

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE CONCRETO REFORZADO Y
ADICIONADO CON FIBRA EXPUESTO A FUEGO

MARÍA VICTORIA LOPEZ DE LA HOZ
WILLIAM JOSIMAR SAENZ PEÑALOZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
Y FISCO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIVIL
BUCARAMANGA

2012

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE CONCRETO REFORZADO Y
ADICIONADO CON FIBRA EXPUESTO A FUEGO

MARIA VICTORIA LÓPEZ DE LA HOZ
WILLIAM JOSIMAR SAENZ PEÑALOZA

Trabajo de grado realizado para optar el título de ingeniero metalúrgico y Civil

DIRECTOR
Ph.D. RICARDO CRUZ

COORDIRECTORA
Msc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTÍZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
Y FISCO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIVIL
BUCARAMANGA

2012

*A Dios por estar siempre a mi lado en todos estos años de estudio, por guiar mi camino,
por ser mi motor de vida y darme las fuerzas necesarias para superar cada obstáculo.*

*A mi madre por ser esa persona constante y perseverante, por su amor, su dedicación, sus
oraciones y su gran apoyo, sin la compañía de ella nada de esto hubiera sido posible.*

*A mi abuelo por motivarme siempre a salir adelante, por inculcarme grandes valores, por
ser ese ejemplo de vida y por depositar toda su confianza en mí.*

*A la familia Chadid De La Hoz por ser mi segundo hogar, por cada una de sus
enseñanzas, y por permitirme hacer parte de su familia.*

*A mi familia porque siempre estuvieron presentes en cada momento de dificultad,
supliendo siempre cada una de mis necesidades.*

*A cada uno de los profesores que fueron partícipes de mi formación académica, por haber
compartido sus conocimientos y experiencias.*

*A mi novio por entender cada una de mis dificultades y brindarme ese apoyo incondicional
en todo momento.*

A mis compañeros de universidad con los que compartí los mejores momentos de mi carrera.

GRACIAS

María Victoria López de la Hoz.

Los diversos caminos que tomamos a lo largo de la vida nos llevan a superar grandes pruebas, durante este proceso podemos conocer amigos, compañeros y enemigos, personas que día tras día tienen algo para ofrecernos y cosas que enseñarnos, y es por esto que hoy quiero agradecerle a cada uno de ellos por las experiencias vividas.

A dios por entregarme la fe y las fuerzas para salir adelante.

A mi madre por su apoyo incondicional y su forma de ver la vida donde lo que realmente importa es la felicidad.

A mi hermana por sus enseñanzas llenas de sabiduría donde lo más importante es la determinación y la actitud.

A mi familia, quienes me enseñaron a superar los obstáculos del camino mostrándome la mejor forma de enfrentarme a la vida.

A mi mejor amigo que siempre me brindo su apoyo incondicional en los momentos difíciles e hizo que este gran logro fuese posible.

A todos mis amigos y compañeros que me brindaron su compañía y las alegrías más importantes durante mi carrera, mostrándome que siempre se debe luchar y jamás rendirse.

GRACIAS.

Josimar Sáenz Peñalosa

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de proyecto Ph. D Ricardo Cruz por depositar su confianza en nosotros y habernos permitido trabajar en este proyecto, por toda su colaboración y apoyo.

A la Profesora Luz Amparo Quintero por estar siempre atenta a nuestras necesidades, por su paciencia y colaboración durante la elaboración de nuestro proyecto de grado.

A la ingeniera Carolina por contribuir con sus conocimientos sobre el tema trabajado.

A la planta Cemex y todo el personal de trabajo por todo el apoyo prestado en la realización de este proyecto.

A la escuela de ingeniería civil, por permitirnos trabajar en sus instalaciones, y brindarnos los equipos empleados en esta investigación. A sus técnicos por su constante colaboración.

A la escuela de ingeniería metalúrgica y al grupo de profesores por compartir cada conocimiento y ayudarnos a superar cada dificultad académica que se nos presentó en nuestra carrera profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	21
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.2 OBJETIVOS	26
1.2.1 Objetivo General	26
1.2.2 Objetivos Específicos	26
2. MARCO TEÓRICO	27
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO	27
2.2 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO	28
2.3 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS	29
2.4 AFECTACIÓN DEL CONCRETO A ELEVADAS TEMPERATURAS	31
2.5 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO	33
2.6 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	35
3. METODOLOGÍA	37
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	38
3.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS A ENSAYAR	38
3.2.1 Caracterización de la materia prima.	39
3.2.2 Diseño de Mezcla	43
3.2.3 Elaboración de las Probetas.	43
3.2.4. Fraguado y curado.	45
3.3 CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DE EQUIPOS	47
3.4 ENSAYOS PREVIOS A LA EXPOSICIÓN AL FUEGO	47
3.4.1 Inspección visual	48
3.4.2 Metrología dimensional	48
3.4.3 Ensayo de ultrasonido	49
3.4.4 Ensayo de resistencia a la compresión	51
3.5 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO	53

3.5.1 Adecuación del horno.	53
3.5.2 Exposición a fuego.....	55
3.5.3 Enfriamiento post-exposición.	56
3.6 ENSAYOS POSTERIORES A LA EXPOSICIÓN AL FUEGO.....	57
3.6.1 Metrología Dimensional	57
3.6.2 Inspección Visual.....	57
3.6.3 Ensayo de Ultrasonido.....	57
3.6.4 Ensayo de resistencia a la compresión.....	58
4.RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
4.1 REALIZACIÓN DE PRUEBAS ANTES DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.	59
4.1.1 Metrología dimensional.....	59
4.1.2 Inspección visual.....	61
4.1.3 Ensayo de Ultrasonido.....	62
4.1.4 Ensayo de resistencia a la compresión.....	66
4.2 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO	67
4.2.1 Curvas de calentamiento de las probetas en el ensayo a fuego.....	67
4.3 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DESPUÉS DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.	72
4.3.1 Metrología dimensional.....	72
4.3.2 Inspección visual.....	74
4.3.3 Ensayo de ultrasonido.	77
4.3.3.1 Relación entre la velocidad de pulso y la temperatura de exposición.....	83
4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión.....	85
4.4 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE EXPOSICIÓN.....	87
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA.....	92
ANEXOS.....	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del Concreto según su velocidad ultrasónica.....	33
Tabla 2. Clasificación del concreto según su resistencia a la compresión.....	36
Tabla 3. Número de probetas asignadas para la exposición a fuego	39
Tabla 4. Parámetros establecidos en el equipo de ultrasonido.....	51
Tabla 5. Peso promedio de las probetas antes de ser expuesta a fuego	60
Tabla 6.. Dimensiones de las Probetas antes de ser expuestas a fuego.....	60
Tabla 7. Resultados de resistencia a la compresión para probetas antes de ser expuestas a fuego.....	66
Tabla 8.. Identificación de las termocuplas empleadas en las gráficas de las curvas de calentamiento.....	67
Tabla 9. Pérdida de peso de las probetas	72
Tabla 10. Dimensiones de las probetas antes y luego de la exposición a fuego. ...	73
Tabla 11. Resultados de la velocidad de pulso ultrasónico a diferentes temperaturas de exposición.....	83
Tabla 12. Resultados de resistencia a la compresión a diferentes temperaturas de Exposición	85
Tabla 13. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento del concreto a Diferentes temperaturas de exposición	32
Figura 2. Diferentes Posiciones de los palpadores (emisión T_x y receptor R_x)	34
Figura 3. Principio de funcionamiento del equipo de ultrasonido.....	35
Figura 4. Análisis detallado de cada una de las etapas planteadas.....	37
Figura 5. Caracterización del cemento Portland tipo III utilizado	40
Figura 6. Características físicas del agregado de grava de (3/4")	41
Figura 7. Características físicas del agregado grueso	42
Figura 8. Formaleta diseñada para la elaboración de las probetas	44
Figura 9. Pasos para la elaboración de las probetas	45
Figura 10. Procedimientos luego de la elaboración de las probetas.....	46
Figura 11. Ensayo de metrología dimensional antes de ser sometidas a fuego	48
Figura 12. Toma de Mediciones de VPU	49
Figura 14. Pulido y Limpieza de las Probetas	51
Figura 15. Fotografías de toma de la resistencia a la compresión.....	52
Figura 16. Horno utilizado para la exposición a fuego de las probetas.....	54
Figura 17. Termocupla tipo K.....	55
Figura 18. Tarjeta de Adquisición	55
Figura 19. Procedimiento para la exposición a fuego de las probetas.....	56
Figura 20. Fotografía de la probeta antes de ser expuesta a fuego.....	61
Figura 21. Fotografías de las superficies de las probetas expuestas a fuego	74
Figura 22. Defectos superficiales visibles presentes en las probetas expuestas a 1200°C.....	75
Figura 23. Probeta de concreto reforzado y sin adición de fibra expuesta a 1200°C	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 200 °C	62
Gráfica 2. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 400 °C	63
Gráfica 3. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 600 °C	63
Gráfica 4. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 800 °C	64
Gráfica 5. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 1000°C ...	64
Gráfica 6. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 1200°C ...	65
Gráfica 7. Perfiles de Velocidad de probetas sin fibra antes de ser expuestas a 1200 °C.....	65
Gráfica 8. Temperatura Vs tiempo de exposición a 200°C	68
Gráfica 9. Temperatura Vs tiempo de exposición a 400°C	69
Gráfica 10. Temperatura Vs tiempo de exposición a 600°C	69
Gráfica 11. Temperatura Vs tiempo de exposición a 800°C	70
Gráfica 12. Temperatura Vs tiempo de exposición a 1000°C	70
Gráfica 13. Temperatura Vs tiempo de exposición a 1200°C	71
Gráfica 14. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 200°C	77
Gráfica 15. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 400°C	78
Gráfica 16. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 600°C	78
Gráfica 17. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 800°C	79
Gráfica 18. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1000°C	80
Gráfica 19. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1200°C	80
Gráfica 20. Perfiles de velocidad de probetas sin fibra expuestas a 1200°C.....	81
Gráfica 21. Relación de las velocidades a diferentes temperaturas de exposición	82
Gráfica 22. Relación de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la temperatura de exposición.....	84
Gráfica 23. Relación de la resistencia a la compresión con respecto a la temperatura de exposición.....	86
Gráfica 24. Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico	88

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Diseño de mezcla.....	98
ANEXO B. Registro de toma de datos de velocidad de pulso ultrasónico en los 4 perfiles de la probeta P ₁ 600 antes de la exposición a fuego.....	99
ANEXO C. Registro de toma de datos de velocidad de pulso ultrasónico en los 4 perfiles de la probeta P ₁ 600 luego de la exposición a fuego.....	100
ANEXO D. Cálculos para hallar la resistencia a la compresión	101

GLOSARIO

ANÁLISIS GRANOLUMÉTRICO: Fase en la cual se separa una masa de agregado en fracciones de similar tamaño a través de una serie de tamices cuyas características se ajustan según la norma.

AGREGADO FINO: El agregado fino es la porción de un aglomerado que pasa a través de una malla número 4. Consiste en arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente. La forma de las partículas deberá ser generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas

AGREGADO GRUESO: El agregado grueso está formado por roca o grava triturada obtenida de las fuentes previamente. El tamaño mínimo de los aglomerados gruesos será de 4,8 mm. El agregado grueso es una consistencia dura y resistente.

CONCRETO: El concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico) agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.

CONCRETO REFORZADO: Concreto con refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas donde se prevé que se desarrollaran tensiones bajo las acciones de servicio. El acero restringe el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto.

CURADO: El curado, según el ACI 308 R, es el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico madura y endurece con el tiempo, como

resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor

DURABILIDAD DEL CONCRETO: La ACI define la durabilidad del concreto como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Y determina que el concreto durable debe mantener su forma original, calidad y características de servicio cuando es expuesto a este ambiente.

ENSAYOS DESTRUCTIVOS: Los ensayos destructivos se definen como aquellos ensayos que se realizan a un material mediante el uso de herramientas o máquinas, las cuales producen una alteración irreversible de su composición química o geometría dimensional.

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS: Los ensayos no destructivos son pruebas practicadas a un material que no alteran de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo.

ETAPA DE FRAGUADO: Proceso de solidificación y pérdida de la plasticidad inicial que tiene lugar en el hormigón, mortero, cemento, etc., por la desecación y cristalización.

FIBRA DE POLIPROPILENO: Fibra hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel. Las fibras de polipropileno son hidrófobas y por lo tanto tienen como desventajas el tener pobres características de adherencia con la matriz del cemento.

FISURA: Las fisuras en el concreto son roturas que aparecen generalmente en la superficie del mismo, debido a la existencia de tensiones superiores a su capacidad de resistencia.

FUEGO: El fuego es el calor y la luz producidos por la combustión. El fuego nace a partir de una reacción química de oxidación y supone la generación de llamas y la emanación de vapor de agua y dióxido de carbono.

RELACIÓN AGUA CEMENTO: Relación entre las masas de agua (excluyendo el agua absorbida por los agregados) y de cemento en una mezcla de hormigón.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: La resistencia a la compresión se define como máxima resistencia de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial.

TERMOCUPLA: La termocupla es un transductor de temperatura compuesto por 2 metales distintos que se encuentran a distintas temperaturas, una de referencia y la otra desconocida. Es un dispositivo que convierte una magnitud física en una señal eléctrica.

TRABAJABILIDAD: Es una propiedad importante para muchas aplicaciones del concreto. En esencia, es la facilidad con la cual pueden mezclarse los ingredientes y la mezcla resultante puede manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de la homogeneidad.

RESUMEN

TITULO:

EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA DE CONCRETO REFORZADO Y ADICIONADO CON FIBRA EXPUESTO A FUEGO*

AUTORES:

LOPEZ de la hoz Maria Victoria

SAENZ Peñaloza William Josimar **

DESCRIPCION:

La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica que durante los últimos años ha sido utilizada como un ensayo no destructivo para la inspección de materiales. En la presente investigación se evaluó mediante ensayos no destructivos, el concreto reforzado y adicionado con fibra sometido a fuego. Para esto se fabricaron 23 probetas en forma de paralelepípedos con dimensiones de 0.30x0.30x0.15 m, elaboradas con una relación Agua/Cemento de 0.6, a las cuales fue necesario introducir 3 termocuplas como sensores de temperatura a diferentes distancias de la cara de exposición, 3 de las probetas se elaboraron sin adición de fibra con el fin de conocer el comportamiento de la misma. Se realizaron ensayos de fuego a diferentes temperaturas y para cada ensayo se utilizaron 3 probetas, para la exposición a fuego se utilizó un horno y un programa desarrollado en Labview 8.5 que permitió el registro de las temperaturas internas de las probetas y el control de temperatura de la llama, mostrando las curvas de calentamiento en razón del tiempo de exposición para cada probeta. Los resultados obtenidos mostraron que a medida que aumenta la temperatura de exposición, los valores de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión disminuyen. Luego mediante técnicas de inspección visual se determinó que la fibra de polipropileno ayuda a disminuir el daño causado por el fuego, debido a que las 3 probetas sin fibra presentaron un mayor daño y registraron los menores valores de VPU y resistencia a la compresión. Finalmente se realizó una relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico donde se pudo observar que estos parámetros son directamente proporcionales y se ven afectados luego de la exposición a fuego.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director Cruz Ricardo PhD. Coodirectora Msc. QUINTERO Ortiz Luz Amparo

ABSTRACT

TITLE:

ASSESSING DISRUPTION OF REINFORCED CONCRETE AND ADDED FIBER EXPOSED TO FIRE*

AUTHORS:

LOPEZ De La Hoz Maria Victoria
SAENZ Peñaloza William Josimar **

DESCRIPTION:

The ultrasonic pulse velocity is a technique that in recent years has been used as a nondestructive testing for materials inspection. In this research was tested through non-destructive testing and added reinforced concrete fiber subjected to fire. A total of 23 test tubes were fabricated in the form of parallelepipeds with dimensions of 0.30x0.30x0.15 m, made with a water / cement ratio of 0.6, which was necessary to enter 3 thermocouples as temperature sensors at different distances from the face of exposure, 3 of the specimens were prepared without addition of fiber to know the behavior of the same. Fire tests were conducted at different temperatures and for each test 3 samples were used for exposure to fire a furnace and use a program developed in Labview 8.5 that allowed the recording of internal temperatures of the samples and the temperature control flame heating curves showing because of the exposure time for each specimen. The results showed that as the exposure temperature increases, the speed values ultrasound pulse and the compressive strength decreases. After visual inspection techniques was determined that the polypropylene fiber helps reduce the damage caused by fire, because the 3 samples without fiber damage and had higher values recorded under VPU and compression resistance. Finally a relationship between resistance to compression and velocity of ultrasonic pulse was conducted, and it was observed that these parameters are directly proportional and are unaffected after exposure to fire.

*Draft grade

**Faculty of Engineering physicochemical School of Metallurgical Engineering and Materials Science, Director CRUZ Ricardo PhD Coodirectora Msc. QUINTERO Ortiz Luz Amparo

INTRODUCCIÓN

Los ejemplos cotidianos y las estadísticas internacionales proporcionan una amplia evidencia de las propiedades de protección frente al fuego del concreto, y por ello los constructores de edificios, están convirtiendo al concreto en su material favorito, exigiendo cada vez más su empleo frente al de otros materiales de construcción¹. Si se especifica que se utilice concreto, se puede estar seguro de que se ha hecho la elección adecuada porque no aumenta la carga de fuego, proporciona recorridos de evacuación protegidos contra el fuego debido a que es un material que no emite humos tóxicos cuando es expuesto a altas temperaturas, detiene la propagación del mismo entre compartimentos y retrasa cualquier fallo estructural, impidiendo en la mayoría de los casos un colapso total. En comparación con los otros materiales de construcción habituales, el concreto presenta de forma fácil y económica un mejor comportamiento frente al fuego, sea cual sea el criterio de seguridad que se considere.

Hay dos componentes clave para explicar el comportamiento satisfactorio del concreto frente al fuego: en primer lugar, sus propiedades básicas como material de construcción y, en segundo, su funcionalidad en una estructura².

El hormigón es incombustible (no arde) y tiene una baja velocidad de transmisión del calor (protege frente al fuego), lo que significa que en la mayoría de las estructuras este material puede utilizarse sin ninguna protección adicional frente a incendios.

Sin embargo aunque muchas de las propiedades físicas del concreto no se alteran cuando este es sometido a la exposición a fuego, otras propiedades físicas por el contrario si presentan algún tipo de deterioro, esto se evidencia en la aparición de

¹ PLATAFORMA EUROPEA DEL HORMIGÓN: "Seguridad frente al fuego utilizando hormigón". 2008. p, 29.

² RILEM TC 200-HTC: "Propiedades Mecánicas del Concreto a Altas Temperaturas – Modelado y Aplicaciones". Recommendations of RILEM (2005), Materials and Structures, vol. 38, p. 913-919.

microfisuras, defectos, cambios físicos y químicos que actúan negativamente en la calidad del mismo³, para lo cual es imprescindible una evaluación de cada una de las estructuras de concreto para verificar si luego de ser expuestas a fuego estas pueden continuar con el funcionamiento de su vida útil.

En la actualidad la técnica de VPU o bien conocida como la técnica de Velocidad de Pulso Ultrasónico, es la más usada para evaluar las propiedades del concreto luego de que este ha sido sometido a elevadas temperaturas. Esta técnica es una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto y ha sido utilizada desde hace aproximadamente 50 años⁴.

La técnica cubre la determinación de la velocidad de propagación de pulsos de una onda longitudinal a través del material, por tanto consiste en determinar el tiempo que tarda una onda de pulso ultrasónico en atravesar una dimensión conocida del elemento de concreto⁵.

Es importante reconocer que los ensayos no destructivos representan una herramienta útil para determinar la calidad del concreto, pero en la mayoría de los casos no remplazan a los ensayos destructivos, este es el caso de estructuras de concreto de calidades poco comunes, a las cuales para evaluar y efectuar diagnósticos preliminares se les suele aplicar las técnicas de ensayos no destructivos, y posteriormente se procede a investigar las zonas con mayor daño a través de las técnicas destructivas, y de esta manera poder emitir una opinión más precisa acerca de la estructura⁶.

³ CONCRETE AND FIRE< 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

⁴ 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.41.

⁵ ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación de la relación agua/cemento, tamaño de agregado, y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 40, 2010.

⁶ EQUIPO ULTRASONIDO. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL HORMIGÓN. Disponible: <http://icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.doc>> visitada en: Enero de 2012.

Precisamente esta es una de las mayores ventajas de la técnica de velocidad de pulso ultrasónico. Es una técnica que se fundamenta en el cálculo del tiempo de vuelo de una onda sonora, lográndose relacionar con los valores obtenidos a través de ensayos de resistencia a la compresión⁷, la cual se considera una prueba no destructiva debido a que es necesario hacer extracción de núcleos de la estructura a analizar, por lo cual se destruye la estructura.

A través de la presente investigación se pretende evaluar las propiedades físicas del concreto reforzado y adicionado con fibra luego de haber sido sometido a altas temperaturas, mediante la técnica de velocidad de pulso ultrasónico y de ensayos de resistencia a la compresión, y de esta manera establecer relaciones y comparaciones que nos permiten crear criterios y aportar de manera positiva a la vida útil de las estructuras de concreto, ya que es de importancia mantener la seguridad estructural de las edificaciones que se encuentran diseñadas a partir de concreto.

⁷ SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Tercera Edición. Bogotá: Bhandar Editores LTDA. 1996

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A lo largo de la historia el concreto ha sido uno de los materiales ampliamente utilizados en la construcción debido a que sus excelentes propiedades físico-mecánicas e importante relación costo-beneficio⁸ lo constituyen en el elemento principal para el desarrollo de la infraestructura de un país, y a su vez le confiere múltiples aplicaciones que se ven involucradas directamente con actividades de tipo arquitectónico.

Recientemente la industria de la construcción ha mostrado un interés significativo en el uso de concreto adicionado con fibra, evidenciado en aplicaciones como: pavimentos, túneles y edificaciones a nivel general⁹. Lo anterior se debe a que la adición de esta fibra ayuda principalmente a evitar la aparición de fisuras causada por la retracción del concreto que ocasiona daños estructurales¹⁰.

