

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE CONCRETO SIN  
REFUERZO AFECTADO POR FUEGO MEDIANTE MICROSCOPIA  
ÓPTICA Y E.N.D.**

**JOHN ALEXANDER ARDILA ARCINIEGAS  
LUIS ALEJANDRO DÍAZ ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2013**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE CONCRETO SIN  
REFUERZO AFECTADO POR FUEGO MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA Y  
E.N.D.**

**JOHN ALEXANDER ARDILA ARCINIEGAS  
LUIS ALEJANDRO DÍAZ ROJAS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Metalúrgico**

**Director:**

**MSc. JULIÁN ORLANDO HERRERA ORTÍZ**

**Codirector:**

**MSc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2013**

## DEDICATORIA

*A DIOS, porque todo lo que he logrado ha sido por su infinita misericordia porque ha sido su santa voluntad y él me ha dado la fuerza suficiente para afrontar muchos años de estudios.*

*A mi familia, por su paciencia, incondicionalidad y ayuda en cada momento difícil de mi carrera, especialmente a mi abuelita Alicia porque ella me formo, me guió y fue toda una madre. A mi papá por todo su apoyo y confianza que depositó en mí.*

*A Sandrita, por su constante apoyo, motivación y porque cumplimos al fin este gran sueño. Hoy podemos decir que somos 2 profesionales dispuestos a entregar todo el amor del mundo el uno por el otro.*

*A la selección Fútbol Sala UIS, en cabeza del profe Rene y a mis grandes amigos Doctor Pollito, Carlitos, Pachito, Alex y todos los integrantes del equipo con los cuales compartí victorias, derrotas, alegrías y tristezas. Lo importante de todas esas vivencias fue formar una gran familia y grandes lazos de amistad.*

*Gracias a todas esas personas que contribuyeron de una u otra manera en mi formación. Mil bendiciones a todos.*

*John Alexander Ardila Arciniegas*

## DEDICATORIAS

*A Dios: por ser la energía que me empuja para mejorar cada día, enseñándome que a pesar de los problemas siempre es posible encontrar la salida a ellos.*

*A mis padres: por formarme en un buen hogar, por darme una buena crianza y educación, por el apoyo brindado y los buenos deseos, pero sobretodo, gracias por ser mis padres y regalarme esta maravillosa vida.*

*A Mary Luz Vargas (mi vida): por acompañarme durante todo este largo camino, estando conmigo en las buenas y en las malas, brindándome siempre el hermoso cariño de tu amor. Gracias por ser la mejor persona que he conocido, y por hacerme un feliz papa.*

*A mi primogénito (Alejandro): porque desde que me entere de que vendrías a este mundo he tratado de ser una mejor persona y me he esforzado más por lograr los mejores resultados en todo lo que hago, para que te sientas orgulloso de tener un buen padre.*

*A mis hermanos: por ser mis ejemplos a seguir y mostrarme la importancia de la educación en la vida de las personas, gracias porque han sido, y siempre serán parte importante en mi vida.*

*A mis amigos y compañeros: Henry Briceño, Ludwig Cáceres, Edwin Hernández, Jair Villamizar, los gemelos Luna Hernández, a quienes conocí en diferentes etapas de mi educación, pero han estado conmigo en momentos importantes durante la larga carrera de mi vida.*

*Aunque la vida no sea exacta a los planes que uno se plantea, Dios nos muestra diferentes y maravillosos caminos hacia la felicidad, debemos tomar las mejores decisiones teniendo en cuenta nuestros sueños y los de las personas que nos aman. Gracias a todas las personas que estuvieron conmigo durante el maravilloso camino recorrido hasta mi graduación espero me sigan acompañando en la realización de mi proyecto de vida.*

*Luis Alejandro Díaz Rojas*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander, a los grupos de investigación GIMAT de la escuela de Ingeniería Metalúrgica, al grupo de investigación INME de la escuela de Ingeniería Civil y a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales por brindarnos su apoyo durante el transcurso de nuestra investigación.

A nuestro estimado director de nuestro proyecto MsC. Julián Orlando Herrera por su infinita disposición para resolver cualquier inquietud, paciencia y orientación durante el desarrollo de ésta investigación, porque gracias a su confianza se convirtió en un gran amigo el cual brindó lo mejor de su experiencia para la realización de ésta investigación; le agradecemos el tiempo dedicado.

A la Codirectora MsC. Luz Amparo Quintero por creer y confiar en nosotros para el desarrollo de esta investigación, por su disposición, por ser nuestro apoyo en cada una de las dificultades que fueron superadas con éxito y brindarnos todo el conocimiento valioso para el cumplimiento del proyecto.

A los profesores: Jaime González, Walter Pardave, Jhon Freddy Palacios, Gustavo Neira, José Pedraza, Iván Uribe, Luis Orlando Aguirre, Custodio Vásquez, Arnaldo Alonso, Orlando Gómez, Elcy Córdoba, Afranio Cardona por contribuir en nuestra formación como personas y como profesionales éticos, íntegros con sentido de pertenencia con nuestra universidad y escuela.

A los técnicos: Ambrosio Carrillo, Domingo Carreño, Fermín Gómez, Mario Navarrete, Javier Gaitán, y la mechuda por su inmensa colaboración durante toda nuestra formación profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	19
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	20
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	20
1.2. OBJETIVOS .....	21
1.2.1. Objetivo general. ....	21
1.2.2. Objetivos específicos.....	21
2. MARCO TEÓRICO .....	23
2.1. GENERALIDADES DEL CONCRETO .....	23
2.1.1. Efecto del fuego sobre la estructura del concreto. ....	24
2.2 ESTADO DEL ARTE .....	28
3. METODOLOGÍA.....	30
3.1. ETAPA 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.2. ETAPA 2. CAPACITACIÓN EN EQUIPOS Y FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	31
3.2.1. Capacitación en manejo de equipos.....	31
3.2.2. Caracterización de los materiales.....	31
3.2.3 Diseño de mezcla.....	32
3.2.4 Elaboración de probetas.....	32
3.2.5 Fraguado y curado .....	33
3.3 ETAPA 3. ENSAYOS A PROBETAS ANTES DE EXPOSICIÓN A FUEGO.....	33
3.3.2 Peso de las muestras.....	33
3.3.3 Ensayo de ultrasonido (VPU) .....	34

3.3.4	Ensayo de compresión. ....	35
3.3.5	Microscopia óptica. ....	36
3.3.6	Difracción de rayos X (DRX). ....	36
3.3.7	Ensayo de porosidad. ....	37
3.4	ETAPA 4. EXPOSICIÓN PROBETAS A FUEGO. ....	37
3.4.1	Tiempo de enfriamiento. ....	38
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	40
4.1	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ANTES DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO. ....	40
3.5	ETAPA 5. ELABORACIÓN INFORME FINAL. ....	40
4.1.1.	Peso de las muestras. ....	40
4.1.2.	Inspección visual antes de calentamiento. ....	41
4.1.3.	Ensayo de ultrasonido (VPU). ....	42
4.1.4.	Ensayo de resistencia a la compresión. ....	43
4.1.5.	Ensayo de porosidad. ....	43
4.1.6.	Resultados DRX probetas referencias. ....	45
4.2.	RESULTADOS PRUEBAS LUEGO DE SOMETIMIENTO A FUEGO. ....	46
4.2.1.	Peso de las muestras. ....	47
4.2.2.	Inspección visual. ....	49
4.2.3.	Ensayo de ultrasonido (VPU). ....	57
4.2.4.	Relaciones entre velocidad de pulso y temperatura de exposición. ....	60
4.2.5.	Ensayo de resistencia a la compresión. ....	62
4.2.6.	Ensayo de porosidad abierta. ....	63

4.2.7. Relaciones entre velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión y porosidad a diferentes temperaturas de exposición para las probetas cilíndricas. ....	64
4.2.8. Microscopia Óptica.....	67
4.2.9. Difracción rayos X a probetas sometidas a fuego.....	71
5. CONCLUSIONES .....	74
6. RECOMENDACIONES.....	78
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXOS .....	87

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Cambios en el concreto a diferentes temperaturas .....	25
Tabla 2. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica .....	35
Tabla 3. Clasificación del concreto según su resistencia a la compresión .....	35
Tabla 4. Peso promedio antes de someter a fuego las probetas cilíndricas y cúbicas .....	41
Tabla 5. VPU promedio para las probetas cilíndricas antes de someter a fuego...	42
Tabla 6. VPU (m/s) promedio para las probetas cúbicas en cada perfil .....	42
Tabla 7 Resultados porosidad .....	44
Tabla 8. Difracción rayos X concreto sin sometimiento a fuego .....	46
Tabla 9. Pérdida de peso después de calentamiento probetas cilíndricas y cúbicas .....	47
Tabla 10. Comparación VPU probetas cilíndricas antes y después de sometimiento a fuego .....	57
Tabla 11. Porcentaje de pérdida de VPU para las probetas cúbicas en los tres perfiles .....	60
Tabla 12. Resistencia a la compresión promedio para las probetas cilíndricas .....	62
Tabla 13. Porcentaje porosidad abierta probetas cilíndricas .....	63
Tabla 14. Relación resultados obtenidos de VPU, resistencia a la compresión y porosidad a cada temperatura para las probetas cilíndricas .....	65

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Baja conductividad del concreto .....	24
Figura 2. Diagrama del gradiente de temperaturas dentro de una columna en el momento de máxima temperatura en el aire durante un incendio .....	26
Figura 3. Defectos del fuego sobre la superficie del concreto .....	27
Figura 4. Curva de Temperatura vs. Tiempo según norma ISO 834. ....	28
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto .....	30
Figura 6. Termocuplas .....	33
Figura 7. Demarcación y toma de VPU probetas cúbicas .....	34
Figura 8. Cortes en las probetas .....	36
Figura. 9. Horno utilizado en las probetas cúbicas .....	38
Figura.10. Probetas antes de sometimiento a fuego .....	41
Figura 11. Perfil de VPU probeta cúbica antes de ser expuesta a 1000°C.....	43
Figura 12. Corte de núcleo extraído a probetas sin afectar para ensayo de porosidad.....	45
Figura 13. Pérdida de peso vs. Temperatura de exposición probetas cilíndricas y cúbicas .....	48
Figura 14. Escape de agua sobre cara superior de la probeta cúbica durante el calentamiento .....	48
Figura 15. Probetas y cortes de las probetas cilíndricas expuestas a 200 y 400°C .....	50
Figura 16. Probetas y cortes de probetas cilíndricas expuestas a 600, 800 y 1000°C .....	51
Figura 17. Daños probetas cilíndricas a partir de 600 °C .....	53
Figura 18. Probetas cúbicas sometidas a 400, 800 y 1000°C .....	54
Figura 19. Grietas que se propagan hacia el interior de la probeta sometida a 1000°C .....	56

Figura 20. Temperatura vs. Tiempo de las termocuplas para la probeta cúbica sometida a 1000°C .....	57
Figura 21. Comparación gráfica probetas cúbicas en el perfil B .....	58
Figura 22. Perfiles de velocidad probetas cúbicas después de ser expuestas a fuego .....	59
Figura 23 Promedio de VPU promedio vs. Temperatura de exposición de las probetas cilíndricas y cúbicas .....	61
Figura 24. Resistencia a la Compresión vs. Temperatura para las probetas cilíndricas .....	63
Figura 25. Porcentaje (%) porosidad abierta vs. Temperatura de exposición para las probetas cilíndricas .....	64
Figura 26. Relación Resistencia a la compresión vs. VPU.....	65
Figura 27. Relación % Porosidad abierta vs. VPU .....	66
Figura 28. Relación Resistencia a la compresión vs. % Porosidad abierta .....	66
Figura 29. Cambio de coloración y estado superficial del concreto para las probetas cilíndricas.....	68
Figura 30. Agrietamiento probetas cilíndricas a 600°C .....	69
Figura 31 Agrietamiento probetas cúbicas a 400°C y 800°C.....	70

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXOS A. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA .....	87
ANEXOS B. DISEÑO DE MEZCLA .....	88
ANEXOS C. REGISTRO DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....	90
ANEXOS D. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE POROSIDAD ABIERTA.....	91
ANEXOS E. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU) .....	92
ANEXOS F. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) .....	94

## RESUMEN

**TÍTULO** EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE CONCRETO SIN REFUERZO CON RELACIÓN AGUA/CEMENTO=0.5, AFECTADO POR FUEGO A DIFERENTES TEMPERATURAS, MEDIANTE MICROSCOPIA ÓPTICA Y E.N.D.

**AUTORES:** ARDILA ARCINIEGAS, John Alexander, DÍAZ ROJAS, Luis Alejandro\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Concreto, fuego, pérdida de peso, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, porcentaje de porosidad abierta, microscopia, difracción de rayos X.

### DESCRIPCIÓN:

El concreto es un material de construcción incombustible que presenta gran resistencia y es ampliamente usado en diferentes estructuras, sin embargo dichas estructuras están expuestas a accidentes como los incendios, afectando así sus propiedades.

El presente trabajo de investigación evaluó diferentes propiedades físicas del concreto sin refuerzo con relación agua/cemento de 0.5 afectado a diferentes temperaturas de exposición, sus propiedades se evaluaron mediante microscopia óptica, pérdida de peso, velocidad de pulso ultrasónico (VPU), resistencia a la compresión, porosidad abierta y difracción de rayos X. La afectación a diferentes temperaturas se realizó de dos formas diferentes, la primera calentando las probetas cilíndricas de 20 cm de altura por 10 cm de diámetro dentro de muflas hasta alcanzar la temperatura seleccionada para luego mantener por una hora y la segunda forma de calentamiento fue con probetas cúbicas de 20x20x20 cm<sup>3</sup> utilizando una llama directa sobre una de sus caras, siguiendo la curva de calentamiento ISO 834 hasta llegar a la temperatura seleccionada y manteniendo por una hora.

Los diferentes resultados obtenidos comprueban que al aumentar la temperatura de exposición, la velocidad de pulso (VPU) y la resistencia a la compresión disminuyen mientras la porosidad y pérdida de peso aumentan. Mediante la microscopia realizada se observan daños como agrietamiento en el mortero y la separación de este a los agregados gruesos, algunos de los daños observados se explican por los resultados obtenidos en el análisis de difracción de rayos X.

---

\*Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Director: M.Sc. Julian Orlando Herrera Ortiz. Codirectora: M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITHOUT REINFORCEMENT WITH RELATION WATER / CEMENT = 0.5, AFFECTED BY FIRE AT DIFFERENT TEMPERATURES, THROUGH OPTICAL MICROSCOPY AND NDT.

**AUTHORS:** ARDILA ARCINIEGAS, John Alexander, DÍAZ ROJAS, Luis Alejandro\*\*

**KEY WORDS:** Concrete, fire, weight loss, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, percentage of open porosity, microscopy, X-ray diffraction

### DESCRIPTION:

Concrete is a fireproof building material that has high strength and is widely used in different structures. Nevertheless, these structures are exposed to accidents such as fires, affecting their properties.

The current research, evaluated different physical properties of unreinforced concrete with water / cement ratio of 0.5 affected by the exposure to different temperatures. Their properties were evaluated through optical microscopy and various tests such as weight loss, ultrasonic pulse velocity (UPV), compressive strength, porosity and X-ray diffraction. Exposures at different temperatures were developed in two different ways; the first one, heating cylindrical specimens of 20 cm of height and 10 cm of diameter inside of a muffle furnace until it reached the selected temperature held for an hour. The second form of heating was with the use of cubic specimens of 20x20x20 cm<sup>3</sup> using a direct flame. In this one, it was used one flame straight to one of its sides following the heating curve of ISO 834 until it reached and maintained the temperature established for an hour.

The different results obtained confirm that increasing temperature of exposure, the pulse velocity (VPU) and the compressive strength decreases, while the porosity and the weight loss are increased. Through the microscopy performed, damages like cracking in the mortar and the separation of these to the coarse aggregates were observed; some of the damages observed are explained through the results obtained in the analysis of X-ray diffraction.

---

\*Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Director: M.Sc. Julian Orlando Herrera Ortiz. Codirectora: M.Sc. Luz Amparo Quintero Ortiz

## INTRODUCCIÓN

El hombre en su incansable búsqueda de resguardarse de las inclemencias del clima y la necesidad de construir un hábitat digno y resistente a diferentes agentes agresivos como el fuego, encontró en el concreto el material que cumple y satisface estas necesidades. Este material se caracteriza por ser incombustible, por tener baja conductividad térmica y alta resistencia al fuego, lo cual lo hace ideal para todo tipo de construcciones.

El concreto al ser expuesto a fuego inevitablemente presenta cambios fisicoquímicos que afectan negativamente las propiedades, estos daños van a depender directamente de la temperatura que alcance la exposición a fuego, por lo tanto a mayores temperaturas se producen más daños. A raíz de todas las afectaciones producidas por fuego, es importante analizar y evaluar la estructura interna del concreto porque permite conocer de manera detallada los componentes, propiedades y características que permiten verificar su estabilidad futura.

En este trabajo de investigación se realizaron una serie de ensayos destructivos y no destructivos a probetas fabricadas en concreto con relación  $a/c=0,5$  antes y después de ser sometidas a fuego donde se utilizó 2 métodos: el primero fue calentamiento por mufla a las probetas cilíndricas y el segundo método por llama directa a las probetas cúbicas

La etapa de resultados muestra los diferentes datos obtenidos en los ensayos realizados y como algunos de estos se pueden relacionar. Además se realiza el análisis de los resultados donde se observa como el fuego afecta diferentes características y propiedades del concreto a diferentes temperaturas, tales como: pérdida de peso, resistencia a la compresión, % porosidad y otras que abordaremos en el desarrollo de la investigación.

# 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años se ha registrado un aumento de todo tipo de construcciones a nivel mundial teniendo como materia principal el concreto; material que muestra como una de sus principales características su incombustibilidad y baja emisión de humos tóxicos, cuando es expuesto a altas temperaturas [1]. Por lo tanto estas estructuras tienen buena resistencia al fuego y baja conductividad térmica.

Pese a lo anterior, se destaca el incremento en el número de incendios que afectan a dichas estructuras como por ejemplo el presentado en la Torre Windsor en España y el incendio de La Catedral de la Santa Trinidad ( 2006 ) y es así como estudios en países industrializados muestran cifras de 1 a 2 muertos por cada 100.000 habitantes y costos por daños de 0.2 a 0.3% del producto interno bruto (PIB) promedio en un año [2]. Por todo esto, ha surgido la necesidad de evaluar los daños asociados a incendios en estas estructuras de manera macro y microestructural, como una alternativa para la evaluación de las características del concreto afectado por fuego.

Una vez se inicia un incendio, el calor se propaga rápidamente a través de radiación, convección o conducción, alcanzando temperaturas entre 600 y 1200°C, causando así daños por la combinación de los efectos del humo y los gases que son emitidos por los materiales en combustión y los efectos de las llamas y altas temperaturas del aire [2]. En este intervalo de temperaturas el mayor daño se genera en la superficie exterior, donde las propiedades del concreto se ven afectadas considerablemente, presentando cambios físicos y químicos, como presencia de porosidad, agrietamiento, desprendimiento local (Spalling) y generando macro y micro fisuras producto de la descomposición gaseosa de algunos componentes del concreto [3], con lo cual la nueva superficie expuesta es

afectada por el fuego disminuyendo su resistencia y poniendo en riesgo su estabilidad futura. Estos cambios dependen directamente de la temperatura alcanzada, del tiempo de exposición, de la composición del concreto y su temperatura de enfriamiento [3].

