resistencia del concreto a compresión. Se usa normalmente el denominado módulo secante, que se obtiene de la pendiente de la recta que une el origen de la curva de esfuerzos vs. deformación unitaria del concreto, con un punto

correspondiente a un esfuerzo de  $0,45 f'c$ . Esta propiedad del concreto es muy importante para la predicción de las deflexiones producidas por cargas de corta duración en los elementos a flexión. Aunque es un valor que es variable según la resistencia del concreto a compresión, su valor puede asumirse como 20000 Mpa, para muchos casos en que no sea necesaria demasiada precisión.

#### **2.1.4. Durabilidad del Concreto**

Existen varios factores que inciden en el deterioro del hormigón; un estudio realizado en Francia sobre factores y sus porcentajes de influencia en el deterioro del hormigón determinó que [3]:

43% se debió a fallas de diseño

43% se produjeron por fallas de construcción

6% ocurrió debido al uso de material defectuoso

8% debido a fallas en el mantenimiento del hormigón

El deterioro del concreto se da generalmente por la acción combinada de diferentes agentes agresivos, los cuales se pueden clasificar en cuatro grandes grupos, en función de su forma de actuar [2]:

- ✓ Acciones químicas,
- ✓ Físicas.
- ✓ Mecánicas.
- ✓ Biológicas.

▪ **Acciones Químicas.**

Entre las acciones químicas que influyen negativamente en la durabilidad del concreto se consideran: la corrosión del acero embebido en el concreto, la lixiviación de la pasta de cemento, las reacciones expansivas que incluyen el ataque de sulfato y la reacción álcali-agregado. Estas acciones son las más agresivas a la masa de concreto y las más temidas por lo que se deben tener en cuenta desde que se concibe el proyecto estructural de una construcción. Los agentes químicos más frecuentes que producen el deterioro del concreto son:

- El aire y otros gases, en ambiente natural o contaminado.
- Las aguas agresivas (puras, de mar, industriales, negras agrícolas, negras urbanas) y otros líquidos.
- Los productos químicos orgánicos o inorgánicos.

Otras causas menos frecuentes son:

- Ciclos de hielo-deshielo
- Carbonatación de la pasta que recubre al acero provocando corrosión
- Ataque por sulfatos
- Agregados que poseen alta retracción
- Reacción álcali-agregado
- Suelos y terrenos agresivos.

Las causas mencionadas de una u otra forma tienen relación con la porosidad del hormigón y con los cambios volumétricos de sus componentes ya sea en forma de expansión o compresión. Estos cambios provocan esfuerzos de tracción que rebasan la débil capacidad resistente de la pasta cementicia y generan fisuras que comprometen la integridad del sólido y su durabilidad.

Existen tres tipos de reacción que son provocados por los óxidos de sodio y potasio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) cuando atacan a cierto tipo de agregados reactivos. Las reacciones que mencionaremos a continuación generan expansión y causan deterioro en el hormigón [3]:

- a. Reacción álcali-silicato
- b. Reacción álcali-carbonato
- c. Reacción álcali-sílice

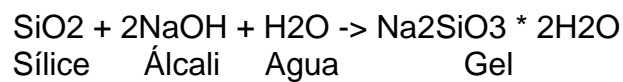
La primera es una reacción producida por los álcalis presentes en el agua de poro del hormigón y varios minerales comúnmente encontrados en rocas arcillosas como las Grawacas, Filitas y Argilitas. Los álcalis y el hidróxido generado en solución acuosa poseen gran capacidad de disolución y al parecer desalojan a un mineral del tipo de las “Vermiculitas” que se encuentra ubicado entre las capas de exfoliación de ciertos filosilicatos (minerales de arcilla). Estos últimos, una vez liberados, logran con mayor facilidad absorber agua y se expanden notablemente causando fisuración. Este tipo de reacción es más lenta que la reacción álcali-sílice y de ella se han reportado escasos ejemplos en el mundo.

El segundo tipo de reacción ocurre entre rocas carbonatadas del tipo de las dolomías y los álcalis. Una vez más los óxidos de Sodio y Potasio causan una de-dolomitización del carbonato (disolución del magnesio del mineral Dolomita) la que viene acompañada de un aumento en la porosidad del mismo. Con frecuencia las dolomías poseen en su interior minerales de arcilla, los que quedan expuestos al agua de poro luego de una de-dolomitización. La hidratación de estos minerales provoca presiones capaces de fisurar al hormigón.

La reacción álcali-carbonato al igual que la reacción previamente comentada es poco frecuente y son raros los casos de su ocurrencia en el mundo.

Finalmente, la reacción que con mayor frecuencia se presenta y ha sido objeto de estudio, es la que ocurre entre los álcalis del cemento y agregados que contienen algunos tipos de sílice reactiva como ópalo, calcedonia, chert, cuarzo que haya soportado esfuerzos, cierto tipo de rocas volcánicas, etc. [3].

La reacción con sus productos puede ser representada en forma simplificada como sigue:



El gel producto de la reacción tiene la propiedad de absorber agua y por consiguiente aumenta de volumen. Esta expansión genera esfuerzos de tracción internos que terminan por romper al hormigón.

Se requieren de tres condiciones para que se produzca la reacción, éstas son:

- a. Un nivel adecuado de álcalis en la pasta cementicia.
- b. Presencia de agregados reactivos
- c. Agua

Sin una de estas tres condiciones la reacción no se producirá.

El contenido de álcali en cementos que se utiliza en la elaboración de hormigones con presencia de áridos reactivos deberá limitarse.

De acuerdo a su contenido de álcali (equivalente sodio) los cementos son clasificados en:

- a. Cementos de alto contenido de álcali  $\text{Na}_2\text{O} > 1.0\%$
- b. Cementos de mediano contenido de álcali  $\text{Na}_2\text{O} < 1.0\% > 0.6\%$
- c. Cementos de bajo contenido de álcali  $\text{Na}_2\text{O} < 0.6\%$

Algunos países sobre la base de experiencias entre sus cementos y áridos locales limitan el contenido de álcalis en el hormigón a valores que no sobrepasan los 3.5 kg/m<sup>3</sup> de equivalente sodio (Na<sub>2</sub>O).

La cantidad de sílice reactiva en el hormigón es un factor importante en la provocación de expansión, pero su acción depende de la cantidad de álcalis disponibles y de la relación agua/cemento de la mezcla, cantidades pequeñas como 1% son suficientes para provocar expansiones deletéreas en el hormigón.

La reacción cesará pues cuando uno de los reactivos se consume o cuando la concentración de ión hidroxilo es tan baja que la sílice reactiva no es atacada.

Existen tres maneras de mitigar este tipo de reacciones en el hormigón, primero usar cementos con bajos contenidos de álcalis (< 0,6%). Esta condición está supeditada a encontrar cementos con estas características, situación que no garantiza totalmente la mitigación de la reacción ya que esta puede producirse por el aporte de álcalis provenientes de fuentes externas al hormigón.

La segunda opción sería la de evitar la presencia de agua en la estructura, condición muy difícil de lograr en obra si consideramos que tan solo un 85% de humedad relativa en el hormigón es suficiente para iniciar la reacción.

Por último la medida más sencilla y accesible es la de utilizar sílice reactiva finamente molida para contrarrestar el ataque de los álcalis a los agregados.

Existen varios materiales que son fuente de sílice reactiva entre varios citamos a la puzolana natural y artificial, componente de los cementos puzolánicos, la micro-sílice o humo de sílice, un subproducto obtenido de la producción de silicio, ceniza volante, un subproducto de la combustión de carbón mineral. Estos productos pueden ser incorporados en el hormigón y contrarrestan la reacción [3].

▪ **Acciones Físicas:**

Los efectos físicos más comunes que actúan adversamente en la durabilidad del concreto incluyen: el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de las sales en los poros, la exposición a temperaturas extremas como son las heladas o el fuego y el desgaste de la superficie [2].

▪ **Acciones Mecánicas:**

Las acciones mecánicas más comunes que pueden dañar la durabilidad de una estructura son las cargas, sobrecargas, impactos, vibraciones, etc. que pueden estar provocadas por causas naturales, como el viento y el agua o por causas artificiales, que afectan el comportamiento futuro del elemento estructural.

▪ **Acciones Biológicas:**

Las generan los microorganismos, fungicidas y bacterias entre otros, las cuales se relacionan directamente con las propiedades de porosidad, permeabilidad y absorción capilar, ya que si la estructura del material es demasiado porosa, es muy susceptible a ataques de este tipo.

**2.2. El Vidrio:**



**Foto 1 Vidrio Reciclado**

### **2.2.1. Definición:**

Es un material duro, frágil, transparente y amorfo que se usa para hacer ventanas, lentes, botellas y una gran variedad de productos. El vidrio se obtiene por fusión a unos 1.500 °C de arena de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y caliza ( $\text{CaCO}_3$ ). Es una sustancia amorfa, es decir, no cristalina, que por su estructura se parece a un líquido pero que por su cohesión, a la temperatura ordinaria, es tan grande que aparenta un sólido. Los vidrios no tienen punto de fusión ni de solidificación precisa; por calentamiento se ablandan y llegan al estado líquido pasando por un estado intermedio, el pastoso.

#### **▪ Reseña Histórica:**

El primer uso que se le dio al vidrio se remonta a tiempos muy antiguos, se utilizaba para objetos de bisutería; a éstos objetos se le añadían diversos minerales haciendo así que durante el fundido se obtuvieran cuentas de diferentes colores.

En la Antigua Roma, se dio a luz a la técnica del soplado, la misma permitió la elaboración o creación de decenas de recipientes, e incluso de láminas para ventanas. De todas formas, la técnica seguía siendo muy primitiva, y las láminas de buena calidad tenían que ser confeccionadas en pequeños tamaños. En la Edad Media, el vidrio, fue muy utilizado en las vidrieras de las catedrales góticas. La industria que se dedicaba a la fabricación del vidrio experimentó un gran cambio a partir del primer cuarto del siglo XIX, esto se debió, gracias al abaratamiento de la producción comercial del mismo. Dicho abaratamiento tuvo lugar gracias a un método ideado por el químico francés Nicolás Leblanc al finalizar el siglo XVIII. A partir de allí, comenzaron a fabricarse vidrios de alta calidad para ser utilizados en instrumentos ópticos; a la vez pudo popularizarse su aplicación haciendo así que proliferasen objetos de usos corrientes tales como: vasos, espejos, botellas, arañas, y otros utensilios, que le brindaban al ser humano una mejora en su calidad de vida [18].

### **2.2.2 Estructura del Vidrio:**

Un gran número de sustancias químicas solidifican del estado fundido en forma de vidrio. La formación del vidrio depende de la velocidad de enfriamiento y requiere tipos diferentes de enlaces (enlace covalente y enlace iónico) entre los átomos o grupos de átomos. Como resultado, los productos que forman el vidrio tienen una fuerte tendencia en el estado fundido para enlazarse en tres dimensiones por polimerización de una manera desordenada. Los cristales se forman cuando los átomos individuales se ordenan en 3 dimensiones, lo que es conocido con el nombre de red cristalina, tan pronto como la sustancia particular cambie del estado líquido al estado sólido. El vidrio forma, al enfriarse del estado líquido, una red espacial desordenada. Los principales componentes que participan en la formación del vidrio son llamados por éstos los formadores de la red. Iones pueden ser también incorporados en esta red de moléculas que forman el vidrio; éstos alteran la red en ciertos lugares y modifican su estructura y las propiedades del vidrio. Por este motivo, son llamados los modificadores de la red.

### **2.2.3 Propiedades Del Vidrio:**

El vidrio se caracteriza por una resistencia química máxima, una dilatación térmica mínima y en consecuencia, la elevada resistencia al choque térmico. Este comportamiento físico y químico óptimo del vidrio hace que sea un material ideal para el uso en el laboratorio, en grandes plantas industriales y en la industria de la construcción.

#### **2.2.3.1. Resistencia Física:**

Según su composición, algunos vidrios pueden fundir a temperaturas de sólo 500 °C; en cambio, otros necesitan 1.650 °C. La resistencia a la tracción, que suele estar entre los 3.000 y 5.500 Pa, puede llegar a los 70.000 Pa si el vidrio recibe un tratamiento especial. La densidad relativa (densidad con respecto al

agua) va de 2 a 8, es decir, el vidrio puede ser más ligero que el aluminio o más pesado que el acero.

#### **2.2.3.2. Resistencia Química:**

La resistencia química del vidrio es más amplia que la de otros materiales conocidos. El vidrio borosilicato es resistente al agua, a ácidos, soluciones de sales, sustancias orgánicas y también frente a halógenos como cloro y bromo. Tiene también una relativamente buena resistencia frente a soluciones alcalinas. Solamente el ácido fluorhídrico, el ácido fosfórico concentrado y soluciones fuertemente alcalinas atacan la superficie del vidrio a temperaturas elevadas.

#### **2.2.4. Proceso de Fabricación del Vidrio:**

El vidrio se origina a través de una compleja mezcla de compuestos vitrificantes tales como, fundentes, sílice, estabilizantes y álcalis; éstas materias primas son llevadas al horno de producción continua a través de una tolva.

El vidrio se hace en un reactor de fusión, en donde se calienta una mezcla que casi siempre consiste en arena silícea (arcillas) y óxidos metálicos secos pulverizados o granulados. En el proceso de la fusión (paso de sólido a líquido) se forma un líquido viscoso y la masa se hace transparente y homogénea a temperaturas mayores a 1 000°C. Al sacarlo del reactor, el vidrio adquiere una rigidez que permite darle forma y manipularlo. Controlando la temperatura de enfriamiento se evita la desvitrificación o cristalización.

Por sus características cristalinas debemos afirmar que el vidrio es un material muy higiénico y no tiene ninguna influencia sobre otros compuestos con los que se lo relaciona, este es el caso de los alimentos almacenados en recipientes de vidrio; su degradación química y física le exige un largo tiempo, de todas formas, no contiene sustancias nocivas para el medio ambiente.

### 2.2.5. Clasificación del Vidrio:

Siendo utilizado desde hace mucho tiempo siempre está unido a la evolución. Su primera expansión fue en la edad media en Venecia en el siglo XIX cuando la industria alimentaria comienza a ser una realidad ya que los productores comprobaron que los alimentos se conservaban mas envasados en este material

El vidrio es clasificado según su uso en:

- Aislante eléctrico y térmico.
- Decoración
- Empaques
- Aparatos ópticos
- Vidrio de ventana

#### - Vidrio de Placa

El vidrio de ventana normal producido por estiramiento no tiene un espesor uniforme, debido a la naturaleza del proceso de fabricación. Las variaciones de espesor distorsionan la imagen de los objetos vistos a través de una hoja de ese vidrio.

En arquitectura se emplea vidrio laminado sin pulir, a menudo con superficies figurativas producidas por dibujos grabados en los rodillos. El vidrio de rejilla, que se fabrica introduciendo tela metálica en el vidrio fundido antes de pasar por los rodillos, no se astilla al recibir un golpe. El vidrio de seguridad, como el utilizado en los parabrisas de los automóviles o en las gafas de seguridad, se obtiene tras la colocación de una lámina de plástico transparente (polivinilbutiral) entre dos láminas finas de vidrio de placa. El plástico se adhiere al vidrio y mantiene fijas las esquirlas incluso después de un fuerte impacto.