En consecuencia los elementos estructurales deben ser diseñados para satisfacer los requisitos de servicio y estados límite de seguridad para diversas condiciones ambientales. Sin embargo la exposición a fuego representa una de las situaciones más severas e imprevistas a la que el concreto puede estar sujeto, y por lo tanto es necesario buscar alternativas desde su proceso de fabricación que garanticen una mejor respuesta del mismo cuando es sometido a fuego. En este contexto es importante conocer que las propiedades del concreto se ven sustancialmente modificadas cuando es sometido a este tipo de situaciones, debido a la continua aparición de fisuras que afectan los elementos estructurales y por consiguiente a

⁸Di Maio, A., Ferreyra Hirschi, E, Giaccio, G. y Zerbino, R. Concretos expuestos a elevadas temperaturas: "Evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas". 199. P, 204-205.

⁹[9] Kumar Mehta P, Monteiro Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD. p. 3-13.

¹⁰K.D. Hertz.; "Desprendimiento del Concreto Expuesto al Fuego". Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Dinamarca. Publicado en: "Fire Safety Journal". Dinamarca, 5, Agosto, 2002.

la estructura en general. La permanencia del concreto a elevadas temperaturas hace que se produzcan cambios físicos y químicos que depende tanto de la composición de la matriz como el tipo de agregados empleados¹¹.

Estos cambios que se producen en el concreto alteran de manera significativa cada una de sus propiedades entre las que se encuentran: la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la porosidad, además el acero utilizado para el concreto reforzado contribuye a la formación de un fenómeno conocido como spalling o desprendimiento del concreto, el cual destruye la sección transversal y reduce en forma sustancial la capacidad de los elementos estructurales expuestos a altas temperaturas.

Estos fenómenos anteriormente mencionados han sido y serán objetos de estudio debido a que dan necesidad de evaluar el comportamiento del concreto sometido a condiciones de alta temperatura. Actualmente existen diversas formas de medir el daño de una estructura de concreto luego de la exposición a fuego. Como primera medida se encuentra que los Ensayos Destructivos (por ejemplo la resistencia a la compresión), brindan una información exacta de la resistencia del concreto, pero debilitan la estructura, por lo tanto el uso de los Ensayos No Destructivos es una alternativa que ofrece la oportunidad de evaluar el grado de afectación en una estructura de concreto que ha reaccionado previamente con el fuego, esta técnica presenta una ventaja frente a la aplicación de los ensayos destructivos y es que puede ser aplicada sin producir el deterioro o destrucción de la estructura.

Finalmente por todo lo anterior es importante realizar un estudio que permita analizar los cambios ocurridos en el concreto reforzado y adicionado con fibra cuando es sometido a altas temperaturas, con el fin de contribuir al estudio de la durabilidad de dicho material.

¹¹ VenkateshK.R. Kodur, Luke A. Bisby, Mark F. Green.; "Evaluación Experimental del Comportamiento del Concreto Reforzado y Adicionado con Fibras de Polímero Expuesto a Fuego". Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Estatal de Michigan. Publicado en: " Fire Safety Journal".Michigan, 30, mayo, 2006.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades físico-mecánicas del concreto reforzado y adicionado con fibra sometido a la exposición del fuego.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Determinar a través de la velocidad de pulso ultrasónico y el ensayo de resistencia a la compresión el efecto de la temperatura de exposición a fuego, en concreto reforzado y adicionado con fibra.

- ✓ Evaluar a través de los ensayos no destructivos de inspección visual y metrología dimensional, los cambios físicos ocurridos en el concreto reforzado y adicionado con fibra, expuesto a fuego.

- ✓ Relacionar la velocidad de pulso ultrasónico con la resistencia a la compresión, del concreto en estudio, después de su exposición a fuego.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO

Como primera medida el concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico) agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión¹², por consiguiente se puede afirmar que el concreto se produce a partir de un diseño de mezcla que consiste en la selección de los constituyentes disponibles (cemento, agregado, agua y aditivos) y su dosificación en cantidades relativas para producir, una masa volumétrica con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad adecuada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen y apariencia adecuada¹³.

El concreto se puede encontrar en estado fresco, en proceso de fraguado o en estado endurecido, y en estos tres estados presenta características típicas las cuales determinan su desempeño. La propiedad más relevante o quizás la de mayor referencia en el concreto es su resistencia a la compresión, debido a su facilidad para evaluar y en la mayoría de los casos es suficiente para garantizar un buen comportamiento estructural¹⁴.

Las propiedades del concreto fresco están gobernadas por el tipo de construcción y por las técnicas de colocación y transporte, y las propiedades del concreto endurecido están especificadas por el diseñador requerido.

¹²Kosmatka and Panarese, W.C., "Design and Control of Concrete Mixtures", Portland Cement Association, Skokie, Ill, 13th Ed, 1988.

¹³ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.11.

¹⁴ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.12

2.2 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO

Si bien es cierto el concreto posee excelentes propiedades que lo hacen resistente a las condiciones más extremas, pero no podemos dejar a un lado que ciertas propiedades físicas del concreto se ven sustancialmente modificadas cuando el concreto es sometido a la exposición a fuego. La exposición de una estructura de concreto a elevadas temperaturas producto, por ejemplo, de un incendio o por las condiciones de servicio que se registran en una industria, afectan su durabilidad y sus prestaciones mecánicas, debido a la aparición de macro y microfisuras que afectan a la estructura en general. En muchas investigaciones se ha comprobado que el grado de alteración que se produce depende fundamentalmente del nivel de temperatura alcanzado, del tiempo de exposición, de la composición del concreto en especial de los agregados y del tiempo de enfriamiento¹⁵.

Estos daños causados en el concreto por la acción del fuego pueden variar desde leves defectos superficiales a daños más graves tales como la delaminación, grietas externas e internas, desprendimientos y cambios químicos.

Dentro de las propiedades físico-mecánicas del concreto tenemos: la plasticidad, la ductilidad, la consistencia, la permeabilidad, la durabilidad, la resistencia a la compresión, la fluidez, entre otras¹⁶.

De las anteriores propiedades físico-mecánicas, la resistencia a la compresión es la propiedad que presenta mayor afectación cuando el concreto es sometido a altas temperaturas, ya que el fuego reduce en el concreto el valor de carga máxima que este puede soportar. Para esto es importante determinar los factores que influyen sobre la resistencia del concreto:

¹⁵ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.107.

¹⁶ ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.127.

Como primera medida se encuentran aquellas variables que intervienen en el proceso de fabricación del concreto, como: Mezclado, transporte, colocación, compactación y curado. En segundo lugar se hallan aquellos factores relacionados con la calidad y la cantidad de elementos constitutivos en el concreto, tales como: Agregados, cemento y agua.

De estos dos grandes grupos los factores que más afectan esta propiedad son: el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la calidad de los agregados, el tamaño máximo de agregado grueso, el tiempo y tipo de curado¹⁷.

2.3 CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

El concreto hecho con cemento Portland tiene ciertas características: es relativamente resistente en compresión pero débil en tensión y tiende a ser frágil. La debilidad en tensión puede ser superada por el uso de refuerzo convencional de varilla y, en cierta medida, por la inclusión de un volumen suficiente de ciertas fibras.

Para el uso efectivo de fibras en el concreto endurecido se deben tener contempladas las siguientes características:

- Las fibras deben ser significativamente más rígidas que la matriz, es decir, un módulo de elasticidad más alto.
- El contenido de fibras por volumen debe ser adecuado.
- Debe haber una buena adherencia entre la fibra y la matriz.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas con relación a su diámetro¹⁸.

¹⁷ERCOLANI, G.D, ORTEGA N.F., SEÑAS L. Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires Octubre. 2007. p. 1-2.

Por razones económicas, la tendencia actual es la de minimizar el volumen de las fibras, en cuyo caso los mejoramientos en las propiedades pueden ser marginales.

Para las cantidades de fibra típicamente usadas (menos del 1% por volumen para el acero y aproximadamente 0.1% por volumen para el polipropileno) las fibras no tendrán un efecto significativo en la resistencia o el módulo de elasticidad del compuesto, debe de hacerse notar que las concentraciones en un alto volumen de ciertas fibras pueden hacer que el concreto fresco no pueda trabajarse.

Los diferentes tipos de fibras adicionadas en el concreto son:

- Fibras de vidrio
- Fibras de acero
- Fibras sintéticas (acrílico, carbón, aramida, nylon, polipropileno, poliéster y polietileno)

La presente investigación se basó en el concreto reforzado con una fibra tipo sintética conocida como polipropileno.

El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel.

Las fibras de polipropileno son hidrófobas y por lo tanto tienen como desventajas el tener pobres características de adherencia con la matriz del cemento, un bajo punto de fusión, alta combustibilidad y un módulo de elasticidad relativamente bajo. Las largas fibras de polipropileno pueden resultar difíciles de mezclar debido a su flexibilidad y a la tendencia a enrollarse alrededor de las orillas extremas de las hojas de la mezcladora.

¹⁸ CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS < Disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2007/feb07/PROBLEMAS.pdf>> visitada: Marzo 2012.

Las fibras de polipropileno son tenaces, pero tienen baja resistencia a tensión y bajo módulo de elasticidad; tienen una característica plástica de esfuerzo-deformación.

Actualmente se asegura que se han usado exitosamente contenidos de fibras de polipropileno de hasta 12% por volumen, con técnicas de fabricación de empaque manual, pero se ha reportado que volúmenes de 0.1% de fibras de 50 mm en el concreto han causado una pérdida de revenimiento de 75 mm. Según reportes las fibras de polipropileno reducen la contracción no restringida, plástica y por secado del concreto a contenidos de fibra de 0.1 a 0.3 % por volumen.

2.4 AFECTACIÓN DEL CONCRETO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Los cambios que sufre el concreto en relación al nivel de temperatura alcanzado se pueden visualizar en la figura 1.

La mayor afectación del concreto a altas temperaturas se encuentra en las propiedades mecánicas del concreto (resistencia o deformabilidad), o en los procesos fisicoquímicos en las pastas de cemento. Los primeros son producto de la alteración de la estructura del material, la cual no es uniforme en toda la masa sino que se produce en mayor medida en las capas superficiales, razón por la cual es posible asumir grandes diferencias entre las características de la masa y de las capas externas de una estructura expuesta a altas temperaturas¹⁹.

En relación a lo anterior podemos afirmar que el efecto de la temperatura sobre la pasta de cemento hidratado depende del grado de hidratación y estado de humedad, de esta manera es importante conocer que la presencia de grandes cantidades de agua evaporable puede causar problemas. Si la velocidad de calentamiento es alta y la permeabilidad de la pasta de cemento es baja, el daño

¹⁹ Di Maio, A., Ferreyra Hirschi, E., Giaccio, G. y Zerbino, R. Concretos expuestos a elevadas temperaturas: "Evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas". 199. p. 207-208.

al concreto se da por el desprendimiento de la superficie, y este desprendimiento se produce cuando la presión de vapor dentro del material aumenta a un ritmo más rápido que el alivio de la presión por la liberación de vapor en la atmósfera²⁰.

Figura 1. Comportamiento del concreto a Diferentes temperaturas de exposición

Temperatura	Que sucede
1000	
900	Las temperaturas del aire en incendios rara vez exceden este nivel pero las de la llama pueden alcanzar los 1.200°C y más aún.
800	
700	
600	Con esta temperatura el hormigón no mantiene su capacidad estructural total.
550-600	Los materiales con base de cemento experimentan un descenso de su capacidad de apoyo.
400	
300	Comienza una pérdida de firmeza pero en realidad sólo los primeros centímetros de hormigón expuestos al fuego soportarán más calor que éste e internamente la temperatura estará por debajo de ésta.
250-420	Se produce una pérdida de recubrimiento con partes del hormigón separándose de la superficie.

Fuente: Procesos físicos (Khoury, 2000)

Luego de conocer que afectaciones causa la acción del fuego sobre el concreto es importante mencionar y conocer que pruebas orientan y ayudan a dar criterios preliminares de los daños que se producen al someter el concreto a elevadas temperaturas. Básicamente este tipo de pruebas se dividen en dos: los ensayos no destructivos y los ensayos destructivos. Los primeros son pruebas útiles que nos permiten evaluar la calidad del concreto endurecido sin obtener alguna alteración o deformabilidad del material, por lo tanto los ensayos no destructivos

²⁰ Kumar Mehta P, Monteiro Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD. p.149.

implican un daño imperceptible o nulo²¹ , por el contrario los ensayos destructivos causan deformación en el material y producen daños perceptibles a la estructura.

2.5 VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO

Entre las pruebas no destructivas se encuentra la Velocidad de Pulso Ultrasónico. Con esta prueba es posible determinar el grado de homogeneidad, entre otras características del concreto en estudio²². La técnica cubre la determinación de la velocidad de propagación de pulsos de una onda longitudinal a través del material. Las ondas longitudinales usadas tienen frecuencias entre 20 y 150 KHz, las cuales son bajas comprándolas con las del acero, por la heterogeneidad del concreto²³, según lo indicado en la norma ASTM C 597²⁴. El concreto se puede clasificar según los valores de VPU (Velocidad de Pulso Ultrasónico), que se obtengan, como lo indica la siguiente tabla:

Tabla 1. 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 ultrasónico²⁵.

²¹ ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO-ULTRASONIDO < Disponible en:

<http://civilgeeks.com/2011/04/11/ensayos-no-destructivos-del-concreto-ultrasonido/>> visitada en: Febrero 2012.

²² 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.

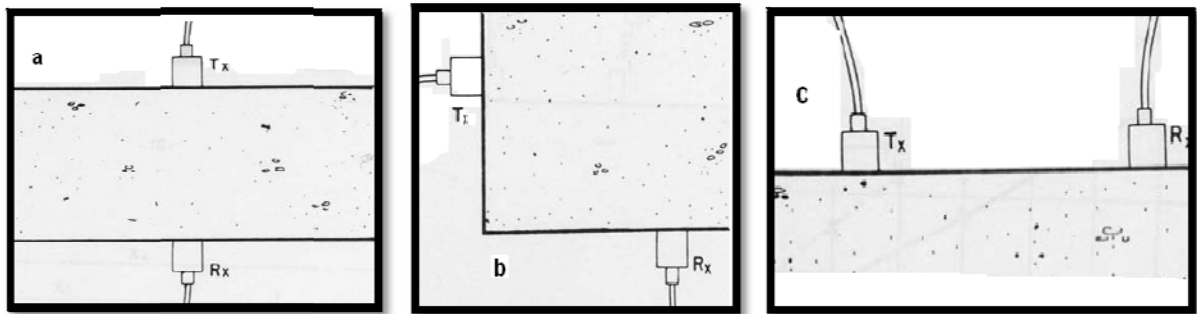
²³ CORZO PATINO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre la resistencia a la compresión, porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento. Trabajo de grado [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 25, 2008.

²⁴ AMERICAN STANDARD TESTING OF MATERIALS. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States. ASTM international - American Society of testing for materials. ASTM C 597-02.

²⁵ CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO POR SU RESISTENCIA. <Disponible en: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm>> visitada en: Febrero 2012.

Por el método de los ultrasonidos existen tres tipos de ensayos que corresponden a la posición relativa de los transductores uno con relación a otro: directa, semi-directa e indirecta.

Figura 2. Diferentes Posiciones de los palpadores (emisión T_x y receptor R_x)



a) Transmisión Directa

b) Transmisión Semi-directa

c) Transmisión Superficial o Indirecta

Fuente: Norma UNE 83-308-86²⁶

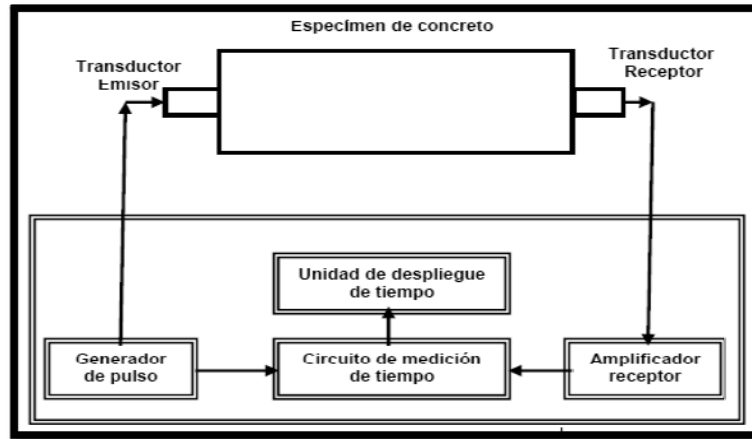
La velocidad de transmisión o velocidad de propagación se determina en cada caso por el cociente entre la distancia o separación L entre los transductores y el tiempo de tránsito t , para esta distancia ($V= L/T$)²⁷.

El tipo de velocidad ultrasónica que precisa valores más exactos es la que se hace de manera directa, ya que la máxima energía del pulso es transmitida y recibida. En la siguiente figura se muestra el principio de funcionamiento del equipo de ultrasonido a través del método directo.

²⁶ BUNGEY, J.H. y MILLAR, S. G. Testing Of Concrete in Structure. An imprint of Chapman and Hall. Third Edition. 1996. p. 53.

²⁷ ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación de la relación agua/cemento, tamaño de agregado, y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 40, 2010.

Figura 3. Principio de funcionamiento del equipo de ultrasonido



Fuente: Métodos de ensayos ultrasónicos ²⁸.

2.6 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Dentro de los ensayos destructivos que se encuentran para evaluar la calidad del concreto se tiene el ensayo de Resistencia a la Compresión. El ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión a partir de la fuerza de ruptura dividida por el área de sección de la probeta y se reporta en unidades de PSI o en MPa²⁹. Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 17 MPa (2500 PSI) para el concreto residencial hasta 28 MPa (4000 PSI) y más para estructuras comerciales. Para determinadas aplicaciones se especifican resistencias superiores hasta de 70 MPa (10000 PSI)³⁰.

El concreto se puede clasificar de acuerdo a su resistencia a la compresión, esta clasificación se especifica en la tabla 2.

²⁸ _____. ASTM C597-2. Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete. USA, 2003.

²⁹ Lima, P.R.L.; "Análisis Teórico y Experimental de Materiales Compuestos Reforzados Con Fibras de Sisal". PhD thesis (2004), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil.

³⁰ Velasco, R.V; "Concreto de alto Desempeño reforzado con Fibras de Polipropileno y Sisal Sometido a Altas Temperaturas", MSthesis (2002), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil.

Tabla 2. Clasificación del concreto según su resistencia a la compresión

Clasificación	Resistencia a la Compresión [Kgf/cm²]	Resistencia a la Compresión [Mpa]
Baja Resistencia	<150	< 14,70
Resistencia Moderada	Entre 150 y 250	Entre 14,70 y 24,51
Normal	Entre 250 y 420	Entre 24,51 y 41,18
Muy alta Resistencia	Entre 400 y 800	Entre 39,22 y 78,45

Fuente: Clasificación de Concretos por su resistencia [31].

Las pruebas de compresión uniaxial son las más fáciles de realizar en el laboratorio y la resistencia del concreto a la compresión a edad de 28 días es determinada por una prueba estándar uniaxial a la compresión, y se acepta universalmente como un índice general de la resistencia del concreto³¹.

Finalmente los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar la calidad del hormigón endurecido, sin embargo a través de las técnicas destructivas se pueden investigar las zonas con mayor daño, y emitir una opinión más fundada sobre la estructura afectada. En general se puede señalar, que los ensayos no destructivos son la etapa previa de los ensayos que dan una indicación precisa acerca del estado del concreto cuando este es sometido a condiciones extremas, para así determinar si el material puede continuar en servicio.

³¹ CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO POR SU RESISTENCIA. <Disponible en: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm>> visitada en: Febrero 2012.

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo de la presente investigación se muestra de manera esquemática en la figura 3.

Figura 4. Análisis detallado de cada una de las etapas planteadas.



A continuación se presentan detalles de cada una de las etapas anteriormente planteadas:

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se recopiló toda la información necesaria de libros, artículos, trabajos de grado, normas técnicas (ISO – ASTM - Incontec) y la información por internet, para posteriormente desarrollar las técnicas que permitieron analizar las características del material cuando es sometido a fuego.

Por medio de la información seleccionada se pudieron establecer las variables a considerar durante la realización de este trabajo tales como el tamaño de los agregados, la relación A/C, dimensiones de las probetas, tiempo de curado y temperaturas de exposición a fuego.

3.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS A ENSAYAR

Para la preparación de las probetas se realizaron las siguientes actividades: caracterización de los materiales componentes del concreto, diseño de mezcla, elaboración de probetas con una relación agua-cemento de 0.6, curado de las mismas durante 28 días bajo condiciones estándar de humedad y temperatura.

Para el desarrollo de la presente investigación se estableció emplear probetas en forma de paralelepípedos de concreto reforzado y adicionado con fibra de polipropileno, con dimensiones de 0.30 m x 0.30 m x 0.15 m, y así poder simular el comportamiento de una placa de concreto estándar con una relación A/C de 0.6 debido a que se utilizó un concreto premezclado de una de las concreteiras más importantes de la ciudad y un tamaño máximo de agregado de 1" proveniente de la mina Surata (Santander).

Se fabricaron 23 probetas con la relación A/C y dimensiones ya establecidas, a continuación se muestra la distribución de las probetas con sus respectivas temperaturas a las que fueron expuestas (ver tabla 3).

Para poder obtener la resistencia real de las probetas, se utilizaron dos probetas con las mismas dimensiones indicadas y se realizó la extracción de núcleos de las mismas, obteniendo así las resistencias esperadas luego de los 28 días de curado inicial.

Para poder analizar el comportamiento de la fibra de polipropileno dentro del concreto fue necesario elaborar 3 probetas de concreto reforzado con las mismas características pero sin adición de fibra, y se expusieron a fuego hasta alcanzar una temperatura de 1200 °C. De esta manera se realizó un comparativo con las probetas que presentaron la adición de fibra de polipropileno.