Debido a los severos daños generados en las estructuras de concreto luego de ser expuestas a fuego, es necesario revelar la historia de calentamiento y su influencia sobre la microestructura del concreto. Estos estudios normalmente se basan en la inspección visual y su comparación con casos similares, lo cual permite tomar la mejor decisión sobre la reparación o demolición de la estructura [4].

Por lo anterior, se planteó realizar un estudio más completo a las estructuras de concreto sin refuerzo sometido a diferentes temperaturas, y siendo evaluadas mediante el uso de ensayos destructivos y no destructivos con el fin de contribuir al estudio de las características y propiedades del concreto afectado por fuego.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general.**

Evaluar las propiedades físicas de concreto sin refuerzo con relación agua/cemento=0.5, afectado por fuego a diferentes temperaturas, mediante microscopía óptica y e.n.d.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Evaluar mediante inspección visual, pérdida de peso y VPU el cambio generado en el concreto sin refuerzo con relación  $a/c=0.5$ , afectado por fuego a temperaturas de 25, 200, 400, 600, 800, y 1000°C

- Determinar el efecto sobre la microestructura del concreto mediante análisis de difracción de rayos X y microscopía óptica de concreto afectado por fuego a diferentes temperaturas.
- Establecer relaciones entre los resultados obtenidos de los diferentes tipos de ensayos, aplicados a concreto afectado por fuego y compararlos con muestras sin afectar.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. GENERALIDADES DEL CONCRETO**

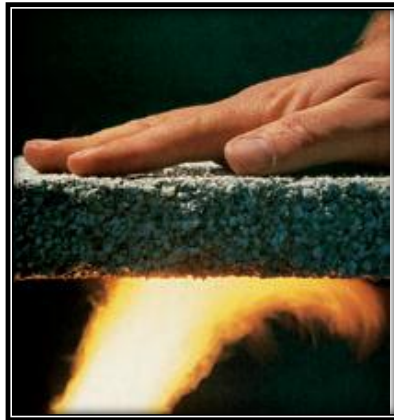
El concreto es un material compuesto básicamente de dos componentes: agregados y pasta, la pasta, compuesta de cemento portland y agua se encarga de unir a los agregados finos y gruesos (arena y grava o piedra triturada).

Como principales propiedades el concreto están la trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad, además de esto el concreto es incombustible y no emite humos tóxicos cuando es expuesto a altas temperaturas, por estas razones se dice que el concreto tiene un alto grado de resistencia al fuego. Esta resistencia se debe principalmente a que la pasta y los agregados forman un material prácticamente inerte, pero no se debe pensar que esta buena resistencia le confiere inmunidad total hacia la exposición del fuego.

Como material de construcción el concreto es usado por su elevada resistencia y en algunos casos usado como aislante contra el calor puesto que su conductividad térmica es relativamente pobre [2], por estas razones la capa superficial de los concretos será normalmente la más afectada durante un incendio empeorando la situación cuando aparecen en la superficie, producto del calor, grietas, desprendimientos y expulsiones de agregados, con lo que el daño se desplaza más rápidamente hacia el interior del concreto, provocando mayores pérdidas de resistencia. Estos daños serán explicados a continuación en el efecto del fuego sobre la estructura del concreto.

En la figura 1 se puede observar un ejemplo de la baja conductividad del concreto, este ayuda a que las llamas no se expandan hacia otros cuartos cuando se presenta un incendio, además de esto el concreto no gotea material fundido con lo que no se une al incendio como combustible, lo cual si ocurre con algunos materiales plásticos y metálicos en algunas construcciones.

**Figura 1. Baja conductividad del concreto**



**Fuente:** The Concrete Centre<sup>TM</sup>, Concrete and Fire [2]

**2.1.1. Efecto del fuego sobre la estructura del concreto:** A pesar de la buena resistencia del concreto frente al fuego, las propiedades de este se ven sustancialmente modificadas por la exposición a altas temperaturas debido a la aparición de micro y microfisuras junto a otros cambios físicos y químicos que pueden ser irreversibles dependiendo del nivel de temperatura alcanzado, del tiempo de exposición, de su composición y forma de enfriamiento [3].

Los daños más significativos en el concreto se producen a temperaturas mayores a 500°C, sin embargo el concreto empieza a presentar cambios físicos y químicos desde los 100°C, estos se pueden observar en la tabla 1 que es una recopilación de varios autores [2], [3], [4] y [5]. Cabe resaltar que los mayores daños se producen en la superficie y cuando se extienden al interior, el daño principal es producido en los agregados gruesos los cuales son el mayor contenido volumétrico del concreto y su expansión predomina cuando se trata de calcularla, debido a que ha sido sometido a elevadas temperaturas.

**Tabla 1. Cambios en el concreto a diferentes temperaturas**

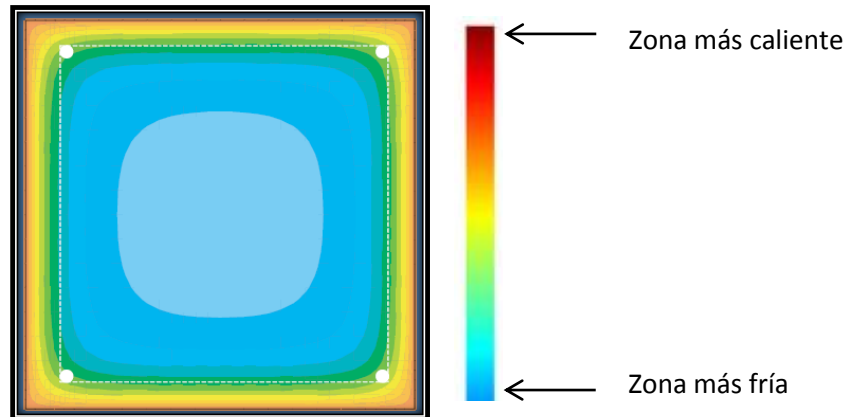
Temperatura (°C)	Coloración	Propiedad afectada o cambios en los componentes del concreto
100-200	Gris tradicional	105°C deshidratación de la pasta acompañada por contracción, si el calentamiento es muy rápido puede producir desprendimiento por la alta presión de evaporación interna, 180°C comienza la deshidratación del silicato de calcio hidratado.
200-300	Gris tradicional	Continúa la deshidratación o pérdida de agua no evaporable, entre 200 a 250°C comienza la primera pérdida de resistencia a la compresión.
300-500	Rosado	Sobre 300°C la reducción de resistencia estaría en un rango entre 15 a 40%, se encuentran algunos agrietamientos en la superficie.
500-600	Segundo gris con partículas rojas	A partir de 500°C la mayoría de agregados dejan de ser estables y las afectaciones son irreversibles. Aparecen una importante densidad de microfisuras que debilitan la zona de interface agregado mortero y afecta directamente la resistencia mecánica del concreto, ocurre la transformación alotrópica del cuarzo $\alpha$ a cuarzo $\beta$ acompañada de significativa expansión del 1.2%. Comienza la deshidratación del hidróxido de calcio. A 540°C la reducción de resistencia normalmente se encuentra entre 55 a 70%, se presentan expulsiones de agregados de cuarzo y sílice. Se presentan mayores grietas internas.
600-700	Segundo gris con partículas rojas	Comienza descarbonatación de agregados calcáreos y continua hasta los 900°C.
700-800	Segundo gris con partículas rojas	Comienza la descomposición del silicato de calcio hidratado.
800-900	Segundo gris con partículas rojas	Los basaltos comienzan a presentar cambios de fase, se presentan Spalling o desprendimientos.
900-1000 >1000	Amarillo opaco o beige	No se encontró bibliografía respecto a cambios sobre el concreto a dicha temperatura

**Fuente:** Los autores

En la figura 2, se puede observar una isoterma a 500°C que es una de las temperaturas más críticas en el concreto como ya se ha mencionado, esta

isoterma se encuentra señalada por la línea blanca punteada y los círculos blancos en sus esquinas es la posición donde debería estar ubicado el refuerzo.

**Figura 2. Diagrama del gradiente de temperaturas dentro de una columna en el momento de máxima temperatura en el aire durante un incendio**



**Fuente:** The Concrete Centre<sup>TM</sup>, Concrete and Fire [2]

La mezcla de pasta y agregados puede verse seriamente afectada por el efecto del fuego, ya que estos materiales presentan diferentes coeficientes de dilatación, lo que produce cambios volumétricos distintos generando e incrementando las microfisuras, esto acompañado por la descomposición de productos de hidratación genera una acción combinada de contracción y expansión de la pasta que afecta su microestructura[5].

Estas expansiones y contracciones que se generan por el calentamiento a altas temperaturas en el concreto junto con la presión interna generada por la evaporación de humedad y descomposición de productos de hidratación, son en muchos casos las responsables del agrietamiento, desprendimiento (spalling) como se muestra en la figura 3 (a) y la expulsión (popouts) de agregados a la superficie como se muestra en la figura 3 (b), los cuales provocan que el daño se extienda hacia el interior mucho más rápido de lo que la conductividad térmica del hormigón permitiría si estos daños no se presentaran.

**Figura 3. Defectos del fuego sobre la superficie del concreto**



**a) Spalling**



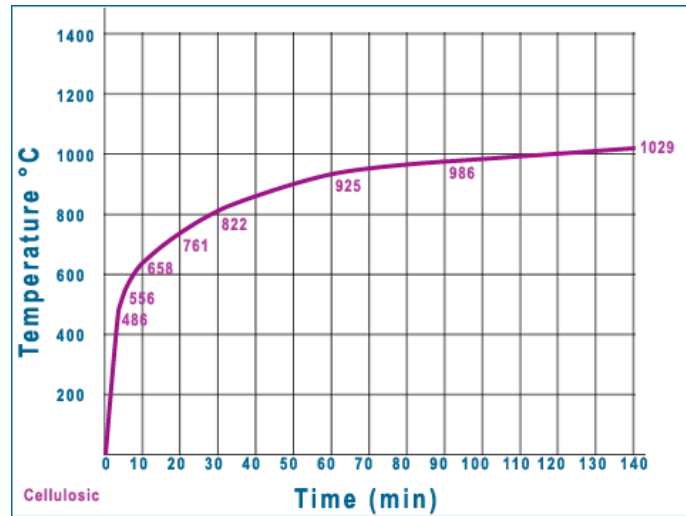
**b) Popouts**

**Fuentes:** a) Guide to Fire Safety of Concrete Buildings [6]  
b) imagen tomada de Concrete in Practice [7]

La coloración del concreto luego de haber estado sometido a fuego es muy importante, puesto que todas las transformaciones en los agregados se manifiestan por un cambio en su coloración permanente e irreversible que ocurre a medida que aumenta su tiempo de exposición y la temperatura a la que se expone, este hecho puede ser útil para la estimación de la temperatura final que fue alcanzada por el concreto a diferentes profundidades [8].

Es de importancia que los ensayos de concretos sometidos a fuego sean llevados a cabo bajo condiciones normalizadas que puedan simular un incendio real, aunque no todos los incendios tienen los mismos resultados sobre la estructura del concreto ni tampoco son ocasionados por los mismos efectos o en presencia de los mismos combustibles, la mayoría de los estudios realizados a concretos sometidos a altas temperaturas son llevados a cabo según la curva de Temperatura vs. Tiempo según la norma ISO 834 [9] como la representada en la figura 4.

**Figura 4. Curva de Temperatura vs. Tiempo según norma ISO 834.**



**Fuente:** Efecto del fuego sobre los hormigones: Alteraciones sufridas por los agregados [5]

## 2.2 ESTADO DEL ARTE

Existen varios estudios generados en Latinoamérica enfocados al daño provocado por el fuego a concretos, pero todos realizados con diferentes temperaturas máximas, composiciones, modos de enfriamiento y análisis diferentes; entre esos estudios se encuentran:

El estudio realizado por la ingeniera Geraldine L. Charreau y el licenciado Fabio S. Luna quienes investigaron los efectos de la exposición a altas temperaturas sobre los agregados en el concreto, siguiendo la curva de calentamiento de la norma ISO 834 y llegando hasta una temperatura máxima de 1200°C con enfriamiento natural en horno abierto. Los resultados obtenidos por esta investigación muestran que el comportamiento de los agregados finos y gruesos es muy diferente, presentándose los mayores cambios en los agregados gruesos y siendo estos a los que más le afecta la reducción de resistencia [5].

Otro fue el estudio realizado por Señas L., Maiza P., Priano C., Marfil S., Valea J. en el año 2000, quienes evaluaron testigos de concreto extraídos de una estructura expuesta a un incendio. Este estudio concluyó que en el incendio se produjo una reducción de resistencia del orden del 50% y un valor elevado de porosidad y succión capilar, además de esto se concluye mediante el uso de microscopía que se desarrollaron microfisuras que debilitaron la zona de interface entre los agregados y la pasta [8].

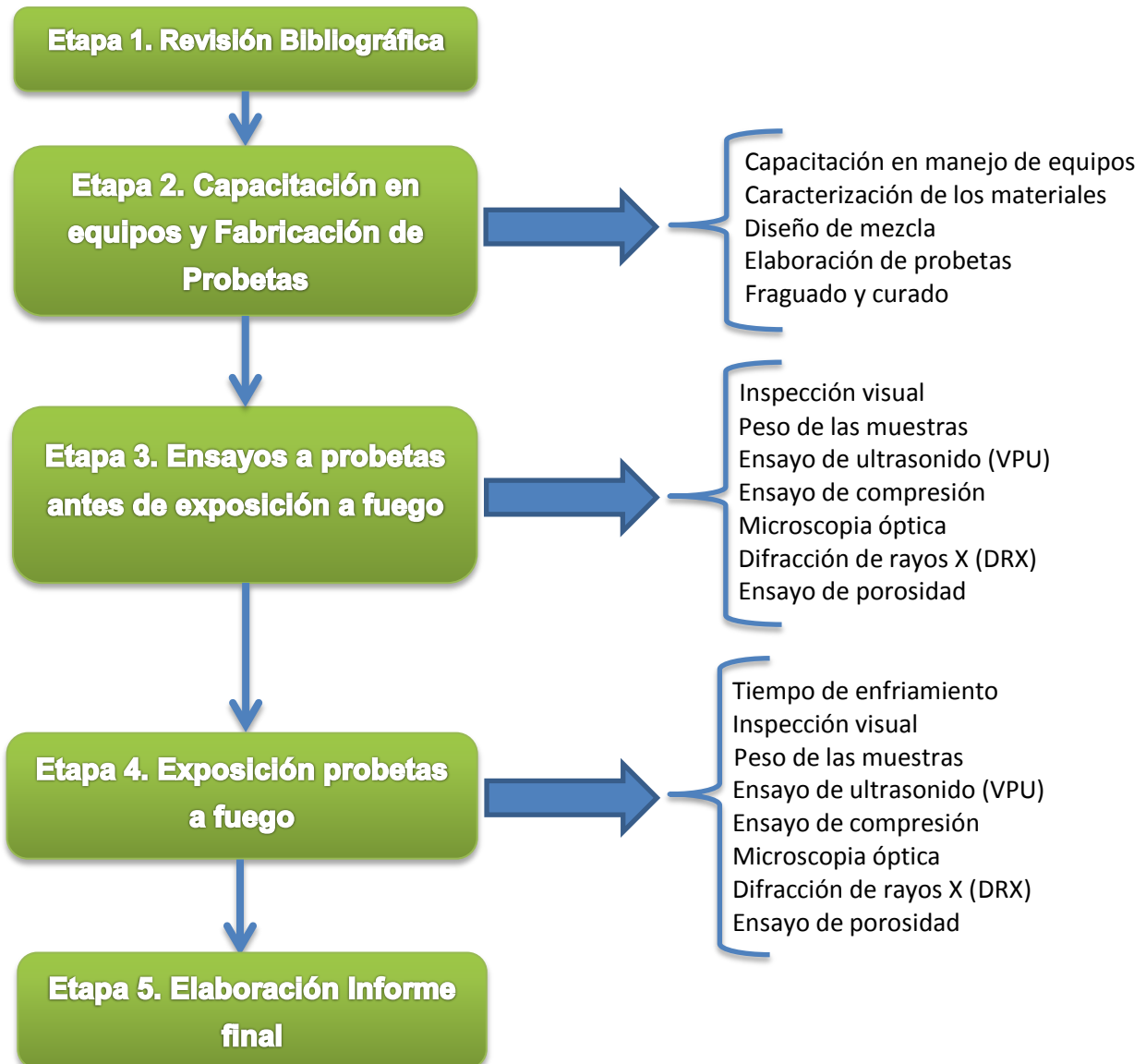
También se puede citar la investigación llevada a cabo por Ercolani, G.D., Ortega N.F. Señas L en el año 2007, donde se realizaron probetas de concreto con diferente relación agua cemento y un agregado grueso específico e igual para cada composición exponiendo las probetas a diferentes temperaturas hasta un máximo de 750°C con periodo de exposición de una hora, luego de finalizado el calentamiento fueron enfriadas de dos maneras, natural y rociadas con agua. Se pudo concluir en esta investigación que al enfriarse el hormigón usando agua se aumenta la cantidad de macro y microfisuras y se pueden observar notorios descensos del índice esclerométrico y de la velocidad de propagación de pulsos ultrasónicos [10].

En la Universidad Industrial de Santander Harry Nelson Cuesta González, Héctor Fabián Luque Pinzón, realizaron en el año 2010 una investigación que estudió el efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego, aquí realizaron ensayos de fuego a temperaturas de 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200°C, con velocidad de calentamiento según norma ISO 834, obteniendo como resultado que la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistencia a la compresión disminuyen, mientras que el porcentaje de porosidad aumenta al incrementar la temperatura de exposición, además se obtuvieron relaciones con las técnicas empleadas [1]

### 3. METODOLOGÍA

A continuación se presentan los detalles de las etapas llevadas a cabo durante el desarrollo de la presente investigación.

**Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del proyecto**



**Fuente:** Los autores

### **3.1. ETAPA 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

La revisión bibliográfica se realizó durante todo el desarrollo de esta investigación con el fin de obtener los conocimientos necesarios para llevarlo a cabo. Por lo anterior se revisaron textos, artículos, normas técnicas e informes de proyectos de grado de los temas relacionados con las propiedades del concreto antes y después de ser sometido a fuego, y con los ensayos destructivos y no destructivos aplicados a este material.

### **3.2. ETAPA 2. CAPACITACIÓN EN EQUIPOS Y FABRICACIÓN DE PROBETAS**

En esta fase se realizó una serie de capacitaciones con el fin de operar los equipos de manera correcta. También se llevó a cabo la caracterización de los materiales, el diseño de mezcla, la elaboración de las probetas, el curado y fraguado de las mismas. A continuación se dará a conocer los detalles de las actividades realizadas

**3.2.1. Capacitación en manejo de equipos:** Se llevó a cabo la capacitación en el manejo del equipo de ultrasonido PUNDIT plus PC 1006, en el funcionamiento y control de las termocuplas auxiliares, los hornos de exposición a fuego y muflas de calentamiento. Esta capacitación se llevó a cabo durante los 28 días de curado húmedo al que se sometieron las probetas.

**3.2.2. Caracterización de los materiales:** Se realizó la caracterización del cemento y de los agregados (fino y grueso) cumpliendo con las normas técnicas colombianas las cuales se relacionan a continuación:

- **Cemento:** El cemento utilizado para la fabricación de las probetas fue cemento portland tipo I el cual cumple con las especificaciones mecánicas, físicas y químicas indicadas por las normas NTC 121 [11] y NTC 321 [12].
- **Agregados:** Fueron utilizados grava y arena como agregado grueso y fino respectivamente. Para el análisis de dichos agregados fueron usadas pruebas granulométricas con las cuales se determinan el módulo de finura,

gravedad específica, porcentaje de absorción, y porcentaje de vacíos, estas propiedades cumplieron con las normas NTC 92 [13], NTC 176 [14], y NTC 237 [15]. La granulometría fue realizada según norma NTC 77[16] y NTC 78 [17]. Los detalles de dicha caracterización se presentan en el anexo (A).