- **Botellas y Recipientes**

Las botellas, tarros y otros recipientes de vidrio se fabrican mediante un proceso automático que combina el prensado (para formar el extremo abierto) y el soplado (para formar el cuerpo hueco del recipiente). En una máquina típica para soplar botellas, se deja caer vidrio fundido en un molde estrecho invertido y se presiona con un chorro de aire hacia el extremo inferior del molde, que corresponde al cuello de la botella terminada. Después, un desviador desciende sobre la parte superior del molde, y un chorro de aire que viene desde abajo y pasa por el cuello da la primera forma a la botella. Esta botella a medio formar se sujeta por el cuello, se invierte y se pasa a un segundo molde de acabado, en la que otro chorro de aire le da sus dimensiones finales. En otro tipo de máquina que se utiliza para recipientes de boca ancha, se prensa el vidrio en un molde con un pistón antes de soplarlo en un molde de acabado. Los tarros de poco fondo, como los empleados para cosméticos, son prensados sin más.

- **Vidrio Óptico**

La mayoría de las lentes que se utilizan en gafas (anteojos), microscopios, telescopios, cámaras y otros instrumentos ópticos se fabrican con vidrio óptico. Éste se diferencia de los demás vidrios por su forma de desviar (refractar) la luz. La fabricación de vidrio óptico es un proceso delicado y exigente. Las materias primas deben tener una gran pureza, y hay que tener mucho cuidado para que no se introduzcan imperfecciones en el proceso de fabricación. Pequeñas burbujas de aire o inclusiones de materia no vitrificada pueden provocar distorsiones en la superficie de la lente. Las llamadas cuerdas, estrías causadas por la falta de homogeneidad química del vidrio, también pueden causar distorsiones importantes, y las tensiones en el vidrio debidas a un recocido imperfecto afectan también a las cualidades ópticas.

- **Vidrio Fotosensible**

En el vidrio fotosensible, los iones de oro o plata del material responden a la acción de la luz, de forma similar a lo que ocurre en una película fotográfica. Este vidrio se utiliza en procesos de impresión y reproducción, y su tratamiento térmico tras la exposición a la luz produce cambios permanentes.

El vidrio fotocromático se oscurece al ser expuesto a la luz tras lo cual recupera su claridad original. Este comportamiento se debe a la acción de la luz sobre cristales diminutos de cloruro de plata o bromuro de plata distribuidos por todo el vidrio. Es muy utilizado en lentes de gafas o anteojos y en electrónica.

- **Vitrocerámica**

En los vidrios que contienen determinados metales se produce una cristalización localizada al ser expuestos a radiación ultravioleta. Si se calientan a temperaturas elevadas, estos vidrios se convierten en vitrocerámica, que tiene una resistencia mecánica y unas propiedades de aislamiento eléctrico superiores a las del vidrio ordinario. Este tipo de cerámica se utiliza en la actualidad en utensilios de cocina, conos frontales de cohetes o ladrillos termo resistentes para recubrir naves espaciales. Otros vidrios que contienen metales o aleaciones pueden magnetizarse, son resistentes y flexibles y resultan muy útiles para transformadores eléctricos de alta eficiencia.

- **Fibra de Vidrio**

Es posible producir fibras de vidrio que pueden tejerse como las fibras textiles, estirando vidrio fundido hasta diámetros inferiores a una centésima de milímetro. Se pueden producir tanto hilos multifilamento largos y continuos como fibras cortas de 25 o 30 centímetros de largo. Una vez tejida para formar telas, la fibra de vidrio resulta ser un excelente material para cortinas y tapicería debido a su estabilidad química, solidez y resistencia al fuego y al agua. Los tejidos de fibra de vidrio, sola o en combinación con resinas, constituyen un aislamiento eléctrico excelente. Impregnando fibras de vidrio con plásticos se forma un tipo compuesto que

combina la solidez y estabilidad química del vidrio con la resistencia al impacto del plástico. Otras fibras de vidrio muy útiles son las empleadas para transmitir señales ópticas en comunicaciones informáticas y telefónicas mediante la nueva tecnología de la fibra óptica.

#### **2.2.6. Utilización del Vidrio Reciclado:**

Desde hace muchos años se ha tratado de dar soluciones innovadoras al vidrio y usarlo como una manera práctica para aliviar los problemas que conlleva el almacenamiento de vidrio usado.

En la ingeniería civil el uso que se le da al vidrio es únicamente estético, tales como fachadas, ventanas, claraboyas, cielo rasos etc. En la utilización de la fábrica de baldosas como material de adorno y en la fabricación de adoquines.

En Estados Unidos en la universidad de Columbia en Nueva York, se han estado realizando investigaciones para ser utilizado en la fabricación de morteros.

#### **2.2.7. Utilización de Vidrio en la Fabricación de Concreto:**

El concreto con vidrio no es un nuevo concepto. La idea de utilizar vidrio reciclado en forma de agregado para concreto ha sido por lo menos de alrededor de 30 años. El uso de vidrio como un agregado especial para concreto decorativo está en aumento debido a que hay más posibilidades de color. Esta práctica es cuestionable debido a la posibilidad de la reacción de álcali-sílice entre el vidrio y el cemento.

Hasta ahora, sin embargo, el concepto no puede ser a causa de reacciones químicas entre el vidrio y el cemento que pueden causar grietas y daños inaceptables para un edificio [33].

Unos de los principales materiales que se reciclan después de su consumo es el vidrio, debido a que puede llegar a contaminar el ecosistema en donde sea arrojado. Ya que hemos entrado en la onda de edificios ecológicamente racionales, se ha notado el interés de ingenieros civiles y arquitectos en utilizar materias reciclados para la construcción de dichos.

En estos momentos en Estados Unidos y Alemania la utilización de concreto con vidrio se está llevando a cabo en la elaboración de elementos decorativos como pisos y baldosas, que tienen poca exposición a medios agresivos como el agua (reacción álcalis-sílice), ya que el vidrio proporciona de cierto modo una tonalidad diferente a el concreto, y de esta manera embellece los espacios donde es utilizado [17].

Según otros estudios realizados el vidrio en el concreto se ha usado en proporciones que van de 0 a 30%. Una prueba de campo se llevó a cabo utilizando una mezcla de concreto con una resistencia de 40 Mpa, incorporando diferentes proporciones de vidrio (0%, 20% y 30%) como reemplazo del cemento.

En la mayoría de los estudios que se le han realizado a las mezclas de concreto y vidrio, o mortero y vidrio nunca se han usado adiciones mayores al 30% de este como agregado, buscan de alguna manera una mejor dosificación y dejando como inquietud cual sería el comportamiento de un concreto o mortero con un remplazo de los áridos mayor o total por vidrio como agregado.

### 2.3 El Metacaolín.



**Foto 2 Metacaolín obtenido en el laboratorio**

#### 2.3.1. Definición:

El metacaolín (MK) es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 500°C y 600°C; a esta temperatura se produce una transformación de su estructura cristalina. Fundamentalmente su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y hormigones, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y porosidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, es comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes. Además, tiene como gran ventaja su color blanco que le permite aplicaciones especiales e incluso ser utilizado en la producción de cemento blanco adicionado.

Otros autores [5, 14] han determinado temperaturas diferentes para la producción del MK ampliando el rango entre 700°C y 900°C, mostrando que no sólo es importante la temperatura sino el tiempo de estadía, condiciones del horno, tamaño de partícula y pureza del caolín.

### **2.3.2. Propiedades del Cemento Mezclado con Metacaolín:**

La utilización de las puzolanas en el cemento Pórtland, en términos generales, presenta un efecto en la disminución del calor de hidratación debido a que tiene un menor porcentaje de los compuestos responsables de la elevación de la temperatura durante el fraguado del cemento, lo que implica una menor formación de capilares y por ende una mayor densidad y compacidad, a su vez necesita una menor utilización de agua para el curado de los elementos realizados con este tipo de mezclas [6, 19, 20, 21 y 22]. Además, estas adiciones activas mejoran el desarrollo de resistencias y la durabilidad de los morteros y hormigones.

Entre las propiedades que se le pueden atribuir a los cementos con adiciones, se encuentra la referente a su cualidad puzolánica, que consiste en una serie de reacciones ocurridas durante la etapa de fraguado y endurecimiento. Además, contribuyen al aumento de las resistencias mecánicas y de la durabilidad, más allá de las que se alcanzarían sin la adición de puzolanas. Algunas investigaciones, tales como la de Ambroise, Maximilien y Pera [5], muestran que el uso de este tipo de materiales puede generar una disminución en la exudación del concreto; sin embargo, cuando se hacen reemplazos alrededor del 30% de la masa del cemento, el metacaolín puede actuar como un acelerante del fraguado.

### **2.3.3. Efecto Puzolánico del Metacaolín (MK):**

El MK se ha estado investigando como material puzolánico en las últimas décadas, por científicos de todo el mundo, debido a su composición química,  $Al_2Si_2O_7$ , y a su estructura cristalina amorfa

Fundamentalmente su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y hormigones, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y aumento de la durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes, que son dos de las puzolanas más usadas en el mundo entero. Además, tiene como gran ventaja su color blanco que permite su utilización en aplicaciones especiales e incluso en la producción de cemento blanco adicionado. En esta última aplicación, un contaminante muy importante a ser evaluado es la anatasa, que debe estar por debajo del 1%, porque esta se convierte en brokita a una temperatura entre  $845^{\circ}C$  y  $1023^{\circ}C$ , dándole un color rosado al MK. [4]

### **2.3.4 Propiedades Mecánicas:**

Los resultados de la investigación establecen que al realizar reemplazos de MK por cemento con porcentajes del 10%, se logran los máximos valores de resistencias a compresión. Valores superiores al 10% no muestran aumentos significativos. Las máximas resistencias relativas se dieron a los 14 días, lo que les permitió establecer que la actividad puzolánica del MK alcanza su punto máximo de reacción en este periodo de tiempo. Por otro lado, los análisis realizados por estos autores [6] indican que no se logra realizar una remoción completa del hidróxido de calcio, lo cual, probablemente, se debe a que las partículas del MK no se dispersan completamente en las mezclas, por lo que se plantea la posibilidad de usar aditivos dispersantes. Adicionalmente se indica, que

al realizar reemplazos de cemento por metacaolín, con porcentajes entre el 30% y 40%, se logra remover completamente el hidróxido de calcio, sin embargo, la resistencia a la compresión en estas mezclas con reemplazos por encima del 20% disminuyen drásticamente [4].

## 2.4 La Fibra Óptica



Foto 3 Fibra Óptica Usada

### 2.4.1 Definición:

Un filamento de vidrio sumamente delgado y flexible (de 2 a 125 micrones) capaz de conducir rayos ópticos (señales en base a la transmisión de luz). Las fibras ópticas poseen capacidades de transmisión enormes, del orden de miles de millones de bits por segundo. Se utilizan varias clases de vidrios y plásticos para su construcción. Una fibra es un conductor óptico de forma cilíndrica que consta del núcleo (core), un recubrimiento (cladding) que tienen propiedades ópticas diferentes de las del núcleo y la cubierta exterior (jacket) que absorbe los rayos ópticos y sirve para proteger al conductor del medio ambiente así como darle resistencia mecánica. Además, y a diferencia de los pulsos electrónicos, los impulsos luminosos no son afectados por interferencias causadas por la radiación aleatoria del ambiente. Cuando las compañías telefónicas reemplacen finalmente los cables de cobre de sus estaciones centrales e instalaciones domiciliarias con fibras ópticas, estarán disponibles de modo interactivo una amplia variedad de servicios de información para el consumidor, incluyendo la T.V. de alta definición.

Cada una de las fibras ópticas, puede transportar miles de conversaciones simultáneas de voz digitalizada.

#### **2.4.2 Reseña Histórica:**

La Historia de la comunicación por la fibra óptica es relativamente corta. En 1977, se instaló un sistema de prueba en Inglaterra; dos años después, se producían ya cantidades importantes de pedidos de este material. Antes, en 1959, como o derivación de los estudios en física enfocados a la óptica, se descubrió una nueva utilización de la luz, a la que se denominó rayo láser, que fue aplicado a las telecomunicaciones con el fin que los mensajes se transmitieran a velocidades inusitadas y con amplia cobertura. Sin embargo esta utilización del láser era muy limitada debido a que no existían los conductos y canales adecuados para hacer viajar las ondas electromagnéticas provocadas por la lluvia de fotones originados en la fuente denominada láser. Fue entonces cuando los científicos y técnicos especializados en óptica dirigieron sus esfuerzos a la producción de un ducto o canal, conocido hoy como la fibra óptica. En 1966 surgió la propuesta de utilizar una guía óptica para la comunicación. Esta forma de usar la luz como portadora de información se puede explicar de la siguiente manera: Se trata en realidad de una onda electromagnética de la misma naturaleza que las ondas de radio, con la única diferencia que la longitud de las ondas es del orden de micrómetros en lugar de metros o centímetros. Como portadora de información en poco más de 10 años la fibra óptica se ha convertido en una de las tecnologías más avanzadas que se utilizan como medio de transmisión de información. Este novedoso material vino a revolucionar los procesos de las telecomunicaciones en todos los sentidos, desde lograr una mayor velocidad en la transmisión y disminuir casi en su totalidad los ruidos y las interferencias hasta multiplicar las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica.

### 2.4.3 Propiedades de la Fibra Óptica:

Capacidad de transmisión: La idea de que la velocidad de transmisión depende principalmente del medio utilizado, se conservo hasta el advenimiento de las fibras ópticas, ya que ellas pueden transmitir a velocidades mucho más altas de lo que los emisores y transmisores actuales lo permiten, por lo tanto, son estos dos elementos los que limitan la velocidad de transmisión. La fibra óptica ha venido a revolucionar la comunicación de datos ya que tiene las siguientes ventajas:

- Gran ancho de banda (alrededor de 14Hz)
- Muy pequeña y ligera
- Muy baja atenuación
- Inmunidad al ruido electromagnético

Para transmitir señales por fibra óptica se utiliza modulación de amplitud sobre un rayo óptico, la ausencia de señal indica un cero y la presencia un uno. La transmisión de fibra óptica es unidireccional. Actualmente se utilizan velocidades de transmisión de 50, 100 y 200 Megabytes por segundo (Mbps), pero experimentalmente se han transmitido hasta Gigabytes por segundo (Gbps) sobre una distancia de 110 Km.

### 2.4.4 Tipos de Fibra Óptica:

- **Multimodales:** Los diferentes rayos ópticos recorren diferentes distancias y se desfasan al viajar dentro de la fibra. Por esta razón, la distancia a la que se puede transmitir esta limitada.
- **Multimodales con índice Graduado:** En este tipo de fibra óptica el núcleo esta hecho de varias capas concéntricas de material óptico con diferentes

índices de refracción. La propagación de los rayos en este caso siguen un patrón similar

- **Monomodales:** Esta fibra óptica es la de menor diámetro y solamente permite viajar al rayo óptico central. No sufre del efecto de las otras dos pero es más difícil de construir y manipular. Es también más costosa pero permite distancias de transmisión mayores.

#### **2.4.5 Utilización de la Fibra Óptica en la fabricación de Concretos**

### 3. ETAPA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Obtención Del Metacaolín:

El tratamiento térmico de la caolinita da lugar a transformaciones estructurales que llevan a la obtención de metacaolín ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ). De estos productos el Metacaolín (MK), obtenido bajo un proceso de tratamiento térmico controlado del caolín, es un aluminosilicato de carácter amorfo y alta reactividad, que mezclado con cal o cemento actúa como puzolana y les concede a los morteros y concretos excelentes propiedades cuando se adiciona al cemento.

Para obtener el metacaolín utilizado en este proyecto se calcino a  $800^\circ\text{C}$  durante dos horas, caolín traído desde Arcabuco (Boyacá), el cual es un material con alto contenido de caolinita, debido a esta propiedad produjo un metacaolín de una tonalidad muy similar a la del cemento blanco, haciendo que de esta manera al ser combinado con este no modifique su color [1].