Tabla 3. Número de probetas asignadas para la exposición a fuego

Temperatura de Exposición (°C)	Numero de Probetas
Probetas para la resistencia a la compresión	2
Probetas sin fibra expuestas a 1200	3
200	3
400	3
600	3
800	3
1000	3
1200	3
Total Probetas	23

Fuente: Los Autores

Para la elaboración de las probetas se llevaron a cabo las siguientes actividades:

3.2.1 Caracterización de la materia prima.

Para la obtención del concreto se emplearon los siguientes materiales: Cemento Portland tipo III, agua, agregado fino, agregado grueso y fibra de polipropileno. A continuación se indicaran algunas características de los anteriores materiales y se describirá el método de caracterización usado en la presente investigación.

- **Cemento:** El tipo de cemento que se utilizó fue cemento Portland tipo III, para el cual se revisó que cumpliera con las especificaciones de las normas NTC 121³² y NTC 32³³ según la información suministrada por el fabricante.

Figura 5. Caracterización del cemento Portland tipo III utilizado

ANÁLISIS QUÍMICO (%)	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN NTC 321	ARGOS CONCRETERO
Oxido de Silice (SiO ₂)	20.45	----	----
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	4.39	----	----
Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	4.09	----	----
Oxido de Calcio (CaO)	64.56	----	----
Oxido de Magnesio (MgO)	0.80	Máx. 7.0	Máx. 6.0
Trióxido de Azufre (SO ₃)	2.65	Máx. 3.5	Máx. 3.5
Oxido de Sodio (Na ₂ O)	0.17	----	----
Oxido de Potasio (K ₂ O)	0.27	----	----
Oxido de Titanio (TiO ₂)	0.19	----	----
Oxido de Fósforo (P ₂ O ₅)	0.07	----	----
Pérdida al fuego	2.55	Máx. 4.0	----
Cal Libre	1.13	----	----
Residuo Insoluble	0.50	Máx. 3.0	----
Alcalis como Na ₂ O	0.35	Máx. 0.60	----
C ₃ S	64.49	----	----
C ₂ S	9.99	----	----
C ₃ A	4.71	Máx. 15.0	Máx. 15.0
C ₄ AF	12.45	----	----
ANÁLISIS FÍSICO	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN NTC 121	ARGOS CONCRETERO
Finura (permeabilidad al aire), cm ² / g	4125	Min. 2800	----
Finura Tamiz 45 µm, %	98.31	----	----
Expansión en autoclave, %	0.04	Máx. 0.80	Máx. 0.80
Resistencia a la compresión			
1 Día PSI (Mpa)	2015 (13.9)	Min. 1450 (10.0)	Min. 1740 (12.0)
3 Días PSI (Mpa)	4024 (27.8)	Min. 3045 (21.0)	Min. 3480 (24.0)
7 Días PSI (Mpa)		----	Min. 4700 (32.4)
28 Días PSI (Mpa)		----	Min. 6300 (43.4)
Flujo Mortero, %	110.0	----	----
Tiempo de fraguado (Vicat)			
Consistencia normal, %	26.0	----	----
Tiempo inicial de fraguado, minutos	170	Min. 45	----
Tiempo final de fraguado, minutos	250	Máx. 480	----
Requisitos físicos opcionales			
Falso Fraguado (método de la pasta), %	78.5	----	----

Certificamos que este cemento cumple con las Normas Técnicas Colombianas 121 y 321 para CEMENTO PORTLAND TIPO III. Los resultados expresados han sido obtenidos aplicando los ensayos normalizados en la Norma Técnica Colombiana.

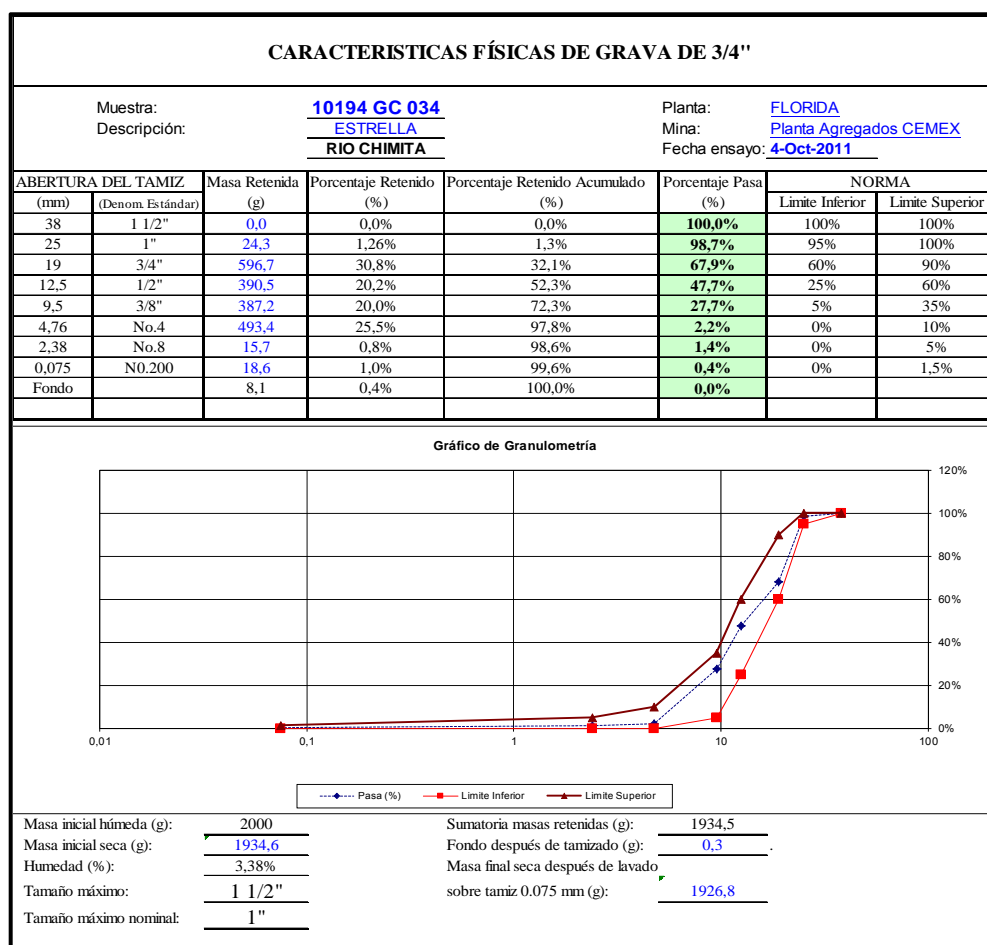
- **Agua:** Se utilizó agua potable procedente del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
- **Agregados:** Se trabajó con agregados procedentes del municipio de Chimitá (Santander), utilizando la arena como agregado fino y grava como agregado grueso. Se determinó el módulo de finura, peso específico,

³² _____. NTC 121 (1995) Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC-Norma Técnica Colombiana.

³³ _____. NTC 321 (1995) Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC-Norma Técnica Colombiana.

porcentaje de absorción y porcentaje de vacíos para cada uno de los agregados, por medio un análisis granulométrico basado en las normas: NTC 92³⁴, NTC176³⁵ y NTC 237³⁶. La clasificación de los agregados por tamaños (a fin de obtener una granulometría específica) se realizó según los requerimientos de las Normas NTC 77³⁷ y NTC 78³⁸.

Figura 6. Características físicas del agregado de grava de (1")



³⁴ _____. NTC 92 (1995) Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados compactados. NTC- Norma Técnica Colombiana.

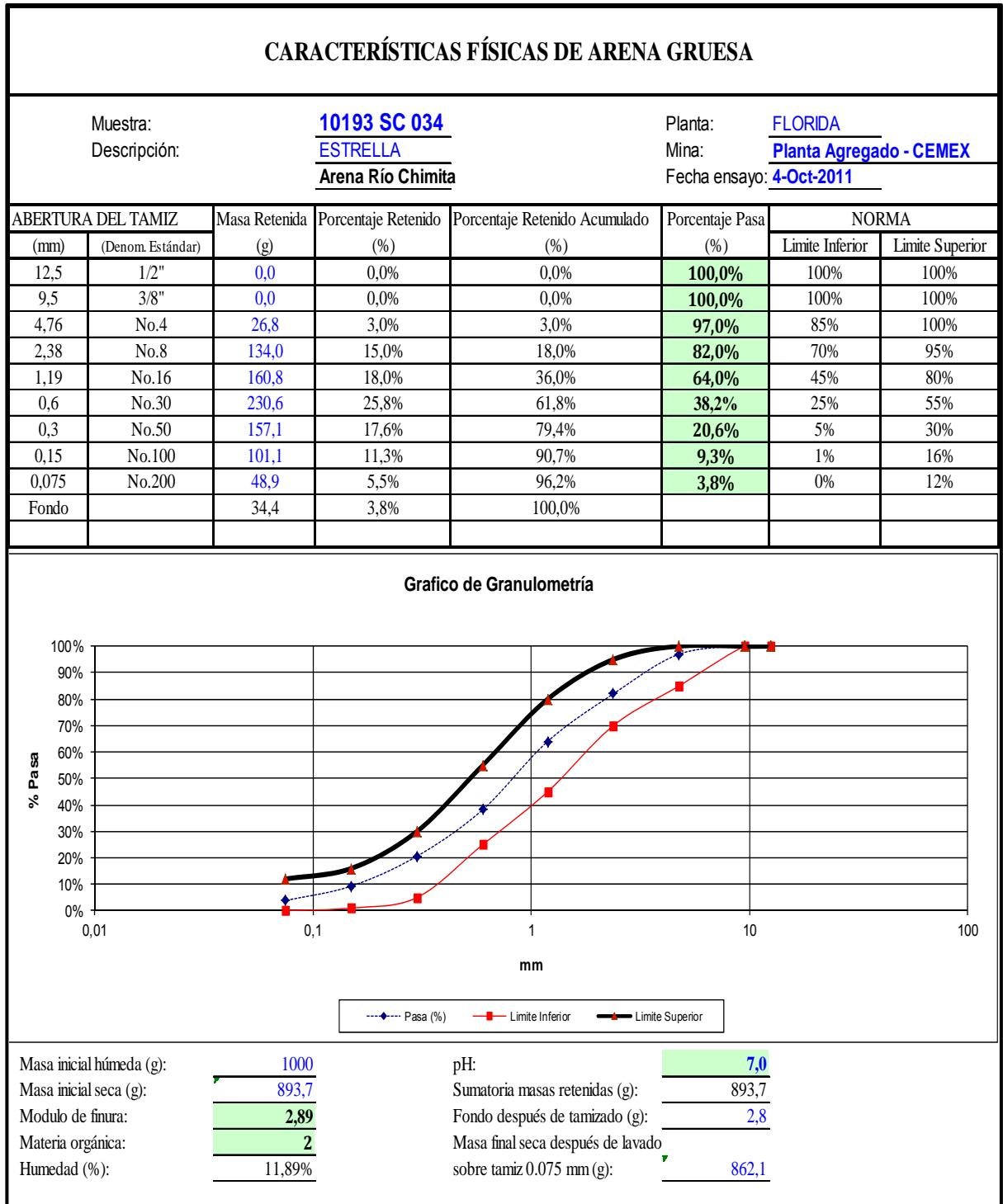
³⁵ _____. NTC 176 (1995) Método de ensayo para determinar la densidad y absorción del agregado grueso. NTC- Norma Técnica Colombiana.

³⁶ _____. NTC 237 (1995) Método de ensayo para determinar la densidad y absorción de agregado fino. NTC- Norma Técnica Colombiana.

³⁷ _____. NTC 77 (1995) Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), Análisis granulométrico. NTC- Norma Técnica Colombiana.

³⁸ _____. NTC 78 (1995) Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz INCONTEC74. Método de lavado. NTC- Norma Técnica Colombiana.

Figura 7. Características físicas del agregado fino



- **Fibra de Polipropileno:** La fibra de polipropileno corresponde a una fibra usada comercialmente de la casa TOXEMENT tipo TOC Fibra 500 (fibra de refuerzo secundario para concretos o morteros)³⁹. Siguiendo las recomendaciones del fabricante se adicionó fibra a razón de 1kg/m^3 , para la elaboración de las probetas se utilizaron 0.5 m^3 , y fue necesario adicionar 500 gr de fibra de polipropileno, debidamente caracterizada.

La caracterización de los materiales utilizados se llevó a cabo en la planta Cemex Bucaramanga, que se encuentra localizado en el Km 2 de la autopista Floridablanca – Piedecuesta.

3.2.2 Diseño de Mezcla.

El diseño de mezcla se realizó para una relación A/C de 0.6, con un tamaño máximo de agregado (1"), el diseño de mezcla realizado se presenta en el ANEXO A. este diseño corresponde a una mezcla comercial de una de las concreteiras mas importantes de la ciudad, regido por método ACI, debido a que es un concreto premezclado necesita mayores tiempos de manejabilidad y por esta razón se tiene una relación A/C tan alta.

3.2.3 Elaboración de las Probetas.

Para la elaboración de las probetas se elaboraron las 23 formaletas de madera de 2.5 cm de grosor, con dimensiones internas de $0.30 \times 0.30 \times 0.15$ [m] (ver figura 8), con el fin de realizar una sola mezcla de concreto con las mismas características para todas la probetas a ensayar y de esta forma obtener resultados con un menor porcentaje de error.

³⁹ FIBRA DE REFUERZO SECUNDARIO PARA CONCRETO O MORTERO. <Disponible en:http://www.toxement.com.co/pdf_2010/Toc%20Fibra%20500.pdf>visitada en: Abril 2012.

Figura 8. Formaleta diseñada para la elaboración de las probetas



Fuente: Los Autores

Luego de la elaboración de las formaletas se utilizó el concreto premezclado de la planta de concreto de Cemex Bucaramanga, con las características anteriormente señaladas.

Al instante de obtener la mezcla se procedió a combinarla con la fibra polimérica, por intermedio de un trompo mezclador, este procedimiento continuo hasta obtener una mezcla homogénea y poder proceder con el llenado de las formaletas, teniendo en cuenta compactar cada $1/3$ del volumen de la formaleta. El refuerzo se introduce a 4 cm de la cara inferior y seguidamente se procede con la compactación a través de una varilla metálica dando 30 golpes en toda la mezcla, esta compactación logro darle mayor uniformidad a la probeta. Fue necesario golpear la parte exterior de cada formaleta con un martillo de caucho, esto con el fin de eliminar el aire atrapado dentro de la probeta, evitar posibles defectos superficiales y principalmente darle una mayor homogenización a la mezcla.

Finalmente se introdujeron las termocuplas tipo K dentro de cada probeta a 4, 7 y 10 [cm] de la cara de exposición a fuego (ver figura 9) con el objetivo de mostrar el cambio de temperatura en el interior de cada una de las probetas.

Figura 9. Pasos para la elaboración de las probetas



a) Adición de fibra



a) Mezcla de fibra



c) Toma de asentamiento



d) Colocación del refuerzo



e) Colocación de las termocuplas



f) Vibrado de la mezcla



g) Probetas elaboradas

3.2.4. Fraguado y curado.

Posterior a la elaboración de las probetas se procedió a un periodo de fraguado de 12 horas (ver figura 10a), humedeciendo constantemente para evitar la pérdida de humedad de las muestras. Pasado este tiempo se procedió con el desencofrado (ver figura 10b) y se llevaron a un proceso de curado en condiciones estándar de temperatura (23°C) al aire libre, manteniendo la humedad constante durante los 28

días siguientes (ver figura 10c) con el fin de realizar un curado como el aplicado en la construcción de edificaciones y observar el comportamiento bajo condiciones reales⁴⁰. Para mantener la humedad de las probetas fue necesario aplicar una capa de agregado fino de 3 cm de espesor sobre estas y mantenerlas en un lugar fresco.

Figura 10. Procedimientos luego de la elaboración de las probetas



a) Proceso de Fraguado



b) Proceso de Desencofrado



c) Proceso de Curado

⁴⁰ _____. ICONTEC 1377 (1995) Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

En total se elaboraron 23 probetas prismáticas de concreto, a las cuales se le realizaron los ensayos de inspección visual, metrología dimensional, resistencia a la compresión, y velocidad de pulso ultrasónico, estos ensayos se hicieron antes y después de la exposición a fuego de las probetas, teniendo en cuenta que solo se expusieron a fuego 21 probetas y con las dos restantes se realizó una extracción de núcleos para poder obtener la resistencia real de las probetas utilizadas antes de la exposición a fuego.

3.3 CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DE EQUIPOS

En esta etapa fue necesario obtener un conocimiento previo sobre los equipos a utilizar como: mezclador de materiales (planta de concreto Cemex Bucaramanga), horno de calentamiento (laboratorio de caracterización de materiales de ingeniería civil), equipo para la toma de resistencia a la compresión MODELCT-1500 tipo AUTOMAX System marca Dirimpex Ltda, (planta de concreto Cemex Bucaramanga), y en especial el equipo de ultrasonido de marca CNSFARNELL LIMITED tipo PUNDIT PLUS MODEL PC1006 perteneciente a la escuela de ingeniería metalúrgica. Esta capacitación se llevó a cabo en el tiempo en el cual las probetas a ensayar se encontraban en el tiempo de curado, aproximadamente un mes.

3.4 ENSAYOS PREVIOS A LA EXPOSICIÓN AL FUEGO

Se desarrollaron pruebas de inspección visual, metrología dimensional, velocidad de pulso ultrasónico, y resistencia a la compresión, con el fin de obtener datos que luego se emplearan como punto de comparación en el momento de realizar los análisis. Estas pruebas se llevaron a cabo siguiendo los procedimientos establecidos en las normas NTC (Icontec) y ASTM (American Society for Testing and Materials).

Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos se muestran en el capítulo de resultados y análisis de resultados.

3.4.1 Inspección visual.

Luego que las probetas cumplieran previamente su tiempo de curado, estas se limpiaron y se secaron con el objetivo de hacerles detalladamente un análisis visual, el cual mostró la estructura superficial y las características físicas, como: presencia de grietas, porosidades u otros defectos superficiales inherentes al proceso de fabricación

3.4.2 Metrología dimensional.

En esta etapa se tomaron medidas de las dimensiones de las probetas (largo, ancho y alto) luego de finalizado el tiempo de curado de las probetas (28 días), con el fin de tener una referencia de sus dimensiones iniciales y así poder establecer un comparativo de estas dimensiones luego de su exposición a fuego a diferentes temperaturas. Esta fase incluye también el cálculo del peso de las probetas antes de realizar la exposición a fuego, esto se hizo a través de una balanza analítica la cual permitió obtener la lectura de tres cifras significativas para cada medición (ver figura 11).

Figura 11. Ensayo de metrología dimensional antes de ser sometidas a fuego



a) Ancho de la Probeta



b) Alto de la Probeta

3.4.3 Ensayo de ultrasonido.

El equipo que se empleó para realizar los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) fue el Model PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNSFARNELL LTDA, con transductores de 54 KHz de frecuencia (ver figura 12) perteneciente a la escuela de ingeniería metalúrgica y laboratorio de ensayos no destructivos de la universidad industrial de Santander. El equipo calcula el tiempo de propagación de la onda ultrasónica a través del material teniendo como proporción la distancia que hay entre los transductores.

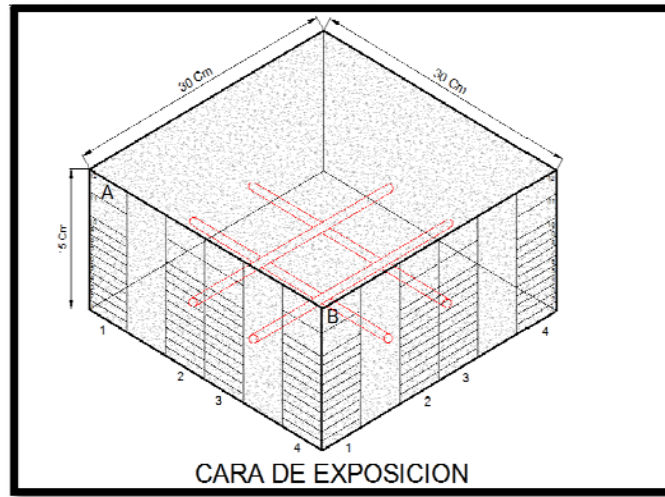
Figura 12. Toma de Mediciones de VPU



Fuente: Los autores

Las probetas se ensayaron mediante el método directo antes de la exposición a fuego, utilizando una cuadrícula de 1x5 cm la cuadrícula se dibujo perpendicular a la cara de exposición a fuego con el fin de facilitar la ubicación de los transductores a lado y lado de la probeta y poder conocer la variación de la velocidad de pulso a medida que se alejan los transductores de la cara de exposición. La toma de mediciones se hizo 48 puntos por cada cara de las probetas y por cada punto se hicieron dos mediciones para reducir el margen de error en los datos obtenidos (ver figura 13) y obtener los perfiles de velocidad.

Figura 13. Cuadrícula utilizada para la toma de valores de VPU



Fuente: Los autores

Se utilizó la cara inferior de la probeta como la zona de exposición paralelo al acero de refuerzo el cual se encuentra a 4 cm de la cara de exposición con el fin de observar su comportamiento luego de la exposición a fuego. El procedimiento seguido para realizar este ensayo se encuentra dentro de los lineamientos de la norma ASTM C 597-02.

Antes de realizar las mediciones de VPU se realizó el pulido y la limpieza de las caras de las probetas para obtener una superficie lisa y plana que proporcionara un mejor acople de los transductores y unas mediciones de VPU (Velocidad de Pulso Ultrasónico) con un margen de error inferior al 2% entre cada medición realizada (ver figura 14). Para lograr este objetivo fue necesario utilizar como acoplante la vaselina, debido a que esta presenta excelentes propiedades de humectabilidad (capaz de mojar la superficie y el transductor), viscosidad adecuada, baja atenuación, bajo costo, no es tóxica y no es corrosiva, propiedades que la hacen el acoplante adecuado para este tipo de ensayos.