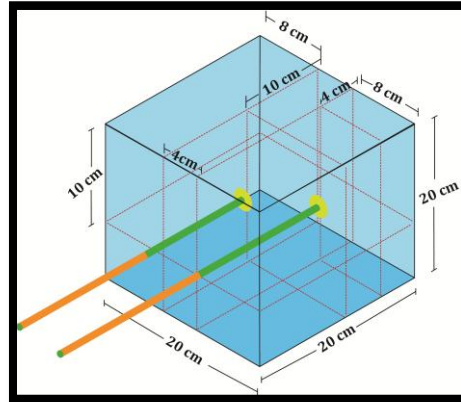
**3.2.3 Diseño de mezcla:** Se realizó el diseño de mezcla según norma ACI 211 [18] para una relación agua/cemento de 0.5 con tamaño máximo de agregados de (3/4”). El diseño de mezcla usado se presenta en el anexo (B).

**3.2.4 Elaboración de probetas:** Se fabricaron en total 40 probetas cilíndricas y 10 probetas cúbicas. Las probetas cilíndricas fueron fundidas en moldes de plástico de 10 cm de diámetro por 20 cm de largo, y las probetas cúbicas en formaletas de madera de 20x20x20 cm<sup>3</sup>, con base en la norma NTC 1377 [19]. Los moldes plásticos y las formaletas de madera fueron impregnados con ACPM y en la base grasa con el fin de que no se dañara la superficie y fuera más fácil la extracción. El llenado de los moldes y formaletas con la mezcla de concreto se realizó por compactación manual cada 1/3 del volumen en cada caso, para esto se empleó una varilla metálica de 30 cm de longitud y se dieron 30 golpes en toda la mezcla para conseguir la mayor homogeneidad posible, además se golpeó con un martillo de goma en el exterior del molde para ayudar a expulsar las burbujas de aire. Posteriormente se introdujeron dos termocuplas tipo K en cada una de las probetas cúbicas dejando una distancia desde el fondo de 4 cm y 10 cm respectivamente, con una separación de 4 cm entre ambas termocuplas según se muestra en la figura 6.

**Figura 6. Termocuplas**



**a) Termocupla tipo K**



**b) Ubicación de las termocuplas en la probeta**

**Fuente:** Los autores

**3.2.5 Fraguado y curado:** Las muestras elaboradas se sometieron a un proceso de fraguado durante 24 horas dentro de las formaletas y moldes, luego de pasado este tiempo se des moldearon para llevarlas al proceso de curado durante 28 días en condiciones estándar de temperatura y humedad (23°C con 100% de humedad) según norma NTC 1377. Posteriormente se sacaron y dejaron 15 días más al aire en condiciones bajo techo con el fin de que las probetas se secaran.

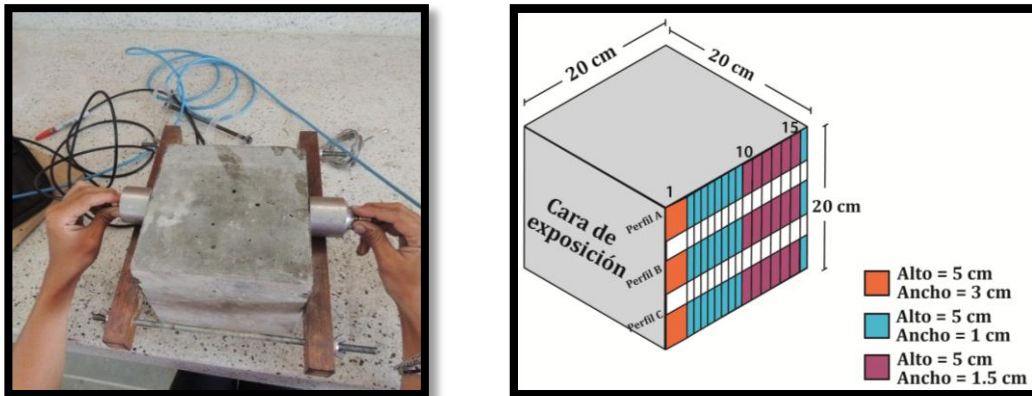
### **3.3 ETAPA 3. ENSAYOS A PROBETAS ANTES DE EXPOSICIÓN A FUEGO**

Después de transcurridos los 15 días de secado se procedió a realizar los ensayos de: inspección visual, pesaje de las muestras, velocidad de pulso ultrasónico (VPU), ensayo de compresión y de porosidad. Antes de la realización de los ensayos fueron marcadas las probetas con el fin de distinguirlas y hacer seguimiento de los resultados antes y después de exposición a fuego.

**3.3.2 Peso de las muestras:** Se pesaron la totalidad de las probetas, para lo cual se empleó una balanza analítica con lectura de tres cifras significativas. Este peso es necesario para comparar la pérdida de peso después de someter las probetas a fuego.

**3.3.3 Ensayo de ultrasonido (VPU):** Se realizó a la totalidad de las probetas empleando la técnica de transmisión por método directo. Para las probetas cilíndricas se empleó un soporte plástico que permite la toma de lecturas en tres puntos diferentes de las caras de las probetas, en cada punto se tomó la medición dos veces. Para el caso de las probetas cúbicas en la toma de datos se utilizó como soporte una de las partes de las formaletas que sirven para ajustar los bloques, la distancia en la toma de datos y la demarcación que va de 1 a 15 sobre las probetas se explica a continuación en la figura 7. Para la toma de medidas en las probetas cilíndricas y cúbicas se tuvo en cuenta que no podía existir una diferencia mayor al 2% entre las dos tomas y una diferencia no mayor al 5% en la totalidad de los datos como lo indica la norma NTC 4325 [20], esto indica la homogeneidad de la probeta pero en este caso dio superior al 5% debido al proceso de compactación manual.

**Figura 7. Demarcación y toma de VPU probetas cúbicas**



**a) Soporte para el equipo VPU**

**b) Demarcación sobre la probeta**

Fuente: Los autores

El ensayo de VPU es un ensayo cuya medida ayuda a calificar cualitativamente el concreto y puede ser usado correlacionándolo junto a otros ensayos. El concreto se puede clasificar según los valores de VPU que se obtengan, como lo indica la siguiente tabla:

**Tabla 2. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica**

Velocidad Ultrasónica (m/s)	Clasificación del Concreto
V > 4575	Excelente
V entre 4575 y 3660	Bueno
V entre 3660 y 3050	Cuestionable
V entre 3050 y 2135	Pobre
V < 2135	Muy pobre

**Fuente:** Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico [21].

**3.3.4 Ensayo de compresión:** Para los ensayos de compresión se tomaron 3 probetas cilíndricas para lo cual se usó la máquina de compresión de ensayos marca TREBEL, ajustándose a los rangos de velocidad y cargas permitidas según la norma ASTM C39/C39-04 [22]. El procedimiento se explica en el Anexo C. El concreto se puede clasificar de acuerdo a su resistencia a la compresión, esta especificación se describe en la tabla 3.

**Tabla 3. Clasificación del concreto según su resistencia a la compresión**

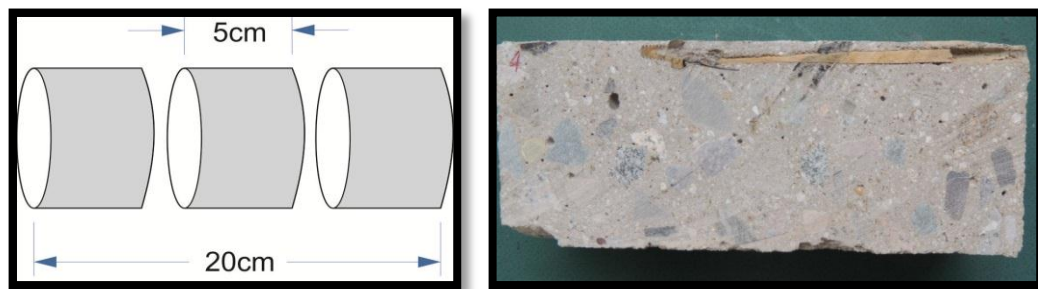
Clasificación	Resistencia a la compresión Kgf/Cm <sup>2</sup>	Resistencia a la compresión (MPa)
Baja resistencia	< 150	< 14,7
Resistencia moderada	Entre 150 y 250	Entre 14,7 y 24,51
Normal	Entre 250 y 420	Entre 24,51 y 39,22
Muy alta resistencia	Entre 420 y 800	Entre 39,22 y 78,45

**Fuente:** Clasificación de concretos por su resistencia [23]

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión porque es una medida característica en los concretos, pero esta investigación solo se interesa en encontrar una posible correlación entre este ensayo y los datos obtenidos por el ensayo de VPU en concretos sometidos a calentamiento.

**3.3.5 Microscopia óptica:** Este ensayo se realizó en el laboratorio de metalografía de la escuela ingeniería metalúrgica de la UIS con los equipos OLYMPUS SZ (estereoscopio) y OLYMPUS GX71 (microscopio invertido), con el fin de tomar una serie de imágenes y asociarlas a los daños ocurridos en su rango de temperatura. Para este ensayo se hicieron cortes sobre las probetas cilíndricas y cúbicas que se detallan en la figura 8. La figura 8 (a) representa el tipo de corte que se hizo en las probetas cilíndricas para posteriormente analizar los daños ocurridos en el centro de la probeta con los microscopios. La figura 8 (b) representa el corte que se le hizo a las probetas cúbicas, donde se extrajo un núcleo cilíndrico de 3 pulgadas de diámetro por 20cm de profundidad, luego se procedió a realizar otro corte dividiendo ese cilindro de manera longitudinal. Por último y después de realizados los cortes se les hizo un lavado con agua para eliminar cualquier tipo de residuo que afectara la observación al microscopio.

**Figura 8. Cortes en las probetas**



**a) Corte probeta cilíndrica**

**b) Corte probeta cúbica**

**Fuente:** Los autores

**3.3.6 Difracción de rayos X (DRX):** Esta prueba fue contratada con el laboratorio de difracción de rayos-X sede UIS-Guatiguará, donde se enviaron muestras de 15gr de concreto triturado a un tamiz malla 400, garantizando así una homogeneidad de partícula aproximadamente a  $38\mu\text{m}$  de muestras sin afectar por fuego y muestras afectadas a 200, 400, 600, 800 y  $1000^{\circ}\text{C}$ .

**3.3.7 Ensayo de porosidad:** Para esta prueba se realizaron 2 clases de ensayo: El primero con un porosímetro Core Pet en los laboratorios de la UIS Guatiguará, adscritos a la escuela de Ingeniería de Petróleos donde se cortaron muestras cilíndricas de 1 pulgada de diámetro por 2 pulgadas de alto. Para el segundo ensayo se aplicó la técnica de porosidad abierta, donde se pesa la probeta de tamaño original en seco, luego se procede a sumergirla en agua dentro de una canasta y se registra su peso, posteriormente se deja la probeta en agua durante 24 horas y se registra su peso. Los cálculos se detallan en el anexo D.

### **3.4 ETAPA 4. EXPOSICIÓN PROBETAS A FUEGO**

El calentamiento de las probetas cilíndricas en las muflas se realizó en el laboratorio de pirometalurgia de la escuela Ingeniería Metalúrgica de la UIS, estas muflas cuentan con una termocupla interna la cual permitía controlar la temperatura alcanzando temperaturas superiores a los 1100°C, además se realizó el control de la temperatura con el uso de una termocupla externa. Fueron usadas 30 probetas cilíndricas las cuales se calentaron a las temperaturas de 200, 400, 600, 800 y 1000°C desde temperatura ambiente, hasta llegar a la temperatura requerida y manteniéndola durante 1 hora.

Para la exposición a fuego de las probetas cúbicas fueron seleccionadas las temperaturas de 400, 800 y 1000°C usando 2 probetas por temperatura y con una hora de sostenimiento a la temperatura requerida. Se determinaron estas temperaturas con el fin de observar el cambio de coloración y daños a diferentes temperaturas encontrados en la literatura y detallada en la tabla 1. Para esta operación se utilizó un horno fabricado con ladrillos refractarios y como medio de calentamiento, se utilizó una llama proveniente de una boquilla alimentada con gas propano como muestra la figura 9, cuya intensidad se reguló manualmente usando la llave de la pipeta de gas o variando la distancia de separación de la boquilla a la probeta.

**Figura. 9. Horno utilizado en las probetas cúbicas**



**Fuente:** los autores

Para llevar a cabo esta actividad fue necesario hacer la respectiva calibración del software y hardware perteneciente al grupo de investigación INME, con el fin de seguir la curva de calentamiento arrojada por el software según la norma ISO 834 mediante el uso de la llama y una termocupla externa. También se contó con dos termocuplas dentro de la probeta como se explicó en la figura 6(b) y una termocupla que medía la temperatura del ambiente del horno, estas termocuplas estaban conectadas a la tarjeta de adquisición de datos la cual registraba y permitía visualizar por medio del software los valores de temperatura y tiempo de exposición.

**3.4.1 Tiempo de enfriamiento:** Las probetas cilíndricas sometidas a calentamiento en las mufla se dejaron enfriar dentro de ellas durante 24 horas para evitar el choque térmico, ya que estas probetas tuvieron mayor tiempo de exposición al calentamiento, debido a que el aumento de temperatura en las muflas fue más lento que el realizado en el horno de llama directa.

Para las probetas cúbicas el enfriamiento se hizo dentro del horno hasta que la superficie de las probetas llegaron a la temperatura ambiente, este tiempo varió según su temperatura de exposición, siendo el tiempo de enfriamiento para las

probetas de 400°C de aproximadamente 8 horas y para las de 800 y 1000°C de aproximadamente 10 a 12 horas, antes de realizar los ensayos posteriores al calentamiento.

Posterior al enfriamiento se hizo inspección visual, se pesaron las probetas cilíndricas y cúbicas para determinar el % de pérdida de peso, además se realizaron los ensayos de VPU a la totalidad de las probetas sometidas a fuego, de resistencia a la compresión, porosidad, DRX, microscopia óptica.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se exponen los resultados obtenidos en los ensayos de inspección visual, peso de las muestras, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión, porosidad, difracción de rayos X y microscopía realizada a las probetas de concreto cilíndricas y cúbicas sin refuerzo antes y después de ser sometidas a fuego.

### 4.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS ANTES DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO

A continuación se presentan los resultados de las pruebas realizadas a las probetas antes de haber sido sometidas a fuego, con los siguientes ensayos: peso de las probetas, inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico y los resultados de las probetas sin afectar seleccionadas para los ensayos de porosidad, DRX y resistencia de compresión.

### 3.5 ETAPA 5. ELABORACIÓN INFORME FINAL.

Para llevar a cabo esta etapa se hará la evaluación de resultados, se establecerán las conclusiones respectivas y se presentará el informe final.

**4.1.1. Peso de las muestras:** En la tabla 4 se observan los pesos promedios obtenidos en las probetas cilíndricas y cúbicas respectivamente antes de ser sometidas a fuego y relacionando la temperatura a la cual se iban a someter.

Para este proceso fue necesario marcar las probetas con el fin de distinguir cada una, conociendo de esta forma exactamente el peso de cada probeta y a que temperatura se iba a exponer. Como se ve en la tabla 4 el peso en las probetas cilíndricas antes de someterlas a calentamiento no varía más de 1% y para las probetas cúbicas antes de ser expuestas a fuego la diferencia máxima de peso fue de 1,61% obteniendo en ambos casos probetas con un peso uniforme

**Tabla 4. Peso promedio antes de someter a fuego las probetas cilíndricas y cúbicas**

Temperatura (°C) a la que se va a someter las probetas	Peso promedio Cilíndricas (Kg)	Peso promedio Cúbicas (kg)
No afectada	3,99	18.46
200	3,97	N.R.
400	3,99	18.26
600	3,96	N.R.
800	3,96	18.46
1000	3,97	18.56
N.R.: La probetas cúbicas no fueron sometidas a esta temperatura		

**Fuente:** Los autores

**4.1.2. Inspección visual antes de calentamiento:** En la figura 10 se puede observar las fotografías de una probeta cilíndrica y una cúbica antes de sometimiento a fuego. Se realizó inspección visual a la totalidad de las probetas y en ellas se puede apreciar algunos detalles como una superficie lisa y uniforme con relativamente baja porosidad, no se encontraron grietas ni daños superficiales como desprendimientos por causa de la extracción del molde, las probetas presentan además una coloración grisácea.

**Figura.10. Probetas antes de sometimiento a fuego**



**Fuente:** Los Autores

**4.1.3. Ensayo de ultrasonido (VPU):** En las tablas 5 y 6 se muestran los promedios de velocidad de pulso ultrasónico registrado para las probetas cilíndricas y cúbicas respectivamente, antes de ser expuestas a fuego y la correspondiente temperatura a la cual iban a ser expuestas según la selección realizada. Un ejemplo de los datos recolectados durante el ensayo de VPU a las probetas cilíndricas y cúbicas antes y después de ser expuestas a calentamiento se puede observar en el anexo E.

**Tabla 5. VPU promedio para las probetas cilíndricas antes de someter a fuego.**

Temperatura (°C) a la que se va a someter las probetas	VPU (m/s) promedio probetas cilíndricas
No afectada	3952
200	3891
400	3915
600	3855
800	3895
1000	3898

**Fuente:** Los autores

**Tabla 6. VPU (m/s) promedio para las probetas cúbicas en cada perfil**

VPU (m/s) probetas cúbicas			
Temperatura (°C) a la que se va a someter las probetas	Perfil A	Perfil B	Perfil C
No afectada	4197	4172	4046
400	4098	4099	4009
800	4122	4168	4055
1000	4202	4231	4111

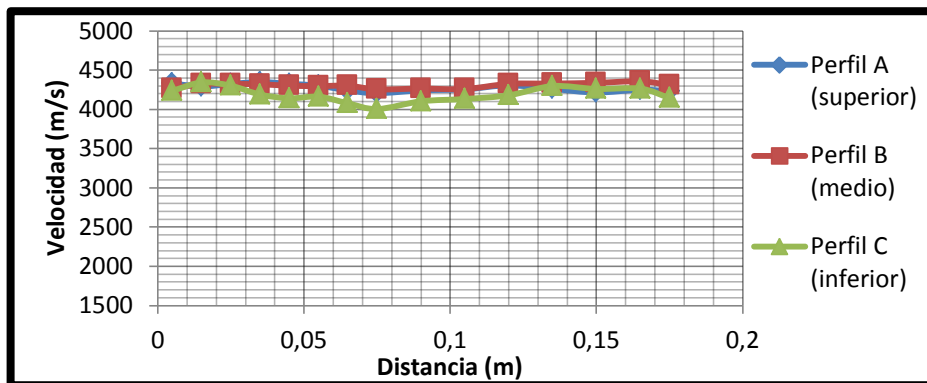
**Fuente:** Los autores

Como se puede comprobar en las tablas 5 y 6 y teniendo en cuenta que el concreto es un material heterogéneo, se puede afirmar que la velocidad de pulso

ultrasónico fue muy similar para todas las probetas cilíndricas y cúbicas mostrando propiedades homogéneas respecto al VPU. Ninguna probeta presento variación mayor al 2% entre mediciones y además por el valor de VPU obtenido se pueden calificar todas como buenas de acuerdo a la tabla 2 y la NTC 4325.