Foto 4 Molino Para Obtención del MK



Foto 5 Horno De Calcinación Del Caolín y Temperatura Promedio de 800 grados

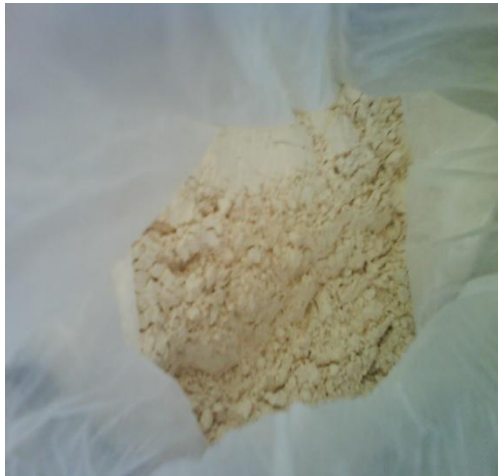


Foto 6 Metacaolín Usado

### 3.2. Diseño de Mezcla

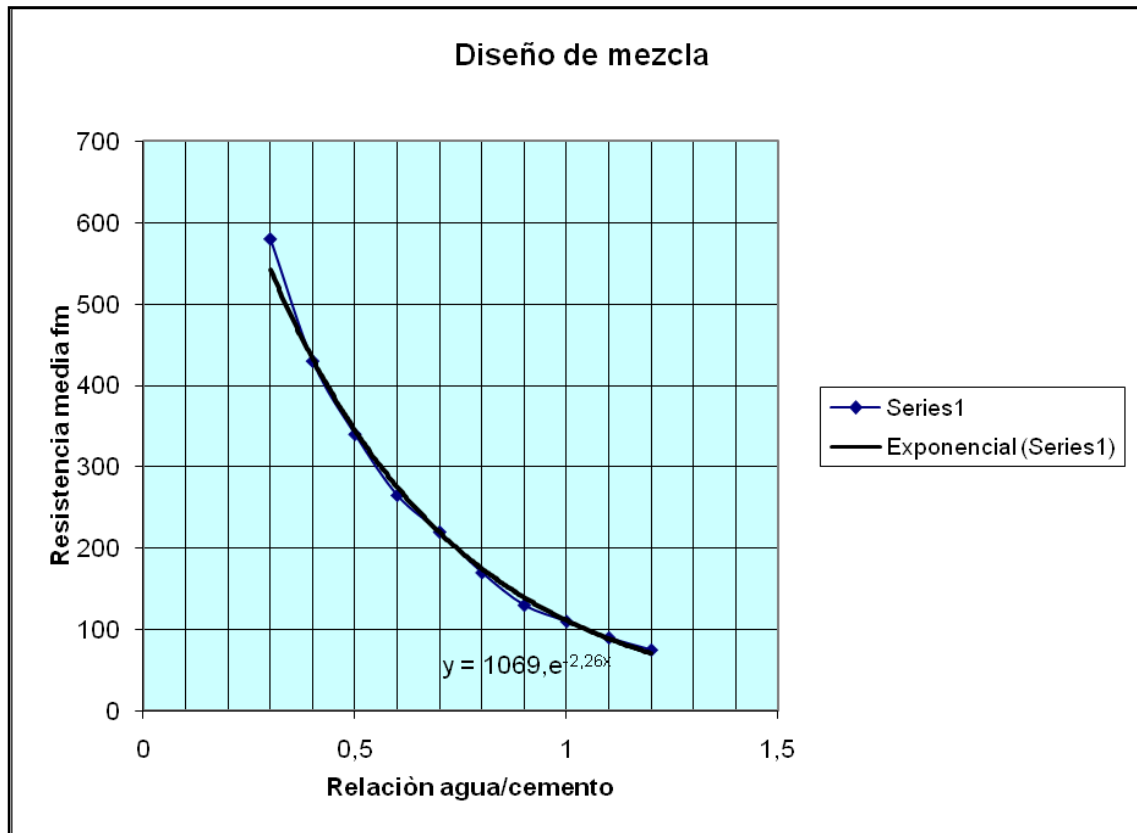
La dosificación utilizada en la presente investigación con una relación de agua cemento de 0,58 para una mezcla fluida es:

Tabla 1 Dosificación de la Mezcla de Concreto para 1 m<sup>3</sup> de volumen

<i>MATERIAL</i>	<i>VOLUMEN NETO m3</i>	<i>PESO kg</i>
<i>Cemento</i>	0,153	483
<i>Agregado fino</i>	0,396	1094
<i>Agregado grueso</i>	0,210	526,24
<i>Agua</i>	0,24	240
<i>Aire atrapado</i>	0,01	0

Tabla 2 Dosificación de la Mezcla para un volumen de 0,0025m<sup>3</sup>

<i>MATERIAL</i>	<i>VOLUMEN NETO m3</i>	<i>PESO kg</i>
<i>Cemento</i>	0.000383	1.2
<i>Agregado fino</i>	0.000991	2.7
<i>Agregado grueso</i>	0.000526	1.3
<i>Agua</i>	0.000600	0.6



**Gráfica 1 Resistencia Vs Relación Agua/ Cemento**

Cálculo del contenido de cemento a partir de la siguiente expresión:

$$C = 1000 / ((1/G_c) + (n/G_A) + A/C)$$

Donde:

$G_C$  = Peso específico del cemento (2.9 gramos/cm<sup>3</sup>)

$G_A$  = Densidad Aparente vidrio (2.5 gramos/cm<sup>3</sup>)

$n$  = Proporción vidrio cemento (3)

$A/C$  = Relación Agua / Cemento (0.58)

Para la obtención de las proporciones de la mezcla de materiales con vidrio molido

se reemplazará el agregado fino y grueso por vidrio, cuyo peso específico es 2.5 g/cm<sup>3</sup>.

El cemento utilizado es un cemento hidráulico blanco encargado de brindar la mayor parte de la resistencia al concreto, inicialmente, siendo igualmente el primer agente conglomerante del conjunto.

Peso Específico (NTC 221) 3,14 gr/cm<sup>3</sup>

Tiempo de fraguado (NTC 118) 1 Horas

Consistencia normal del Cemento (NTC 110) 28.80 %

Debido a que se utiliza MK como aditivo en la mezcla de concreto para mitigar la reacción álcali-sílice, es necesario reemplazar un porcentaje del cemento por este producto. La cantidad de MK que se escogió para reemplazar parte del cemento fue del 15% ya que según autores como Courard L. et al. [7] el óptimo emplazo está entre el 10 y 15% en peso.

Cantidad de MK = cantidad de cemento inicial \* 15%

Cantidad de MK= 180 g.

Cantidad de cemento = cantidad de cemento inicial \* 85%

Cantidad de cemento = 1020 g.

Cantidad de fibra óptica = 5% del peso total = 290 g. aproximadamente

El tamaño del agregado grueso fue vidrio pasa n° 4 y retenido en el tamiz n° 8, el tamaño del agregado fino (vidrio) está desde el pasa n° 8 hasta el retenido n° 100.

### **3.3. Ensayos de Laboratorio**

En la fase experimental de esta investigación se realizaron diferentes ensayos de laboratorio permitió caracterizar el concreto translucido en su comportamiento físico mecánico

- Compresión
- Flexión

- Tracción
- Porosidad
- Permeabilidad
- Absorción capilar
- Determinación de reactividad de los agregados y mitigación de la reacción álcali-sílice.
- Transmitancia
- Espectrofotometría

### **3.3.1. Ensayo de compresión:**

Este ensayo mide el comportamiento de la mezcla de cemento hidráulico, bajo cargas de compresión.

Se emplearon probetas en forma cubicas de 5 cm de lado, las cuales fueron fundidas conforme a la norma NTC 220 (Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 5 cm de lado). En los procedimientos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL, dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas. En la evaluación de los resultados se tomaron en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto a los cubos defectuosos y sus correspondientes valores de aceptación. La resistencia a compresión de los concretos se evaluó para 7, 14 y 28 días, debido a la importancia que ésta tiene en el comportamiento mecánico del material [8].



**Foto 7 Máquina Universal de Ensayos TREBEL**



**Foto 8 Montaje del Ensayo de Compresión**

### **3.3.2. Ensayo De Flexión:**

Esta prueba determina la resistencia a la flexión de un mortero de cemento hidráulico. Las probetas empleadas son de una longitud de 16 cm. y una sección cuadrada de  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ , las cuales fueron fundidas conforme a la norma NTC 120 (Método para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico), empleando los accesorios correspondientes, tales como molde, compactador, guías del compactador, etc.

En los procedimientos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos.

Debido a la dificultad en la consecución del dispositivo para el apoyo de las probetas en el momento de la aplicación de la carga, recomendado por la norma,

éste fue reemplazado por un montaje realizado con materiales encontrados en el laboratorio, y que cumple plenamente con la función deseada. En la evaluación de los resultados se tomaron en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto a las probetas defectuosas y sus correspondientes valores de aceptación [9].

La resistencia a flexión de los concretos se evaluó para 7, 14 y 28 días, debido a la importancia que ésta tiene en el comportamiento mecánico del material [8].



**Foto 9 Montaje Ensayo de Flexion**

### **3.3.3. Ensayo De Tracción:**

Este ensayo determina el comportamiento del concreto de cemento hidráulico, bajo cargas de tensión.

Las probetas utilizadas en este ensayo se deben fundir de acuerdo a la norma NTC 119 (Método para determinar la resistencia a la tensión de morteros de cemento hidráulico).

La cantidad de agua empleada debe ser conforme a la norma, modificando el diseño escogido; de otra forma, se alteraría la consistencia de las probetas, haciendo imposible el llenado de los moldes y su posterior compactación. Dicha cantidad de agua se selecciona a partir de las proporciones de cemento y vidrio

utilizado, y el porcentaje de agua necesario para producir una pasta de cemento de consistencia normal.

En los procedimientos de mezclado, preparación, llenado, compactación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la máquina Italiana de ensayos de morteros a tracción (OFFICINE GALILEO DI MILANO), siendo adaptada a las correspondientes exigencias de la norma NTC 119 cumpliendo los requerimientos necesarios para tal fin y dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos. En la evaluación de los resultados se debieron tomar en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto al tratamiento de las probetas y su selección.

Esta propiedad de los concretos se evaluó para 7,14 y 28 días, siendo los más representativos de su comportamiento [10].



**Foto 10 Montaje Ensayo de Tracción**

### 3.3.4. Ensayo de porosidad:

Con esta prueba se determina la porosidad del material utilizando el porosímetro de campo Ruska foto12.

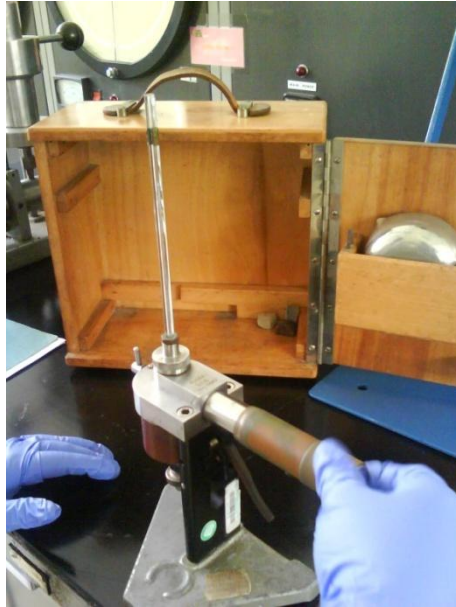


Foto 11 Porosímetro de Campo Ruska

#### ✓ Principio del Método.

Esta práctica está basada en la ley de Boyle para determinar la porosidad efectiva. La determinación de la porosidad consiste en la medida del volumen de sólidos o granos de la probeta, seguida por la medición del volumen total del espécimen.

#### • Procedimiento Experimental.

- Se fabricaron 3 probetas cúbicas de 5 cm. de lado, las cuales se sometieron a un curado de 28 días. De cada espécimen se cortaron 3 muestras cúbicas de 2 cm. de lado, descartando la parte superior e inferior de la muestra original. Luego del corte del se escogieron las muestras con

la forma más regular posible, por lo que al final se eligieron solo tres especímenes, uno de cada probeta inicial.

- Se quita la copa del manómetro y se llena el pozo con unas pocas gotas de mercurio triple destilado y se ajusta nuevamente el manómetro.
- Se observa que el porosímetro esté en buenas condiciones de operación (que no haya fugas en el sistema al colocar presión).
- Se selecciona la copa que mejor se acomode al tamaño de la muestra a evaluar y se ajusta vacía al porosímetro.
- Con la válvula de descarga abierta, llevar el pistón un poco más atrás de la posición de operación. Cada copa tiene su propia posición de inicio según sea: copa pequeña: 150, copa media: 250, copa grande: 400.
- Llevar el mecanismo del pistón hacia delante hasta su posición de inicio y no retroceder para evitar el backflash.
- Cerrar la válvula de descarga y llevar el pistón hacia delante hasta que la lectura de la manga micrométrica sea cero (0). El nivel de mercurio alcanzado es tomado como referencia: lleve la marca del nivel hasta este punto.
- Abrir la válvula de alivio suavemente antes de llevar el pistón un poco más atrás de su respectiva posición de inicio.
- Colocar el corazón o muestra dentro de la copa ajustada a cero y anclarla al bloque del manifold.
- Con la válvula de alivio abierta llevar el pistón hacia delante hasta su posición de inicio correspondiente, sin retroceder. (Todas las lecturas durante la operación se deben hacer con el pistón moviéndose hacia delante para evitar el efecto backflash y el ajuste a cero debe repetirse para cada copa y ocasionalmente durante la operación del instrumento).

- Cerrar la válvula de alivio y llevar el pistón suavemente hacia delante hasta alcanzar el nivel de mercurio de referencia anterior, se debe registrar la medida del micrómetro como  $R_{core}$  que es proporcional al volumen de sólidos de la muestra. Abrir la válvula de alivio y retirar la copa del manifold.
- Colocar el picnómetro dentro de la vasija y llenarlo de mercurio. Luego se introduce la muestra dentro del picnómetro y se mide el volumen bruto de la muestra. El volumen de mercurio recogido de la vasija (desalojado del picnómetro) se lleva a la respectiva copa usada para obtener el  $R_{core}$  y se ajusta la copa al bloque del manifold.
- Se repiten los pasos anteriores y se obtiene un estimativo proporcional al volumen de mercurio en la copa, el volumen bruto de la muestra se designa como  $R_{Hg}$ . [24].

La porosidad se halla con la ley de Boyle y la siguiente ecuación.

$$P(\%) = \frac{V_p}{V_t} * 100$$

$$P(\%) = \frac{(V_t - V_g)}{V_t} * 100$$

$$P(\%) = \left(1 - \frac{V_g}{V_t}\right) * 100$$

Donde  $P$  es la porosidad,  $V_t$  es el volumen total y  $V_g$  es el volumen de los granos del espécimen [25].

**Método de porosidad propuesto por Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Assia Djerbi y Mariusz Kaczmarek.**

La porosidad es medida por el método de la gravedad, usando saturación al vacío. Este método consiste en colocar en un horno de secado la muestra a una temperatura moderada de 60 °C pesándola periódicamente. El secado se detiene cuando el peso de la muestra permanezca constante. La porosidad es determinada utilizando la siguiente fórmula:

$$P = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{\rho_w V_{vol}}$$

Donde  $P$  es la porosidad,  $\rho_w$  es la densidad específica del agua,  $V_{vol}$  es el volumen del espécimen,  $M_{dry}$  y  $M_{sat}$  denotan respectivamente el peso seco y peso saturado del espécimen [11].

Para este ensayo se utilizaron las mismas muestras que en el ensayo con el porosímetro de gas Ruska.



**Foto 12 Probetas Cubicas Ensayo de Porosidad**

### 3.3.5. Ensayo de Permeabilidad:

Para este ensayo se utilizó el permeámetro de gas Ruska con el cual se determina la permeabilidad de diferentes tipos de rocas.