Figura 14. Pulido y Limpieza de las Probetas



Fuente: Los autores

Teniendo las probetas limpias, y con una superficie lisa, se procedió a conectar los transductores en sus puertos correspondientes en el equipo de ultrasonido, y se calibró el equipo con los parámetros señalados en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros establecidos en el equipo de ultrasonido

VOLTAJE	500V
UNIDADES	Métricas
MODO DE PULSO	Continuo
MODO DE ALMACENAMIENTO	Apagado
PULSO DE REFERENCIA	10 Seg
DISTANCIA ENTRE TRANSDUCTORES	0.3 m
LIMITE SUPERIOR	9999
LIMITE INFERIOR	1

Fuente: Los autores

3.4.4 Ensayo de resistencia a la compresión.

Debido a que las probetas analizadas presentan hierro de refuerzo, fue necesario realizar una extracción de núcleos de 3" de diámetro de cada una de las probetas. Con el fin de cumplir con la relación establecida por la NTC 3658 se utilizó 15 cm de espesor para las probetas, y posteriormente se realizó el ensayo de resistencia a la compresión a través de la maquina universal de ensayos MODELCT-1500 tipo AUTOMAX, certificada y calibrada bajo la norma NTC 150 7500-1 dentro de los

rangos de velocidad y carga permitidas. El ensayo se llevo a cabo bajo la norma ASTM C 39/C39M-04⁴¹.

Figura 15. Fotografías de toma de la resistencia a la compresión



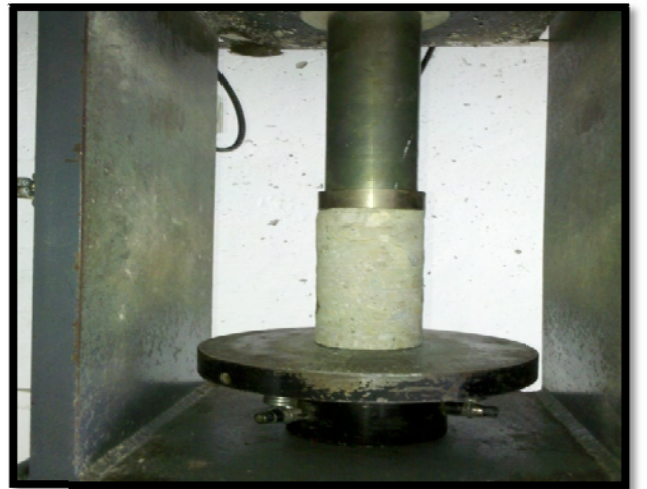
a) Extracción de Núcleos



b) Probeta con núcleos extraídos



c) Núcleos de Probetas



d) Ensayo de Resistencia a la Compresión

Fuente: Los autores

⁴¹ _____. ASTM C39/C39-M04. United States. ASTM – International American Society for Testing and Materials.

El ensayo de resistencia a la compresión realizado en esta investigación se hizo teniendo en cuenta los siguientes pasos:

Como primera medida se hizo la preparación de las probetas; esta etapa comprendía la extracción de núcleos de cada una de las probetas, y la nivelación de cada una de las caras que iban a estar en contacto con la máquina, esta nivelación se hizo por medio de un desbaste el cual permitió eliminar cualquier alteración o irregularidad presente en las probetas al momento de practicar el ensayo. En este paso fue primordial determinar las dimensiones de cada cilindro extraído, para así calcular el área a la cual fue aplicada la carga.

Por último se pasó a la aplicación de la carga, la cual se hizo a una velocidad constante y continua hasta que se provocó la ruptura en el cilindro.

La extracción de núcleos y el ensayo de resistencia a la compresión se le realizaron a las 21 probetas que se les aplicó ensayo al fuego y a dos probetas adicionales de referencia que no fueron expuestas a fuego, con el fin de obtener la resistencia real del concreto.

3.5 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO

Antes de someter las probetas a fuego se hizo la adecuación y calibración previa del horno con el cual se trabajó y para la cual se tuvieron en cuenta las siguientes actividades: adecuación del horno, exposición a fuego y enfriamiento post-exposición.

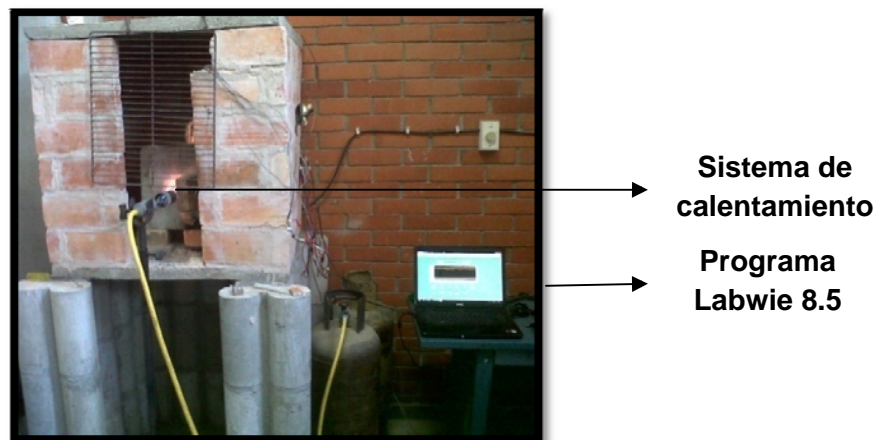
3.5.1 Adecuación del horno.

Para poder realizar el ensayo de fuego se utilizó un horno de ladrillo de 80cm x 90cm x 70cm que se encuentra en el laboratorio de ingeniería civil, el cual consta de una base de cilindros de concreto, una placa de concreto reforzado para

soporte de las probetas y 6 termocuplas alrededor para controlar el comportamiento de la temperatura dentro del horno. Para poder trabajar a altas temperaturas fue necesario instalar un extractor de calor y de esta manera mantener estables las condiciones de temperatura dentro del horno.

La fuente de calentamiento del horno, consistió en una llama lograda mediante una boquilla alimentada con gas propano cuya intensidad se reguló manualmente (ver figura 14).

Figura 16. Horno utilizado para la exposición a fuego de las probetas



Fuente: Los autores

Para controlar la temperatura se le ajusto una termocupla tipo K (ver figura 14) la cual midió y controló respectivamente la temperatura de la llama que incidía sobre la cara de exposición de cada probeta.

Esta termocupla principal se conectó a una tarjeta de adquisición (ver figura 16), la cual era la encargada de transmitir los datos al computador. De igual manera se conectaron a la tarjeta cada una de las termocuplas presentes en cada probeta, y a través de un programa desarrollado en Labwiew 8.5, se logró el registro y la toma de datos (ver figura 16). Este programa suministraba la temperatura con respecto al tiempo mediante una curva de calentamiento patrón, la cual mostraba

el comportamiento que se debía seguir en cada uno de los ensayos de exposición a fuego, siguiendo los requerimientos de la norma ISO 834. A la vez el programa Labview 8.5 permitió observar cada una de las temperaturas, tanto de la llama como de las temperaturas internas de las probetas.

Figura 17. Termocupla tipo K

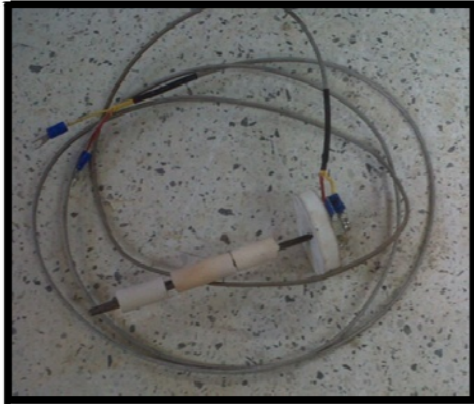


Figura 18. Tarjeta de Adquisición



Fuente: Los autores

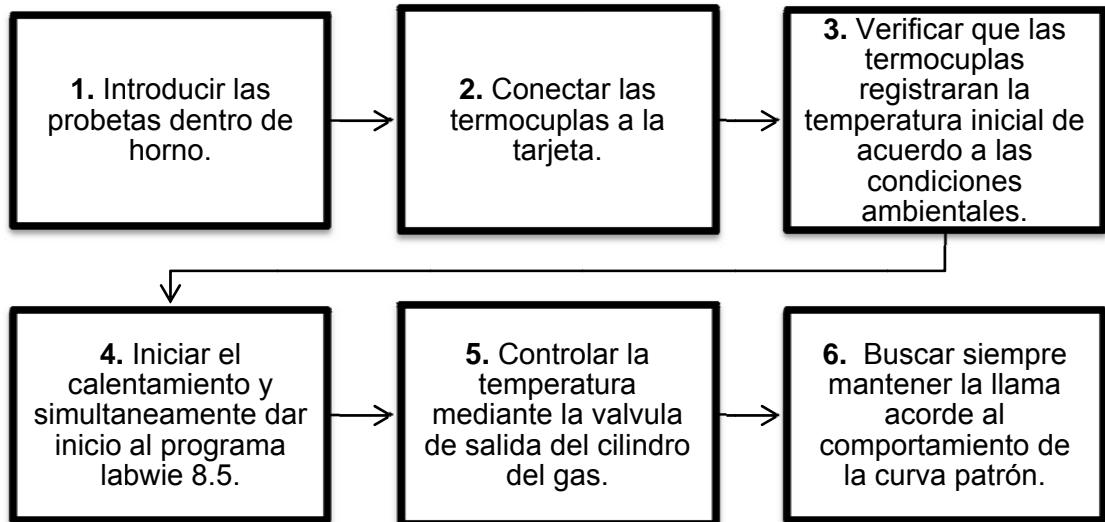
Es importante tener en cuenta que la estandarización de la curva de calentamiento del horno para probetas sometidas a la exposición del fuego la estableció el grupo de investigación INME a través de estudios anteriores.

3.5.2 Exposición a fuego.

Durante el desarrollo de esta etapa se logró la exposición de las probetas a fuego siguiendo la norma ISO 834⁴².

⁴² __. ISO 834 (1975) "Fire Resistance Test – Element of Building, Construction".ISO – International Organization Standardization.

Figura 19. Procedimiento para la exposición a fuego de las probetas



Fuente: Los autores

La temperatura se mantenía constante durante una hora luego de alcanzar la temperatura deseada para cada uno de los ensayos, teniendo en cuenta que el tiempo de alcance de la temperatura deseada para las probetas expuestas a 200, 400 y 600 grados centígrados era más rápido que alcanzar las temperaturas de 800, 1000 y 1200 grados centígrados.

3.5.3 Enfriamiento post-exposición.

Luego de finalizar cada ensayo se procedió al enfriamiento de las probetas. Las probetas que habían sido expuestas a 200, 400, 600 y 800 grados centígrados, se dejaron enfriar dentro del horno durante aproximadamente 30 minutos, posteriormente se sacaron del horno y se dejaron a temperatura ambiente. Para las probetas expuestas a temperaturas de 1000 y 1200 grados centígrados se dejaron enfriar aproximadamente por 120 minutos, esto con el fin de evitar que los cambios bruscos de temperatura causaran grietas y fisuras en las probetas. Luego

se sacaron del horno y de igual manera que las probetas anteriores se dejaron a temperatura ambiente, para aplicarles los ensayos respectivos.

3.6 ENSAYOS POSTERIORES A LA EXPOSICIÓN AL FUEGO

Se realizaron pruebas de inspección visual, metrología dimensional, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión, con el fin de comparar los datos obtenidos con las pruebas previamente efectuadas.

3.6.1 Metrología Dimensional.

Se tomó la medida de cada una de las probetas a través del medidor digital para verificar si hubo alguna variación de las probetas luego de ser sometidas a fuego y de esta manera establecer si las probetas conservan algún tipo de homogeneidad, o si por el contrario la temperatura incide en el cambio de sus dimensiones.

Consecutivamente se colocaron cada una de las probetas en la balanza analítica, para pesarlas y de esta manera determinar la pérdida de peso que posiblemente pudo darse en las probetas durante la exposición a fuego.

3.6.2 Inspección Visual.

En esta etapa se observó detenidamente cada probeta y se identificó cada uno de los cambios superficiales (grietas, fisuras o descascaramiento en las mismas) ocurridos para cada temperatura. En esta prueba respectivamente se identificó el deterioro de cada una de las probetas a diferentes temperaturas de exposición.

3.6.3 Ensayo de Ultrasonido.

En esta etapa se hizo la prueba de ultrasonido a las 21 probetas expuestas a fuego, haciendo uso de la cuadrícula dibujada sobre la superficie de la muestra de 1x5 cm para ayudar a la ubicación de los transductores (ver figura 13), esto con el fin de hacer una toma minuciosa de datos y posteriormente presentar el perfil de velocidades de las probetas. La toma de mediciones se hizo en los mismos puntos mencionados en el numeral 3.4.3 y por cada punto se realizaron dos mediciones.

Este ensayo se realizó transcurridas 24 horas luego de la prueba de fuego para todas las probetas en general.

3.6.4 Ensayo de resistencia a la compresión.

En este ensayo se siguió el mismo procedimiento descrito en el numeral 3.4.4, con el objetivo de observar las variaciones de cada una de las resistencias tomadas anteriormente en relación a las temperaturas a las que fueron sometidas cada una de las probetas.

3.7 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Luego de realizar las pruebas se procedió hacer los respectivos análisis de resultados a cada uno de las probetas, para preparar el informe final de esta investigación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y sus respectivos análisis en los ensayos de inspección visual, metrología dimensional, velocidad de pulso ultrasónico, y resistencia a la compresión de las probetas de concreto reforzadas y adicionadas con fibra de polipropileno.

Además se muestran las relaciones entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico, y la relación de las diferentes temperaturas de exposición respecto a los valores de VPU (Velocidad de Pulso Ultrasónico) obtenidos.

4.1 REALIZACIÓN DE PRUEBAS ANTES DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.

A continuación se presentaran cada uno de los resultados obtenidos en los ensayos realizados previamente a la exposición a fuego de las probetas.

4.1.1 Metrología dimensional.

Esta etapa comprende la toma del peso de las probetas y el registro de las dimensiones: Largo, ancho y alto de cada probeta. La tabla 5 muestra un promedio del peso a diferentes temperaturas de cada una de las probetas antes de ser expuesta a fuego.

Tabla 5. Peso promedio de las probetas antes de ser expuesta a fuego

Temperatura de exposición (°C)	Peso Promedio antes de exposición (Kg)
200	30,8
400	29,68
600	31,75
800	30,9
1000	31,95
1200	32,38
Probeta sin fibra 1200	33,2

Fuente: Los autores

La diferencia de pesos obtenidos en la tabla 5 varían considerablemente debido a que la altura de las probetas fue poco constante durante su fundición, sin embargo esta variable se asumió luego de la exposición a fuego de las probetas.

Seguidamente al cálculo de los pesos se procedió a medir cada una de las dimensiones de las probetas, las cuales se registran en la tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones de las Probetas antes de ser expuestas a fuego

Temperatura de Exposición [°C]	Largo (L _a) [mm]	Ancho (L _b) [mm]	Alto [mm]
200	302,24	300,34	155,46
400	299,27	300,37	154,80
600	300,30	302,22	158,03
800	300,78	302,05	153,42
1000	300,04	302,62	156,95
1200	300,74	301,61	162,61
Probetas sin fibra a 1200	300,56	301,53	156,88

Fuente: Los autores

Como se puede observar en la tabla 6 las dimensiones de las probetas presentan una variabilidad en la altura, debido a que la madera usada para el diseño de las formaletas presentaba algunas irregularidades lo cual no permitió una altura constante para todas las probetas

4.1.2 Inspección visual.

En la figura 18 se puede observar la imagen de una probeta antes de ser expuesta a fuego, en la cual se visualizan ciertas características físicas de la superficie.

Figura 20. Fotografía de la probeta antes de ser expuesta a fuego



Fuente: Los autores

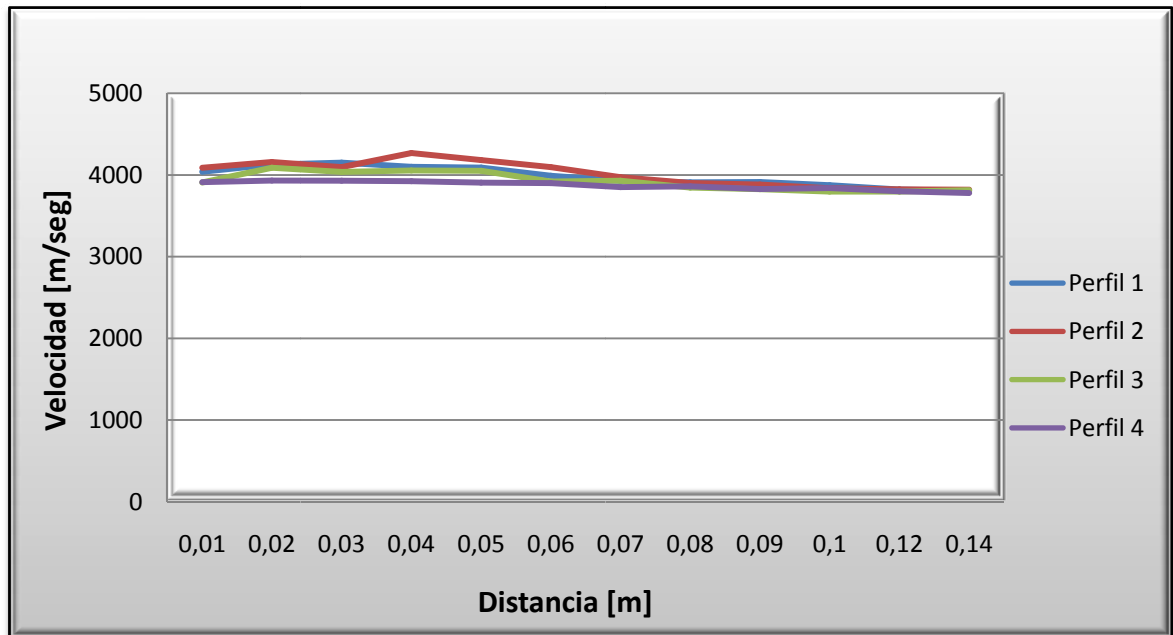
Después de realizar a cada una de las probetas elaboradas las pruebas de metrología dimensional e inspección visual se encontró que la mayoría de las probetas presentaron un estado superficial uniforme y homogéneo con superficies poco rugosas, sin presencia de descascaramiento y grietas o fisuras visibles, a causa de que la adición de la fibra al concreto en estado fresco, reduce la formación de fisuras por retracción plástica.

4.1.3 Ensayo de Ultrasonido.

Para representar cada uno de los valores obtenidos durante esta prueba se calculó un valor promedio de cada uno de las probetas a diferentes temperaturas.

Los perfiles mostrados en las gráficas de la 1 hasta la 7 muestran un comportamiento muy análogo con los datos obtenidos, se puede observar la variación de la velocidad de pulso ultrasónico en las cercanías del refuerzo, esto se debe a que la velocidad del pulso en el acero es hasta dos veces mayor que en el concreto simple y, bajo ciertas condiciones, el primer pulso en llegar al transductor receptor viaja parcialmente en el concreto y parcialmente en el acero⁴³. En el Anexo C se representa un ejemplo de los datos de VPU antes de la exposición a fuego.

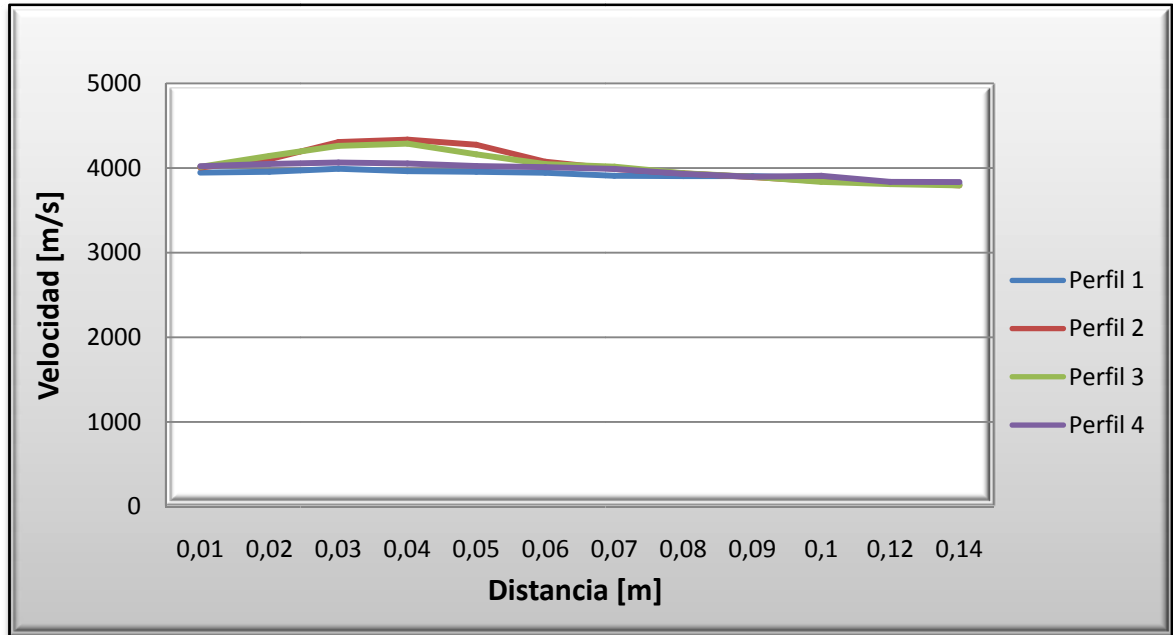
Gráfica 1. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 200 °C



Fuente: Los autores

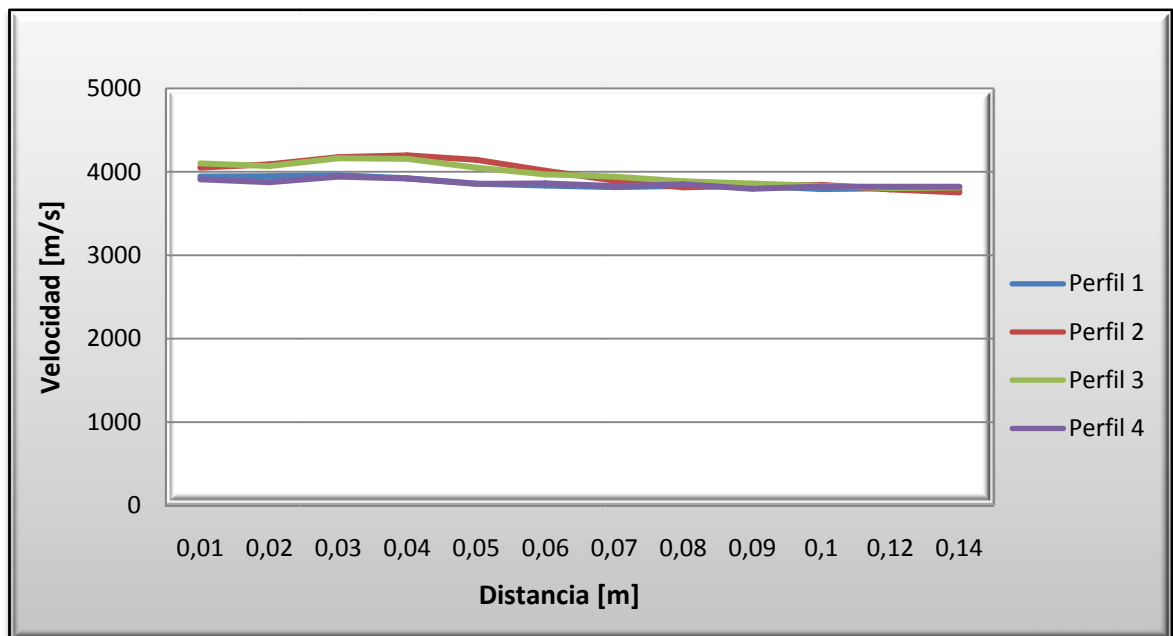
⁴³ _____. NTC 4325 (1997) Método de ensayo para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto. NTC- Norma Técnica Colombiana.