En la figura 11 se muestra los valores de VPU obtenidos en cada perfil para la probeta cúbica que sería sometida a 1000°C, se puede observar homogeneidad en los resultados los cuales estuvieron entre 4000 y 4300 (m/s), que según la tabla 2 es lo esperado para este tipo de concreto.

**Figura 11. Perfil de VPU probeta cúbica antes de ser expuesta a 1000°C**



**Fuente:** Los autores

**4.1.4. Ensayo de resistencia a la compresión:** Los resultados de los ensayos de compresión se realizaron a 3 probetas cilíndricas sin ser expuestas a calentamiento obteniendo un promedio de 36.37 MPa. Estos resultados muestran que las probetas presentan una resistencia normal llegando a límites de resistencia alta de acuerdo con lo que establece la literatura y la tabla 3.

**4.1.5. Ensayo de porosidad:** La porosidad abierta obtenida mediante el método gravimétrico para las probetas cilíndricas sin afectar por fuego se muestra en la tabla 7, además se muestra el volumen poroso encontrado con el porosímetro digital de helio en los núcleos extraídos de las probetas cilíndricas.

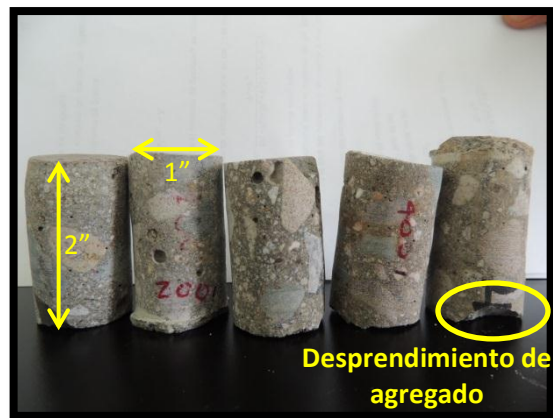
**Tabla 7 Resultados porosidad**

Porosidad abierta probetas cilíndricas completas sin afectación por calentamiento	
Probetas	%P.a
Sin afectar resultado 1	6.68
Sin afectar resultado 2	6.44
Sin afectar resultado 3	5.25
Promedio	6.12
Volumen poroso (porosímetro de helio) en núcleos extraídos	
Núcleo 1	4.90
Núcleo 2	10.96
Núcleo 3	9.34
Promedio	8.44

**Fuente:** Los autores

De la anterior tabla los datos que se tomaron en cuenta en este proyecto fueron los referentes a las probetas cilíndricas completas sin afectar por fuego, que da como promedio de porosidad 6.12%. Los resultados obtenidos por la técnica de porosímetro de Helio no se tuvieron en cuenta ya que no fueron exactos porque al momento de extraer los núcleos de las probetas cilíndricas, estos se rompían en ocasiones, debido a que la broca pasaba por un agregado y lo desprendía, dejando de esta manera alguna zona descubierta como se muestra en la figura 12, además los núcleos obtenidos no cumplían con las dimensiones requeridas y estos desperfectos pueden ser tomados en la medida como parte de la porosidad . Los 2 aspectos mencionados fueron una fuente de error grande, lo cual se vió reflejado en los resultados de porosidad.

**Figura 12. Corte de núcleo extraído a probetas sin afectar para ensayo de porosidad**



**Fuente:** Los autores

**4.1.6. Resultados DRX probetas referencias:** En la tabla 8 se exponen los resultados obtenidos por difracción de rayos X para las probetas cilíndricas sin afectación por fuego.

La tabla 8 permite observar minerales como Annita, moscovita, clinocloro, microclina y albita los cuales aparecen en todos los resultados entregados por el laboratorio tanto para el concreto sin afectar como para los concretos afectados a las diferentes temperaturas de exposición, estos minerales con filosilicatos y feldespatos comunes en agregados [24]

Puede verse además que el componente mayoritario es el Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) que se destaca por su dureza, seguido por portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$  que proviene en parte de la hidratación del óxido de calcio presente en el cemento (cal libre) y, en mayor medida, como subproducto de las reacciones de fraguado de los compuestos del cemento [25]. También se encuentra la calcita el cual es un carbonato muy común en los agregados de piedra caliza.

Se encuentran además minerales como Ettringita y yeso, el yeso es un producto presente en el cemento portland, el cual junto a otros compuestos de sulfatos reaccionan con el aluminato de calcio en el cemento durante el fraguado y forman

ettringita, estos componentes previenen el fraguado rápido y mejoran el desarrollo de la resistencia [26].

Además se encuentran cantidades de caolinita la cual es un filosilicato arcilloso que en el concreto mejora la durabilidad, remueve el hidróxido de calcio químicamente activo, mejora la porosidad y la adhesión entre el cemento, la arena y la grava [27].

**Tabla 8. Difracción rayos X concreto sin sometimiento a fuego**

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	$\text{Si O}_2$	010-85-0796	Cuarzo	33.3 % (0.2)
	$\text{Ca ( OH )}_2$	000-44-1481	Portlandita	11.1 % (0.1)
	$\text{Ca ( CO}_3$ )	010-72-4582	Calcita	11.5 % (0.1)
	$\text{Na ( Al Si}_3 \text{ O}_8$ )	010-89-6424	Albita	4.0 % (0.2)
	$( \text{Mg, Fe } )_6 ( \text{Si, Al } )_4 \text{ O}_{10} ( \text{OH } )_8$	000-29-0701	Clinocloro	3.2 % (0.2)
	$\text{Al}_2 \text{ Si}_2 \text{ O}_5 ( \text{OH } )_4$	000-58-2028	Caolinita	4.3 % (0.1)
	$\text{K Al}_2 ( \text{Si, Al } )_4 \text{ O}_{10} ( \text{OH } )_2$	000-58-2034	Moscovita	9.4 % (0.3)
	$\text{K ( Si}_{0.75} \text{ Al}_{0.25} )_4 \text{ O}_8$	010-77-0135	Microclina	<1 %
	$\text{Ca}_6 \text{ Al}_2 ( \text{SO}_4 )_3 ( \text{OH } )_{12} \cdot 26 \text{ H}_2\text{O}$	000-13-0350	Ettringita	1.5 % (0.1)
	$\text{Ca SO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	000-06-0047	Yeso	2.0 % (0.1)
$\text{K}_{0.936} ( \text{Fe}_{2.568} \text{ Al}_{0.504} ) ( \text{Al}_{1.41} \text{ Si}_{2.59} ) \text{ O}_{10} ( \text{OH } )_2$	010-74-2574	Annita	N.C	
Total Cristalino				80.4 %
Amorfos y otros				18.7 %

**Fuente:** Laboratorio Difracción Rayos X Sede UIS-Guatiguará

#### 4.2. RESULTADOS PRUEBAS LUEGO DE SOMETIMIENTO A FUEGO.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados luego de someter las muestras a calentamiento y los datos obtenidos se comparan con los resultados antes de calentamiento.

**4.2.1. Peso de las muestras:** En la tabla 9 se presenta el promedio de los resultados de pérdida de peso para cada temperatura de exposición en las probetas cilíndricas y cúbicas respectivamente y en la figura 13 se muestran las gráficas obtenidas con estos datos, representando la diferencia de pérdidas de peso entre las probetas cilíndricas y las cúbicas. Para las probetas sometidas a 1000°C se obtuvo que en las cilíndricas se pierde un 8% más de peso en comparación con las probetas cúbicas.

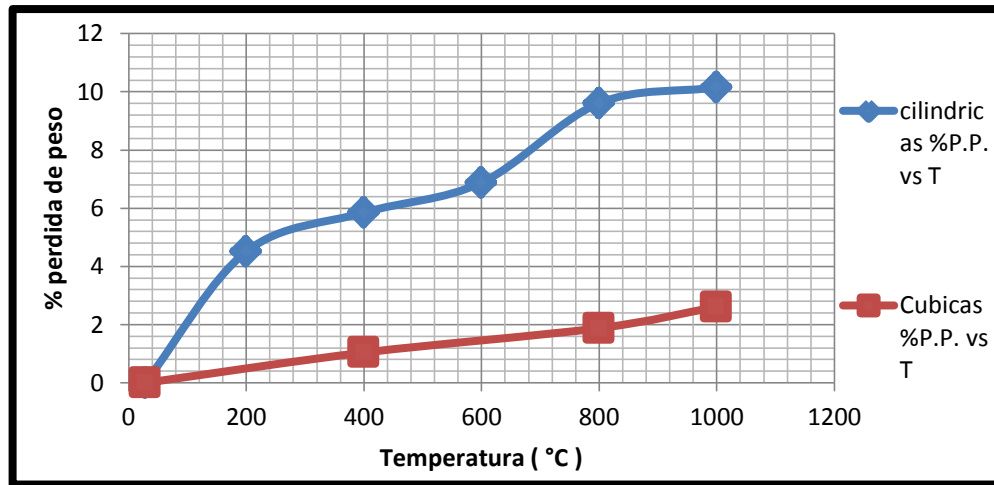
**Tabla 9. Pérdida de peso después de calentamiento probetas cilíndricas y cúbicas**

Cilíndricas	Temperatura de exposición (°C)	Promedio peso antes de calentamiento (Kg)	Promedio peso después calentamiento (Kg)	% pérdida de peso.
	200	3,97	3,79	4,51
	400	3,99	3,75	5,85
	600	3,96	3,69	6,88
	800	3,96	3,58	9,61
	1000	3,97	3,56	10,15
Cúbicas	Temperatura de exposición (°C)	Promedio peso antes de calentamiento (Kg)	Promedio peso después calentamiento (Kg)	% pérdida de peso.
	400	18,36	18,17	1,04
	800	18,56	18,21	1,88
	1000	18,66	18,17	2,61

**Fuente:** Los autores

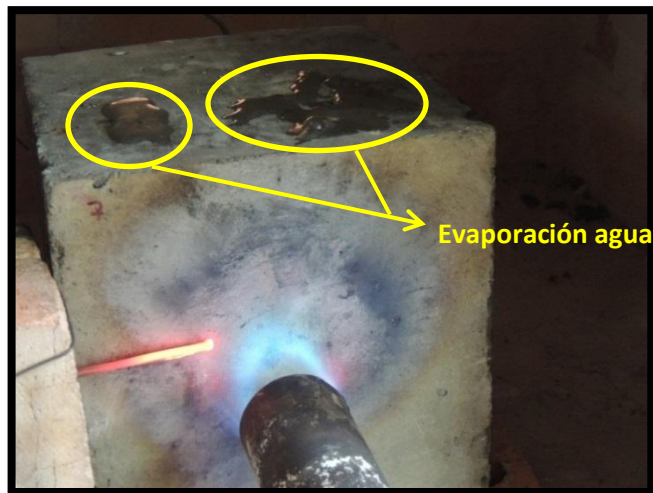
Es de considerar que la pérdida de peso en las probetas se debe en parte a la evaporación del agua cuando fueron sometidas a fuego o calentamiento. En la figura 14 para el caso de las probetas cúbicas sometidas a fuego directo, se observa como salía el H<sub>2</sub>O a la superficie al ser calentado el concreto.

**Figura 13. Pérdida de peso vs. Temperatura de exposición probetas cilíndricas y cúbicas**



Fuente: Los autores

**Figura 14. Escape de agua sobre cara superior de la probeta cúbica durante el calentamiento**



Fuente: Los autores

La mayor pérdida de peso y los daños fueron más apreciable en las probetas cilíndricas a cada temperatura de exposición lo cual se debió principalmente a 3 factores:

**Área expuesta a fuego:** Las probetas cilíndricas fueron afectadas en toda su superficie de forma homogénea exceptuando la base en la cual se apoyaban, esto hace que el calor se extienda hacia dentro de la probeta de manera más rápida. Para el caso de las probetas cúbicas, solo se afectó una cara, donde la llama incidente transfiere el calor primero a la superficie de la cara afectada y luego hacía el interior de la probeta de manera más lenta.

**Tamaño de las probetas:** Las probetas cúbicas tienen un volumen aproximadamente de 4,85 veces mayor respecto a las cilíndricas y pesaban aproximadamente 4,67 veces más, esto produce que las probetas cilíndricas se vean más afectadas por el aumento de la temperatura pues tienen menos masa a la cual transferir el calor.

**Forma y tiempo de calentamiento:** Las probetas cúbicas fueron expuestas a fuego siguiendo la curva de calentamiento ISO 834, las probetas cilíndricas fueron calentadas en mufla, siendo este calentamiento mucho más lento, lo que produjo que las probetas cilíndricas estuvieran más tiempo expuestas a las diferentes temperaturas aumentando así sus daños.

**4.2.2. Inspección visual:** Los resultados obtenidos durante la inspección visual de las probetas cilíndricas pueden observarse en las figuras 15 y 16. Estas imágenes muestran las probetas para cada temperatura de exposición y algunos cortes realizados con el fin de ver el interior de la probeta, dichos cortes fueron destinados a los ensayos de microscopía.

**Figura 15. Probetas y cortes de las probetas cilíndricas expuestas a 200 y 400°C**



**a) Probeta expuesta a 200°C**



**b) Corte probeta expuesta 200°C**



**c) Probeta expuesta a 400°C**



**d) Corte probeta expuesta 400°C**

**Fuente:** Los autores

Al inspeccionar las probetas cilíndricas, sometidas a 200°C, no se puede distinguir mayor daño a simple vista, ocurrió un cambio de coloración poco evidente de un tono amarillento a rosa muy tenue. Las probetas sometidas a 400°C muestran pequeñas grietas en la superficie y su coloración un poco más rosa pero sigue siendo un rosa tenue, a esta temperatura el corte fue un poco más rugoso debido a pérdida de humedad y cambios microestructurales en comparación con los cortes de probetas sin afectar y 200°C.

**Figura 16. Probetas y cortes de probetas cilíndricas expuestas a 600, 800 y 1000°C**



**a) Probeta expuesta a 600°C**



**b) Corte probeta expuesta a 600°C**



**c) Probeta expuesta a 800°C**



**d) Probeta expuesta a 800°C**



**e) Probeta expuesta a 1000°C**



**f) Probeta expuesta a 1000°C**

**Fuente:** Los autores

En las probetas cilíndricas de 600°C se evidencian más las grietas y estas fueron empeorando después del segundo día de enfriamiento convirtiéndose en grietas mayores. La superficie de la probeta presentó un color más rosa que a 400°C y la superficie del corte fue más rugosa, dañada y agrietada que los otros cortes.

Durante la inspección visual de las probetas cilíndricas de 800°C se observaron grietas mayores luego del enfriamiento que las presentadas a 600°C y erupciones en las paredes de la probeta ocasionados por los agregados gruesos de la mezcla, su coloración fue pasando de rosado a un tono blanco casi por completo. Luego del segundo día de enfriamiento las probetas resultaron tan frágiles, que sólo con alzarlas se quebraron o desmoronaron, lo que demuestra que a medida que pasa el tiempo luego del calentamiento las probetas pierden cada vez más resistencia y sus daños empeoran. Esto probablemente se presenta porque los diferentes componentes del concreto durante el calentamiento sufren una completa deshidratación, y luego de ponerlos en contacto con el medio ambiente algunos absorben humedad lo que hace que se expandan y empeoren las grietas previamente observadas [28].

En el caso de las probetas cilíndricas de 1000°C, los daños fueron tan graves que debieron ser fotografiadas antes de sacarlas de las muflas, pues presentaban grietas y daños muy evidentes, los agregados parecían estar completamente separados dentro del cilindro y algunos estaban expuestos a la superficie, esta separación pudo haberse presentado por las diferencias de dilatación entre el mortero y los agregados gruesos [29], otras hipótesis sobre el porqué los agregados perdieron adherencia al mortero se presentan en el numeral 4.2.9 de DRX , además las tapas o caras superiores de las probetas estaban abiertas o separadas y al momento de sacar las probetas de las muflas comenzaron a desmoronarse.

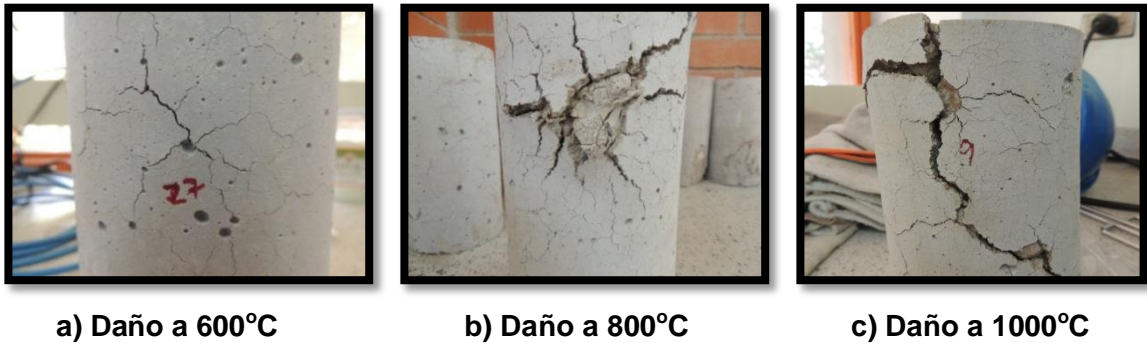
A 1000°C las probetas presentaron un color blanco y luego de algunos días, se desmoronaron completamente como si todos los agregados hubieran perdido la adherencia al mortero por completo.

Cabe mencionar que las probetas a partir de 600°C no pudieron ser usadas para los ensayos de porosidad en el porosímetro de Helio, ya que al momento de intentar extraer el núcleo de estas probetas, el proceso utiliza agua y el núcleo se convertía en una masa similar al barro. Así mismo, no se pudo realizar corte para

microscopia a las probetas cilíndricas de 800 y 1000°C, ni realizar, VPU y ensayo de compresión a la probeta de 1000°C.

A continuación en la figura 17 se muestra la evolución de los daños respecto al aumento de la temperatura, empezando desde 600°C.

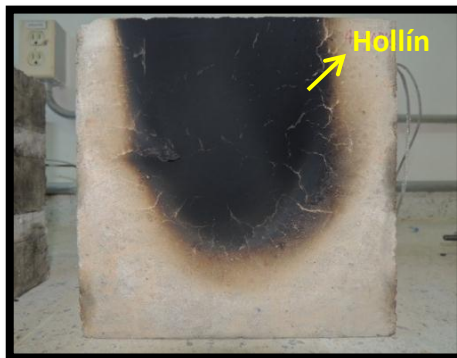
**Figura 17. Daños probetas cilíndricas a partir de 600 °C**



**Fuente:** Los autores

La inspección visual en probetas cúbicas muestra daños menos significativos que en las probetas cilíndricas por los diferentes factores explicados anteriormente, pero se pueden apreciar ciertas similitudes en la cara expuesta a fuego como se observa en la figura 18. Para el caso de las probetas cúbicas expuestas a 400°C se observa una mancha oscura que se produce por la combustión de la llama sobre la superficie del concreto, la llama necesaria para que la superficie afectada alcanzara los 400°C era una llama de tono amarillo que se caracteriza por ser una llama reductora que presenta poca presencia de oxígeno en relación al combustible y genera combustión incompleta la cual suele dejar un rastro de hollín. Se distinguen unas pequeñas fisuras o grietas que hacen contraste con el negro del hollín figura 18 (a) que pudieron presentarse por la deshidratación de esta parte del concreto, y una coloración un tanto rosa en la cara afectada donde no se ha depositado hollín. En los cortes realizados para microscopia de las probetas cúbicas a 400°C no se distinguen daños a simple vista y muestra poco cambio de coloración desde la parte afectada en la figura 18 (b) hacia la parte interior de la probeta.