Foto 13 Permeámetro de Gas Ruska

- **Principio del Método.**

La permeabilidad de materiales de este tipo (morteros, concretos y rocas) se determina en base a la ley de Darcy (Flujo de Fluidos), midiendo en un rotámetro la tasa de flujo de un gas que se hace pasar a través del espécimen bajo un gradiente de presión. El gas a utilizar es de viscosidad conocida.

La permeabilidad determinada es absoluta y se calcula con la siguiente fórmula:

$$k = \frac{\mu Q l}{A \Delta P}$$

Donde  $k$  es la permeabilidad,  $\mu$  es la viscosidad del gas,  $Q$  es el caudal del gas que pasa a través del material,  $A$  es el área transversal expuesta al flujo de gas y  $\Delta P$  es el gradiente de presión incidido a la muestra.

Los equipos empleados fueron: Permeámetro de gas Ruska con todos sus accesorios y las muestras de concreto previamente preparadas y reseñadas.

- **Procedimiento Experimental.**

- Se fabricaron 3 probetas cubicas de 5 cm. de lado, las cuales se sometieron a un curado de 28 días. De cada espécimen se cortaron 3 muestras cubicas de 2 cm. de lado, descartando la parte superior e inferior de la muestra original. Luego del corte del se escogieron las muestras con la forma más regular posible, por lo que al final se eligieron solo tres especímenes, uno de cada probeta inicial.
- Se coloca el espécimen en el receptor de caucho más adecuado, de acuerdo a las dimensiones de este.
- Se debe comenzar por probar la posición de "large" de la válvula selectora del flowmeter y fijar una presión de 0.25 atmósferas en el manómetro. Si el flotador se encuentra en el rango de lectura entre 20 y 140 divisiones, tomar la lectura estimando el centro del flotador suspendido; de lo contrario, probar la posición "medium" y fijar una presión de 0.50 atmósferas, verificar si se puede tomar la lectura; de lo contrario, probar la siguiente posición "small", fijando para esta una presión de 1 atmósfera y tomar la lectura.
- Cerrar la válvula reguladora y retirar la muestra [24, 25].



**Foto 14 Probetas Cubicas Ensayo de Permeabilidad**

### **3.3.6. Ensayo de Absorción Capilar:**

Con esta prueba se determina la capacidad del material de transportar líquidos debido a un gradiente de presión ó por tensiones capilares. El parámetro que cuantifica la capacidad de transporte es la permeabilidad del material.

- **Principio del Método.**

Al poner una muestra de hormigón seco en contacto con agua se produce un gradiente de presión entre el exterior y el interior y se induce una absorción capilar que conduce el líquido desde las partes más húmedas hacia las más secas. Este movimiento se ve influenciado por las características del líquido (viscosidad, densidad y tensión superficial) y por las características del sólido poroso (permeabilidad, estructura de poros y energía superficial). A partir de las leyes de Darcy y de Laplace, es posible deducir que el peso de agua absorbida por unidad de superficie ( $W/A$ ) en el tiempo  $t$  se expresa:

$$\frac{W}{A} = S * \sqrt{t}$$

Siendo  $S$  la capacidad de absorción capilar [12].

Para la prueba de laboratorio se utilizó el procedimiento de la norma de ensayo Swiss Standard - SIA 162/1 – Succión Capilar [13] para conocer la capacidad de absorción capilar del hormigón en estudio.

- **Procedimiento Experimental.**

- Se elaboraron 3 probetas de 50 milímetros de altura y un área transversal de  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  las cuales se sometieron a un curado de 28 días. A cada probeta se le hizo un corte en 2 de sus extremos, de 5 milímetros cada uno, para descartar la parte superior e inferior de cada espécimen, quedando de una altura de 40 milímetros para la prueba.
- Todas las muestras de ensayo se secaron en estufa a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta masa constante (7días) y luego se enfriaron en desecador (1día).
- Posteriormente las muestras fueron colocadas en un recipiente con la superficie en estudio en contacto con agua (no más de 3mm. de altura) como muestra la foto 15, el recipiente fue tapado para lograr una humedad superior al 95%.
- Dos de las muestras se colocaron de manera que la una de las partes cortadas quedara en contacto directo con el agua, mientras que las otras 2 se dispusieron con uno de los extremos que no fueron cortados en contacto con la misma.
- A distintos intervalos ( $\frac{1}{2}$ ; 1; 2; 3 y 24 horas) las muestras se sacaron, se secaron con un paño húmedo y se pesaron con una balanza electrónica digital con una precisión de 0,01g.



Foto 15 Probetas ensayo absorción capilar

### 3.3.7. Ensayo para la Determinación de la Reactividad de los Agregados (Vidrio) Respecto a los Álcalis del Cemento y Mitigación de la Reacción Álcali-Sílice.

Con este experimento se evalúa la reactividad de los agregados del concreto, en este caso Vidrio Reciclado, respecto a los álcalis del cemento y también el efecto de mitigación que posee la puzolana obtenida del caolín (metacaolín MK), la cual se escogió como aditivo para la reducción de la reacción álcali-sílice.

#### ✓ Principio del Método.

Este método se basa en la norma ASTM C1260-07 [15]. (Ensayo acelerado de barras de mortero.), el cual es previsto para evaluar la magnitud de la expansión de un árido que contenga sílice reactiva, mediante curado acelerado.

Se elaboraron 6 barras de mortero con el agregado a evaluar (vidrio) según las especificaciones de la norma ASTM C490/C [16], las cuales, se exponen a una solución 1N de (NaOH) a  $80 \pm 2.0$  °C durante un periodo de 16 días durante el cual se hacen mediciones diarias para observar la expansión que se produce.

Las condiciones elevadas de álcalis (NaOH), así como la temperatura, aceleran la cinética de la reacción a tal punto que las expansiones logradas por medio de este método a los 16 días son equivalentes a las obtenidas en condiciones menos severas, luego de transcurrido un año según el método ASTM C 227. [3]

✓ **Materiales Empleados.**

• **Agregado.**

Se utilizó vidrio reciclado como árido para la mezcla, el cual se obtuvo de diferentes vidrios y distintas tonalidades, para dar un acabado más estético al producto a mostrar, debido a que en su composición química, el vidrio, posee un alto contenido de sílice reactiva fue necesario utilizar un agregado para evitar la reacción álcali-sílice.

• **Cemento.**

Para este trabajo se uso un solo tipo de cemento Portland blanco tipo 1 elaborado por CEMEX el cual posee unas características químicas descritas en la tabla 3.

**Tabla 3 Características Químicas del Cemento Blanco**

<b>Características Químicas (Promedio)</b>		
	ASTM C-150	Bolsa
SiO <sub>2</sub> (Óxido de Sílice)		22,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de Aluminio)		5,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de Hierro)		0,2
CaO (Óxido de Calcio)		67,22
MgO (Óxido de Magnesio)	Máx. 6.0	1,3
SO <sub>3</sub> (Óxido de Azufre)	Máx. 3.5	2,5
Na <sub>2</sub> O (Óxido de Sodio)		
K <sub>2</sub> O (Óxido de Potasio)		
Residuo Insoluble	Máx. 0.75	0,5
Pérdida al fuego	Máx. 3.0	1,5
Aluminato tricálcico (C3A)		11
Silicato Tricálcico (C3S)		>55

- **Metacaolín.**

Se utilizó un caolín traído de Arcabuco Boyacá el cual fue pre-activado mediante la calcinación de éste a una temperatura aproximada de 800 °C durante dos horas para la obtención de Metacaolín (MK), el cual es una puzolana artificial que ayuda a mitigar la reacción álcali-sílice [4]. En este ensayo se reemplazó un 15% de cemento por la puzolana mencionada para tres probetas ya que según autores como Courrard et al [7] el óptimo reemplazo está entre el 10 y 15% en peso, mientras que las otras 3 se elaboraron sin adición de metacaolín.

**Montajes para el ensayo.**



**Foto 16 Montaje Metálico Hermético**



**Foto 17 Montaje de Recirculación de agua y Condensación de los Vapores Liberados en el Proceso**

Para este ensayo hubo que hacer 2 montajes, uno para las muestras que no poseen metacaolín y otro para las muestras adicionadas. Las fotos 16 y 17 muestran los montajes.

Los dos montajes aunque se ven diferentes cumplen el mismo fin, la norma ASTM C1260 [15] dice que no debe existir pérdida de humedad durante la exposición de las muestras a la solución en los 16 días. El primer montaje se hizo con un recipiente de cuarzo dentro de otro metálico sellado herméticamente, mientras que para el segundo se utilizó un montaje de recirculación de agua para condensar y retornar los vapores que se producen a 80 °C por lo que tampoco hay pérdidas de humedad.

### 3.3.8. Transmitancia:

Este ensayo se utilizo para medir la cantidad de luz que puede pasar por el material de concreto expresada en porcentaje.

#### ✓ Principio Del Método.

La transmitancia óptica que se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda especificada, que pasa a través de una muestra ó la relación existente entre la radiación transmitida a través de un cuerpo y la radiación total incidente sobre el mismo.

Su expresión matemática es:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Donde  $I_0$  es la intensidad del rayo incidente e  $I$  es la intensidad de la luz que viene de la muestra.

La transmitancia de una muestra está normalmente dada porcentualmente, definida como:

$$T = \frac{I}{I_0} * 100$$

#### ✓ Procedimiento Experimental.

- Se elaboraron 3 especímenes cúbicos de 50 mm. de lado, los cuales se sometieron a un curado de 28 días. A cada espécimen se le hizo un corte en cada extremo (en donde terminan las fibras ópticas) de 5 mm., para descubrirlas y obtener traslucidez.
- Se calibro el fotómetro con la luz incidente de cada tipo de laser y luz directa del sol.

- Cada muestra se expuso a radiación directa de rayos laser (Rojo y Verde) y luz directa del sol, introduciendo cada una de las probetas en una caja de color negro que no permite perdidas y enfoca mejor la luz que proviene de los modelos.
- Se toma la lectura de la luz procedente de cada modelo con el fotómetro mencionado.



Foto 18 Fotómetro

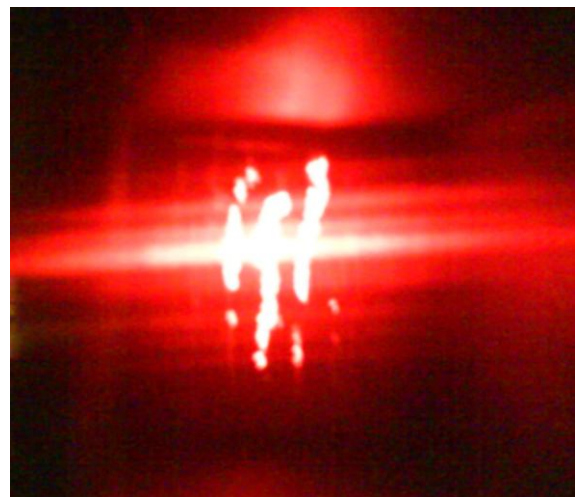
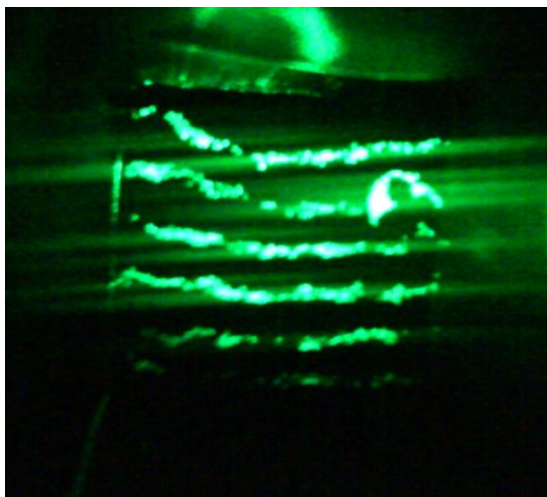


Foto 19 Intensidad de luz proveniente de las muestras



Foto 20 Intensidad de luz proveniente de las muestras 2

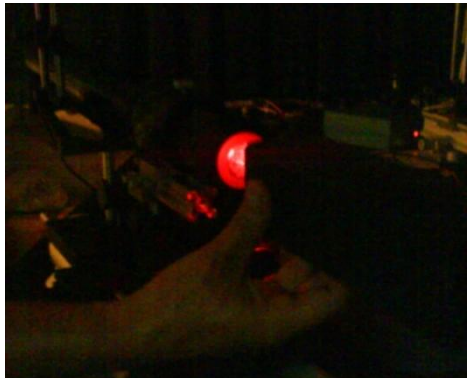


Foto 21 Montajes de laser

### 3.3.9. Espectrofotometría:

Se denomina espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible; un típico ojo humano responderá a longitudes de onda desde 400 a 700 nm aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 a 780 nm.

Generalmente el espectro se divide en siete partes:

- **Ondas de radio**

Estas ondas se usan para hacerte llegar las melodías de tus estaciones de radio favoritas, pero también son un tipo de radiación que proviene del Sol.

- **Microondas**

Las microondas pueden ser usadas para estudiar al Universo, comunicarse con satélites y cocinar palomitas de maíz.

- **Radiación Infrarroja**

Los instrumentos sobre los satélites, que detectan plantas, tipos de rocas y características de la atmósfera, usan radiación infrarroja.

- **Radiación visible**

Esta es la parte del espectro electromagnético que las personas pueden ver. Incluye todos los colores del arcoíris los cuales, cuando se combinan, dan origen a la luz blanca.

- **Radiación ultravioleta**

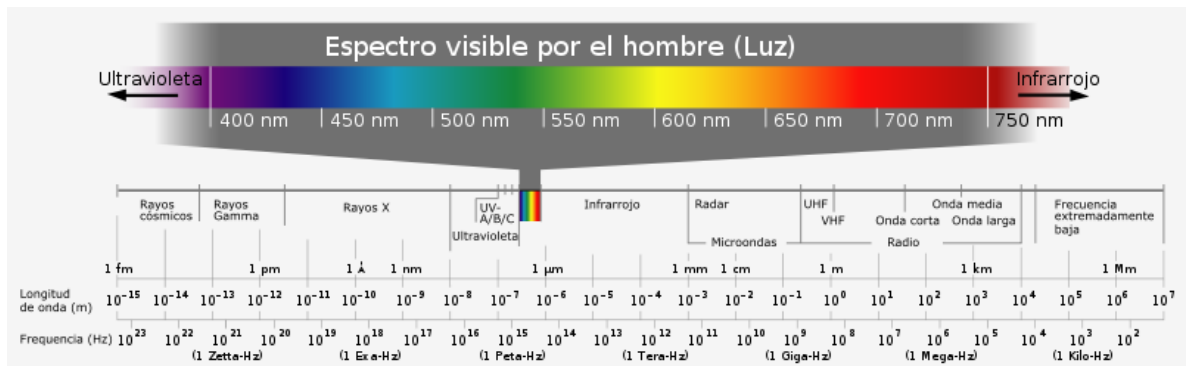
La radiación ultravioleta (UV) que provienen del Sol, la mayor parte está bloqueada por la atmósfera de la Tierra, pero algunos logran pasar. La radiación UV ayuda a que las plantas crezcan, y a crear vitamina D en los humanos. Sin embargo, demasiada cantidad de UV puede causar quemaduras y cáncer de piel, cataratas, y también puede dañar a las plantas.

- **Radiación de Rayos x**

Los Rayos x viajan a través de materiales como el tejido de la piel y órganos, pero rebota contra huesos sólidos. Es por esto que los médicos los usan para tomar fotografías de los huesos.

- **Radiación Gamma**

Los rayos gamma tienen longitudes de onda más cortas de cualquier otro tipo de radiación.