Gráfica 2. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 400 °C



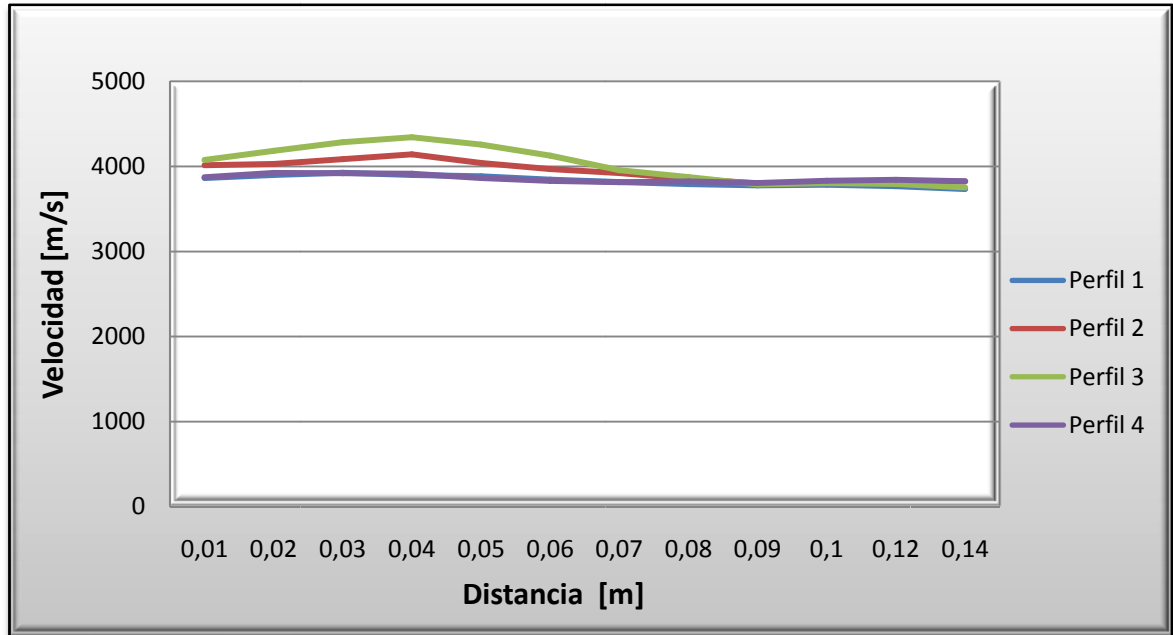
Fuente: Los autores

Gráfica 3. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 600 °C



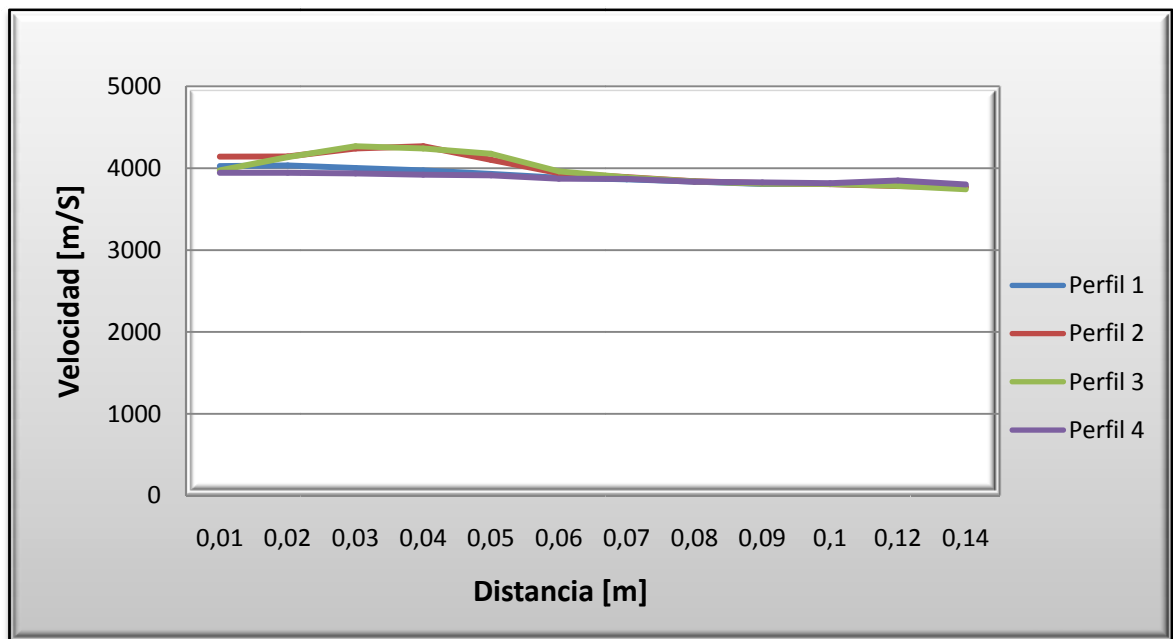
Fuente: Los autores

Gráfica 4. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 800 °C



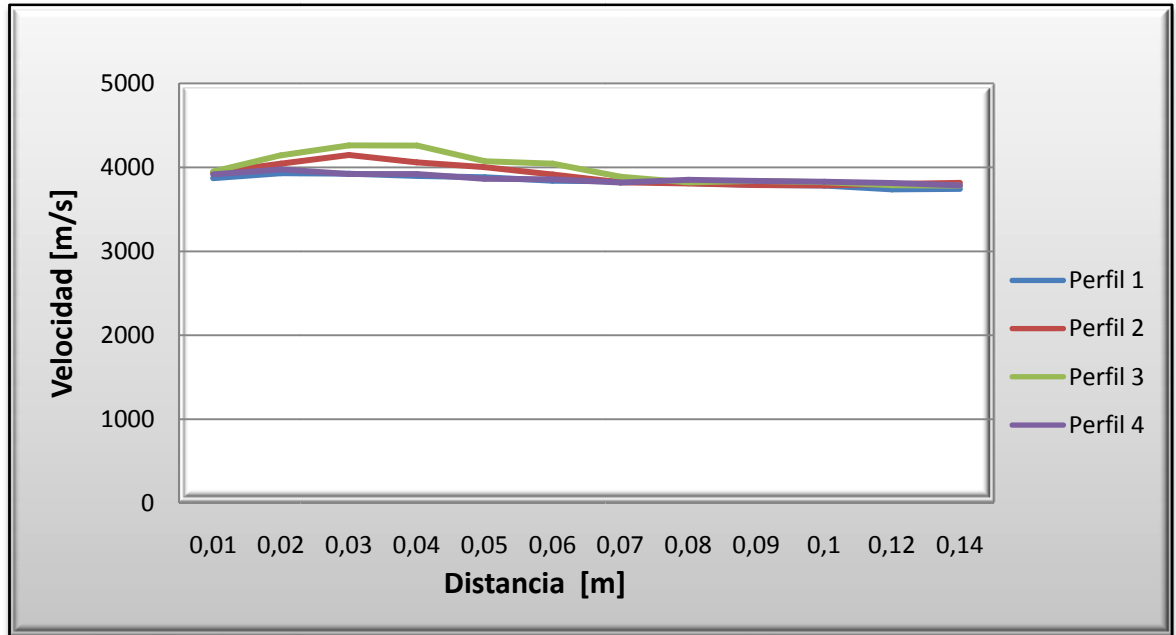
Fuente: Los autores

Gráfica 5. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 1000 °C



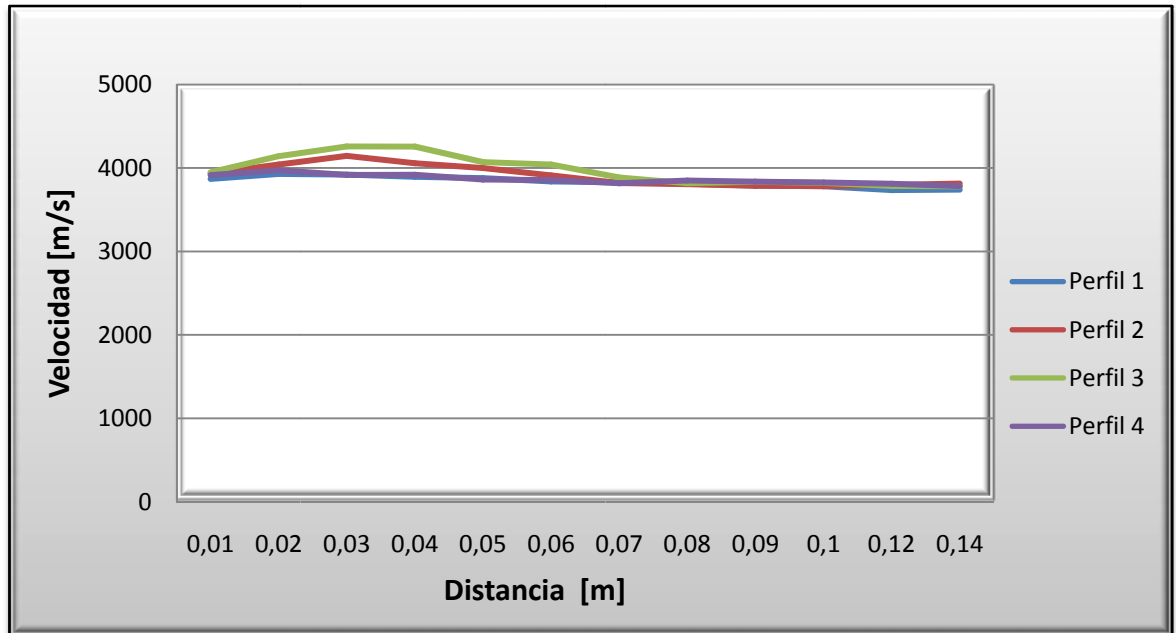
Fuente: Los autores

Gráfica 6. Perfiles de Velocidad de probetas antes de ser expuestas a 1200°C



Fuente: Los autores

Gráfica 7. Perfiles de Velocidad de probetas sin fibra antes de ser expuestas a 1200 °C



Fuente: Los autores

En la gráfica 7 se observa el comportamiento promedio de la VPU de las probetas sin adición de fibra de polipropileno y podemos ver que estas tampoco presentan variaciones con respecto a las probetas con fibra y de igual forma se presentan aumentos en las velocidades en las cercanías de refuerzo.

4.1.4 Ensayo de resistencia a la compresión.

Este ensayo se le realizó a dos probetas patrón a las cuales se les practicó la extracción de 3 Núcleos bajo condiciones ya establecidas⁴⁴. Con el objetivo de conocer la resistencia del concreto utilizado.

En la tabla 7 se muestra un promedio de los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión para las probetas antes de ser expuestas a fuego.

Tabla 7. Resultados de resistencia a la compresión para probetas antes de ser expuestas a fuego

Probeta Patrón	Resistencia a la compresión MPA	Resistencia promedio MPA
1	22,24	22,47
	22,38	
	22,79	
2	21,91	22,16
	22,35	
	22,23	
Resistencia Promedio		22,315

Fuente: Los autores

De acuerdo a la resistencia obtenida después de la extracción de núcleos de las probetas patrón, el concreto se puede clasificar como un concreto de resistencia moderada según la (Tabla 2. Clasificación del concreto según su resistencia a la compresión), el cual es un concreto convencional utilizado para la construcción de viviendas y demás estructuras de ocupación normal.

⁴⁴ _____. NTC 3658 (1994) Método para la obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas de concretos aserradas. NTC-Norma Técnica Colombiana.

4.2 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO

El calentamiento de las probetas se llevó a cabo de acuerdo a la curva característica establecida en la norma ISO 834. Las siguientes graficas muestran las curvas obtenidas en el calentamiento de cada una de las probetas a diferentes temperaturas. En la tabla 8, se identifica cada termocupla, lo cual resulta necesario para interpretar adecuadamente cada una de las gráficas de calentamiento descritas a continuación.

Tabla 8. Identificación de las termocuplas empleadas en las gráficas de las curvas de calentamiento

Termocupla	Descripción
1	Termocupla de registro de las temperatura de la llama a lo larga de cada prueba.
2	Termocupla de registro de la temperatura interna de la probeta a 4 cm de la cara de exposición.
3	Termocupla de registro de la temperatura interna de la probeta a 7 cm de la cara de exposición.
4	Termocupla de registro de la temperatura interna de la probeta a 10 cm de la cara de exposición.

Fuente: Los autores

4.2.1 Curvas de calentamiento de las probetas en el ensayo a fuego.

Los gráficos del 8 al 13 muestran el comportamiento en relación al tiempo de la curva de calentamiento que se llevó a cabo para cada una de las probetas sometidas a sus respectivas temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C y 1200°C. El calentamiento de cada una de las probetas se realizó buscando un comportamiento que fuera similar a la curva de calibración estándar establecida por la norma ISO 834.

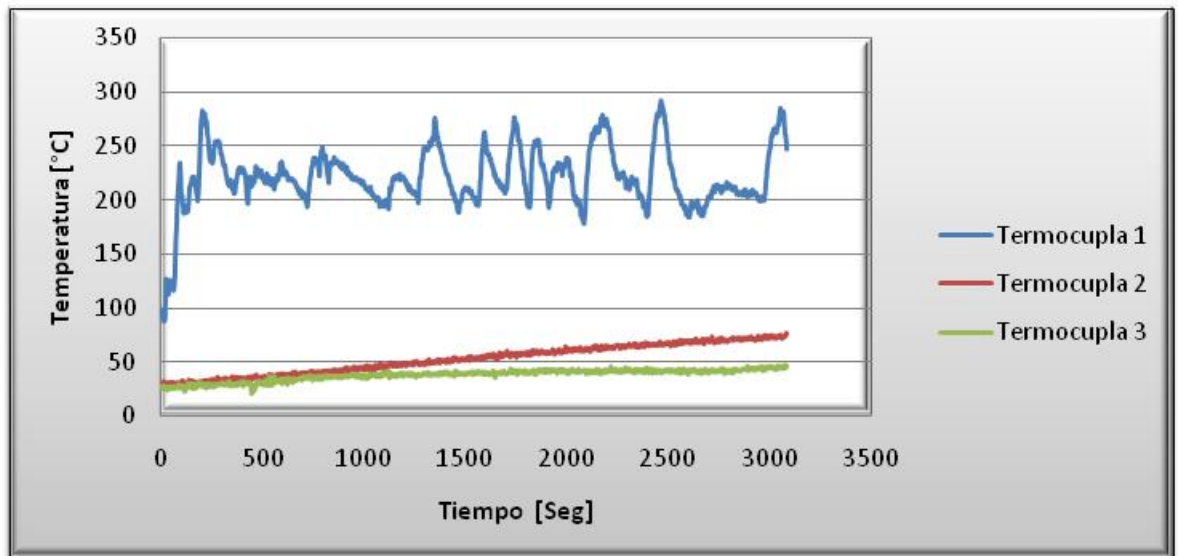
Para cada ensayo se dejaron tiempos de calentamiento de aproximadamente una hora, sin tener en cuenta el tiempo que la termocupla 1 tardaba en alcanzar la temperatura deseada para cada prueba. Luego de alcanzada la temperatura, y debido a que el sistema de calentamiento se lograba de forma manual, ocurrían

fluctuaciones en los ensayos de hasta $\pm 27^{\circ}\text{C}$ en relación a la temperatura de estudio, esto se puede evidenciar en algunas de las gráficas.

En las gráficas 8, 9 y 10 se puede evidenciar el comportamiento de las probetas sometidas a temperaturas de 200°C , 400°C y 600°C , observándose las mayores fluctuaciones, y haciéndose más notables en la gráfica 8 y 9. Esta fluctuación se da en el registro de la temperatura de la termocupla 1, a consecuencia de la complicada manipulación de la válvula de salida del combustible, ya que se trataban de temperaturas muy bajas en relación a las otras y resultaba difícil de mantener el comportamiento de la curva patrón.

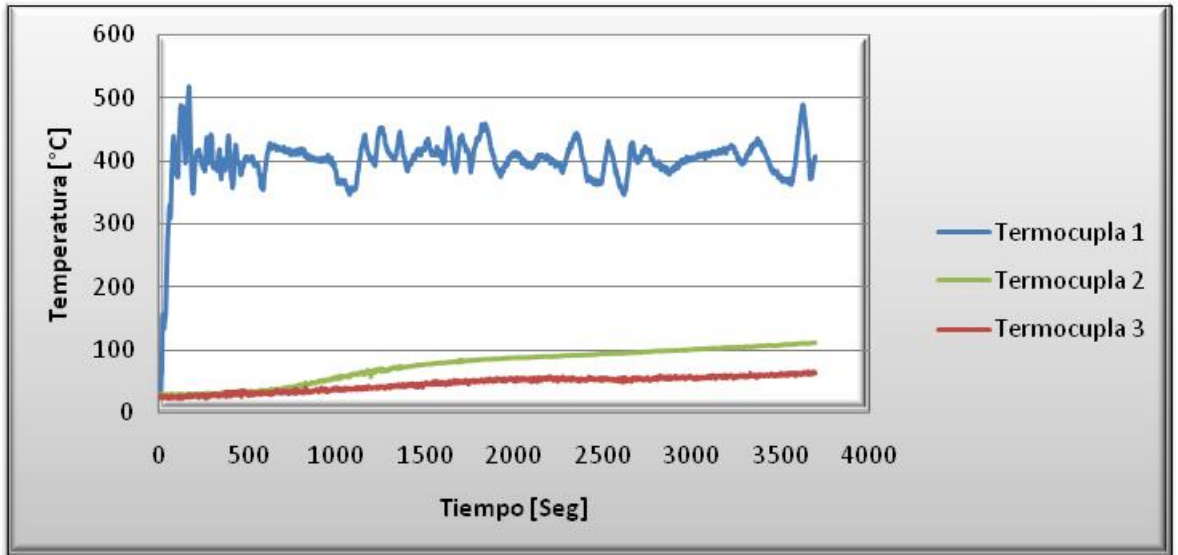
De igual forma se puede observar en todas las gráficas un aumento progresivo para cada una de las temperaturas registradas por las termocuplas interiores de las probetas, mostrando siempre una temperatura más alta en la termocupla 2 ya que esta se encontraba a solo 4 cm de la cara de exposición en cercanías al acero de refuerzo.