Figura 18. Probetas cúbicas sometidas a 400, 800 y 1000°C



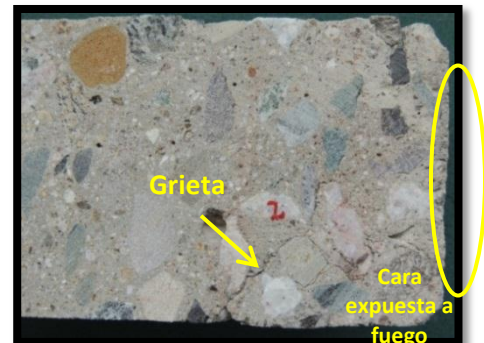
a) Probeta expuesta a 400°C



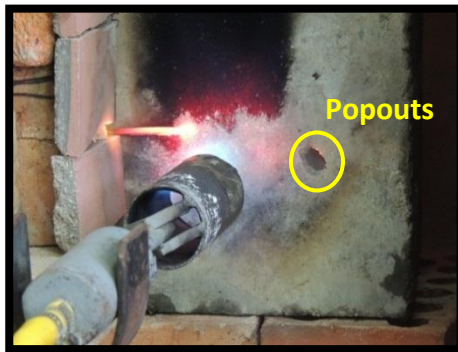
b) Corte probeta expuesta a 400°C



c) Probeta expuesta a 800°C



d) Corte probeta expuesta a 800°C



e) Probeta expuesta a 1000°C



f) Corte probeta expuesta a 1000°C

Fuente: Los autores

Las probetas expuestas a temperaturas de 800°C muestran mayores daños con cambios a nivel superficial más evidentes respecto a las probetas de 400 °C, se

observa en la figura 18 (c) una marca blanca que corresponde a la parte donde incidía la llama y por lo tanto la zona de mayor temperatura de exposición, este color es similar al que muestran las probetas cilíndricas para la temperatura de 800°C. Alrededor de la marca blanca, se observa una marca de color negro (hollín) producto de la combustión al pasar por la temperatura de 400°C, después se observa una coloración rosa y de manera seguida se identifica una tonalidad gris diferente al color original del concreto, por último se observa una línea de color naranja que separa la zona más alejada de donde se incidió la llama dando alrededor de ella una tonalidad grisácea y amarilla. Además se puede ver en la cara expuesta a fuego, algunas grietas que avanzan hacia el interior de la probeta, mayor porosidad y pequeños desprendimientos. En los cortes de 800°C se presentaron daños más significativos, como agrietamiento y separación entre agregado y mortero en los primeros 5 a 8 centímetros desde la cara expuesta a fuego como lo indica la figura 18 (d).

Los cambios que se produjeron en las probetas sometidas a 1000°C son de mayor magnitud a las presentadas a 800°C. Donde incidía la llama, se muestra una coloración blancuzca con un centro amarillento, esta zona es de mayor tamaño respecto a las probetas sometidas a 800°C, seguida por una franja rosa y luego una coloración gris opaca diferente al gris original de este concreto. En estas probetas se observó un cambio en la coloración de las paredes laterales como lo indica la figura 19, mostrando además unas grietas que se extienden de 10 a 12cm de profundidad desde la cara expuesta a fuego. En la parte frontal de las probetas donde incidía la llama, se evidenciaron desprendimientos, mayor porosidad e irregularidad de esta cara y en una probeta se presentó un popouts como lo indica la figura 18 (e). En los cortes de 1000°C sufrieron unas rupturas como lo indica la figura 18 (f), esto se debe a la utilización de agua como medio refrigerante en el corte y a la severidad de las grietas mencionadas, por lo tanto estas probetas no se observaron en el estereoscopio porque la zona de interés sufrió una separación entre agregados y pasta.

**Figura 19. Grietas que se propagan hacia el interior de la probeta sometida a 1000°C**

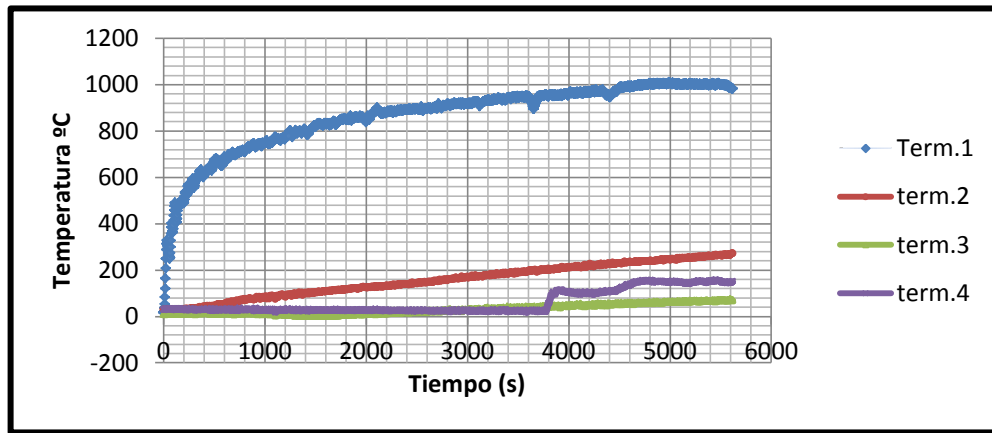


**Fuente:** Los autores

Las termocuplas mencionadas en la figura 6 sirvieron para seguir la curva de calentamiento de la norma ISO 834. En la figura 20, para una probeta cubica sometida a 1000°C la termocupla 1 fue ubicada en la cara expuesta a fuego y alcanzó en este caso 1000°C, la termocupla 2 a 4 cm de profundidad alcanzo 265°C, la termocupla 4 a 10 cm de profundidad alcanzo aproximadamente 150°C y la termocupla 3 que midió la temperatura del ambiente en el horno y alcanzó una temperatura máxima de aproximadamente 70°C. En la figura 20 se puede observar el comportamiento de la temperatura respecto al tiempo.

Al comparar los datos de las temperaturas alcanzadas por las diferentes termocuplas con los daños observados en la figura 20, se puede notar que el concreto sufre mayores daños en la cara de exposición (donde hay mayor temperatura) y estos daños a su vez se propagan en menor intensidad hacia el interior de la probeta. La transferencia de calor también sufre perdidas a medida que avanza hacia el interior de la probeta y esto queda demostrado con los datos registrados por las termocuplas que se encuentran incrustadas dentro de la probeta.

**Figura 20. Temperatura vs. Tiempo de las termocuplas para la probeta cúbica sometida a 1000°C**



**Fuente:** Los autores

**4.2.3. Ensayo de ultrasonido (VPU):** A continuación se presentan los datos obtenidos durante el ensayo de VPU para las probetas cilíndricas y cúbicas luego de someterlas a fuego, cabe recordar que a las probetas cilíndricas sometidas a 1000°C no se le pudo realizar este ensayo.

Los datos del VPU promedio en probetas cilíndricas se muestran en la tabla 10, se observa en esta tabla que la velocidad de pulso ultrasónico promedio después de someter a calentamiento las probetas disminuye, lo que puede indicar un aumento de daños tales como porosidad, agrietamiento interno, separación de la pasta y los agregados u otros defectos que hagan que el pulso transite más lentamente a través de la probeta lo cual se evidencio con la inspección visual.

**Tabla 10. Comparación VPU probetas cilíndricas antes y después de sometimiento a fuego**

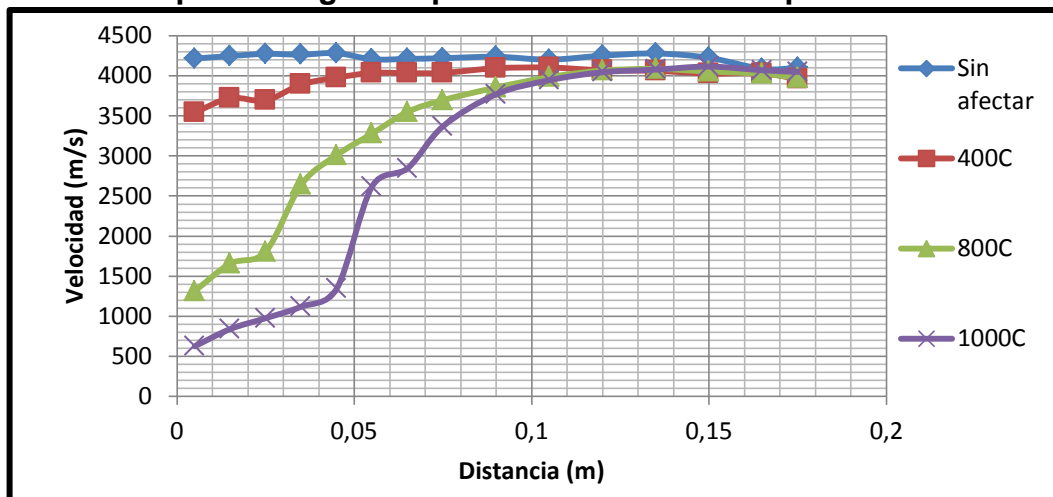
Temp. (°C)	Vp (m/s) promedio antes de fuego	Vp (m/s) promedio después de fuego	Cambio de velocidad (%)
200	3891	3462	10,25
400	3915	2663	31,97
600	3855	1129	70,71
800	3895	544	86,03
1000	3898	*N.R	*N.R
*N.R: No registra, las probetas cilíndricas sometidas a 1000°C no se ensayaron por VPU			

**Fuente:** Los autores

La figura 21 muestra una gráfica comparativa con los perfiles medios (B) de cada temperatura, se escogió este perfil porque la llama incidía de manera uniforme sobre el centro de la probeta y la figura 22 presenta gráficas de VPU de las probetas cúbicas de los diferentes perfiles de velocidad para cada temperatura de exposición.

En la figura 21 se observa la disminución de velocidad de pulso a medida que aumenta la temperatura de exposición, pero en ningún caso, luego de los 12 cm se observa una disminución significativa comparando con los datos obtenidos para la probeta cúbica sin afectar, lo que demuestra la baja conductividad del concreto.

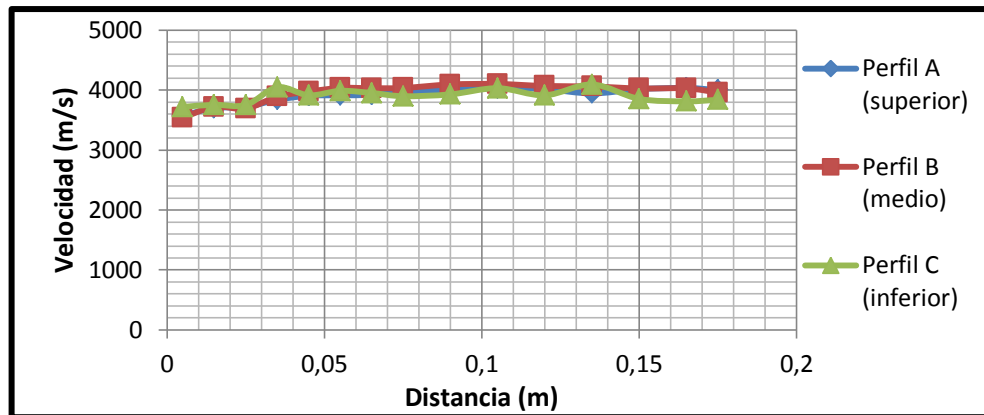
**Figura 21. Comparación gráfica probetas cúbicas en el perfil B**



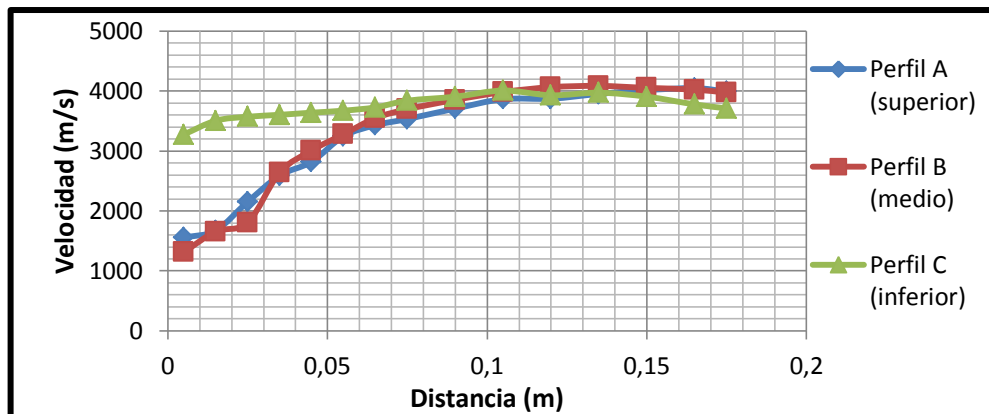
**Fuente:** Los autores

La figura 22 muestra la disminución de velocidad de pulso ultrasónico en los primeros centímetros (desde el área expuesta a fuego directo, el punto 0 de la figura 21 indica que esa es la cara donde se sometió la probeta a fuego) para las probetas sometidas a diferentes temperaturas, la figura 22 (a) muestra un posible daño en los primeros 4 cm y luego muestra mediciones de VPU similares a las observadas para probetas sin afectar, del mismo modo la figura 22 (b) presenta posibles daños hasta los 8 cm aproximadamente y la figura 22 (c) daños hasta aproximadamente 12 cm como se evidenció en la inspección visual en la figura 19 y se ratifica con la toma del VPU que presenta mayores afectaciones en los primeros centímetros.

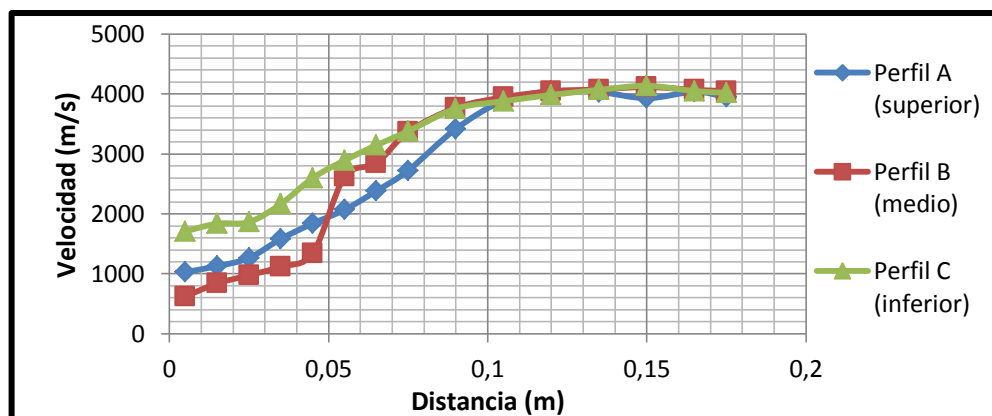
**Figura 22. Perfiles de velocidad probetas cúbicas después de ser expuestas a fuego**



**a) VPU probeta cúbica sometida a 400°C**



**b) VPU probeta cúbica sometida a 800°C**



**c) VPU probeta cúbica sometida a 1000°C**

Fuente: Los autores

#### 4.2.4. Relaciones entre velocidad de pulso y temperatura de exposición: En

la tabla 10 y 11 se presentan los datos de velocidad promedio para las probetas cilíndricas y cúbicas respectivamente a diferentes temperaturas de exposición, en esta se observa la disminución de la VPU a medida que aumenta la temperatura de exposición. En el caso de las probetas cúbicas solo se tiene en cuenta para este cálculo el perfil B.

Según la tabla 10 las probetas cilíndricas presentaron mayor disminución en la VPU para cada temperatura de exposición, lo que se debe probablemente a los tres factores mencionados anteriormente (área expuesta a fuego, tamaño de las probetas, forma y tiempo de calentamiento).

**Tabla 11. Porcentaje de pérdida de VPU para las probetas cúbicas en los tres perfiles**

Vp (m/s) promedio antes de fuego				Vp (m/s) promedio después de fuego			Cambio de velocidad (%)
Temperatura (°C)	Perfil A	Perfil B	Perfil C	Perfil A	Perfil B	Perfil C	
400	4098	4099	4009	3923	3976	3982	3
800	4122	4168	4055	3363	3421	3875	17
1000	4202	4231	4111	2781	2879	3038	32

**Fuente:** Los autores

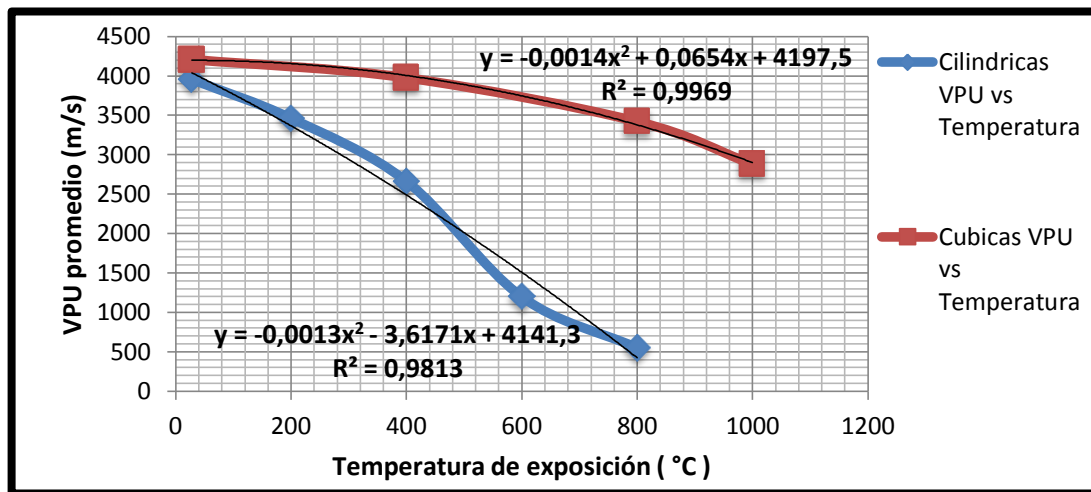
En la figura 23 muestra que para las probetas cúbicas a medida que la temperatura aumenta el concreto se ve más afectado por el fuego, por lo tanto a mayor temperatura, la velocidad de pulso que viaja a través de él disminuye. Esta tendencia se ajusta a un comportamiento que se indica mediante la expresión polinómica,  $V = -0.0014T^2 + 0.0654T + 4197.5$  con índice de correlación de  $R^2 = 0.9969$ .

Según estos datos y teniendo en cuenta la clasificación de la calidad del concreto con respecto a la velocidad de pulso ultrasónico mostrada en la tabla 2, para las

probetas cúbicas desde 600°C la calidad del concreto es cuestionable y a 1000°C la calidad es mala.

Para el caso de las probetas cilíndricas, el daño fue mayor en cada temperatura, pues se observa que la velocidad de pulso, respecto a la cúbicas a cada temperatura, fue menor y en este caso la expresión polinómica que se ajusta es  $V = -0.0013T^2 - 3.6171T + 4141.3$  con índice de correlación de  $R^2 = 0.9813$ . Como se observó en la tabla 10 para las probetas cilíndricas la calidad del concreto según sus valores de VPU, las sometidas a 200°C su calidad es cuestionable, las probetas sometidas a 400°C su calidad es pobre, para las probetas sometidas a temperaturas superiores de 600°C su calidad es muy pobre. Cuando el concreto se encuentra en el rango de VPU para el cual se clasifica con calidad pobre se encuentra inhabilitado para su uso posterior.

**Figura 23 Promedio de VPU promedio vs. Temperatura de exposición de las probetas cilíndricas y cúbicas**



**Fuente:** Los autores

La figura 23 representa los promedios del VPU para las probetas cúbicas y cilíndricas, en el caso de las probetas cúbicas se obtienen datos desde la cara afectada hasta la cara opuesta que prácticamente no mostro afectación a ninguna temperatura como se indicó en la figura 21, caso contrario para las probetas cilíndricas debido a que su forma y el entorno donde se realizó el calentamiento,

permitían una afectación más homogénea en toda la superficie de la probeta, provocando que se produjeran más daños.