Gráfica 2 Espectro Visible

Tabla 4 Espectro Visible

Color	Longitud de onda
violeta	380–450 nm
azul	450–495 nm
verde	495–570 nm
amarillo	570–590 nm
naranja	590–620 nm
rojo	620–750 nm

<http://www.zeitmaschinen.com/svg/Spektrum.svg>

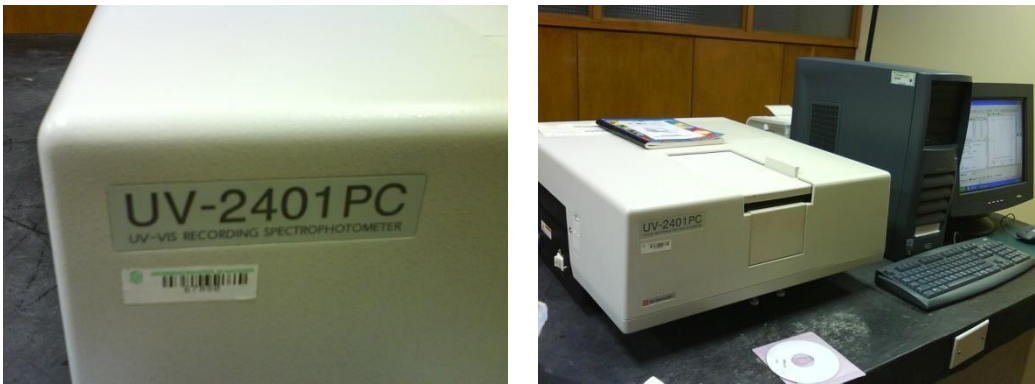
✓ **Principio del Método.**

Este ensayo permite observar si el material propuesto deja pasar el espectro visible y en qué proporción, es muy similar al ensayo de Transmitancia, con la diferencia que con este obtenemos unas graficas de la energía que se hace incidir a través del material contra la longitud de onda del espectro visible.

✓ **Procedimiento Experimental.**

Este experimento se llevo a cabo Con las mismas probetas usadas para el ensayo de transmitancia.

Se utilizo un espectrofotómetro de marca UV-2401PC donde se puso cada muestra y se incidió luz del espectro visible en un área de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup> durante 5 minutos, mientras se mantiene el barrido que hace el aparato.



**Foto 22 Espectrofotómetro UV-2401 PC**

#### 4. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

##### 4.1. Ensayo de compresión:

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de esfuerzo (Mpa), calculándolos de la ecuación  $\sigma = F/A$ , donde,  $\sigma$  es el esfuerzo en el concreto, F es la fuerza aplicada y A es el área de la probeta en estudio,  $25,8 \text{ cm}^2$ , correspondiente a cubos de 5 cm de lado.

Las líneas de falla generadas en las probetas se presentan a través de planos inclinados respecto del eje de aplicación de la carga (eje y); esta inclinación se debe a la restricción de movimiento en el sentido perpendicular a la carga (eje x), en las placas de apoyo.

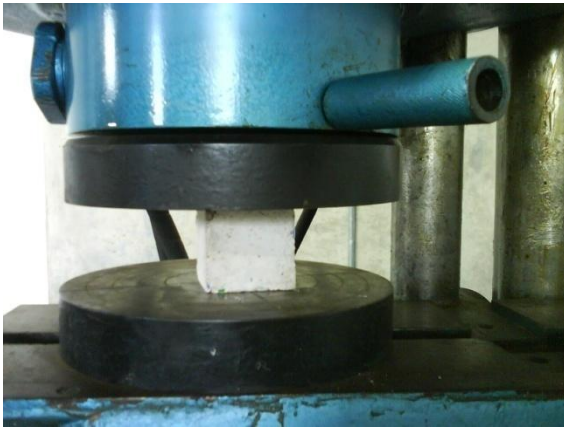
El esfuerzo máximo que puede resistir la probeta con fibra óptica a la compresión es de 14,73 Mpa (2104 Psi) mientras que sin fibra resiste 18,41 Mpa (2630,14Psi)



Foto 23 Moldes Para Ensayo de compresión

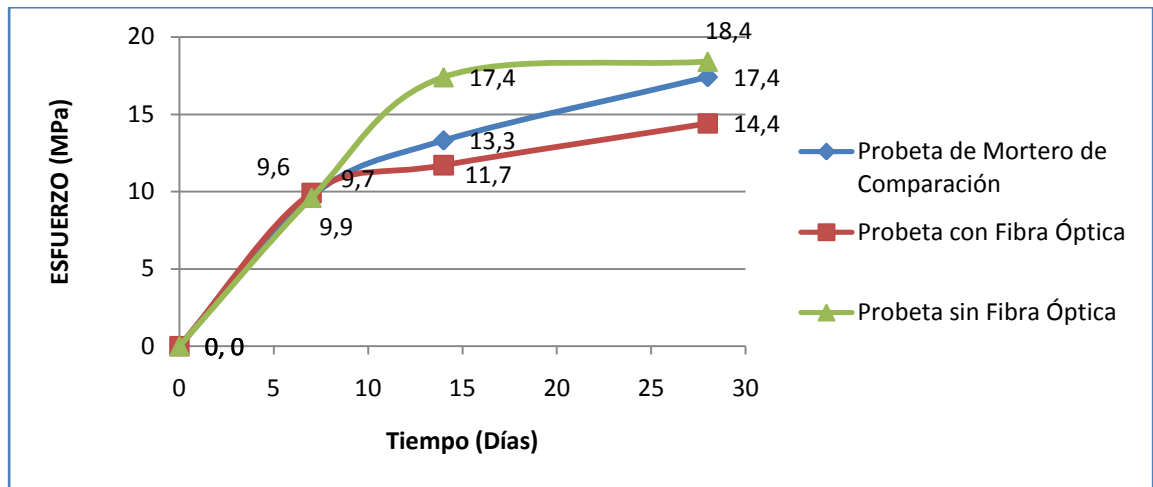


**Foto 24 Elaboración Probetas Ensayo de compresión**

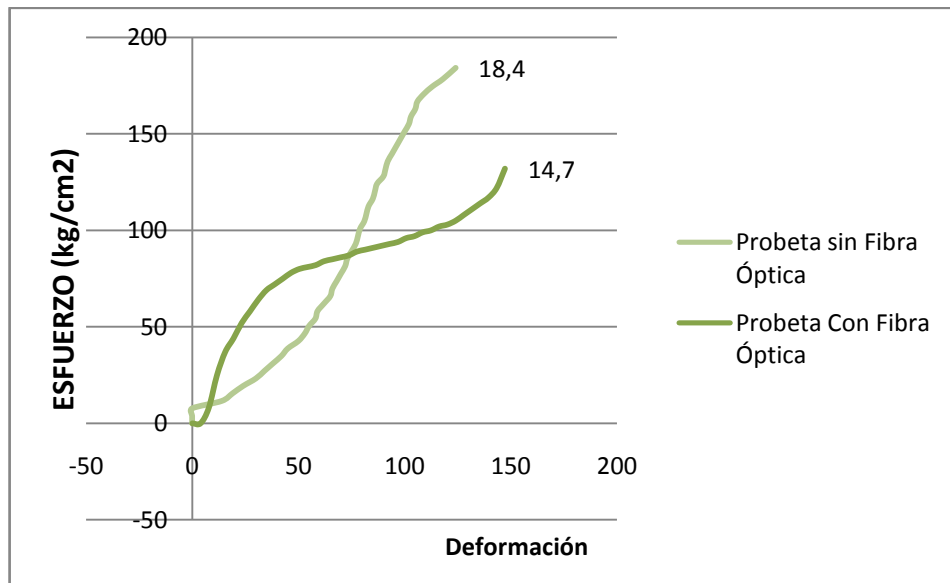


**Foto 25 Probeta sometida a compresión y Probeta Fallada**

✓ **Gráficas y Análisis de Resultados.**



**Gráfica 3 Resistencia a la Compresión vs. Tiempo**



**Gráfica 4 Esfuerzo Vs. Deformación**

- **Análisis de Resultados**

Analizando las graficas 3 y 4, se puede concluir que a medida que se agrega fibra óptica en la mezcla de concretos, disminuye el esfuerzo a la compresión, presentando mayor resistencia la mezcla de concreto sin fibra óptica.

El esfuerzo a la compresión para la mezcla de concreto, sin adición de fibra óptica, a los 28 días fue de 18.4 MPa, la cual presentó el mayor esfuerzo a compresión con respecto a la probeta adicionada, que fue 14.7 MPa, representando una disminución del 20%.

#### **4.2. Ensayo de Flexión.**

Para el análisis de la resistencia a flexión se fabricaron tres probetas con fibra óptica y tres probetas sin fibra óptica para ensayar a los 7, 14 y 28 días respectivamente.

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de esfuerzo (Mpa); el valor de resistencia responde al comportamiento de una viga simplemente apoyada con una carga central y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S = (3 * F * L) / (2 * a^3) / 10$$

Donde:

S: Resistencia a flexión (Mpa)

F: Fuerza aplicada al sistema (Kg)

L: Longitud Efectiva entre apoyos (12 cm)

a: Longitud del lado de sección transversal de la viga (4 cm)

La falla de este elemento se realiza por el momento al que se somete la sección transversal del elemento generándose tracción en las fibras exteriores y opuestas a la aplicación de la carga, y su posterior rompimiento siguiendo la línea de falla que se muestra [9]

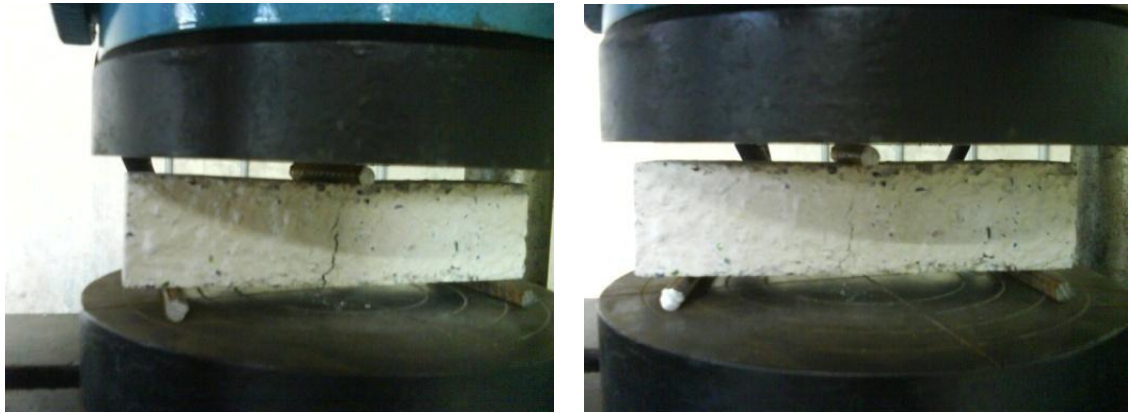
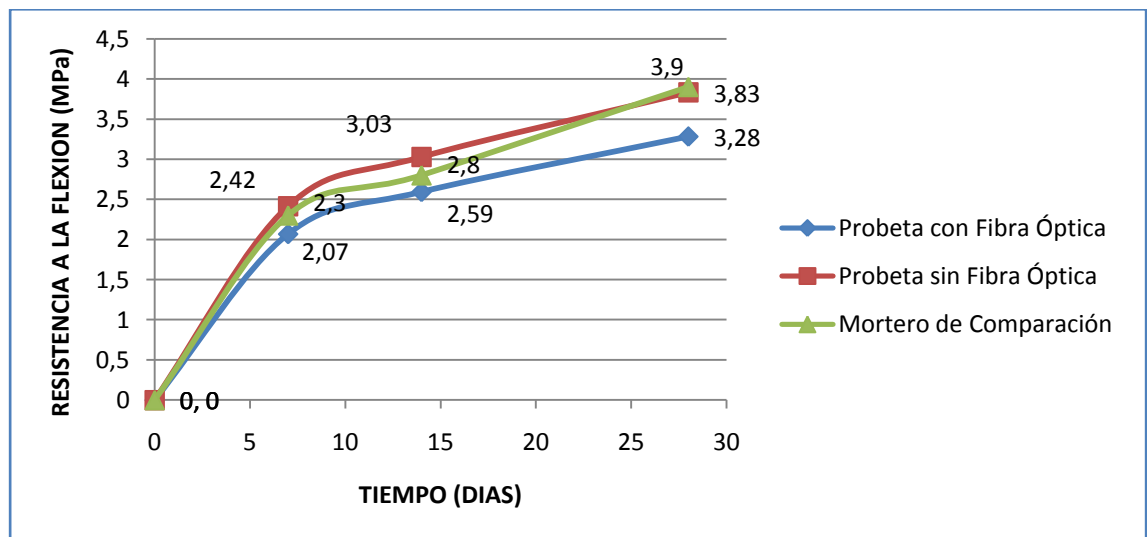


Foto 26 Ensayo a Flexión del Concreto



Foto 27 Falla por Flexión del Concreto

✓ Gráficas y Análisis de Resultados.



Gráfica 5 Resistencia a la Flexión vs. Tiempo

✓ **Análisis de Resultados:**

Analizando la grafica 5 se puede observar que cuando se adiciona fibra de óptica a la mezcla de concreto disminuye el esfuerzo a la flexión, presentando la mayor resistencia las mezclas de mortero que no se le ha adicionado fibra, al igual que en las pruebas de compresión.

El esfuerzo a la flexión para la mezcla de concreto sin la adición de fibra óptica a los 28 días fue de 3,83 Mpa, mostrando una mayor resistencia en comparación con la mezcla de concreto adicionado, el cual obtuvo una resistencia de 3,28 Mpa, indicando una disminución del 14,36% de la resistencia cuando es adicionado con fibra.

### **4.3. Ensayo de Tracción**

Para el análisis de la resistencia a tracción se fabricaron 3 probetas para ser ensayadas a los 7, 14 y 28 días de curado respectivamente.

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de esfuerzo (Mpa.), calculándolos de la ecuación

$$\sigma = (F/A)/10,$$

Donde,

$\sigma$ : es el esfuerzo en el mortero,

F: es la fuerza aplicada

A: es el área de la sección transversal de la probeta en estudio  $6.25 \text{ cm}^2$ .

El tipo de falla generado es característico de un sistema sometido a esfuerzos de tracción, donde se presenta una línea de falla perpendicular a la línea de aplicación de la carga [10].

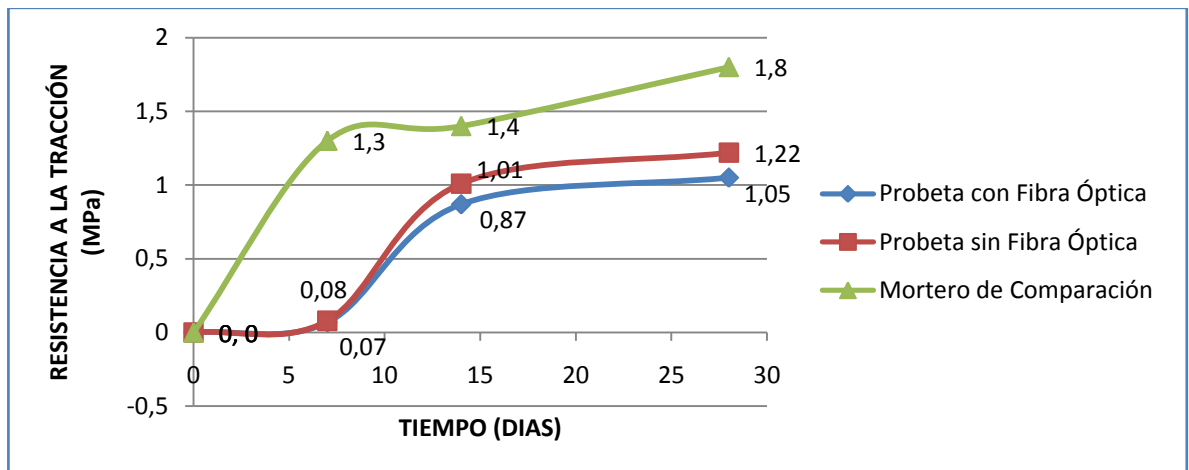


Foto 28 Montaje Ensayo de Tracción



Foto 29 Falla de las probetas del Ensayo de Tracción

✓ Gráficas y Análisis de Resultados.