Gráfica 8. Temperatura Vs tiempo de exposición a 200°C



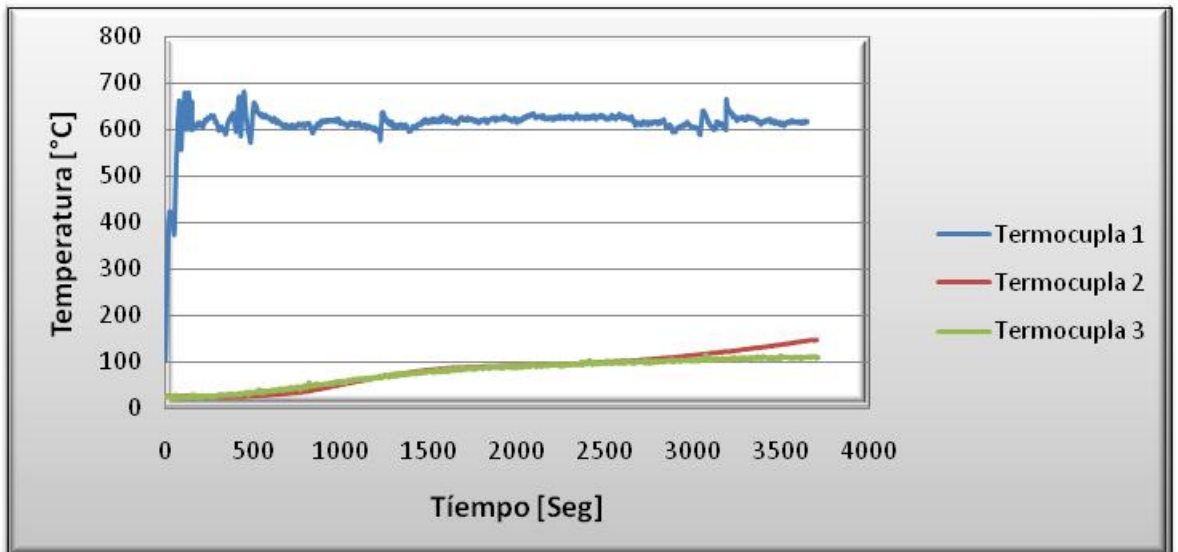
Fuente: Los autores

Gráfica 9. Temperatura Vs tiempo de exposición a 400°C



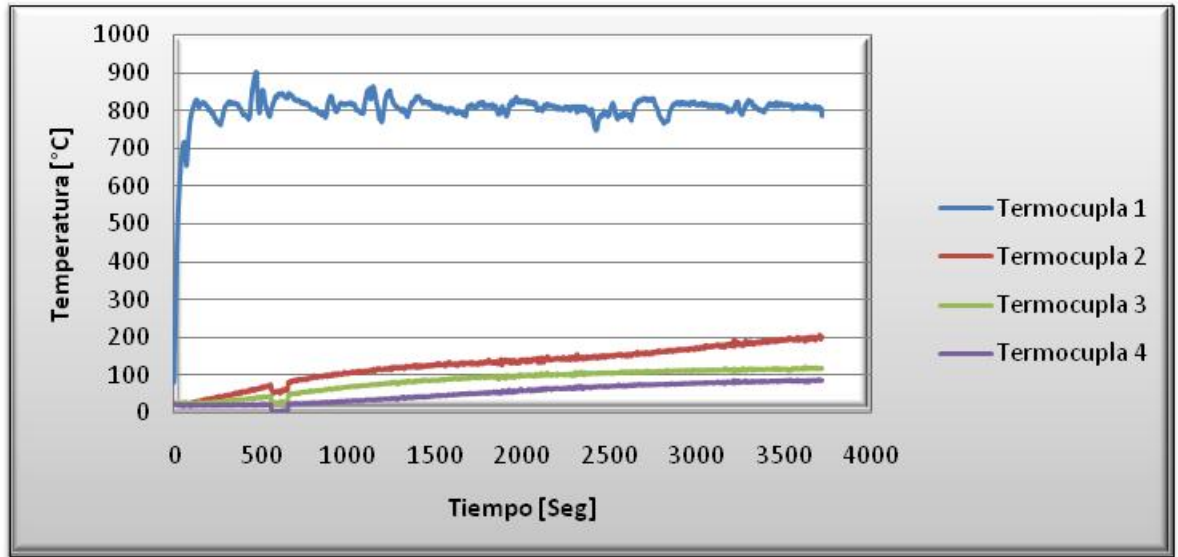
Fuente: Los autores

Gráfica 10. Temperatura Vs tiempo de exposición a 600°C



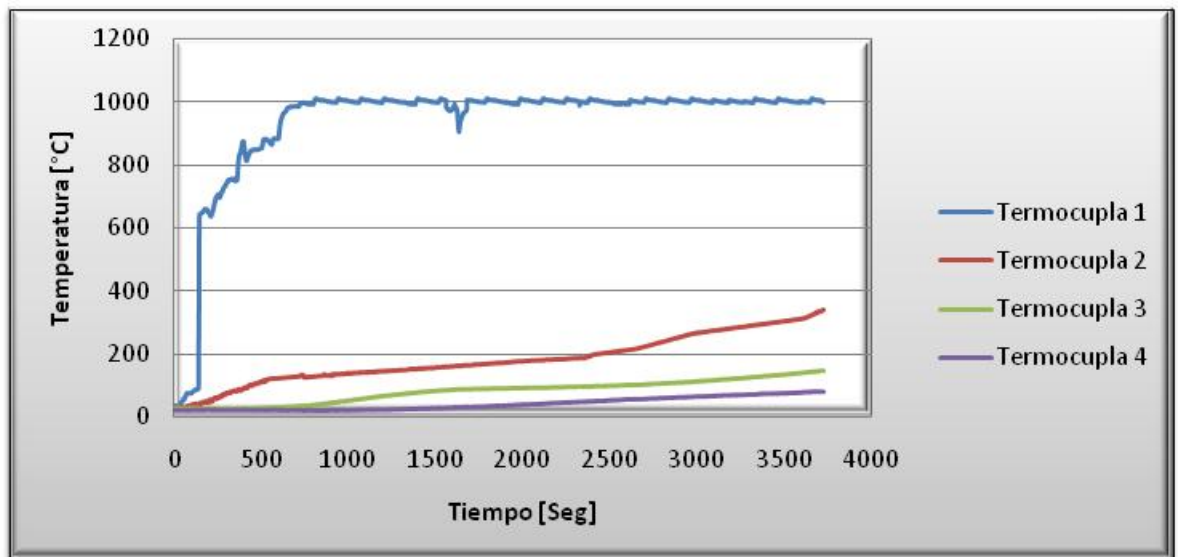
Fuente: Los autores

Gráfica 11. Temperatura Vs tiempo de exposición a 800°C



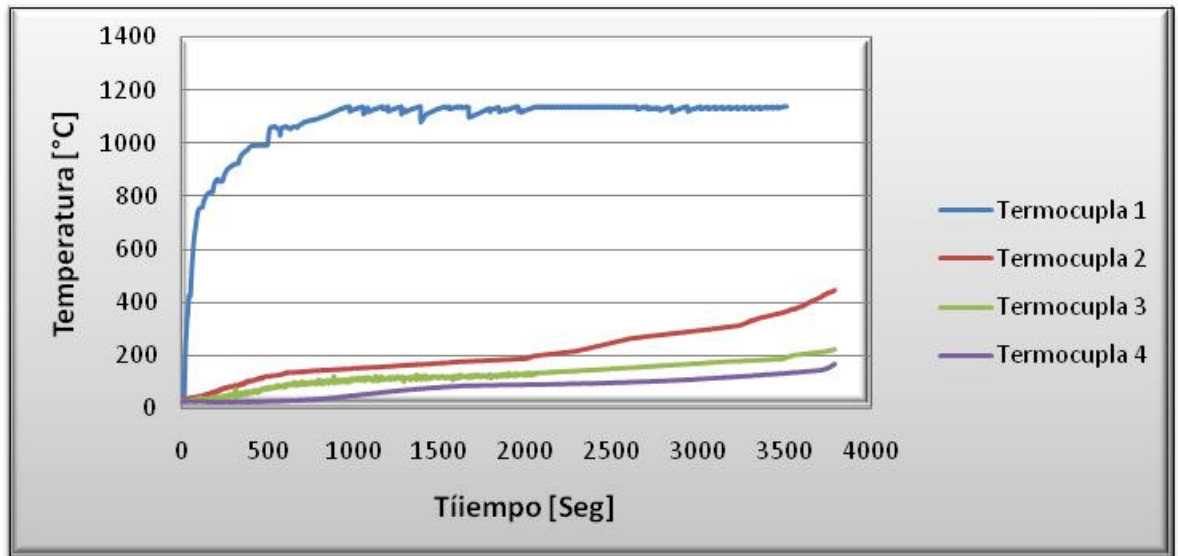
Fuente: Los autores

Gráfica 12. Temperatura Vs tiempo de exposición a 1000°C



Fuente: Los autores

Grafica 13. Temperatura Vs tiempo de exposición a 1200°C



Fuente: Los autores

En las gráficas 12 y 13, se puede apreciar mejor la curva de calentamiento generada a lo largo de la exposición a fuego, debido a que a estas temperaturas se logró una mejor manipulación de la válvula de salida y por consiguiente mantener un poco más constante las temperaturas deseadas. Es importante anotar que a partir de la temperatura de 800°C, las probetas tenían en su interior 3 termocuplas, esto porque eran temperaturas mucho mayores y por lo tanto se registraban cambios considerables en el interior de las probetas. De igual manera a las probetas anteriores, las termocuplas internas muestran un crecimiento con tendencia lineal de la temperatura a medida que aumenta el tiempo.

Para el ensayo en el cual se esperaba obtener una temperatura de 1200°C, solo se pudo alcanzar una temperatura de 1140°C, bajo las condiciones de trabajo ya establecidas.

4.3 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DESPUÉS DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.

En esta fase se muestran cada uno de los resultados obtenidos en las probetas luego de ser expuestas a fuego, mediante ensayos de: Metrología dimensional, inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión. Con estos resultados y con los resultados de los ensayos obtenidos previos a la exposición a fuego, se hará una comparación, la cual relaciona cada una de las variables que influyen en el comportamiento de las probetas a diferentes temperaturas.

4.3.1 Metrología dimensional.

A continuación se muestra una tabla en donde se puede observar la pérdida de peso que se obtuvo después del ensayo al fuego.

Tabla 9. Pérdida de peso de las probetas

Temperatura [°C]	Peso promedio PRE-Exposición [Kg]	Peso promedio POST-Exposición [Kg]	Diferencias de pesos	Porcentaje de pérdida de peso
200	30.80	30.59	0.21	0.68
400	30.48	30.15	0.33	1.08
600	31.34	30.84	0.5	1.59
800	30.90	30.06	0.84	2.71
1000	31.57	30.59	0.98	3.10
1200	32.37	31.36	1.01	3.12
PSF 1200	33.22	32.17	1.05	3.16

Fuente: Los autores

En la tabla 9 se puede apreciar claramente que la acción del fuego causó una pérdida en el peso de cada una de las probetas, debido a que cuando el concreto endurecido es sometido a temperaturas elevadas o a la acción del fuego, ocurren importantes reacciones fisicoquímicas que causan el deterioro del mismo. La pérdida de peso se debe principalmente por la pérdida de humedad, aparición de fisuras y aumento de la porosidad.

Se aprecia que el aumento en la pérdida de peso se ve directamente relacionado con la temperatura de exposición, a medida que aumenta la temperatura de exposición, aumenta notoriamente la pérdida de peso de las probetas y por consiguiente ocurre un aumento en la diferencia entre los pesos antes y después de la exposición a fuego.

Las dimensiones de las probetas presentaron una pequeña variación en sus medidas, de igual forma esta variación está relacionada con el aumento de la temperatura de exposición de cada probeta, la cual pudo producir una contracción mínima en el concreto (ver Tabla10).

Tabla 10. Dimensiones de las probetas antes y luego de la exposición a fuego

Temperatura de Exposición [°C]	Pre- Exposición a fuego			Post- Exposición a fuego		
	Largo (L _a) [mm]	Ancho (L _b) [mm]	Alto [mm]	Largo (L _a) [mm]	Ancho (L _b) [mm]	Alto [mm]
200	302,24	300,34	155,46	302,23	300,33	155,43
400	299,27	300,37	154,80	299,22	300,32	154,77
600	300,30	302,22	158,03	300,24	302,18	158,00
800	300,78	302,05	153,42	300,71	302,02	153,38
1000	300,04	302,62	156,95	300,00	302,56	156,90
1200	300,74	301,61	162,61	300,65	301,54	162,56
Probetas sin fibra a 1200	300,56	301,53	156,88	300,46	301,43	156,80

Fuente: Los autores

4.3.2 Inspección visual.

Los resultados obtenidos mediante la inspección visual, luego de la exposición a fuego de cada una de las probetas se pueden observar en la figura 19.

Figura 21. Fotografías de las superficies de las probetas expuestas a fuego



a) Probeta expuesta a 200°C



b) Probeta expuesta a 400°C



b) Probeta expuesta a 600°C



d) Probeta expuesta a 800°C



e) Probeta expuesta a 1000°C



f) Probeta expuesta a 1200°C

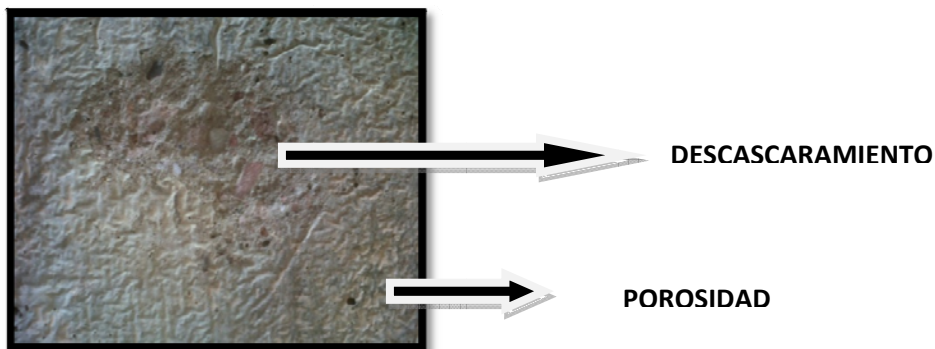
Como se puede observar en las gráficas las probetas expuestas a 200°C, 400°C, y 600°C, presentan una marca oscura generada por la combustión de la llama sobre la superficie del concreto, esto se debe a que para alcanzar estas temperaturas

se requiere de una llama amarilla, y la combustión es muy pobre por lo que deja restos de combustibles sin consumir, lo que hace que se produzcan residuos de combustión y genere ese aspecto en las probetas expuestas a estas temperaturas. (Ver figuras 19a, 19b, 19c).

En estas probetas no se observaron daños en la superficie del concreto, aunque esta se vea de un aspecto corrugado, lo cual es un defecto inherente a su proceso de fabricación, debido a que la madera utilizada para el diseño de las formaletas presentaba cierto deterioro físico. No se observan descascaramientos, no hay presencia de poros, grietas o fisuras. En general las probetas superficialmente no muestran desgaste físico.

Las probetas expuestas a 800°C, 1000°C y 1200°C se observan con mayor deterioro en relación con las probetas anteriormente evaluadas. A partir de la temperatura de 800°C hasta 1000°C las probetas presentaron un aumento en la porosidad, y aparición de pequeñas grietas o fisuras. A la temperatura de 1200°C se presenta el fenómeno de spalling, o bien conocido como el desprendimiento del concreto (ver figura 20) ya que la fibra alcanzó su temperatura de ignición. La fibra de polipropileno es hidrófoba y por lo tanto tiene como desventaja tener pobres características de adherencia con la matriz del cemento, y a su vez presentar un bajo punto de fusión y alta combustibilidad.

Figura 22. Defectos superficiales visibles presentes en las probetas expuestas a 1200°C



Fuente: Los autores

Las probetas de concreto reforzado y sin adición de fibra, expuestas a una temperatura de 1200°C, presentaron un estado superficial con bastante deterioro, como se puede observar en la figura 21, hay presencia de grietas y fisuras bastante pronunciadas. Es evidente el fenómeno de descascaramiento en todo el centro de la cara de exposición, y por consiguiente a esto, las probetas no tienen un buen estado superficial, sino que por el contrario se observan con daños irreversibles en toda la superficie que fue expuesta de manera directa al fuego.

Después de analizar el comportamiento del acero de refuerzo que se encontraba a 4cm de la cara exposición donde se localizaba una termocupla que registraba la temperatura, se observó que la temperatura no supero los 600 °C, y por esta razón no se presentaron variaciones del acero de refuerzo, ya que a apenas a los 600 °C el acero empieza a presentar cambios en su ductilidad.

Figura 23. Probeta de concreto reforzado y sin adición de fibra expuesta a 1200°C

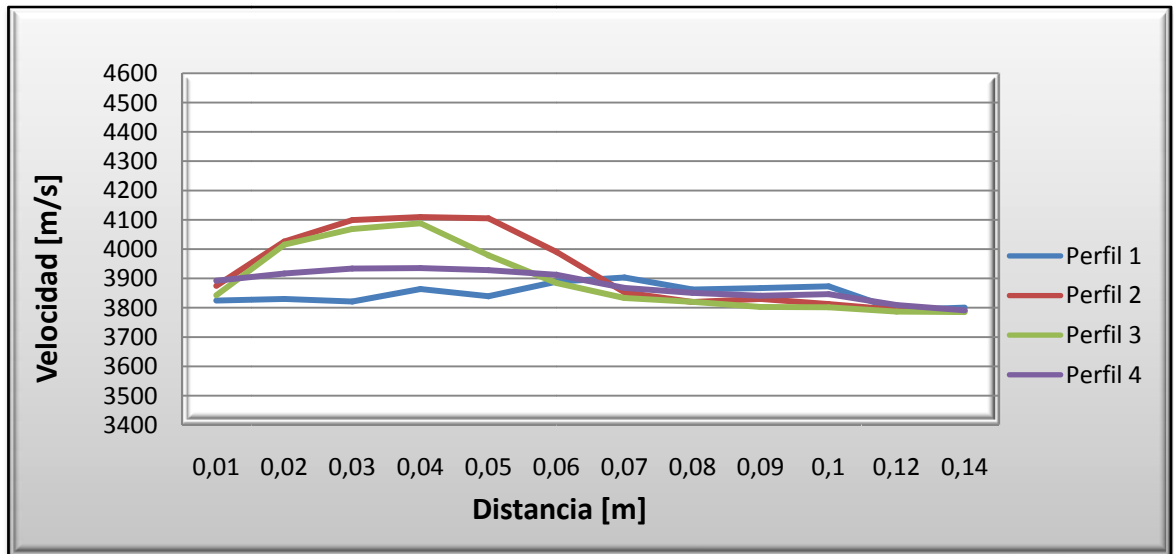


Fuente: Los autores

4.3.3 Ensayo de ultrasonido.

En esta etapa se presentan los diferentes perfiles de Velocidad de pulso ultrasónico a diferentes temperaturas, posterior a la exposición a fuego, y se muestra una gráfica con la relación de cada uno de los perfiles obtenidos.

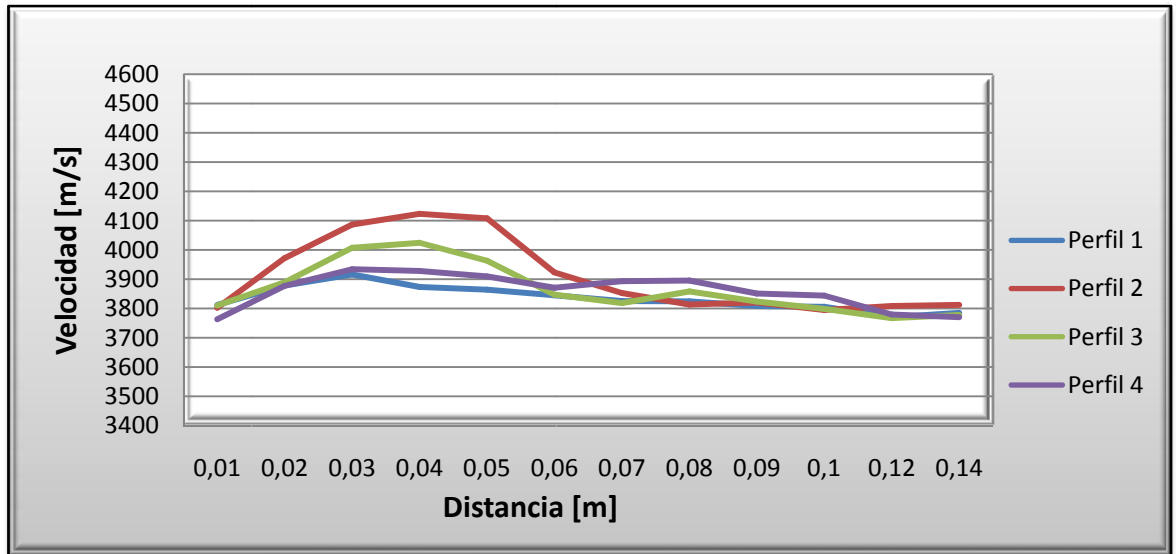
Gráfica 14. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 200°C



Fuente: Los autores

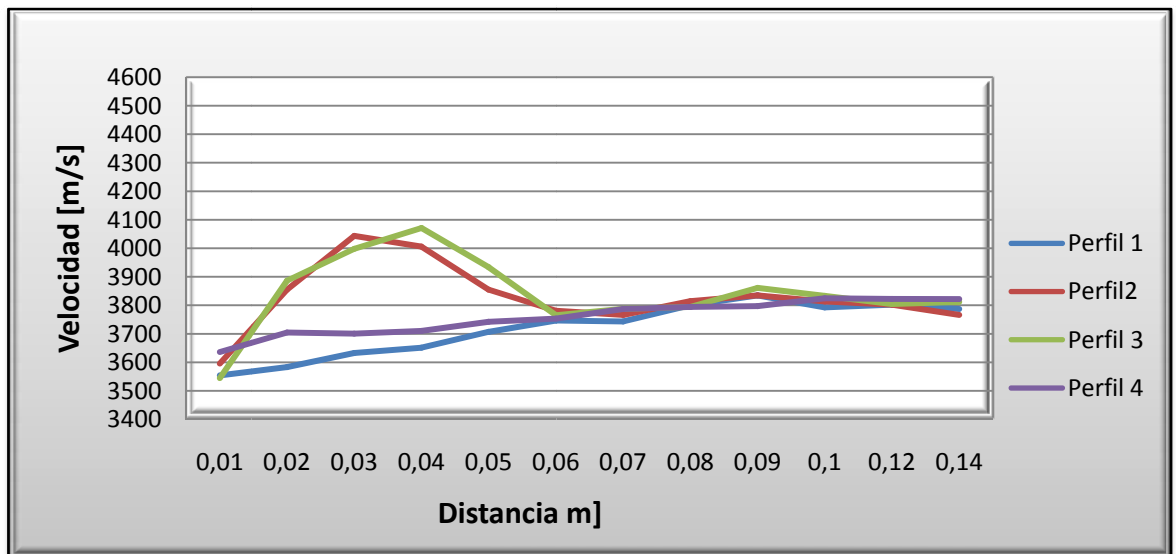
En la gráfica 14 se puede apreciar que el perfil 4 no presenta una variación significativa con respecto a la gráfica antes de la exposición a fuego, sin embargo el perfil 1 registra los menores valores de velocidad de pulso. En los perfiles 2 y 3 se observa un aumento en la velocidad en las cercanías al refuerzo como se esperaba, ya que la velocidad medida en estos puntos corresponde a la velocidad del acero.

Gráfica 15. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 400°C



Fuente: Los autores

Gráfica 16. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 600°C

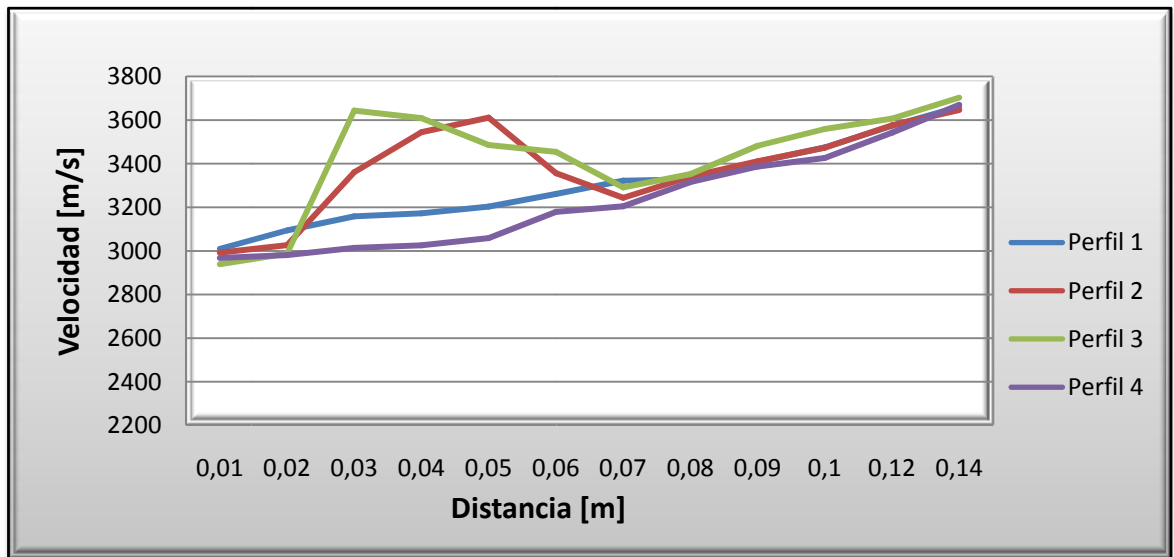


Fuente: Los autores

En la gráfica 15 (400°C) las velocidades de pulso aun presentan variaciones poco significativas y mantienen un comportamiento constante en todos los perfiles.