**4.2.5. Ensayo de resistencia a la compresión:** La tabla 12 presenta los resultados promedio de la resistencia a la compresión que fueron obtenidos para las probetas cilíndricas seleccionadas en cada temperatura de exposición, estos resultados están expresados en MPa. Las probetas con mayor resistencia son las que no se afectaron por fuego. El valor más bajo se obtuvo para las probetas de 800°C.

**Tabla 12. Resistencia a la compresión promedio para las probetas cilíndricas**

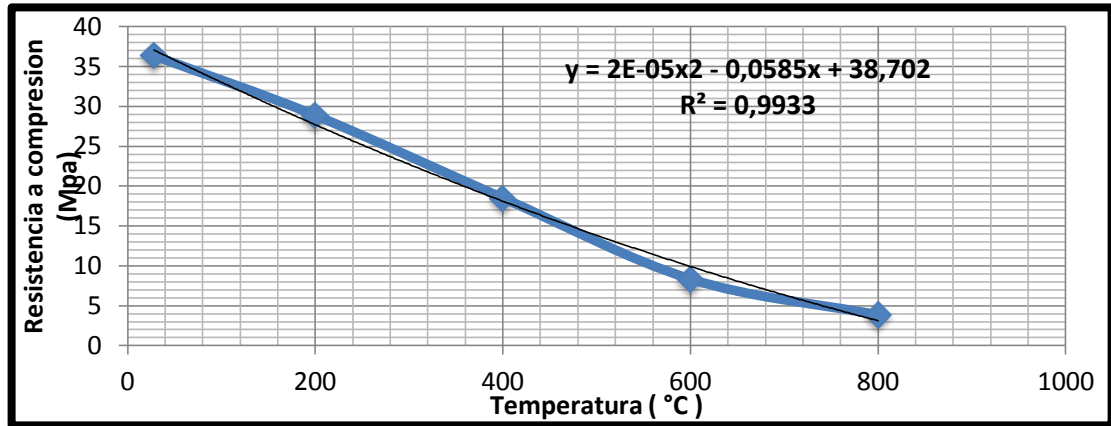
Temperatura de exposición (°C)	Resistencia a la compresión promedio (MPa)	Perdida de resistencia (%)
Probetas sin someter a fuego	36.37	0
200	28.88	20.58
400	18.51	49.08
600	8.35	77.02
800	3.84	89.44

**Fuente:** Los autores

Teniendo en cuenta la clasificación de la tabla 3 y los datos obtenidos en la tabla 12, se puede asegurar que la probeta después de ser sometida a 200°C se clasifica como de resistencia normal, para las probetas de 400°C su resistencia se clasifica como moderada, para las probetas sometidas a 600 y 800°C se clasifican como resistencia baja. En la figura 24 se representa el decrecimiento de la resistencia a medida que aumenta la temperatura.

En la figura 24 podemos ver una disminución que sigue una tendencia que se puede representar mediante la expresión,  $f_c = -2E^{-5}T^2 - 0.0585T + 38.702$  con índice de correlación  $R^2 = 0.9933$ . Esta disminución de la resistencia se debe posiblemente a la aparición de grietas entre los agregados y la pasta, las grietas en los agregados, el aumento de la porosidad y la disminución de los porcentajes de ettringita portlandita y caolinita.

**Figura 24. Resistencia a la Compresión vs. Temperatura para las probetas cilíndricas**



**Fuente:** Los autores

**4.2.6. Ensayo de porosidad abierta:** En la tabla 13 se presentan los valores promedio de porosidad abierta obtenida por método gravimétrico. Los resultados obtenidos del porosímetro de He no fueron tenidos en cuenta como se explicó anteriormente. Solo se disponen de los datos para probetas cilíndricas expuestas hasta 400°C, porque a partir de 600°C se deterioraban fácilmente al sumergirlas en agua. En el anexo D se especifican los cálculos para la tabla 13.

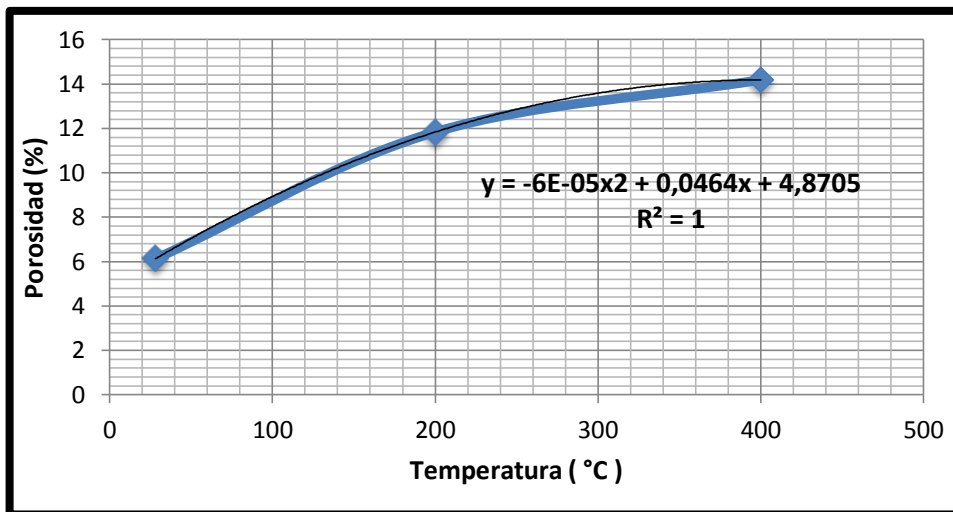
**Tabla 13. Porcentaje porosidad abierta probetas cilíndricas**

Temperatura de exposición (°C)	H (kg)	S (kg)	P (kg)	%Pa	% Porcentaje de porosidad abierta promedio
Sin afectar	4.00	2.27	4.10	5.25	6.12
Sin afectar	3.96	2.24	4.08	6.44	
Sin afectar	3.99	2.27	4.11	6.68	
200	3.82	2.10	4.06	12.22	11.83
200	3.87	2.17	4.09	11.45	
400	3.80	2.11	4.08	14.24	14.20
400	3.83	2.16	4.10	14.13	

**Fuente:** Los autores

De la figura 25 se puede afirmar que a medida que la temperatura de exposición aumenta el valor de la porosidad también crece, esto provoca que el resultado de velocidad de pulso ultrasónico disminuya como se pudo comprobar anteriormente. Con base a estos datos se obtiene la figura 26 con tendencia  $\%P.A. = -6E^{-5}T^2 + 0.0464T + 4.8705$  e índice de correlación  $R^2 = 1$

**Figura 25. Porcentaje (%) porosidad abierta vs. Temperatura de exposición para las probetas cilíndricas**



**Fuente:** Los autores

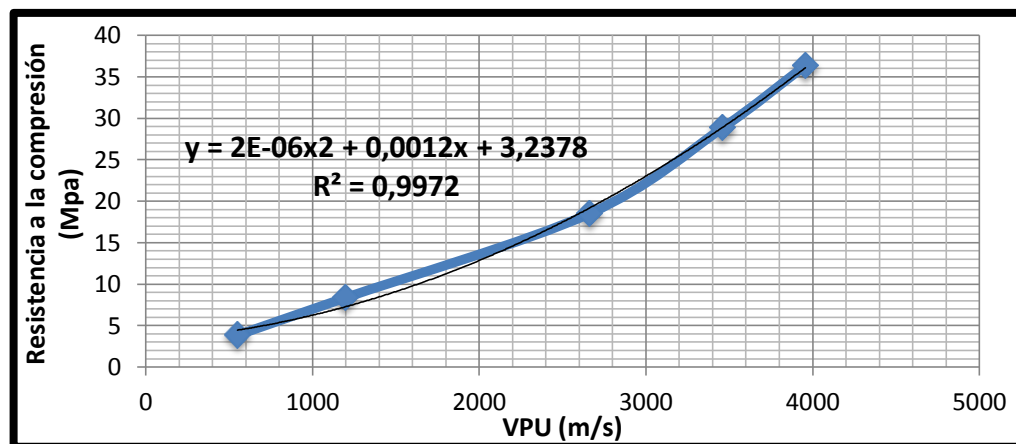
**4.2.7. Relaciones entre velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión y porosidad a diferentes temperaturas de exposición para las probetas cilíndricas:** En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos promedio de velocidad de pulso, resistencia a la compresión y porosidad abierta para las probetas sometidas a la temperatura indicada, con estos datos se obtuvieron relaciones entre cada ensayo los cuales se muestran en las figuras 26 27 y 28.

**Tabla 14. Relación resultados obtenidos de VPU, resistencia a la compresión y porosidad a cada temperatura para las probetas cilíndricas**

Temperatura (°C)	VPU (m/s)	Resistencia a la compresión (MPa)	% porosidad abierta
No afectada	3956	36,37	6.12
200	3462	28,88	11.83
400	2663	18,51	14.18
600	1129	8,35	No registra
800	544	3,84	No registra

Fuente: los autores

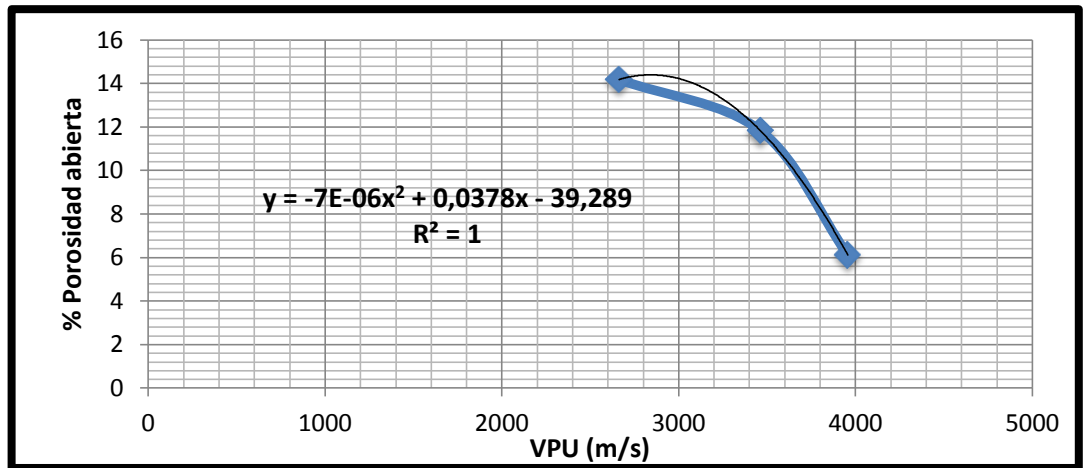
**Figura 26. Relación Resistencia a la compresión vs. VPU**



Fuente: Los autores

La relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso se representa mediante la expresión  $f_c = 2E^{-6}V_p^2 + 0.0012V_p + 3.2378$  con índice de correlación  $R^2 = 0.9972$ , donde se aprecia una relación decreciente entre resistencia a la compresión y VPU, demostrando de esta manera que a medida que disminuye la resistencia a la compresión, disminuye el VPU al aumentar la temperatura de exposición.

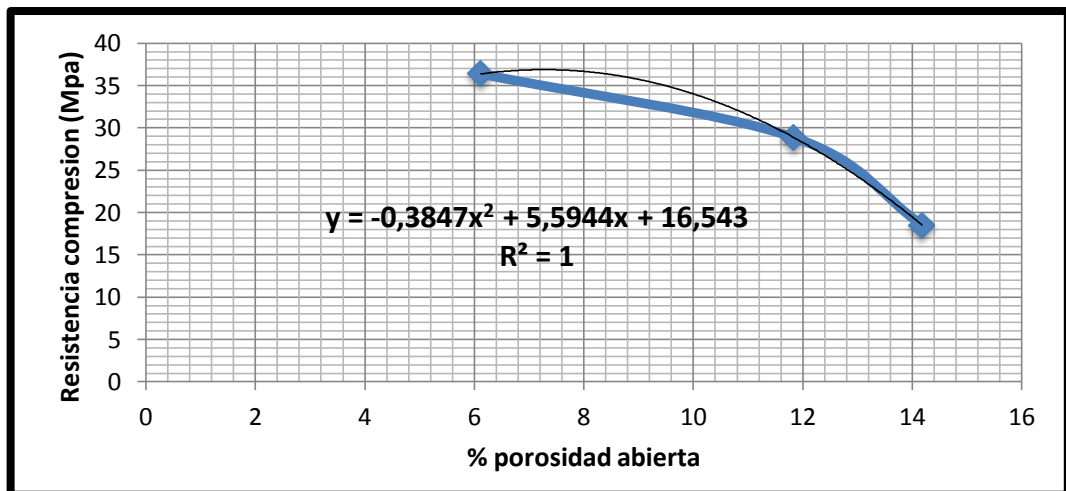
**Figura 27. Relación % Porosidad abierta vs. VPU**



Fuente: Los autores

La expresión que representa la relación entre porcentaje (%) de porosidad abierta y VPU es  $\%P.A. = -7E^{-6}V_p^2 + 0.0378V_p - 39.28$  con índice de correlación de  $R^2 = 1$ , lo que indica que a medida que aumenta la porosidad en el material la velocidad de pulso ultrasónico disminuye cuando se incrementa la temperatura de exposición.

**Figura 28. Relación Resistencia a la compresión vs. % Porosidad abierta**



Fuente: Los autores

La relación determinada entre resistencia a la compresión y porcentaje (%) porosidad abierta para las probetas cilíndricas a cada temperatura, sigue una tendencia descrita por la expresión  $f_c = -0.3847(\%P.A)^2 + 5.5944(\%P.A) + 16.543$  con un índice de correlación de  $R^2 = 1$ . Esta relación muestra que a medida que la porosidad aumenta, la resistencia a la compresión y asociando esta información con el aumento de la temperatura, se demuestra que al aumentar la temperatura disminuye la resistencia a la compresión y aumenta la porosidad.

**4.2.8. Microscopia Óptica:** Los cortes descritos en la metodología para la microscopía, fueron analizados utilizando los microscopios HIROX, OLYMPUS GX71 y el estereoscopio OLYMPUS SZ. Una comparación entre las imágenes tomadas en los diferentes microscopios arrojó como resultado que el indicado para este trabajo de investigación era el estereoscopio OLYMPUS SZ.

Como se puede apreciar en la figura 29 (a-d), la coloración de las probetas a medida que aumenta la temperatura presenta una leve variación, tornándose hasta 600°C una coloración más rosa. El cambio de coloración ocurrida, y la tonalidad rosa se presenta en mayor proporción sobre los agregados, pero esta tonalidad no es homogénea debido a la variación de coloración en estos. Respecto al mortero la variación de color es menor, dicha variación se observó más claramente a temperaturas mayores como lo mencionamos en el aparte 4.2.2 de inspección visual.

En cuanto al estado de las probetas sin afectar por fuego y la de 200°C, los cortes no presentaron cambios significativos. En estos 2 casos se observó una superficie lisa y sin grietas entre los agregados y el mortero, sólo se presentó un leve cambio de coloración una respecto a la otra.

En los cortes de 400°C se empezó a observar un ligero agrietamiento entre los agregados y el mortero, la superficie aun continua lisa pero en algunos sitios se presenta una leve rugosidad. También se observó un aumento en la coloración rosa respecto a la probeta de 200°C.

**Figura 29. Cambio de coloración y estado superficial del concreto para las probetas cilíndricas**



**a) Corte sin afectación por fuego (17x)**



**b) Corte afectado a 200°C (17x)**



**c) Corte afectado a 400°C (17x)**



**d) Corte afectado a 600°C (17x)**

**Fuente:** Los autores

El corte para la probeta sometida a 600°C presentó mayores defectos en su superficie comparado con las probetas sometidas a 200 y 400°C, con una rugosidad evidente en toda el área del corte, además se presentó en algunos sitios orificios producto del desprendimiento de agregados gruesos, también se presentó agrietamiento en el mortero y en el límite entre agregados y mortero. Se observan grietas y roturas en algunos agregados gruesos.

La característica más significativa que se pudo observar durante la realización de la microscopia fue el agrietamiento, este daño se presentó de manera frecuente en la microscopia de los cortes para las probetas cilíndricas sometidas a 600°C y en

el corte de 800°C de las probetas cúbicas, que fueron los cortes de mayor temperatura inspeccionados en el microscopio.

Las grietas se presentaron principalmente en los límites de agregado y mortero, desplazándose a través del mortero hasta alcanzar otro agregado, en algunos casos el agregado también presenta agrietamiento. En la figura 30 se puede apreciar algunas de las grietas en los cortes cilíndricos.

**Figura 30. Agrietamiento probetas cilíndricas a 600°C**



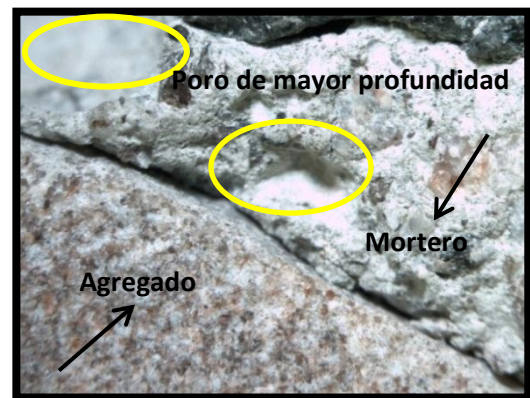
**a) Agrietamiento ruptura en agregado (17x)**



**b) Limite agregado-mortero deteriorado (17x)**



**c) Grieta limite agregado-mortero (17x)**



**d) Grieta limite 2 agregados-mortero (17x)**

**Fuente:** Los autores

En la figura 30 (a) se aprecia como el agrietamiento se produce entre el límite del agregado y el mortero, provocando en algunos casos roturas en los agregados. La figura 30 (b) muestra como el mortero alrededor de los agregados se encuentra

deteriorado presentando algunas cavidades de donde se han desprendido algunos agregados más pequeños. Las figuras 30 (c) y (d) muestran más ejemplos de las grietas encontradas entre el límite de agregado y mortero, en la figura (d) se puede observar en su parte superior izquierda, una cavidad donde falta parte de un agregado y en el centro una cavidad más pequeña donde pudo haberse desprendido un agregado más pequeño.

**Figura 31 Agrietamiento probetas cúbicas a 400°C y 800°C**



**a) Grieta desde agregado a pasta 800°C (17x) b) Grieta desde pasta a agregado 800°C (17x)**



**c) Grieta entre agregados y pasta 800°C (17x) d) Corte 400°C a 1 cm de cara expuesta (17x).**

**Fuente:** Los autores

En las figuras 31 (a-d) se aprecia algunas de las grietas encontradas en los cortes de las probetas cúbicas sometidas a 800°C en los primeros 4 a 6 cm de profundidad desde la cara sometida a fuego, luego de estos primeros centímetros

no se presentaron daños en estas probetas así como tampoco se encontraron daños aparentes en el corte realizado a la probeta de 400°C como se observa en la figura 31 (d). Las grietas que se observan en estas imágenes son la posible causa de que hayan perdido los primeros 8 centímetros de las probetas de 1000°C durante el proceso de corte.

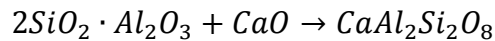
**4.2.9. Difracción rayos X a probetas sometidas a fuego:** A continuación se explican los resultados obtenidos de la difracción de rayos X para las probetas sometidas a temperaturas de 200, 400, 600, 800 y 1000°C. Estos resultados se observan en el anexo F.