Gráfica 6 Resistencia a la Tracción vs. Tiempo

### ✓ **Análisis de Resultados**

Analizando la gráfica 6 se puede concluir que cuando se agrega fibra óptica disminuye el esfuerzo a la tracción, presentando mayor resistencia las mezclas de concreto sin adición de esta. Este comportamiento se puede explicar, debido a que las fibras ópticas aumentan la porosidad debilitando el material.

El esfuerzo a Tracción para la mezcla de concreto sin la adición de fibra óptica a los 28 días fue de 1,22 Mpa, mostrando una mayor resistencia en comparación con la mezcla de concreto adicionado, el cual obtuvo una resistencia de 1,05 Mpa, indicando una disminución del 13,93% de la resistencia cuando es adicionado con fibra [10].

#### **4.4. Ensayo de Porosidad**

El Porosímetro de campo Ruska mide volúmenes del desplazamiento del pistón que corresponden al volumen de sólidos o granos de la muestra, y el volumen total de la muestra; posteriormente, estas medidas son convertidas a  $\text{cm}^3$  usando curvas de calibración.

Después de convertir las lecturas de Rcore (volumen de granos  $Vg$ ) y RHg (volumen total  $Vt$ ) a  $\text{cm}^3$ , se calcula el porcentaje de porosidad de cada muestra [25].

La porosidad se halla con la ley de Boyle y la siguiente ecuación.

$$P(\%) = \frac{Vp}{Vt} * 100$$

$$P(\%) = \frac{(Vt - Vg)}{Vt} * 100$$

$$P(\%) = \left(1 - \frac{Vg}{Vt}\right) * 100$$

Donde  $P$  es la porosidad,  $Vt$  es el volumen total y  $Vg$  es el volumen de los granos del espécimen.



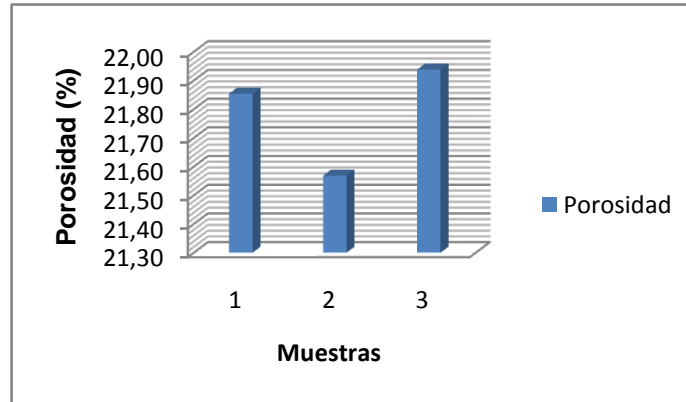
Foto 30 Porosímetro de campo Ruska y Muestras de porosidad.



Foto 31 Muestras de Porosidad.

**Tabla 5 Resultados de Porosidad. Porosímetro de gas Ruska.**

Muestra	Vg (cm <sup>3</sup> )	Vt (cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)
1	5.9	7.55	21.85
2	6	7.65	21.57
3	5.8	7.43	21.94



**Gráfica 7 Porosidad Muestras 1, 2 y 3.**

#### ✓ **Análisis de Resultados**

Como se puede observar en la tabla 5 y la grafica 6, los valores de volumen total son muy cercanos debido a que se escogieron las muestras más regulares para el ensayo, los valores de volumen de granos se deben a que son muestras hechas con el mismo diseño de mezcla y por esta razón la porosidad es muy cercana independientemente que sean especímenes sacados de diferentes probetas.

**Método de porosidad propuesto por Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Assia Djerbi y Mariusz Kaczmarek.**

Con este método se determina la porosidad de las mismas muestras que para el ensayo con el porosímetro de Ruska, haciendo una comparación entre estos.

La porosidad es determinada utilizando la siguiente fórmula:

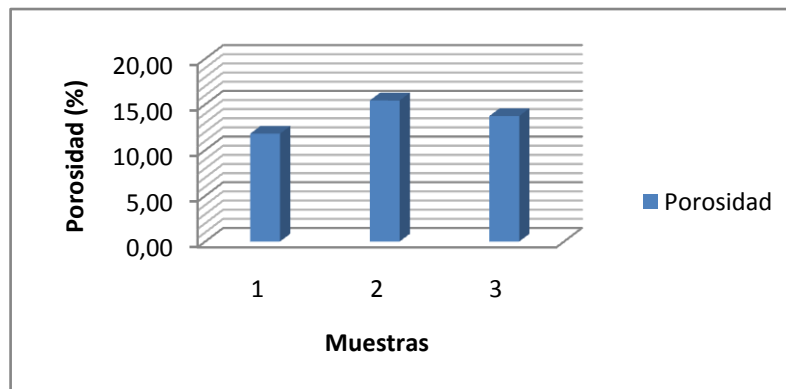
$$P = \frac{M_{sat} - M_{dry}}{\rho_w V_{vol}}$$

Donde  $P$  es la porosidad,  $\rho_w$  es la densidad específica del agua,  $V_{vol}$  es el volumen del espécimen,  $M_{dry}$  y  $M_{sat}$  denotan respectivamente el peso seco y peso saturado del espécimen [11].

La tabla 6 muestra los resultados de porosidad obtenidos con este método.

**Tabla 6 Resultados de Porosidad. Método de porosidad propuesto por Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Assia Djerbi y Mariusz Kaczmarek.**

	M1	M2	M3
Mdry (g)	13.66	13.55	13.47
Msat (g)	14.55	14.73	14.49
Vvol (cm <sup>3</sup> )	7.55	7.65	7.43
Porosidad (%)	11.79	15.42	13.73



**Gráfica 8 Porosidad Muestras 1, 2 y 3. Método de Saturación.**

### ✓ Análisis de Resultados

Se puede observar que los resultados difieren de los obtenidos con el Porosímetro de gas Ruska, esto se debe a que la densidad del agua es mayor que la del gas por lo que este puede penetrar más fácil en todos los poros del material, haciendo más confiable el resultado obtenido del ensayo con el porosímetro de gas.

#### 4.5. Ensayo de Permeabilidad

La permeabilidad obtenida mediante el Permeámetro de gas Ruska se calculó utilizando el caudal de gas que pasa a través del núcleo, el gradiente de presión, la viscosidad del gas y las dimensiones de la probeta.

La viscosidad del gas ( $\mu$ ) se obtiene a partir de la temperatura ambiente al momento de analizar la muestra. Con las lecturas flowmeter,  $R_f$ , y la escala de flowmeter (S, M, o L) se obtienen los datos de la Tasa promedio de flujo,  $Q$  ( $\text{cm}^3/\text{seg}$ ), mediante gráficos de conversión; estos valores y junto con los datos de gradiente de presión  $P$  (atm), área de la sección transversal de la muestra,  $A$  ( $\text{cm}^2$ ), y longitud de la muestra,  $L$  (cm), se procede a hallar la permeabilidad (milidarcys mD.) utilizando la siguiente expresión:

$$k = \frac{\mu Q l}{A \Delta P}$$

Donde  $k$  es la permeabilidad,  $\mu$  es la viscosidad del gas,  $Q$  es el caudal del gas que pasa a través del material,  $A$  es el área transversal expuesta al flujo de gas y  $\Delta P$  es el gradiente de presión incidido a la muestra [24].



Foto 32 Permeámetro de gas Ruska

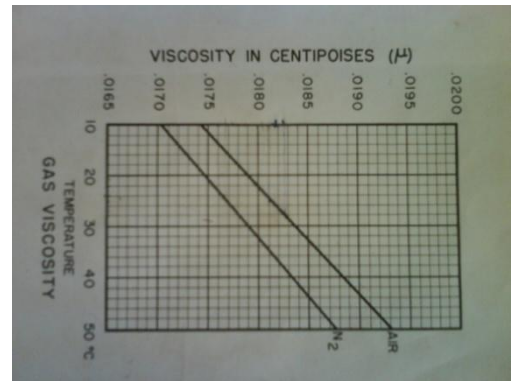


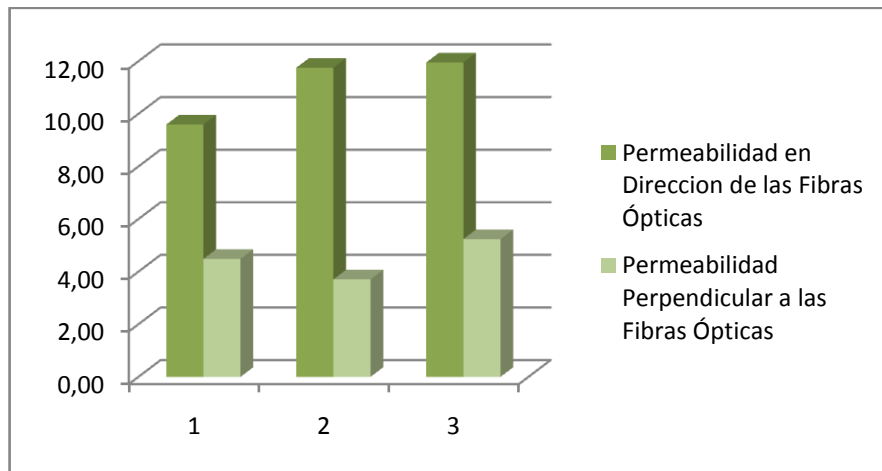
Foto 33 Tabla de calibración.

Para este ensayo se utilizaron las mismas probetas que para el ensayo de porosidad, haciendo pasar gas por dos caras: frontal (en dirección a las fibras ópticas) y lateral (perpendicular a las fibras ópticas), el gas que se utilizó fue Nitrógeno.

La tabla # 7. Presenta los resultados de la permeabilidad al gas Nitrógeno de viscosidad  $\mu = 0,0176$  Cp (centipoises) a una temperatura de 23 °C, de los 3 especímenes mencionados.

Tabla 7 Resultados de Permeabilidad. Permeámetro de gas Ruska.

Muestra	Caudal Q (cm <sup>3</sup> /s)	Presión P (atm)	Área A (cm <sup>2</sup> )	Longitud L (cm)	Permeabilidad K (mD)
1 Frontal	0.54	0.5	3.86	1.95	9.59
1 Lateral	0.5	1	3.84	1.96	4.48
2 Frontal	0.68	0.5	3.92	1.93	11.75
2 Lateral	0.4	1	3.83	2.02	3.71
3 Frontal	0.67	0.5	3.86	1.96	11.96
3 Lateral	0.6	1	3.89	1.93	5.24



**Gráfica 9 Permeabilidad de las Muestras 1, 2 y 3 en Dirección Paralela y Perpendicular a las Fibras.**

✓ **Análisis de Resultados.**

De la tabla 6 se puede observar que la Permeabilidad al gas es muy similar en las tres muestras.

Claramente se puede ver que el material es mucho más permeable en sentido paralelo (Frontal) a las fibras ópticas mientras que en sentido perpendicular (lateral) a estas disminuye considerablemente.

Se puede observar que la disminución de la permeabilidad en sentido perpendicular a las fibras se aproxima al 60%.

En el sentido paralelo a las fibras ópticas se presenta mayor permeabilidad debido a que estas hacen las veces de capilares, ya que en toda su extensión se generan poros muy pequeños que se entrelazan provocando este efecto.

#### 4.6. Ensayo de Absorción Capilar:

Este ensayo permite determinar la capacidad del material de transportar fluidos a través de su núcleo, debido a un gradiente de presión o por tensiones capilares.

Se fabricaron 4 muestras de concreto modificado y translucido, las cuales se pusieron en contacto con agua (no más de mm. de altura) en un recipiente plástico, dos de las muestras (M1 y M2) se colocaron con la superficie Frontal (sentido paralelo a las fibras ópticas) en contacto con el agua y las otras dos muestras (M3 y M4) con la superficie Lateral (sentido perpendicular a las fibras ópticas).



Foto 34 Ensayo de Absorción Capilar

A partir de las leyes de Darcy y de Laplace, es posible deducir que el peso de agua absorbida por unidad de superficie ( $W/A$ ) en el tiempo  $t$  se expresa:

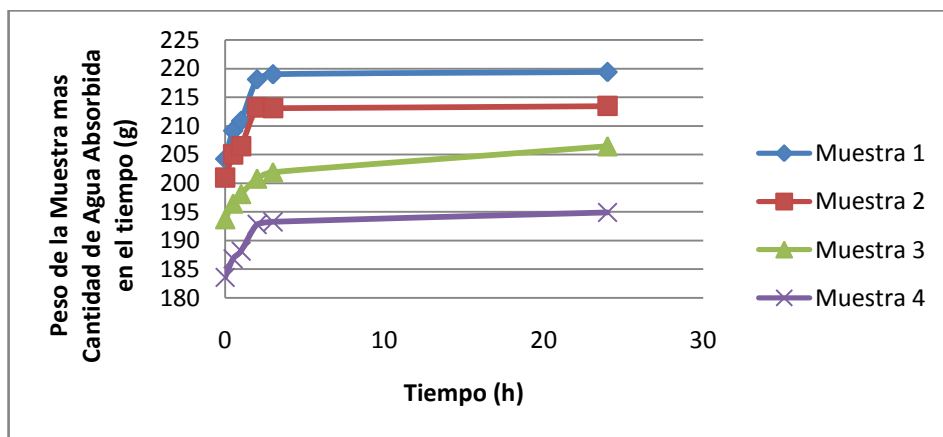
$$\frac{W}{A} = S * \sqrt{t}$$

Siendo  $S$  la capacidad de absorción capilar.

Las tablas 8, 9 y 10 nos muestran los resultados obtenidos con este ensayo.