En la gráfica 16 se visualiza una disminución en la velocidad de pulso ultrasónico de los perfiles, y los daños más graves son registrados por el perfil 1. En el perfil 4 se presenta un aumento de la velocidad, y de igual manera en los perfiles 2 y 3 en las cercanías al acero de refuerzo, hay un incremento en los valores de la velocidad.

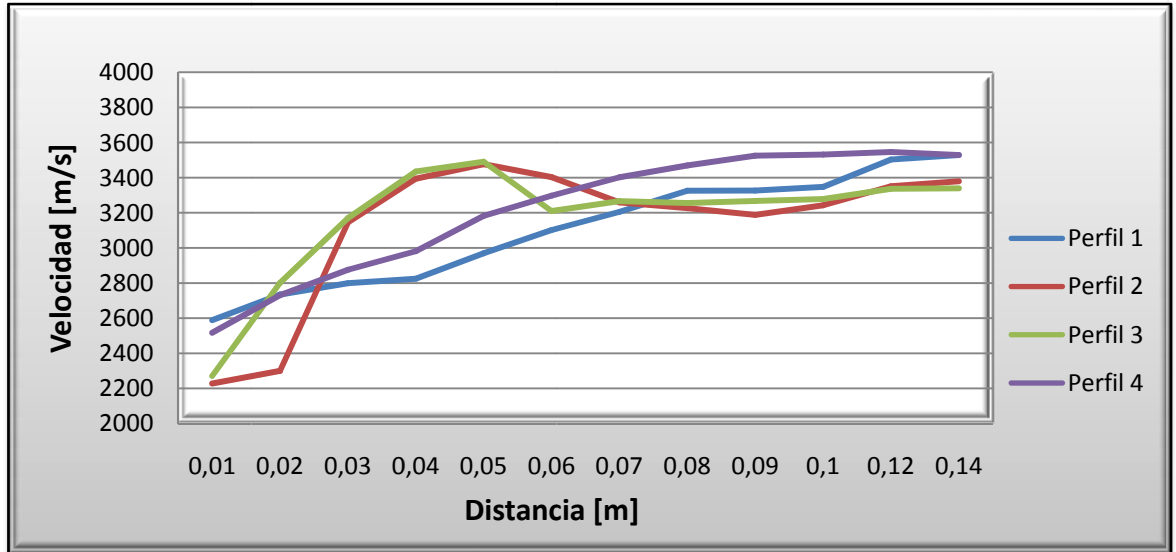
Gráfica 17. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 800°C



Fuente: Los autores

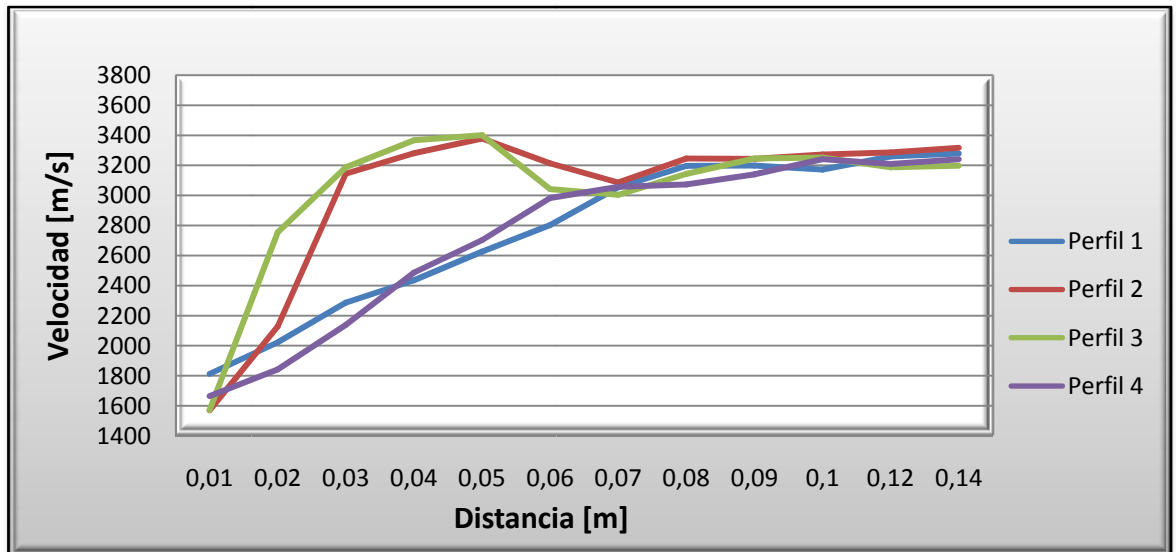
En la gráfica 17 se puede apreciar una disminución de la velocidad de pulso con respecto a las gráficas antes de la exposición a fuego, especialmente en los perfiles 2 y 3 debido a la aparición de microfisuras en las cercanías de acero de refuerzo, que aumentan considerablemente el tiempo de trayectoria de la onda. El perfil 4 muestra los menores valores de velocidad, lo cual quiere decir que este perfil fue el más afectado por la temperatura.

Gráfica 18. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1000°C



Fuente: Los autores

Gráfica 19. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1200°C



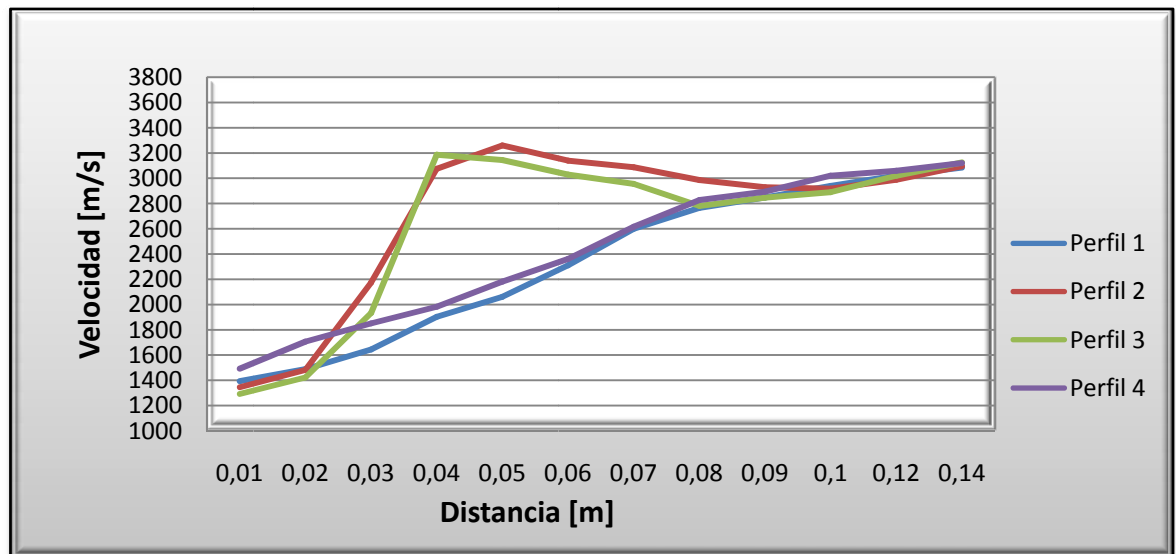
Fuente: Los autores

En la gráfica 18 se puede apreciar la disminución de velocidad en los perfiles 2 y 3 cerca de la cara de exposición y un aumento considerable en la cercanías del refuerzo, pero con disminución en la velocidad de pulso con respecto a las

gráficas antes de la exposición, debido a la aparición de fisuras y al aumento de la porosidad en la zona, a causa del incremento de la temperatura.

En la gráfica 19 se presentan disminuciones en las velocidades de los perfiles 2 y 3 por debajo de 2000 m/s debido a que esta es la zona más afectada por la llama, sin embargo se observa un aumento significativo de la velocidad de pulso en las cercanías del acero de refuerzo, conservando el mismo patrón que en las gráficas anteriores. Los perfiles 1 y 4 presentan comportamientos similares, disminución en los valores de las velocidades de pulso.

Gráfica 20. Perfiles de velocidad de probetas sin fibra expuestas a 1200°C

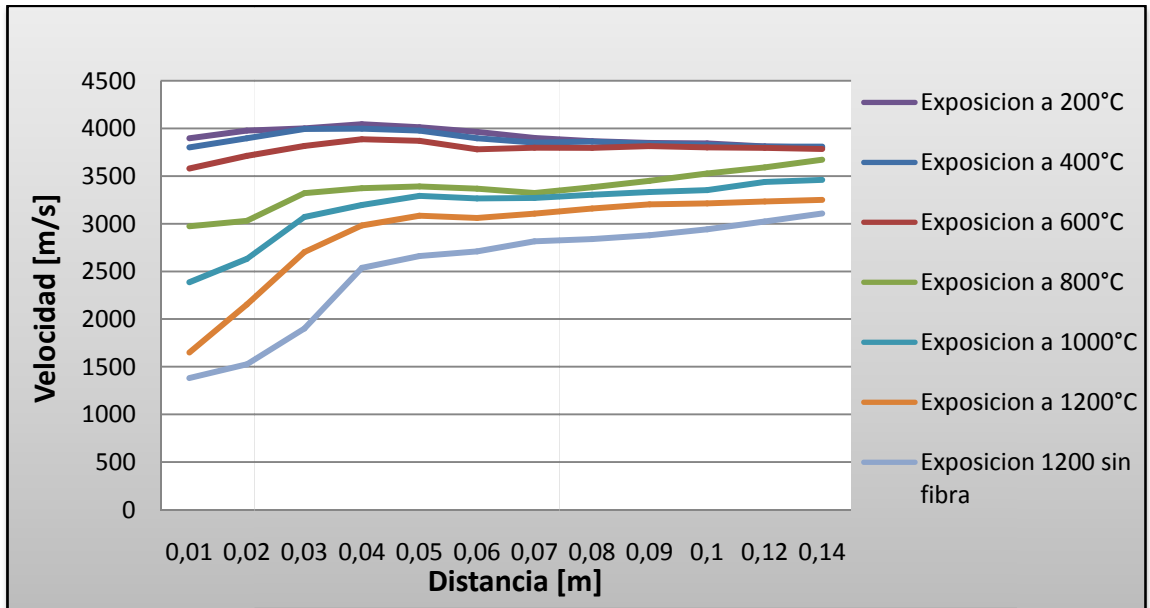


Fuente: Los autores

En la gráfica 20 podemos observar una disminución en todos los perfiles de velocidades con respecto a la probeta con fibra, (ver gráfica 19) expuesta a fuego en las mismas condiciones que esta. Los perfiles 2 y 3 muestran la variación de la velocidad en la cercanía al acero de refuerzo pero se puede observar que los valores llegan a los 3200 m/s, pudiéndose determinar que existe un mayor daño en la probeta. Los perfiles 1 y 4 muestran menores valores de velocidad de pulso

en relación a las gráficas anteriores debido a la penetración de calor en el interior de la probeta.

Gráfica 21. Relación de las velocidades a diferentes temperaturas de exposición



Fuente: Los autores

Para realizar la comparación entre las VPU, y la temperatura de exposición se realizó un promedio de los cuatro perfiles analizados como se puede observar en la gráfica 21. Es notable la disminución de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta la temperatura de exposición para cada probeta. Se puede observar como la probeta sin fibra de polipropileno expuesta a 1200°C presenta los menores valores de VPU en comparación con las demás, y esta es precisamente la probeta que presenta el mayor deterioro físico.

En forma general en las anteriores gráficas se puede apreciar la variación de la velocidad en las cercanías del acero de refuerzo y la disminución de los valores de velocidad a medida que se realizan las mediciones más cerca de la cara de

exposición, debido a que los cambios físicos más severos en las probetas de ocurren en esta zona.

4.3.3.1 Relación entre la velocidad de pulso y la temperatura de exposición.

En la tabla 11, se muestran los resultados promedios obtenidos de la velocidad de pulso ultrasónico para cada temperatura de exposición de las probetas. Se observa que después de la exposición de las probetas a 1200° C se presenta una velocidad promedio de 2900 m/s, con valores mínimos de hasta 1800 m/s cerca de la cara de exposición y aumentos representativos en las cercanías del refuerzo. Las 3 probetas sin adición de fibra presentan velocidades inferiores a las que registra el las probetas con fibra a la misma temperatura, debido a que la fibra ayuda a soportar los esfuerzos de tensión causados por las altas temperaturas.

Tabla 11. Resultados de la velocidad de pulso ultrasónico a diferentes temperaturas de exposición

Temperatura de Exposición [°C]	Velocidad Promedio [m/s]
200	3913,40
400	3880,29
600	3786,22
800	3367,07
1000	3166,89
1200	2900,01
Probetas sin fibra a 1200	2527,07

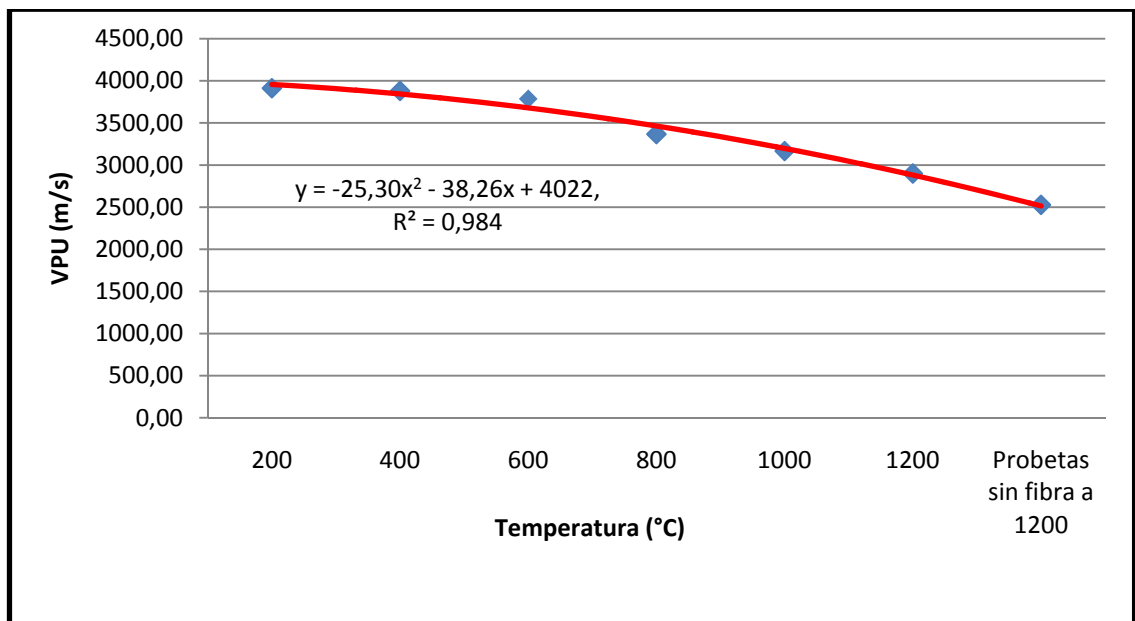
Fuente: Los autores

En la gráfica 22 se puede visualizar un comportamiento decreciente de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta la temperatura de exposición. La tendencia que más se ajusta a este comportamiento se indica mediante la expresión $V = - 25.30T^2 - 38.266T + 4022.1$ con un índice de correlación $R^2=0.9849$.

Realizando un análisis detallado de la gráfica se puede observar que en el rango de temperaturas comprendido entre 25°C y 600°C se presentan velocidades constantes y la variación de las velocidades no es tan representativa como en el rango de temperatura a partir de los 800°C, donde los valores de velocidad decaen considerablemente, indicando mayores daños en el interior de las probetas expuestas a altas temperaturas.

De acuerdo a los parámetros establecidos en la tabla 1 (ver tabla 1), y teniendo en cuenta los valores de velocidad de pulso ultrasónico, el concreto se considera bueno hasta el obtenido en las exposición a 600°C. Por otro lado, las probetas expuestas a 800°C y 1000°C se encuentran en una zona de aceptación cuestionable. Finalmente al analizar los valores de velocidad de pulso ultrasónico en las probetas de 1200°C y las probetas sin fibra, cerca de la cara de exposición se observan valores inferiores a 2135 m/s, clasificando el concreto como muy pobre, que lo inhabilita para posteriores usos según este parámetro.

Gráfica 22. Relación de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la temperatura de exposición



Fuente: Los autores

4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión.

En la tabla 12, se presentan los resultados promedios de la resistencia a la compresión obtenidos a las diferentes temperaturas de exposición, los resultados del ensayo se presentan en MPa y fueron calculados de acuerdo a la ecuación presentada a continuación (ver ANEXO D).

$$f'c = \frac{P}{A}$$

El valor más bajo de resistencia a la compresión se registró con la probeta que no presenta adición de fibra sometida a 1200°C (Ver tabla 12). Los resultados obtenidos fueron acordes al comportamiento esperado de acuerdo a la bibliografía consultada.

Tabla 12. Resultados de resistencia a la compresión a diferentes temperaturas de Exposición

Temperatura de Exposición [°C]	Resistencia a la Compresión Promedio [MPA]
200	22,27
400	21,41
600	20,22
800	18,83
1000	15,88
1200	13,78
Probetas sin fibra a 1200	12,03

Fuente: Los autores

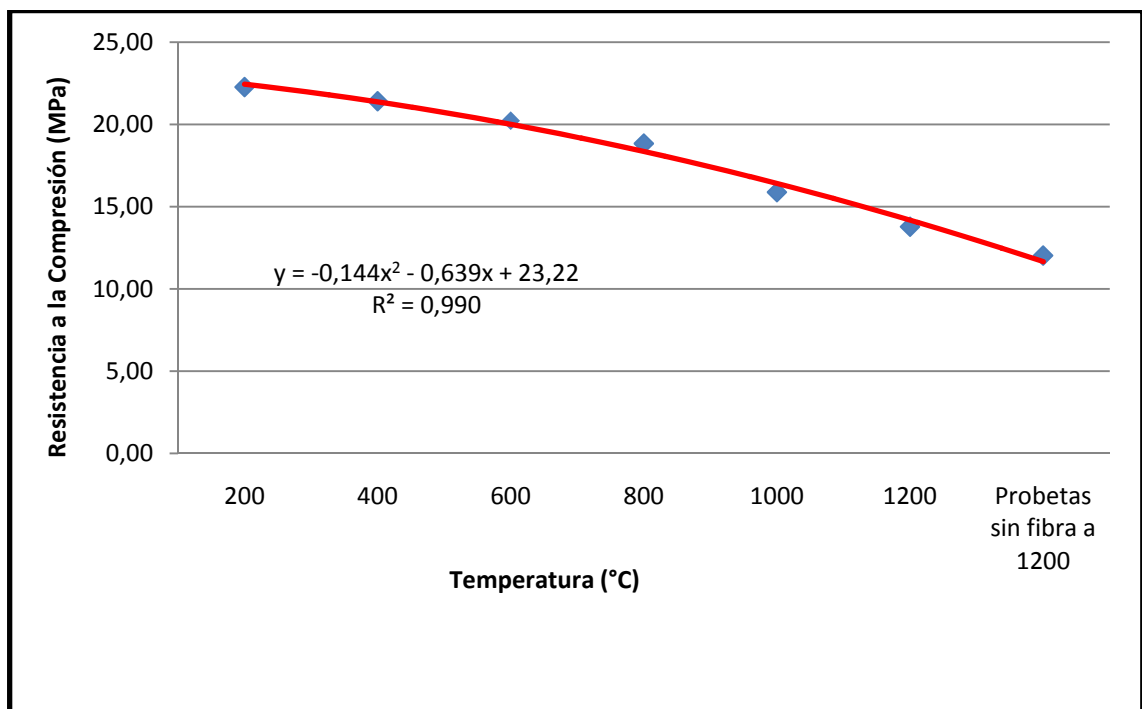
En la gráfica 23, se muestra un decrecimiento en los valores de resistencia a la compresión a medida que se incrementa la temperatura de exposición en cada ensayo realizado. La tendencia encontrada en el comportamiento de la gráfica se

representa mediante la expresión: $f^c = -0.1446x^2 - 0.6392x + 23.224$ con un índice de correlación $R^2 = 0.9905$.

Observando la gráfica se puede señalar que la resistencia a la compresión tiene una caída más notable en el rango de 1000°C a 1200°C en comparación al comportamiento general de la curva.

Según la tabla 2 (Clasificación del concreto según su resistencia a la compresión) las probetas sometidas hasta los 1000°C presentan un concreto con resistencia moderada y las probetas expuestas a 1200°C se obtiene un concreto de baja resistencia debido a la gran afectación de la temperatura. Las probetas expuestas a 1200°C sin adición de fibra presentan una resistencia menor a la obtenida por las probetas con adición de fibra, bajo la misma carga térmica.

Gráfica 23. Relación de la resistencia a la compresión con respecto a la temperatura de exposición



4.4 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE EXPOSICIÓN.

En la tabla 13, se observan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión realizados a cada uno de los núcleos extraídos y velocidad de pulso ultrasónico luego de la exposición a fuego.