**200°C:** Los resultados para las muestra de 200°C muestran la desaparición de la ettringita y el yeso respecto al DRX del concreto sin afectación por fuego, puesto que estos compuestos tienen en su composición agua de hidratación, esta agua desaparecerá con el calentamiento y el compuesto se transforma. Además se presenta una disminución en la caolinita y la portlandita respecto al concreto sin afectación.

**400°C:** Estos resultados muestran una mayor disminución en la caolinita y la portlandita respecto a los resultados de DRX de la probeta sometida a 200°C. La pérdida de estos componentes puede resultar en la disminución de la resistencia del concreto como se comprobó en los ensayos de resistencia a la compresión y VPU.

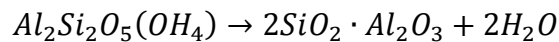
**600°C:** Los resultados para esta temperatura muestran la desaparición de la portlandita  $\text{Ca(OH)}_2$  porque de 410-420°C a 630°C se descompone en  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  y de esta manera produce una pérdida de peso por evaporación de moléculas de agua lo cual está de acuerdo con los resultados obtenidos en el pesado de las probetas, además se producen tensiones locales que provocan microfisuras en la probeta que se transforman en daños irreversibles y que se pueden hacer más visibles con el aumento de la temperatura llevando a que disminuya la resistencia a la compresión [30]. Además aparece Gismondina no cuantificada la cual es un

alumino-silicato de calcio hidratado posiblemente proveniente de la transformación de la caolinita, porque el óxido de calcio libre (óxidos provenientes de la calcinación de la calcita) se combina con los silicatos anhidros, procedentes de la descomposición de la materia arcillosa, para formar silicatos cálcicos [31], lo cual se demostró con la inspección visual, microscopia, además la disminución de la resistencia a la compresión y la VPU comprueban estos resultados.



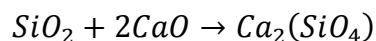
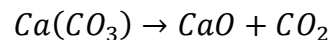
Este compuesto hidratado es la Gismondina ( $CaAl_2Si_2O_8 \cdot 4H_2O$ ).

La desaparición de la caolinita se debe a que a  $550^\circ C$  la caolinita se disocia en  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$ , con una formación inmediata de un silicato anhidro o metacaolín el cual es un componente amorfo y no se muestra en el DRX. Al desaparecer la caolinita se pierde parte de la adhesión entre los agregados y el mortero [29] y [31].



El cuarzo en este DRX posiblemente ya presento una transformación de cuarzo  $\alpha$  a cuarzo  $\beta$  puesto que esta transformación ocurre en el rango de  $500$  a  $600^\circ C$  con una expansión del 1.2% [32].

**$800^\circ C$ :** Estos resultados muestran una disminución significativa de la calcita pasando de 15.8% ( $600^\circ C$ ) a 3.6% probablemente debido al proceso de calcinación que produce (CaO) y la aparición de larnita y olivino los cuales son silicatos de calcio que posiblemente se formaron por la unión de los óxidos de calcio libres y los silicatos anhidros del metacaolín [31].



**1000°C:** Los resultados muestran una reducción de la cantidad de cuarzo significativa pasando de 26.6% (800°C) a 17.3% puesto que al calentar el cuarzo por encima de 870°C se forma un vidrio silíceo amorfo antes de transformarse a tridimita. Se presenta un aumento en la cantidad de larnita y olivino con respecto a la muestra de 800°C [31].

Los diferentes resultados desde 600°C muestran productos como silicatos de calcio y aluminio, los cuales después de ser expuestos al ambiente pueden ser hidratados y cambiar su volumen, lo cual es la posible causa de las grietas y daños agravados que se presentaron 48 horas después de ser extraídas las probetas de las muflas y estar expuestas al medio ambiente.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas a las probetas cilíndricas y cúbicas de concreto sin refuerzo, sometidas a calentamiento en muflas y a llama directa respectivamente se concluye que:

Durante la exposición a fuego del concreto, este pierde parte del material que lo compone, esta pérdida de material se ve representada con la disminución de su peso, lo que dependerá de la forma de exposición al fuego y de la temperatura alcanzada como lo muestran las relaciones halladas para la pérdida de peso contra temperatura de exposición, las cuales para las probetas cúbicas mostraron una menor pérdida como lo muestra la relación  $\%P.P = 2E^{-7}T^2 + 0.0024T - 0.041$  con índice de correlación de  $R^2 = 0.9928$  y para las probetas cilíndricas  $\%P.P = -7E^{-6}T^2 + 0.017T + 0.1912$  con índice de correlación de  $R^2 = 0.9576$ . Se debe tener en cuenta que las diferentes relaciones entre VPU, resistencia a la compresión, porosidad y temperatura determinadas son para tipos de concretos similares a los empleados en esta investigación.

Mediante el ensayo de VPU se obtuvo que la medida de velocidad disminuía con el aumento de temperatura de exposición, mostrando que a medida que la temperatura aumenta el material sufre daños progresivamente, que son más evidentes desde los 600°C para las probetas cilíndricas y desde los 800°C para las probetas cúbicas, dicha disminución se puede representar para las probetas cilíndricas mediante la expresión  $V = -0.0013T^2 - 3.6171T + 4141.3$  con índice de correlación  $R^2 = 0.9813$ , y para el caso de las probetas cúbicas la expresión que representa la disminución de velocidad es  $V = -0.0014T^2 + 0.0654T + 4197.5$  con índice de correlación de  $R^2 = 0.9969$ . Al graficar estas relaciones se comprueba que las probetas cilíndricas tuvieron menor medida de VPU a cada temperatura de exposición, lo que indica que la forma de calentamiento influye de manera importante en el deterioro general de la estructura de concreto.

Los datos recolectados de resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas evidenciaban que a medida que aumentó la temperatura de exposición, fue disminuyendo su resistencia, mostrando cambios significativos desde los 200°C perdiendo cerca del 20% de su resistencia y cerca del 90% de su resistencia al alcanzar los 800°C. Esta pérdida de resistencia a la compresión aplica a las zonas en las cuales alcanza las temperaturas indicadas, teniendo en cuenta el factor tiempo de sostenimiento, la pérdida de resistencia de las probetas cilíndricas fue mayor a medida que aumentaba la temperatura de exposición. Esto se representa gráficamente mediante la expresión  $f_c = -2E^{-5}T - 0.0585T + 38.702$  con índice de correlación  $R^2 = 0.9933$ .

En cuanto a los resultados obtenidos para porosidad abierta en las probetas cilíndricas se presentó un aumento en la porosidad a medida que aumentaba la temperatura de exposición, esto puede ser consecuencia de la deshidratación del concreto, y otras transformaciones que ocurren en este material a medida que aumenta la temperatura. Una expresión que permite graficar dicho aumento de porosidad es  $\%P.A. = -6E^{-5}T^2 + 0.0464T + 4.8705$ .

La inspección visual de las probetas cúbicas permitió verificar que las superficies de las caras expuestas a las temperaturas de 800 y 1000°C en sus primeros centímetros desde la cara de exposición hacia dentro, presentaban daños similares a los que presentaban las probetas cilíndricas sometidas a las mismas temperaturas, pero a medida que se avanzaba en esta distancia los daños disminuían significativamente. Por lo tanto para las probetas de 800 y 1000°C cúbicas los daños se presentaban en una zona de 10 a 12 cm aproximadamente desde la cara de exposición y luego de esta distancia, no se apreció ningún tipo de daño. Esto muestra que la forma de calentamiento y el tamaño de las estructuras de concreto es un factor significativo para la resistencia futura de estructuras sometidas a fuego, pues las caras expuestas directamente al fuego sufrirán daños significativos, pero a medida que aumenta la profundidad los daños son menores por la poca conductividad térmica que presenta el concreto.

Relacionando los datos encontrados se verificó que al aumentar la porosidad ocurre una pérdida de resistencia en el concreto y a su vez se produce una disminución en velocidad de pulso. La relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso fue  $f_c = 2E^{-6}V_p^2 + 0.0012V_p + 3.2378$  con índice de correlación  $R^2 = 0.9972$ , al graficar esta relación se observa la disminución de la velocidad de pulso y de la resistencia. La relación que permite graficar el comportamiento de la porosidad abierta respecto a la velocidad de pulso es  $\%P.A. = -7E^{-6}V_p^2 + 0.0378V_p - 39.28$ , esta relación representa como la velocidad de pulso disminuye al aumentar el porcentaje de porosidad abierta y la relación que muestra la disminución de la resistencia a la compresión a medida que aumenta la porosidad es  $f_c = -0.3847(\%P.A.)^2 + 5.5944(\%P.A.) + 16.543$ .

Después del calentamiento y posterior enfriamiento los daños aumentan al pasar el tiempo, pues las probetas cilíndricas sometidas a 600, 800 y 1000°C luego de haber sido retiradas del enfriamiento en muflas y puestas a temperatura ambiente aumentaron sus daños al pasar los días aumentando las grietas en las de 600°C y desmoronándose por completo las probetas de 800°C y 1000°C luego de dos días al aire.

Por las imágenes obtenidas durante la microscopia en los cortes realizados a probetas cilíndricas y cúbicas, se concluye que el mayor daño a altas temperaturas (desde 600°C) se encuentra en el límite entre agregados y mortero, presentándose en este límite agrietamiento, fractura del mortero y de algunos agregados, aparentemente las grietas comienzan con la separación de los agregados del mortero por la diferente dilatación que estos tienen durante el calentamiento, lo que posteriormente forma grietas que pasan de un agregado a otro a través del mortero. Además se encontró a temperaturas mayores de 600°C un gran daño en el mortero, dejando la superficie de los cortes muy rugosos y porosos.

Los resultados de difracción de rayos X, muestran desaparición de yeso y ettringita a 200°C y disminución de portlandita y caolinita desde 200 hasta 600°C, la transformación y desaparición de estos compuestos, causa la pérdida de resistencia en el concreto y promueve la aparición de otros compuestos como gismondina, larnita y olivino luego de la calcinación de la calcita a partir de 800°C, estos tipos de compuestos como el caso de la gismondina, pueden llegar a producirse luego de que el concreto es expuesto al medio ambiente debido a la absorción de humedad, causando un aumento en el agrietamiento.

Esta investigación concluye que el fuego es un agente agresivo a la superficie del concreto principalmente en los primeros 12 cm, debido a que la mayoría de los daños se centran en esta zona dependiendo de su temperatura de exposición, lo que hace que la pared de las estructuras sometidas a calentamiento en elevadas temperaturas se vea seriamente deteriorada y pierda parte de su resistencia, teniendo diferentes características a medida que se adentra en el concreto. Si la temperatura de exposición es mayor a los 600°C en la superficie, puede que se produzcan grietas que viajan hacia el interior de la estructura y disminuyan aún más su resistencia, puesto que existen zonas sometidas a diferentes valores de temperatura y la dilatación de sus agregados va a ser diferente.

Se comprobó la efectividad y sensibilidad de la inspección del concreto al ser afectados por fuego a través de VPU, pues la técnica es capaz de revelar cambios en el material desde temperatura ambiente y para el caso de esta investigación al ser sometidos a fuego desde 200°C, demostrando que desde dicha temperatura ya existen algunas variaciones que hacen que el concreto pierda resistencia.

## 6. RECOMENDACIONES

Al finalizar el presente trabajo de investigación se dan las siguientes recomendaciones:

La fabricación o adecuación de un horno de llama directa, donde la llama incida en las probetas desde abajo lográndose con esto un calentamiento más uniforme y de paso esto permitiría controlar más fácilmente la temperatura para poder seguir la curva de calentamiento.

Realizar la prueba de calentamiento con llama directa en cilindros de 20 cm de largo y 10 cm de diámetro, para comprobar que el daño aumenta por ser probetas más pequeñas y si fuera posible que la llama cubriera toda la probeta para que su calentamiento fuera uniforme.

Si se desea observar un patrón de daños que disminuya progresivamente hacia el interior, esto se puede lograr con probetas cilíndricas de mayor diámetro sometidas a calentamiento en las muflas, pero apagando la mufla al momento de alcanzar la temperatura. Esto permitiría ver daños de diferentes isotermas de temperatura en la microscopia de una sola probeta.

Hacer estudios en cuanto a la afectación que tiene el tamaño y forma de las probetas en los diferentes resultados obtenidos de los ensayos realizados, usando la misma forma de calentamiento y así comprobar si a menor tamaño de las probetas se presentarían mayores daños.

Investigar la afectación de los diferentes agregados utilizados en concretos, sometiendo estos a calentamiento, con el fin de revisar por separado sus cambios, así mismo es recomendable realizar una investigación a concretos reforzados con acero revisando así, como la temperatura afecta toda la estructura.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] Harry Nelson Cuesta González, Héctor Fabián Luque Pinzón, Evaluación del efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego, Trabajo de grado Ingeniería metalúrgica, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales, 2010, 120p.

[2] The Concrete Centre<sup>TM</sup>, Concrete and Fire, [online], First published 200., [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.irishconcrete.ie/downloads/Concrete\\_and\\_Fire.pdf](http://www.irishconcrete.ie/downloads/Concrete_and_Fire.pdf). Visitada en enero de 2012.

[3] LEMIT-CIC-CONICET, Hormigones expuestos a altas temperaturas: evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas, Anales SAM 1999, facultad de ingeniería UNLP. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://biblio.unicen.edu.ar/download/sam99/indice/trabajos/titu123.pdf>. Visitada en enero de 2012

[4] B. Georgali, P.E. Tsakiridis / Cement & Concrete Composites 27 (2005) 255–259, Microstructure of fire-damaged concrete. A case study, Science direct [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504000307>. Visitada en enero de 2012

[5] Geraldine L. Charreau, Fabio S. Luna, INTI-CECON, Efecto del fuego sobre los hormigones: Alteraciones sufridas por los agregados [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www4.inti.gov.ar/Gd/jornadas2000/TrabCompl/CECON-3J-190.PDF>. Visitada en enero de 2012.

[6] © Cement Concrete & Aggregates Australia 2009, Guide to Fire Safety of Concrete Buildings, First Published July 2010, ISBN 978-1-877023-27-9, [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.concrete.net.au/publications/pdf/Fire\\_Safety.pdf](http://www.concrete.net.au/publications/pdf/Fire_Safety.pdf). Visitada en enero de 2012

[7] National Ready Mixed Concrete Association, NRMCA, Concrete in Practice, What, Why and How?, CIP 40-Aggregate Popouts. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/40p.pdf>. Visitada en enero de 2012

- [8] Señas L., Maiza P., Priano C., Marfil S., Valea J., CIMPAR 2010, Evaluación de elementos estructurales de hormigón expuestos a un incendio. [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar\\_2010/Topico%201/CINPAR%20016.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%201/CINPAR%20016.pdf) . Visitada en enero de 2012
- [9] ISO 834 (1975) “Fire Resistance Test – Element of Building, Construction”. ISO – International Organization Standardization.
- [10] Ercolani, G.D., Ortega N.F. Señas L., Departamento de ingeniería, Universidad Nacional del Sur, IV Conferencia panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007, Empleo de ultrasonidos y esclerometria en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/37.pdf>. Visitada en enero de 2012.
- [11] NTC 121 (1995). Cemento portland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC – Norma Técnica Colombiana.
- [12] NTC 321 (1995). Cemento portland. Especificaciones químicas. NTC – Norma Técnica Colombiana.
- [13] NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC – Norma Técnica Colombiana.
- [14] NTC 176 (1995). Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. NTC – Norma Técnica Colombiana.
- [15] NTC 237 (1995). Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. NTC – Norma Técnica Colombiana.
- [16] NTC 77 (1995). Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC – Norma Técnica Colombiana.
- [17] NTC 78 (1995). Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75  $\mu\text{m}$  en agregados minerales. NTC – Norma Técnica Colombiana.
- [18] ACI 211R (2001). Diseños de mezcla de concreto. ACI – American Concrete Institute.

[19] NTC 1377 (1995).Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[20] NTC 4325 (1997) Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto. NTC – Norma Técnica Colombiana.

[21] SOLÍS R; MORENO Erick. y R. Castillo Pak. Predicción de la Resistencia del Concreto con Base en la Velocidad de Pulso Ultrasónico y un Índice de Calidad de los Agregados. p.42.

[22] ASTM C39/C39-M04. United States. ASTM – International American Society for Testing and Materials.

[23] CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU RESISTENCIA. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm> Visitado en marzo de 2013.

[24] Manual de mineralogía DANA-HURLBUT segunda edición, editorial Reverte S.A.

[25] CAOLIN CALCINADO USADO COMO ADITIVO MINERAL AL CEMENTO PORTLAND., vol. 2 año 2000 pag.132 [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=tRKNQIFpPPsC>. Visitado en abril de 2013

[26] ETRINGITA Y EXPANSIÓN RETARDADAS. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/etringita-y-expansion-retardadas-por.html>. Visitado en abril de 2013.

[27] RESISTENCIA SULFATOS [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.Resistencia.SULFATOS.pdf>. Visitado en abril de 2013.

[28] New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. [En línea] Pagina Web. Disponible en:<http://www.deepdyve.com/lp/elsevier/new-ndt-techniques-for-the-assessment-of-fire-damaged-concrete-xe1RnM6PsZ>. Visitado en abril de 2013.

[29] EFECTO DEL FUEGO SOBRE LOS HORMIGONES. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www4.inti.gov.ar/Gd/jornadas2000/TrabCompl/CECON-3J-190.PDF>. Visitada en marzo de 2013.

[30] INFLUENCIA DE DOS TIPOS DE CENIZAS VOLANTES ESPAÑOLAS EN LA MICROESTRUCTURA Y DURABILIDAD DE LA PASTA DE CEMENTO PORTLAND HIDRATADO. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://biblioteca.ucm.es/tesis/19911996/X/0/X0024801.pdf>. Visitado en abril de 2013.

[31] ANALISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE CERAMICAS IBERICAS VALENCIANAS. [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.museuprehistoriavalencia.com/resources/files/TV/TV045\\_Anton.pdf](http://www.museuprehistoriavalencia.com/resources/files/TV/TV045_Anton.pdf). Visitado en abril de 2013.

[32] HORMIGONES EXPUESTOS A ALTAS TEMPERATURAS: EVALUACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y OTRAS PROPIEDADES FÍSICAS. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://biblio.unicen.edu.ar/download/sam99/indice/trabajos/titu123.pdf>. Visitado en abril de 2013.

[33] SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Durabilidad y patología del concreto. Instituto del concreto, 2006, pag 38.

## BIBLIOGRAFÍA

ACI 211R (2001). Diseños de mezcla de concreto. ACI – American Concrete Institute

ANALISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE CERAMICAS IBERICAS VALENCIANAS. [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.museuprehistoriavalencia.com/resources/files/TV/TV045\\_Anton.pdf](http://www.museuprehistoriavalencia.com/resources/files/TV/TV045_Anton.pdf). Visitado en abril de 2013.

ASTM C39/C39-M04. United States. ASTM – International American Society for Testing and Materials

B. Georgali, P.E. Tsakiridis / Cement & Concrete Composites 27 (2005) 255–259, Microstructure of fire-damaged concrete. A case study, Science direct [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946504000307>. Visitada en enero de 2012

CAOLIN CALCINADO USADO COMO ADITIVO MINERAL AL CEMENTO PORTLAND., vol. 2 año 2000 pag.132 [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=tRKNQIFpPPsC>. Visitado en abril de 2013

Cement Concrete & Aggregates Australia 2009, Guide to Fire Safety of Concrete Buildings, First Published July 2010, ISBN 978-1-877023-27-9, [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.concrete.net.au/publications/pdf/Fire\\_Safety.pdf](http://www.concrete.net.au/publications/pdf/Fire_Safety.pdf). Visitada en enero de 2012

CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU RESISTENCIA. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm> Visitado en marzo de 2013

EFEECTO DEL FUEGO SOBRE LOS HORMIGONES. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www4.inti.gov.ar/Gd/jornadas2000/TrabCompl/CECON-3J-190.PDF>. Visitada en marzo de 2013.