**Tabla 8 Absorción de agua en el tiempo. Datos de laboratorio**

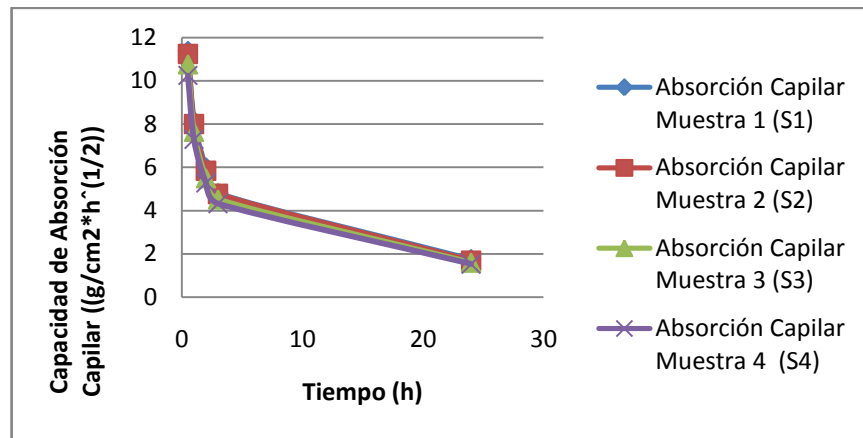
	TIEMPO (h)	M1(g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	AREA (cm2)
peso inicial	0	204.22	200.97	193.71	183.59	25.8
1/2 hora	0.5	209.14	205.01	196.44	186.81	25.8
1 hora	1	210.85	206.42	198.11	188.16	25.8
2 horas	2	218.1	213.2	200.8	192.8	25.8
3 horas	3	218.99	213.09	201.9	193.26	25.8
24 horas	24	219.39	213.44	206.44	194.89	25.8



**Gráfica 10 Absorción de Agua en el Tiempo**

**Tabla 9 Capacidad de Absorción Capilar en el Tiempo.**

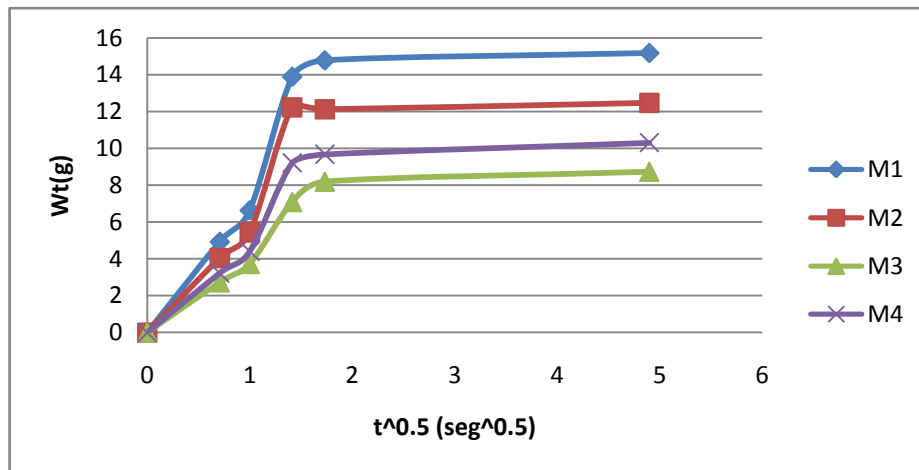
TIEMPO (h)	S1 ((g/cm <sup>2</sup> *h <sup>(1/2)</sup> ))	S2 ((g/cm <sup>2</sup> *h <sup>(1/2)</sup> ))	S3 ((g/cm <sup>2</sup> *h <sup>(1/2)</sup> ))	S4 ((g/cm <sup>2</sup> *h <sup>(1/2)</sup> ))
0	0	0	0	0
0,5	11,37	11,24	10,77	10,24
1	8,12	8,00	7,65	7,29
2	5,98	5,84	5,50	5,28
3	4,79	4,77	4,52	4,32
24	1,74	1,69	1,60	1,53



Gráfica 11 Capacidad de Absorción Capilar en el Tiempo

Tabla 10 Agua absorbida en función de la raíz cuadrada del tiempo.

Tiempo h <sup>(1/2)</sup>	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)
0	0	0	0	0
0,71	4,92	4,04	2,73	3,22
1	6,63	5,44	3,73	4,40
1,41	13,88	12,23	7,09	9,21
1,73	14,77	12,12	8,19	9,67
4,90	15,17	12,47	8,73	10,30



Gráfica 12 Agua absorbida en función de la raíz cuadrada del tiempo.

✓ **Análisis de Resultados**

De las tablas 8, 9 y 10 y la grafica 6, se puede deducir que las muestras M1 y M2, las cuales estuvieron en contacto con el agua en su parte Frontal, se saturaron más rápido que las estuvieron en contacto en su parte Lateral.

Como en el caso de la permeabilidad, también se observa que la mayor absorción capilar se presenta en la parte Frontal en dirección paralela a las fibras ópticas, esto podría resultar debido a que las fibras actúan como capilares haciendo que el fluido ascienda por estas más rápidamente, mientras que en la parte Lateral se puede ver que el ascenso es menor, debido a que las fibras están dispuestas perpendicularmente al fluido.

**4.7. Ensayo para la Determinación de la Reactividad de los Agregados (Vidrio) Respecto a los Álcalis del Cemento Y Mitigación de la Reacción Alkali-Sílice.**

La norma ASTM C1260 (15) determina la reactividad potencial de los agregados del concreto, aunque ésta no está diseñada para medir el efecto que tiene la adición de materiales suplementarios, como el MK, que puedan mitigar esta reactividad, quienes han tenido la oportunidad de probar este método en combinaciones de agregados, cementos y adiciones puzolánicas, concuerdan en que es una fuente de información rápida y precisa sobre el efecto de prevención de las expansiones causadas por los álcalis en agregados reactivos, cuando se utilizan estas adiciones minerales [3].

Durante los 16 días de tomas de muestras estos fueron los resultados obtenidos:

✓ **Resultados Obtenidos**

La tabla 11, 12 y la grafica 7 Muestran los resultados obtenidos, las expansiones logradas y las reducciones de las muestras adicionadas. Las muestras 1, 2 y 3 son muestras patrón, mientras que las 4, 5 y 6 son las muestras con adición de MK.

**Tabla 11 Porcentaje de Expansión en el Tiempo**

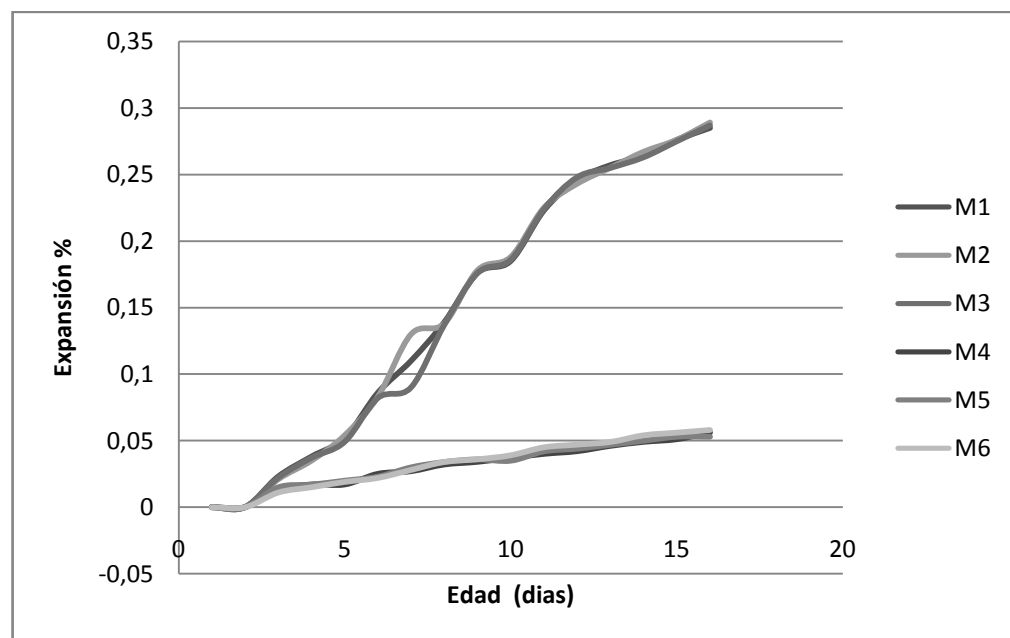
TIEMPO (DIAS)	EXPANSIONES (%)					
	M1	M2	M3	M4	M5	M6
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0.023	0.021	0.022	0.013	0.015	0.011
4	0.038	0.035	0.037	0.017	0.017	0.015
5	0.052	0.054	0.049	0.017	0.02	0.019
6	0.086	0.083	0.082	0.025	0.023	0.022
7	0.11	0.13	0.09	0.027	0.03	0.028
8	0.139	0.138	0.137	0.032	0.034	0.034
9	0.176	0.178	0.176	0.034	0.036	0.036
10	0.185	0.188	0.186	0.037	0.035	0.039
11	0.223	0.225	0.224	0.04	0.042	0.045
12	0.246	0.243	0.248	0.042	0.044	0.047
13	0.257	0.255	0.255	0.046	0.047	0.049
14	0.264	0.267	0.263	0.049	0.05	0.054
15	0.276	0.276	0.275	0.051	0.053	0.056
16	0.285	0.289	0.287	0.056	0.053	0.058

M1, M2 y M3 son muestras patrón, sin adición de MK, M4, M5 y M6 son muestras adicionadas con MK.

**Tabla 12 Comparación Entre Expansión de las Muestras sin Adicionar y Adicionadas**

MUESTRA #	TIPO DE CEMENTO	TIPO DE ADICION (%)	EXPANCIION 16 DIAS (%)	EXPANCIION PROMEDIO (%)	REDUCCION DE EXPANCIION (%)
1	1	0	0.285		
2	1	0	0.289	0.287	0
3	1	0	0.287		
4	1	15	0.056		
5	1	15	0.053	0.056	80.60
6	1	15	0.058		

M1, M2 y M3 son muestras patrón, sin adición de MK, M4, M5 y M6 son muestras adicionadas con MK.



**Gráfica 13 Expansión vs. Edad**



Foto 35 Montaje de recirculación



Foto 36 probetas ensayadas 1



Foto 37 Deformaciones que Sufren los Modelos Después del Ensayo



Foto 38 Fisura que Muestra la Probeta después del Ensayo



Foto 39 Desmonte del Ensayo y Probetas Ensayadas

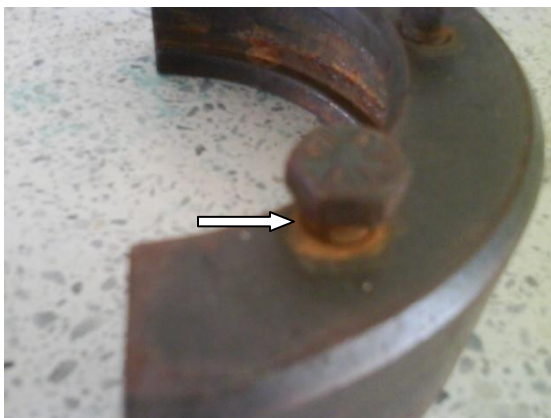


Foto 40 Corrosión que Presenta la Tapa Hermética.

✓ **Análisis de Resultados**

Las expansiones y deformaciones se presentaron en las probetas cuyo contenido de Metacaolín MK fue nulo, mientras que las probetas con adición de MK presentaron deformaciones pequeñas y dentro del rango, según la ASTM C1260 [15].

Se puede concluir que la puzolana adicionada al concreto reduce la Reacción Álcali-Sílice debido a las propiedades que posee este material.

Como se puede observar en las fotografías, la solución de NaOH corroyó la tapa del montaje hermético, lo cual demuestra que la solución actúa en los metales y también es una fuente de álcalis, la cual es una de las principales causas que originan la reacción álcali-sílice.

**4.8. Ensayo de Transmitancia:**

La transmitancia óptica que se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda especificada, que pasa a través de una muestra ó la relación existente entre la radiación transmitida a través de un cuerpo y la radiación total incidente sobre el mismo.

Este ensayo trata de darnos un estimativo porcentual de la cantidad de luz que se puede transmitir a través del concreto modificado y traslucido. La transmitancia de una muestra está normalmente dada porcentualmente, definida como:

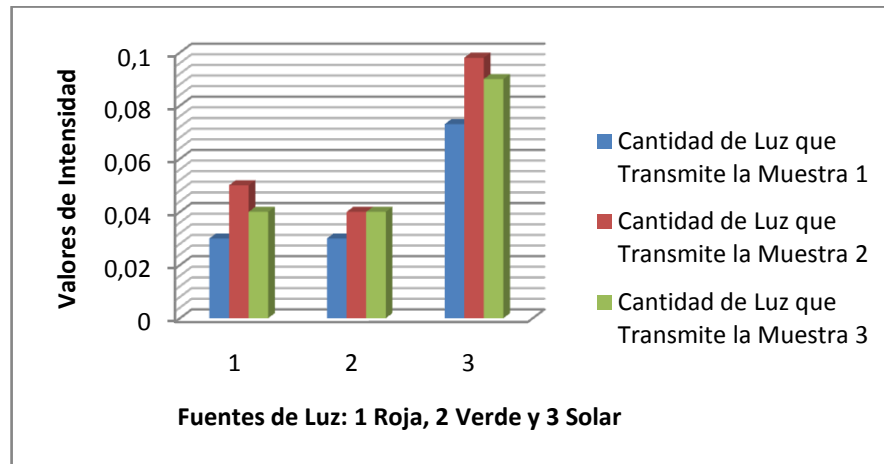
$$T = \frac{I}{I_0} * 100$$

Donde  $I_0$  es la intensidad del rayo incidente e  $I$  es la intensidad de la luz que viene de la muestra.

Las tablas # 13 y 14 muestran los datos medidos en laboratorio y la transmitancia de cada muestra respectivamente.

**Tabla 13 Intensidad de los Láseres y Cantidad de Luz que Transmiten las Muestras**

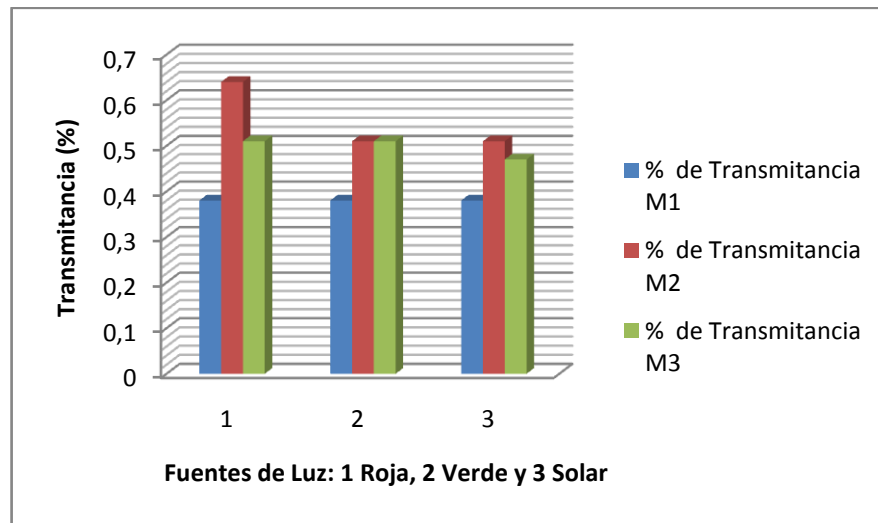
		Laser Rojo ( $\mu\text{w}$ )	Laser Verde ( $\mu\text{w}$ )	Luz solar (mw)
	Intensidad lo	7,84	7,89	19,2
M1	Intensidad I	0,03	0,03	0,073
M2		0,05	0,04	0,098
M3		0,04	0,04	0,09



**Gráfica 14 Cantidad de Luz que Transmiten las Muestras**

**Tabla 14 Valores de Transmitancia para la Muestras M1, M2 y M3**

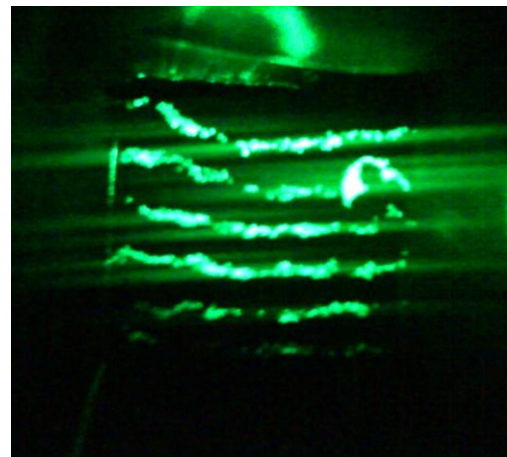
	Laser Rojo ( $\mu\text{w}$ )	Laser Verde ( $\mu\text{w}$ )	Luz solar (mw)
Transmitancia M1 %	0,38	0,38	0,38
Transmitancia M2 %	0,64	0,51	0,51
Transmitancia M3 %	0,51	0,51	0,47



**Gráfica 15 Transmitancia de las Muestras 1, 2 y 3**

✓ **Análisis de Resultados**

Las tablas anteriores muestran una transmitancia menor a 1%, lo que indica que la intensidad de la luz registrada por el fotómetro es muy pequeña, aunque se puede observar que la luz pasa a través del material como lo demuestran la fotografía 41 y 42.