Ercolani, G.D., Ortega N.F. Señas L., Departamento de ingeniería, Universidad Nacional del Sur, IV Conferencia panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007, Empleo de ultrasonidos y esclerometria en el diagnóstico de estructuras de

hormigón afectadas por elevadas temperaturas. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/37.pdf>. Visitada en enero de 2012.

ETRINGITA Y EXPANSIÓN RETARDADAS. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/etringita-y-expansio-n-retardadas-por.html>. Visitado en abril de 2013.

Geraldine L. Charreau, Fabio S. Luna, INTI-CECON, Efecto del fuego sobre los hormigones: Alteraciones sufridas por los agregados [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www4.inti.gov.ar/Gd/jornadas2000/TrabCompl/CECON-3J-190.PDF>. Visitada en enero de 2012.

Harry Nelson Cuesta González, Héctor Fabián Luque Pinzón, Evaluación del efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego, Trabajo de grado Ingeniería metalúrgica, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales, 2010, 120p.

HORMIGONES EXPUESTOS A ALTAS TEMPERATURAS: EVALUACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y OTRAS PROPIEDADES FÍSICAS. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://biblio.unicen.edu.ar/download/sam99/indice/trabajos/titu123.pdf>. Visitado en abril de 2013.

INFLUENCIA DE DOS TIPOS DE CENIZAS VOLANTES ESPAÑOLAS EN LA MICROESTRUCTURA Y DURABILIDAD DE LA PASTA DE CEMENTO PORTLAND HIDRATADO. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://biblioteca.ucm.es/tesis/19911996/X/0/X0024801.pdf>. Visitado en abril de 2013.

ISO 834 (1975) “Fire Resistance Test – Element of Building, Construction”. ISO – International Organization Standardization.

LEMIT-CIC-CONICET, Hormigones expuestos a altas temperaturas: evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas, Anales SAM 1999, facultad de ingeniería UNLP. [En línea] Pagina Web. Disponible en:

<http://biblio.unicen.edu.ar/download/sam99/indice/trabajos/titu123.pdf>. Visitada en enero de 2012

Manual de mineralogía DANA-HURLBUT segunda edición, editorial Reverte S.A.

National Ready Mixed Concrete Association, NRMCA, Concrete in Practice, What, Why and How?, CIP 40-Aggregate Popouts. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/40p.pdf>. Visitada en enero de 2012

New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures. [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www.deepdyve.com/lp/elsevier/new-ndt-techniques-for-the-assessment-of-fire-damaged-concrete-xe1RnM6PsZ>. Visitado en abril de 2013.

NTC 121 (1995). Cemento portland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 1377 (1995).Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 176 (1995).Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 237 (1995).Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 321 (1995). Cemento portland. Especificaciones químicas. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 4325 (1997) Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico a través del concreto. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 77 (1995).Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 78 (1995).Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 µm en agregados minerales. NTC – Norma Técnica Colombiana.

NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados. NTC – Norma Técnica Colombiana.

RESISTENCIA SULFATOS [En línea] Pagina Web. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.Resistencia.SULFATOS.pdf>. Visitado en abril de 2013.

SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Durabilidad y patología del concreto. Instituto del concreto, 2006, pag 38.

Señas L., Maiza P., Priano C., Marfil S., Valea J., CIMPAN 2010, Evaluación de elementos estructurales de hormigón expuestos a un incendio. [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar\\_2010/Topico%201/CINPAR%20016.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%201/CINPAR%20016.pdf) . Visitada en enero de 2012

SOLÍS R; MORENO Erick. y R. Castillo Pak. Predicción de la Resistencia del Concreto con Base en la Velocidad de Pulso Ultrasónico y un Índice de Calidad de los Agregados. p.42.

The Concrete Centre<sup>TM</sup>, Concrete and Fire, [online], First published 200., [En línea] Pagina Web. Disponible en: [http://www.irishconcrete.ie/downloads/Concrete\\_and\\_Fire.pdf](http://www.irishconcrete.ie/downloads/Concrete_and_Fire.pdf). Visitada en enero de 2012.

## ANEXOS

### ANEXOS A. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

#### ETAPA 1. Caracterización de la materia prima

En la realización de esta etapa se hizo un análisis granulométrico a los agregados finos y gruesos basado en las normas NTC 92 [13], NTC 176 [14] y NTC 237[15] con el fin de determinar sus principales propiedades, las cuales se pueden observar en siguiente tabla:

#### Caracterización de la materia prima

Características	Agregado Grueso	Agregado fino
Gravedad específica aparente SSS	2.659	2.612
Peso unitario suelto (Kg/m <sup>3</sup> )	1408.62	1393.42
Peso unitario Compactado (Kg/m <sup>3</sup> )	1523.15	1606.22
% absorción	0.63	2.90
Porcentaje de vacíos %	42.72	38.51

**Fuente:** Los autores

Se realizó la clasificación de los agregados por tamaño según las normas NTC 77 [16] y NTC 78 [17]. Luego de caracterizado el material se realizó el análisis granulométrico del agregado fino utilizando una serie de tamices y pesando el retenido de cada uno de ellos, con estos pesos se pueden obtener los resultados de la siguiente tabla.

#### Análisis granulométrico agregado fino

TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
4	0.4	0.04	0.04	99.96
8	111.2	11.25	11.29	88.71
16	210.8	21.33	32.62	67.38
30	252.3	25.52	58.14	41.86
50	265.3	26.84	84.98	15.02
100	95.9	9.70	94.68	5.32
fondo	52.6	5.32	100	0

**Fuente:** Los autores

Para la determinación del módulo de finura del agregado fino se debe sumar los datos de % retenido acumulado de la tabla anterior y dicha suma se divide en 100.

$$\text{Modulo de finura} = \frac{\sum \% \text{Retenido acumulado}}{100}$$

$$\text{Modulo de finura} = \frac{281.75}{100} = 2.8175$$

## ANEXOS B. DISEÑO DE MEZCLA

Se utilizó el método ACI 211 para la realización del diseño de mezcla con el cual se fabricaron las probetas de estudio. A continuación se presentan los pasos realizados para la obtención del diseño de mezcla.

- i. Selección del asentamiento:** El tipo de asentamiento se debe seleccionar según el tipo de construcción y el riesgo de segregación o dificultad para trabajar el concreto según su consistencia. Se determinó como adecuado un asentamiento de 50 a 100 mm.
  
- ii. Selección del tamaño máximo de agregado:** El tamaño máximo de agregado debe ser el mayor económicamente disponible, pero teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura el agregado de ser de 1/5 del ancho del elemento, según esto, como el mínimo espesor presentado en nuestras probetas es de 3.93 in, si dividimos en 5 sería 0.78 in. Por esta razón el tamaño máximo adecuado sería  $\frac{3}{4}$  in o 0.75 in (19 mm).
  
- iii. Estimación del contenido de agua:** La cantidad de agua adecuada para obtener un determinado asentamiento depende del tamaño máximo de concreto, tomando como asentamiento 50-100 y tamaño máximo de agregado de 19 mm, se estima que la cantidad de agua adecuada es de 202 Kg/m<sup>3</sup> de concreto.

**iv. Selección de la relación Agua/Cemento:** La selección de la relación A/C dependen de la resistencia requerida y del tipo de estructura deseada. Ajustándonos a los objetivos del libro se escogió una relación A/C de 0.5 la cual según tablas otorga una resistencia después de 28 días entre 25 a 35 MPa.

**v. Calculo de contenido de cemento:** La cantidad de cemento para la mezcla se obtiene según la relación Agua/cemento como se muestra en la ecuación siguiente.

$$C = \frac{a}{a/c}$$

$$C = \frac{202 (Kg/m^3)}{0.5} = 404 (Kg/m^3)$$

**vi. Calculo del contenido de agregado grueso:** El volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto depende solamente del tamaño máximo de agregado y del módulo de finura del agregado fino. Utilizando estos datos y la figura 9-3 de la ACI 211 se obtiene el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto de 0.62, la cual debemos multiplicar por el peso unitario compactado del agregado grueso el cual fue de 1523.15 Kg/m<sup>3</sup>. Por lo que el contenido de agregado grueso deberá ser de 944.35 Kg/m<sup>3</sup> de concreto.

**vii. Contenido del agregado fino:** El volumen de agregado fino se puede calcular restando los volúmenes de agua, cemento y agregado grueso hallados a un metro cubico.

$$Vol. Agregado Fino: 1000 - \left[ 202 + \left( \frac{404}{3.03} \right) + \left( \frac{944.35}{2.659} \right) \right] = 309.51$$

$$Cantidad \frac{agregado\ fino}{m^3} = 309.51 \times 2.612 = \frac{808.45 Kg}{m^3}$$

La tabla siguiente muestra la dosificación utilizada para la fabricación de las probetas cubicas y cilíndricas realizadas en el proyecto con base a 1m<sup>3</sup> de concreto.

### Dosificación para fabricación de probetas

Constituyentes	Masa (kg) para 1m <sup>3</sup>	Masa (kg) para 40 probetas cilíndricas	Masa (kg) para 10 probetas cubicas
Agua	202	13.30	16.16
Cemento	404	26.61	32.32
Agregado fino	808.45	53.26	64.67
Agregado Grueso	944.35	61.21	75.54

**Fuente:** Los autores

### ANEXOS C.REGISTRO DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Los datos de resistencia a la compresión fueron hallados según la ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A}$$

Dónde:

$f_c$  : Resistencia a la compresión.

$F$  : Fuerza aplicada

$A$  : Área de la sección transversal

El área donde se aplicaba la fuerza para las probetas cilíndricas es  $A = \pi * \frac{\phi^2}{4}$  que para las dimensiones usadas es  $A = 78.54 \text{ cm}^2$ . El dato de la fuerza aplicada por la máquina de ensayos de compresión marca TREBEL se da en Kgf, por lo que la resistencia tendría valores de (Kgf/cm<sup>2</sup>) y para pasar a MPa usamos un factor de conversión multiplicando el resultado por 0.098067.

## DATOS TOMADOS PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Temperatura de exposición (°C)	Resistencia a la compresión (MPa)
<b>Sin afectar</b>	34.49
	35.74
	38.88
Promedio (sin afectar)	<b>36.37</b>
<b>200</b>	30.22
	30.72
	25.71
Promedio (200)	<b>28.88</b>
<b>400</b>	20.06
	16.93
	18.56
Promedio (400)	<b>18.51</b>
<b>600</b>	8.15
	7.52
	9.40
Promedio (600)	<b>8.35</b>
<b>800</b>	3.76
	3.88
	3.88
Promedio (800)	<b>3.84</b>

Fuente: Los autores

## ANEXOS D. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE POROSIDAD ABIERTA

Los datos de % de porosidad abierta fueron hallados utilizando la ecuación:

$$\%Pa = \frac{V_{pa}}{V_T} \times 100\% = \frac{H-P}{H-S} \times 100\% \quad [33]$$

Dónde:

$\%Pa$ : % de porosidad abierta

$V_{pa}$ : Volumen ocupado por los poros abiertos

$V_T$ : Volumen total

$H$ : Masa de la probeta húmeda

$P$ : Masa de la probeta seca

$S$ : Masa de la probeta sumergida

El valor P es el peso de la probeta seca, el valor H se halla dejando la probeta sumergida en agua 24 horas y luego se extrae y se seca su superficie con un trapo ligeramente humedecido, con el fin de que solo se seque su superficie y luego se pesa. El valor S es el peso hallado con la probeta suspendida en agua utilizando una balanza hidrostática.

**ANEXOS E. REGISTRO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (VPU)**

**VPU Probetas cilíndricas**

VPU (m/s) antes de someter a fuego	Temperatura (°C) de exposición probetas cilíndricas	VPU (m/s) después de someter a fuego
3906	No afectada	N.R.
3912		
4004		
3959		
3944		
3936		
4004		
3978	200	3493
3907		3460
3936		3515
3913		3464
3794		3336
3817		3503
4003	400	2690
3880		2565
3904		2409
3811		2801
3871		2551
4023		2961
3854	600	1060
3975		1006
3859		978
3954		1666
3696		1275
3791		1195
3848	800	599
3905		685
3944		452
3875		512
3962		521
3918		459
3955	1000	N.R.
3867		
4004		
3904		
3863		
3794		
N.R. No se registró VPU para dichas probetas		

**Fuente:** Los autores

## VPU Probetas cúbicas

VPU (m/s) probetas cúbicas afectadas por fuego																	
Temp.(°C)	Perfil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	5%
Sin Afectar	A	4299	4305	4294	4235	4226	4212	4220	4209	4220	4200	4130	4077	4087	4137	4105	8,4
	B	4283	4255	4184	4139	4178	4206	4220	4213	4197	4169	4122	4132	4154	4120	4003	
	C	4089	4073	4078	4041	4063	4084	4163	4079	3950	4041	4084	4059	3943	4006	3945	
400	A	3543	3615	3733	3896	3939	3955	3963	3998	3980	4034	4051	4028	4059	4051	4006	13,8
	B	3625	3806	3808	3910	3994	4028	4053	4069	4080	4105	4111	4090	4042	3963	3958	
	C	3837	3870	3913	4055	4002	4054	4038	3974	3935	4078	4029	4092	3976	3945	3925	
800	A	1735	1866	2275	2805	3031	3401	3559	3729	3888	3959	4004	4036	4049	4084	4018	57,9
	B	1721	1943	2278	2875	3238	3449	3683	3819	3947	4052	4084	4092	4090	4045	4000	
	C	3569	3712	3646	3768	3773	3839	3934	3994	4034	4079	4035	4033	3979	3905	3824	
1000	A	1133	1197	1453	1706	1932	2164	2456	2803	3328	3777	3958	3894	3933	4026	3949	79,2
	B	850	1002	1095	1214	1362	2940	3194	3552	3821	3931	3977	4009	4092	4080	4059	
	C	1472	1652	1716	1930	2358	2706	2957	3467	3742	3804	3926	4029	3982	3944	3886	

Fuente: Los autores

## ANEXOS F. DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

### CONCRETO 200°C (C5CV)

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-87-2096	Cuarzo	39.6 % (0.2)
	Ca ( OH ) <sub>2</sub>	000-44-1481	Portlandita	10.6 % (0.1)
	Ca ( CO <sub>3</sub> )	010-72-4582	Calcita	10.5 % (0.1)
	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-89-6429	Albita	9.7 % (0.2)
	( Mg, Fe ) <sub>6</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>8</sub>	000-29-0701	Clinocloro	7.2 % (0.2)
	Ti O <sub>2</sub>	010-75-2545	Anatasa	N.C
	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( OH ) <sub>4</sub>	000-58-2028	Caolinita	3.8 % (0.1)
	K Al <sub>2</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-58-2037	Moscovita	5.5 % (0.2)
	K <sub>0.96</sub> Na <sub>0.04</sub> Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	010-83-1895	Microclina	<1 %
K <sub>0.936</sub> ( Fe <sub>2.568</sub> Al <sub>0.504</sub> ) ( Al <sub>1.41</sub> Si <sub>2.59</sub> ) O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	010-74-2574	Annita	1.7 % (0.1)	
Total Cristalino				88.6 %
Amorfos y otros				11.2 %

### CONCRETO 400°C (C5CB)

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-87-2096	Cuarzo	25.1 % (0.3)
	Ca ( OH ) <sub>2</sub>	000-44-1481	Portlandita	8.9 % (0.1)
	Ca ( CO <sub>3</sub> )	010-72-4582	Calcita	12.3 % (0.4)
	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-89-6424	Albita	7.2 % (0.3)
	( Mg, Fe ) <sub>6</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>8</sub>	000-29-0701	Clinocloro	N.C
	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( OH ) <sub>4</sub>	000-58-2006	Caolinita	<1 %
	K Al <sub>2</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-58-2037	Moscovita	5.8 % (0.2)
	K <sub>0.96</sub> Na <sub>0.04</sub> Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	010-83-1895	Microclina	<1 %
Total Cristalino				60.9 %
Amorfos y otros				37.2 %

### CONCRETO 600°C (C5CQ)

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-87-2096	Cuarzo	29.3 % (0.2)
	Ca <sub>4</sub> ( Al <sub>8</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>32</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>16</sub>	010-81-1858	Gismondina	N.C
	Ca ( CO <sub>3</sub> )	010-72-1652	Calcita	15.8 % (0.4)
	( Na <sub>0.84</sub> Ca <sub>0.16</sub> ) Al <sub>1.16</sub> Si <sub>2.84</sub> O <sub>8</sub>	010-76-0927	Albita Cálctica	3.5 % (0.2)
	( Mg, Fe ) <sub>6</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>8</sub>	000-29-0701	Clinocloro	N.C
	Ca <sub>2</sub> Fe Al O <sub>5</sub>	010-70-2764	Browmillerita	8.0 % (0.2)
	K Al <sub>2</sub> ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-06-0263	Moscovita	21.6 % (0.4)
	K <sub>0.94</sub> Na <sub>0.06</sub> Al <sub>0.95</sub> Si <sub>3.05</sub> O <sub>8</sub>	010-76-0829	Microclina	1.1 % (0.1)
Total Cristalino				79.3 %
Amorfos y otros				20.7 %

### CONCRETO 800°C (C5CW)

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-87-2096	Cuarzo	26.6 % (0.2)
	Ca Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> · 4 H <sub>2</sub> O	000-20-0452	Gismondina	N.C
	Ca ( CO <sub>3</sub> )	010-72-4582	Calcita	3.6 % (0.2)
	Ca <sub>2</sub> ( Si O <sub>4</sub> )	010-83-0462	Larnita	5.9 % (0.2)
	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-89-6429	Albita	9.2 % (0.2)
	Ca <sub>2</sub> ( Si O <sub>4</sub> )	010-86-0399	Olivino	16.2 % (0.2)
	K Al <sub>2</sub> ( Si <sub>3</sub> Al ) O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-06-0263	Moscovita	16.4 % (0.2)
	K <sub>0.96</sub> Na <sub>0.04</sub> Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	010-83-1895	Microclina	11.1 % (0.2)
K <sub>0.936</sub> ( Fe <sub>2.568</sub> Al <sub>0.504</sub> ) ( Al <sub>1.41</sub> Si <sub>2.59</sub> ) O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	010-74-2574	Annita	N.C	
Total Cristalino				89.0 %
Amorfos y otros				11.0 %

### CONCRETO 1000°C (C5CW)

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO (D.E)
Cristalinos	Si O <sub>2</sub>	010-85-0795	Cuarzo	17.3 % (0.2)
	Ca Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> · 4 H <sub>2</sub> O	000-20-0452	Gismondina	12.0 % (0.2)
	Ca ( CO <sub>3</sub> )	010-72-4582	Calcita	2.5 % (0.1)
	Ca <sub>2</sub> ( Si O <sub>4</sub> )	010-76-3607	Larnita	13.6 % (0.2)
	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	010-89-6427	Albita	4.6 % (0.1)
	Ca <sub>2</sub> ( Si O <sub>4</sub> )	000-31-0297	Olivino	19.8 % (0.3)
	K Al <sub>2</sub> ( Si, Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( OH ) <sub>2</sub>	000-58-2037	Moscovita	9.6 % (0.3)
	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	000-22-0687	Microclina	9.9 % (0.3)
Total Cristalino				89.3 %
Amorfos y otros				10.7 %

Nota:

**N.C = No Cuantificable** (La(s) fase(s) son identificadas pero debido a su baja proporción no es posible refinar sus datos cristalográficos necesarios para su respectiva cuantificación)

**D.E = Desviación estándar**