**Foto 41 Intensidad de luz Laser proveniente de las muestras**

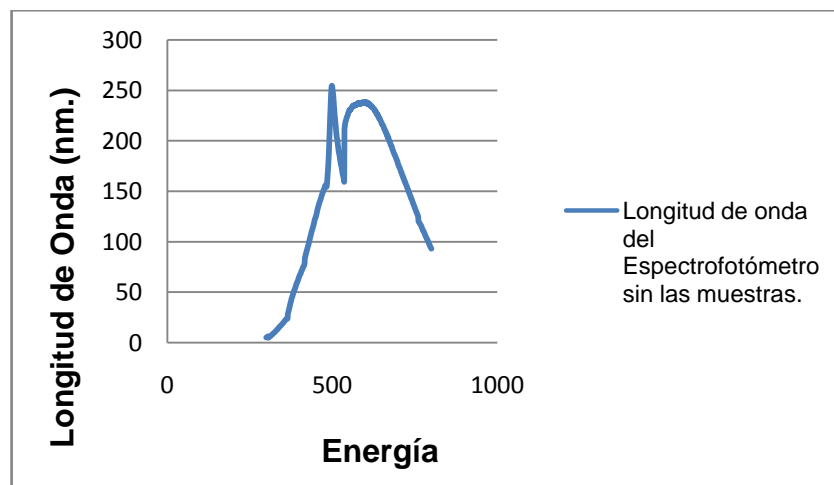


Foto 42 Intensidad de Luz Solar que Proviene de las Muestras

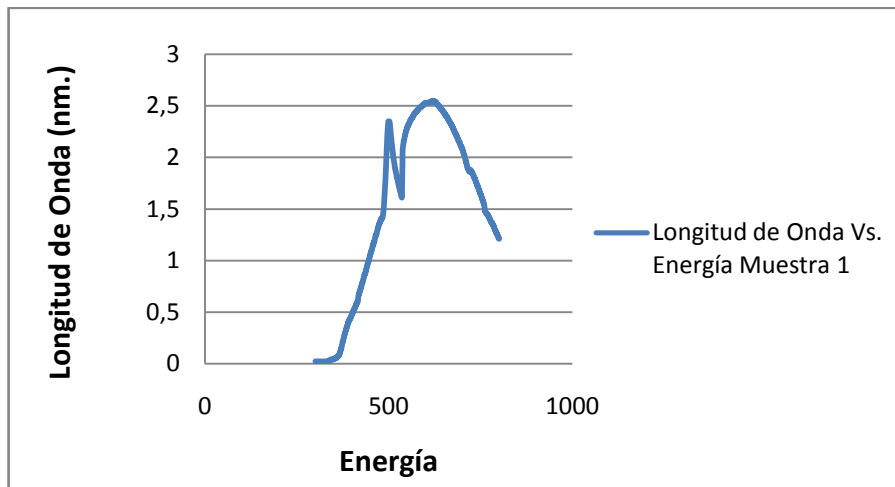
#### 4.9. Espectrofotometría:

En este ensayo como en el de transmitancia se incidió una luz a los especímenes, para determinar la cantidad de luz y el espectro electro-magnético que los atraviesa.

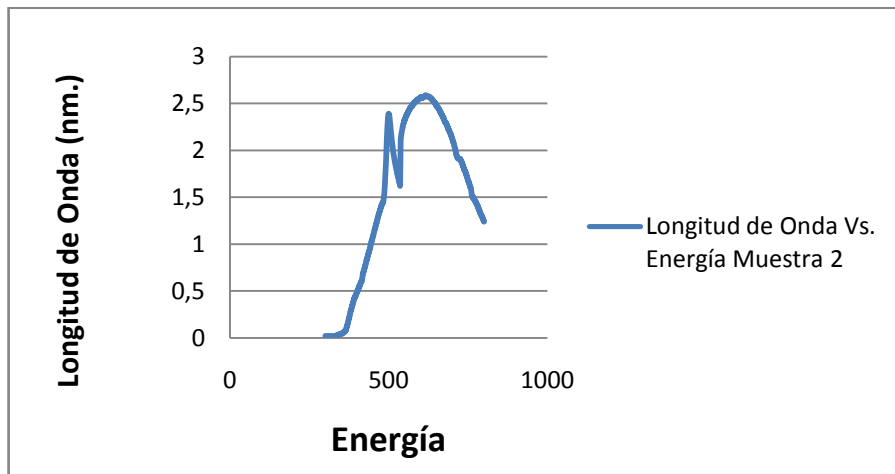
En las siguientes graficas podemos observar el resultado del ensayo.



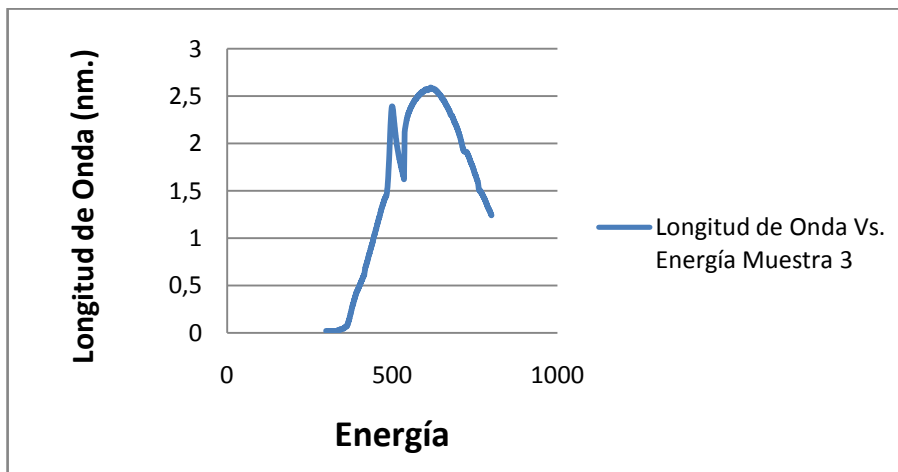
Gráfica 16 Longitud de Onda del Espectrofotómetro sin las Muestras



Gráfica 17 Energía Vs Longitud de Onda1



Gráfica 18 Energía Vs Longitud de Onda2



Gráfica 19 Energía Vs Longitud de Onda 3

✓ **Análisis de Resultados**

Así como en la prueba de Transmitancia, se puede observar que la cantidad de luz que pasa a través de las muestras es muy pequeña, pero el espectro electromagnético aunque en muy baja intensidad pasa por completo.

La cantidad de luz en porcentaje también es menor a 1%, pero por lo visto anteriormente es suficiente para que el ojo humano la capte.

El mayor valor de longitud de onda que emite el Espectrofotómetro es de: 254.49 nm. mientras que el mayor valor que transmitieron las muestras fue de: 2.59 nm.

## CONCLUSIONES

- Se logro obtener una dosificación apropiada de vidrio, metacaolín y fibra óptica, con la que se consiguió un concreto con características de translucidez.
- Se evaluaron las características físico-mecánicas de Tracción, Compresión y Flexión del concreto modificado y adicionado obteniendo unos resultados aceptables ya que no es un concreto estructural.
- En cuanto a la capacidad de transmisión de luz del material, los ensayos de Transmitancia y Espectrofotometría indican que la cantidad de luz que atraviesa las muestras es muy pequeña, menor al 1%, pero podemos observar que esta cantidad es suficiente para que el ojo humano la capte.
- En el estudio se evaluó la durabilidad del concreto, revelando que al adicionar un material puzolánico como el metacaolín se observa una fuerte disminución en las expansiones provocadas por la reacción álcali-sílice determinadas en el ensayo de la ASTM C1260, mejorando su resistencia a la acción de agentes externos que deterioran el concreto.
- Se logro obtener metacaolín a partir de la calcinación a 800°C del caolín traído des de Arcabuco Boyacá, el cual se adiciono al concreto mostrando reducción en la expansión provocada por la reacción álcali-sílice.
- Se utilizo un diseño de mezcla de teórico para lograr una resistencia de 21 Mpa, pero debido a los componentes de este material las resistencias que se obtuvieron con y sin fibra óptica fueron respectivamente 14,73 Mpa. y 18,41 Mpa (Compresión) lo que indica que el vidrio y la fibra óptica

disminuyen considerablemente la resistencia del material. Aunque este material no fue concebido para usos estructurales, la resistencia lograda con la combinación de todos los elementos es aceptable.

- ✿ En cuanto a la porosidad, los resultados obtenidos con el Porosímetro de gas Ruska difieren de los obtenidos con el ensayo de gravedad usando saturación al vacío propuesto por Zoubeir Lafhaj, Marc Goueygou, Assia Djerbi y Mariusz Kaczmarek debido a que la densidad del agua es mayor a la del gas que se hizo incidir en las mismas probetas, probando que es más confiable el ensayo de porosidad con el Porosímetro de campo Ruska.
- ✿ En este trabajo se presentan los ensayos y análisis de permeabilidad y absorción capilar, cuyos resultados nos muestran que este material es más susceptible a la acción de los fluidos en dirección paralela a las fibras ópticas mientras que en la dirección perpendicular a estas disminuyen considerablemente.

## RECOMENDACIONES

- ✚ Proponer una nueva dosificación de este material, utilizando otro tipo de puzolanas para comparar el comportamiento frente acciones externas como la reacción álcali – sílice y observar si se mejoran las características de porosidad, permeabilidad y absorción capilar, así como también las propiedades físico – mecánicas de tracción, compresión y flexión.
- ✚ Utilizar algún tipo de tratamiento con compuestos que ayuden a mitigar la reacción entre el álcali del cemento y la sílice que posee el vidrio, que sean de bajo costo y que proporcionen mayor adherencia entre el este y la matriz del concreto, para mejorar las propiedades mecánicas del material.
- ✚ Optimizar el proceso de fabricación de este material, ya que es muy tedioso la obtención de los tamaños adecuados del vidrio como agregado, la elaboración de la puzolana adicionada (MK) y la distribución de las fibras ópticas dentro de la matriz de este.
- ✚ Hacer recubrimientos de las paredes expuestas del material luego de su fabricación, ya que como se pudo observar estas son las zonas de mayor riesgo a ataques de agentes externos, puesto que los estudios muestran que la porosidad, permeabilidad y absorción capilar son muy altas en dirección de las fibras ópticas, las cuales son las que van a estar expuestas al ambiente.
- ✚ Debido a que es un material meramente decorativo, su uso debe limitarse, por lo que no se puede someter a grandes cargas ya que podría fallar súbitamente, ya que no es un concreto reforzado.

- ✿ Probar con combinaciones de vidrio y agregados corrientes para la fabricación del concreto, para obtener diversidad en materiales derivados del vidrio como agregado.
- ✿ Es recomendable que el vidrio a utilizar como agregado en la fabricación de este tipo de materiales esté libre de contaminación, ya que los residuos de vidrio reciclado están siempre con pedazos de papel, líquidos viscosos y contaminación en general, se deben acondicionar estos residuos para utilizarlos como aditivo.
- ✿ Se sugiere fundir el vidrio para descontaminarlo completamente, si es de una procedencia insalubre.

## REFERENCIAS

- [1] SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá 1996.
- [2] O'REILLY, Vitervo. Acerca de la durabilidad del concreto articulo.
- [3] EGÜEZ. H. Reacción Álcali-Árido en el Hormigón una rápida Evaluación
- [4] RESTREPO GUTIERREZ, Juan Camilo, RESTREPO BAENA, Oscar Jaime y TOBON, Jorge Iván. Efectos de la Adición de Metacaolín en el Cemento Pórtland. Universidad Nacional de Colombia- Medellín, Grupo del Cemento y Materiales de Construcción, Mayo de 2006.
- [5] AMBROISE, A, MAXIMILIEN, S. y PERA, J. Propiedades del Metacaolín mezclado con cemento. Cement Bas Master, 1994.
- [6] KHATIB, J. M., SABIR B. B. y WILD, S. Pore size distribution of metakaolin paste. Cement and Concrete Research. Vol 26, No 10. 1996. P1545 – 1553
- [7] COURARD, L. et al. Durability of mortars modified with metakaolin. Cement and Concrete Research 33. 2003. P 1473 – 1479
- [8] ICONTEC. Norma 220: Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm de lado.
- [9] ICONTEC. Norma 120: Método para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico.
- [10] ICONTEC. Norma 119: Método para determinar la resistencia a la tensión de morteros de cemento hidráulico.

- [11]LAFHAJ, Zoubeir, GOUEYGOU, Marc, DJERBI, Assia y KACZMAREK, Mariusz. Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content. November 2005
- [12]BIZZOTTO, Marcela B. ASTORI, Raúl E. SANGUINETTE, Bibiana M. Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEA. Universidad Nacional del Nordeste. Chaco Argentina 2006.
- [13]Norma de ensayo Swiss Standard - SIA 162/1 - Succión Capilar.
- [14]MURAT, M. Preliminary investigation of metakaolinite. Cement and Concrete Research 13. 1983. P 259 – 266.
- [15] ASTM C-1260 - 07, Standard Test method for Potential Alkali Reactivity of Agregates (Mortar – Bar Method), 2007.
- [16]ASTM C- 490/C 490M – 08, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete<sup>1</sup>, 2008.
- [17]MEYER, Christian. A Green Window into the Urban Future: Glass Concrete. Columbia University, February 20, 2004

- [18] BENDER, Joel. y HELLERSTEIN, Jonathan P. Vidrio, cerámica y materiales afines.
- [19] TAYLOR, H. F. W. Enciclopedia de la química industrial. La Química de los Cementos. Traducción de F. Romero Rossi, Escuela de Ingenieros Industriales de Bilbao, Universidad de Deusto. Ediciones URMO, Bilbao, España. 1967.
- [20] CURCIO, F., DE ANGELIS B. A. y PAGLIOLICO S. Metacaolín como una adición puzolánica para alto comportamiento en morteros. Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Química, Politécnico de Torino, Italia. Cement and Concrete Research.
- [21] FRÍAS ROJAS, M. y SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. La actividad puzolánica de diferentes materiales, es una influencia en el calor de hidratación de morteros. Cement and Concrete Research, 1996.
- [22] MIELENZ, R. C., WITTE L. P. y GRANTZ, O. J. Symposium of the use of pozzolanic materials in mortars and concretes. San Francisco, 1949, p.p. 43 - 92.
- [23] XINCHENG, P. Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index. Cement and Concrete Research, 1995.
- [24] ARCINIEGAS LÓPEZ, Danny Fernando y FONSECA CRISTANCHO, Alexander. Utilización de Vidrio Reciclado en Morteros. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2004.

- [25]RUSKA – Manual de Laboratorio de Análisis de Núcleos.
- [26]How Should Strength be Measured for Concrete Paving? Richard C. Meininger, MRCA TIL 420, and Data Summary. NMRCA TIL 451, NMRCA, Silver Spring, MD.
- [27]Concrete Strength Testing, Peggy Carrasquillo, Chapter 14, ASTM STP 169C, Significance of Test and properties of Concrete and Concrete-Making Materials, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [28]“Studies of Flexural Strength of Concrete, Part 3, Effects of Variations in Testing procedures”, Stanton Walker and D.L. Bloem, NMRCA Publication No. 75, NMRCA, Silver Spring, MD.
- [29]Variation of Laboratory Concrete Flexural Strength Tests, W.Charles Greer, Jr., ASTM Cement, Concrete and Aggregates. Winter, 1983, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [30]“Concrete Mixture Evaluation and Acceptance for Air Field Pavements” Richard C. Meininger and Norm Nelson, NMRCA Publication 178, September 1991, NMRCA, Silver Spring, MD.
- [31]Compression v s. Flexural Strength for Quality Control of Pavements, Steve Kosmatka, CTT PL 854, 1985, Portland Cement Association, Skokie, IL.
- [32]Time to Rein in the Flexure Test, Orrin Riley, ACI Concrete.
- [33]CONCRETE CONSTRUCTION MAGAZINE, Publication date: July 1, 2006