Tabla 13. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico

Temperatura de Exposición [°C]	Velocidad Promedio [m/s]	Resistencia a la Compresión Promedio [MPA]
200	3913,40	22,27
400	3880,29	21,41
600	3786,22	20,22
800	3367,07	18,83
1000	3166,89	15,88
1200	2900,01	13,78
Probetas sin fibra a 1200	2527,07	12,03

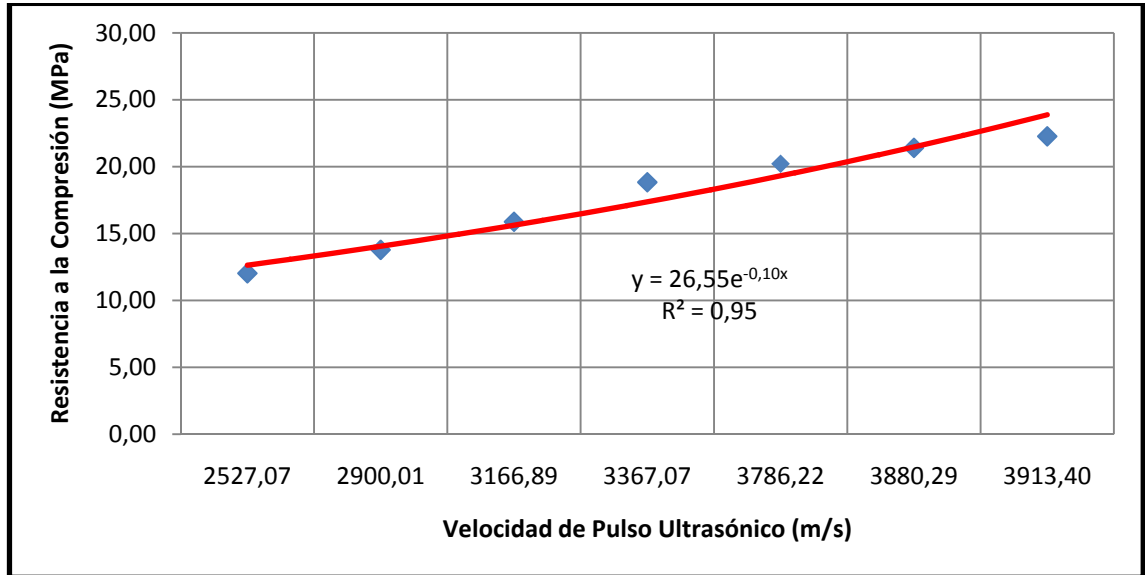
Fuente: Los autores

Según la tabla 13, se puede observar que a medida que se aumenta la temperatura de exposición de las probetas, los resultados obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión presentan una disminución notable.

En la gráfica 24, se muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión con relación a la velocidad de pulso ultrasónico, observando que ambos parámetros presentan un comportamiento exponencial, indicando que a medida que decrece la resistencia la compresión decrece la velocidad de pulso ultrasónico.

La relación que existe entre estos dos parámetros se puede representar mediante la ecuación $f'c = 26.55e^{-0.106V}$ con un índice de correlación de $R^2 = 0.95$.

Gráfica 24. Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico



Fuente: Los autores

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en las probetas de concreto reforzado y adicionado con fibra bajo la exposición a fuego se puede concluir que:

Los valores de resistencia a compresión de los núcleos extraídos presentan un comportamiento inversamente proporcional a la temperatura de exposición, es decir a medida que se aumenta la temperatura de exposición de cada una de las probetas disminuye la resistencia a la compresión del concreto en estudio. El comportamiento de esta relación se evidencia según la ecuación:

$$f'c = -0.1446x^2 - 0.6392x + 23.224 \text{ con un índice de correlación } R^2 = 0.9905.$$

Al analizar la gráfica que relaciona la temperatura con la velocidad de pulso ultrasónico se encontró que los valores de la velocidad de pulso ultrasónico disminuyen significativamente a medida que aumenta la temperatura de exposición a fuego, esto se evidencia en las probetas de 1000°C y de 1200°C debido a que fueron las probetas que presentaron mayor deterioro (descascamiento, y grietas). La tendencia que más se ajusta a este comportamiento, se relaciona mediante la ecuación:

$$V = -25.30T^2 - 38.266T + 4022.1 \text{ con un índice de correlación } R^2 = 0.9849.$$

En el concreto reforzado y adicionado con fibra, la fibra de polipropileno reduce el agrietamiento durante la exposición a altas temperaturas, en las probetas expuestas a 1200°C con adición de fibra no se presentó agrietamientos en la superficie del concreto. Por el contrario en las probetas expuestas a 1200°C sin adición de fibra además del fenómeno de spalling o descascamiento se presentaron grietas que generan un mayor estado de deterioro de las probetas.

En los ensayos realizados de metrología dimensional se presentaron cambios en las variables de estudio, mostrando que a medida que se aumenta la temperatura de exposición el concreto sufre contracción, a consecuencia de la deshidratación que se produce durante la exposición a fuego de las probetas, por lo tanto se presentan pequeñas diferencias en las dimensiones de las probetas.

Al comparar la relación existente entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión se pudo determinar que presentan un comportamiento análogo entre sí; si la velocidad de pulso ultrasónico decrece la resistencia a la compresión de igual manera disminuye. La ecuación que más se ajusta al comportamiento de los datos obtenidos es:

$$f'c = 26.55e^{-0.106V} \text{ Representado por índice de correlación de } R^2=0.95.$$

Se comprobó que a medida que se aumenta el número de mediciones de velocidad de pulso, se reduce el margen de error para cada una de las gráficas, la cual se puede evidenciar en las gráficas de Velocidad de Pulso ultrasónico Vs temperaturas de exposición, en donde estas presentan un comportamiento más uniforme y constante.

En el refuerzo del concreto no se produjo ninguna alteración debido a que el acero es un material que es resistente a altas temperaturas, solo a partir de los 500 grados centígrados aproximadamente se producen variaciones en su ductilidad, y la mayor temperatura que se registró en el refuerzo apenas se aproximaba a los 500 grados centígrados, bajo la máxima carga de temperatura aplicada.

RECOMENDACIONES

El acero de refuerzo dentro de las probetas en estudio, genera grandes variaciones en las velocidades de pulso debido al incremento aparente en la velocidad; que depende de la proximidad de la medición con el acero de refuerzo, del diámetro, del número de barras y su orientación con respecto a la trayectoria de propagación. Por esta razón se recomienda reducir el diámetro del refuerzo en las probetas, con el fin de minimizar el margen de error de cada una de las mediciones realizadas.

Las probetas expuestas a temperaturas de 200°C y 400°C presentan la mayor variación en la carga térmica, por la dificultad que existe para controlar estas llamas de poca intensidad. Se recomienda optimizar el control de la temperatura para seguir adecuadamente el comportamiento de la curva patrón establecido.

Para lograr una mayor relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión, es recomendable hacer mayor cantidad de extracción de núcleos de las probetas afectadas por fuego, ya que las condiciones de precisión que se le puede atribuir a los resultados depende del número de muestras ensayadas, y así de esta manera se puede lograr mayor confiabilidad estadística.

Se recomienda usar otro tipo de fibra con características no hidrófobas y de menos combustibilidad.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN STANDARD TESTING OF MATERIALS. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States. ASTM international - American Society of testing for materials. ASTM C 597-02.

ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación de la relación agua/cemento, tamaño de agregado, y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 40, 2010.

ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación de la relación agua/cemento, tamaño de agregado, y tiempo de curado en la velocidad de pulso ultrasónico. Trabajo de grado [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 40, 2010.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.11.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.12.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.107.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. P.127.

____. ASTM C597-2. Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete. USA, 2003.

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

BUNGEY, J.H. y MILLAR, S. G. Testing Of Concrete in Structure. An imprint of Chapman and Hall. Third Edition. 1996. p. 53.

CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO POR SU RESISTENCIA. <Disponible en: [http:// www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm](http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm)> visitada en: Febrero 2012.

CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO POR SU RESISTENCIA. <Disponible en: [http:// www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm](http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm)> visitada en: Febrero 2012.

CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS < Disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2007/feb07/PROBLEMAS.pdf>> visitada: Marzo 2012.

CONCRETE AND FIRE< 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.

CORZO PATINO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre la resistencia a la compresión, porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto variando la relación agua/cemento. Trabajo de grado [Ingenieros Metalúrgicos] UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. p. 25, 2008.

Di Maio, A., Ferreyra Hirschi, E, Giaccio, G. y Zerbino, R. Concretos expuestos a elevadas temperaturas: “Evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas”. 199. P, 204-205.

Di Maio, A., Ferreyra Hirschi, E, Giaccio, G. y Zerbino, R. Concretos expuestos a elevadas temperaturas: “Evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas”. 199. p. 207-208.

EQUIPO ULTRASONIDO. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL HORMIGÓN. Disponible: <http://icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.doc>> visitada en: Enero de 2012.

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN EL CONCRETO-ULTRASONIDO < Disponible en: <http://civilgeeks.com/2011/04/11/ensayos-no-destructivos-del-concreto-ultrasonido/>> visitada en: Febrero 2012.

ERCOLANI, G.D, ORTEGA N.F., SEÑAS L. Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires Octubre. 2007. p. 1-2.

FIBRA DE REFUERZO SECUNDARIO PARA CONCRETO O MORTERO. <Disponible en: http://www.toxement.com.co/pdf_2010/Toc%20Fibra%20500.pdf>visitada en: Abril 2012.

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

____. ICONTEC 1377 (1995) Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

Kumar Mehta P, Monteiro Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD. p.149.

Kumar Mehta P, Monteiro Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD. p. 3-13.

K.D. Hertz.; “Desprendimiento del Concreto Expuesto al Fuego”. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Dinamarca. Publicado en: “Fire Safety Journal”. Dinamarca, 5, Agosto, 2002.

Kosmatka and Panarese, W.C., “Design and Control of Concrete Mixtures”, Portland Cement Association, Skokie. Ill, 13th Ed, 1988.

Lima, P.R.L.; “Análisis Teórico y Experimental de Materiales Compuestos Reforzados Con Fibras de Sisal”. PhD thesis (2004), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

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

____. NTC 3658 (1994) Método para la obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas de concretos aserradas. NTC- Norma Técnica Colombiana.

____. NTC 121 (1995) Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC- Norma Técnica Colombiana.

____. NTC 321 (1995) Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC- Norma Técnica Colombiana.

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

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

____. NTC 237 (1995) Método de ensayo para determinar la densidad y absorción de agregado fino. NTC- Norma Técnica Colombiana.

____. NTC 77 (1995) Tamizado de materiales granulados (agregados o áridos), Análisis granulométrico. NTC- Norma Técnica Colombiana.

____. NTC 78 (1995) Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz INCONTEC74. Método de lavado. NTC- Norma Técnica Colombiana.

PLATAFORMA EUROPEA DEL HORMIGON: “Seguridad frente al fuego utilizando hormigón”. 2008. p, 29.

RILEM TC 200-HTC; “Propiedades Mecánicas del Concreto a Altas Temperaturas – Modelado y Aplicaciones”. Recommendations of RILEM (2005), Materials and Structures, vol. 38, p. 913-919.

SANCHEZ de GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y Mortero. Tercera Edición. Bogotá: Bhandar Editores LTDA. 1996.

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.

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.41.

VenkateshK.R. Kodur, Luke A. Bisby, Mark F. Green.; “Evaluación Experimental del Comportamiento del Concreto Reforzado y Adicionado con Fibras de Polímero Expuesto a Fuego”. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Estatal de Michigan. Publicado en:” Fire Safety Journal”. Michigan, 30, mayo, 2006.

Velasco, R.V; “Concreto de alto Desempeño reforzado con Fibras de Polipropileno y Sisal Sometido a Altas Temperaturas”, MSc thesis (2002), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

ANEXOS

ANEXO A. Diseño de mezcla

Con el fin de obtener valores muy cercanos a los reales se utilizó una mezcla comercial de 210 Kg/cm² de una de las principales concreteras de la ciudad, en la tabla se observa el registro de cargue de mezcla obtenida y las dosificaciones de los diversos componentes del conglomerado.

Registro de cargue concreto de 210 Kg/cm²

REMISIÓN PRODUCTO	CARGA	Cantidad m ³	Agua [Lt]	Agregado fino [Kg]	Cemento Portland III [Kg]	Aditivo [ml]	Agregado 3/4" [Kg]
63413495	Teórico	6,00	582,50	6705,30	1710,00	4275,00	5548,00
	Automático		574,70	6737,70	1704,70	4336,00	5470,00
	Manual		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Relación A/C	% Humedad			7,00			0,50
0,62984		1,00	95,78	1122,95	284,12	722,67	911,67
			178,95	78,61			4,56

La aplicación de la fibra de polipropileno se realizó de forma manual teniendo en cuenta que su dosificación es de 1 kg/m³, para las probetas se utilizó 0.5 m³ del concreto premezclado con las especificaciones mostradas en la tabla. Se utilizaron 500 gr de fibra de polipropileno TOC Fibra 500, que brinda resistencia al movimiento por contracción térmica y de secado; al mezclarse con el concreto en estado fresco, reduce la formación de grietas por retracción plástica. En caso de ocasionarse grietas en estado endurecido por fallas de estructura menores, minimiza el ancho de longitud de las mismas.

ANEXO B. Registro de toma de datos de velocidad de pulso ultrasónico en los 4 perfiles de la probeta P₁ 600 antes de la exposición a fuego.

PUNTO MEDICION	CARA A				CARA B		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)
	P1 600 ° PERFIL 1		P1 600 ° PERFIL 1		TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)		
	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)				
1	0,01	76,2	76,7	75,7	75,9	0,000076125	3944,915161	
2	0,02	75,9	75,8	75,8	75	0,000075625	3970,997245	
3	0,03	76,7	76,9	75,1	75,2	0,000075975	3952,70374	
4	0,04	77,8	77,4	75,6	75,5	0,000076575	3921,732506	
5	0,05	77,5	77,3	75,6	75,3	0,000076425	3929,429724	
6	0,06	78,3	78,6	75,9	75,7	0,000077125	3893,765532	
7	0,07	79,2	79	76,2	76,1	0,000077625	3868,684917	
8	0,08	79,8	79,6	76,7	76,3	0,0000781	3845,155783	
9	0,09	80	79,8	77,2	76,8	0,00007845	3828,00085	
10	0,1	80,3	79,6	76,8	77,3	0,0000785	3825,562633	
11	0,12	79	79,5	78,3	78,1	0,000078725	3814,628983	
12	0,14	78,1	77,9	78,3	78,1	0,0000781	3845,155783	
PUNTO MEDICION	P1 600 ° PERFIL 2		P1 600 ° PERFIL 2		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)		
	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)				
	1	0,01	77,8	78			71,4	71,1
2	0,02	76,5	76	69	69,1	0,00007265	4133,608626	
3	0,03	76,4	75,8	68,5	68,6	0,00007233	4152,183431	
4	0,04	72,3	73,1	67,9	66,7	0,00007000	4290,095238	
5	0,05	73,1	73,6	67,9	67,3	0,00007048	4261,180088	
6	0,06	76,8	76,5	69,7	70,1	0,00007328	4098,350961	
7	0,07	75,4	75,8	74,8	75,2	0,00007530	3988,136344	
8	0,08	76,7	75,9	77,1	77,3	0,00007675	3912,790445	
9	0,09	75,7	75,5	77,3	77,3	0,00007645	3928,144757	
10	0,1	78,2	79,2	76,1	76,2	0,00007743	3878,678291	
11	0,12	78,2	78	77,4	77,5	0,00007778	3861,223615	
12	0,14	79,8	79,9	81,2	81,3	0,00008055	3728,201945	
PUNTO MEDICION	P1 600 ° PERFIL 3		P1 600 ° PERFIL 3		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)		
	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)				
	1	0,01	75,8	76			74,9	75,2
2	0,02	70,9	70,2	73,5	73,4	0,00007200	4170,925926	
3	0,03	69,6	69,7	73,4	73	0,00007143	4204,503559	
4	0,04	68,7	69,5	72,1	71,6	0,00007048	4261,180088	
5	0,05	70,1	69,6	74,1	74,9	0,00007218	4160,812839	
6	0,06	71,3	70,8	74,4	74	0,00007263	4135,031555	
7	0,07	73,5	73,9	73,8	72,5	0,00007343	4089,978436	
8	0,08	71,9	71,7	76,1	76	0,00007393	4062,31541	
9	0,09	73,3	73	76,7	76,8	0,00007495	4006,760062	
10	0,1	76,1	76,2	77,5	77,4	0,00007680	3910,243056	
11	0,12	77	77,9	78,7	78,1	0,00007793	3853,791038	
12	0,14	77,3	76,9	78,1	77,2	0,00007738	3881,184707	
PUNTO MEDICION	P1 600 ° PERFIL 4		P1 600 ° PERFIL 4		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)		
	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)				
	1	0,01	75,6	75,3			76,1	76,7
2	0,02	75,7	75,1	75	75,1	0,00007523	3992,112551	
3	0,03	76	75,9	75	74,6	0,00007538	3984,168049	
4	0,04	79,2	78,3	74,6	74,5	0,00007665	3917,895195	
5	0,05	75,1	74,8	75,3	74,8	0,00007500	4004,088889	
6	0,06	74,5	74,3	76	76,1	0,00007523	3992,112551	
7	0,07	75,5	74,8	77,6	77,7	0,00007640	3930,715532	
8	0,08	75,1	75,5	78,7	77,6	0,00007673	3914,065385	
9	0,09	76,6	76,8	78,7	78,8	0,00007773	3863,707516	
10	0,1	77,2	77	78,7	78,4	0,00007783	3858,742906	
11	0,12	77,3	77,1	78,6	77,9	0,00007773	3863,707516	
12	0,14	76,9	77,6	78,5	77,9	0,00007773	3863,707516	

ANEXO C. Registro de toma de datos de velocidad de pulso ultrasónico en los 4 perfiles de la probeta P₁600 luego de la exposición a fuego.

PUNTO MEDICION		CARA A		CARA B		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)
		P1 600 ° PERFIL 1		P1 600 ° PERFIL 1			
		TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)		
1	0,01	85,6	85,5	84,2	84	0,000084825	3578,956676
2	0,02	82,7	82,5	82,3	82,1	0,0000824	3684,283981
3	0,03	80,6	80,7	80,6	80,9	0,0000807	3761,895911
4	0,04	81	80,9	80,4	80,5	0,0000807	3761,895911
5	0,05	80,4	80,4	78,6	78,5	0,000079475	3819,880466
6	0,06	80,6	80,5	78,9	78,8	0,0000797	3809,096612
7	0,07	79,2	79	79,1	79,2	0,000079125	3836,777251
8	0,08	79,8	79,6	78,7	78,3	0,0000791	3837,989886
9	0,09	79,5	79,8	77,2	76,8	0,000078325	3875,965528
10	0,1	79,8	79,6	76,8	77,3	0,000078375	3873,492823
11	0,12	79	79,5	78,3	78,1	0,000078725	3856,271832
12	0,14	78,1	77,9	78,3	78,1	0,0000781	3887,131882
PUNTO MEDICION		P1 600 ° PERFIL 2		P1 600 ° PERFIL 2		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)
		P1 600 ° PERFIL 2		P1 600 ° PERFIL 2			
		TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)		
1	0,01	85,2	85,4	85,2	85,1	0,00008523	3562,158991
2	0,02	80,6	80,4	74,5	74,2	0,00007743	3921,020342
3	0,03	79,5	79	73,2	73,5	0,00007630	3978,833552
4	0,04	73,2	73	72,1	71,9	0,00007255	4184,493453
5	0,05	72,7	72,5	77,5	77,6	0,00007508	4043,756244
6	0,06	77,5	77,4	79,9	80,2	0,00007875	3855,047619
7	0,07	77,4	77,8	79,5	79,7	0,00007860	3862,40458
8	0,08	78,7	78,9	77,1	77,3	0,00007800	3892,115385
9	0,09	78,7	78,5	77,3	77,3	0,00007795	3894,611931
10	0,1	78,2	79,2	78,1	78,2	0,00007843	3871,023271
11	0,12	78,2	78	79,4	79,5	0,00007878	3853,824183
12	0,14	79,8	79,9	80,4	80,3	0,00008010	3790,074906
PUNTO MEDICION		P1 600 ° PERFIL 3		P1 600 ° PERFIL 3		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)
		P1 600 ° PERFIL 3		P1 600 ° PERFIL 3			
		TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)		
1	0,01	83,2	83,5	85,5	85	0,00008430	3601,245552
2	0,02	81,2	81,4	78,1	77,6	0,00007958	3815,080113
3	0,03	74,2	74,6	78,7	78,3	0,00007645	3971,026815
4	0,04	72,3	72,1	72,5	73	0,00007248	4188,823732
5	0,05	72,5	72,2	75,5	74,9	0,00007378	4115,01186
6	0,06	77,4	77,6	79,3	78,8	0,00007828	3878,441393
7	0,07	78,5	78,9	79,4	79,6	0,00007910	3837,989886
8	0,08	78,9	78,7	79,6	79,5	0,00007918	3834,354278
9	0,09	79,3	79	76,7	76,8	0,00007795	3894,611931
10	0,1	78,1	78,2	77,5	77,4	0,00007780	3902,120823
11	0,12	77	77,9	78,7	78,1	0,00007793	3895,861405
12	0,14	77,3	76,9	78,1	77,2	0,00007738	3923,55412
PUNTO MEDICION		P1 600 ° PERFIL 4		P1 600 ° PERFIL 4		TIEMPO PROMEDIO	VELOCIDAD (m/s)
		P1 600 ° PERFIL 4		P1 600 ° PERFIL 4			
		TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)	TIEMPO 1 (µs)	TIEMPO 2 (µs)		
1	0,01	85,1	85	83,4	83,1	0,00008415	3607,664884
2	0,02	81,8	81,9	82,4	82,5	0,00008215	3695,496044
3	0,03	82,2	82,3	82,2	82,1	0,00008220	3693,248175
4	0,04	81,5	81	80,9	81,2	0,00008115	3741,03512
5	0,05	81,2	81	80,5	80,6	0,00008083	3756,077946
6	0,06	80,4	80,5	80,2	79,9	0,00008025	3782,990654
7	0,07	78,1	78	79,2	79,4	0,00007868	3858,722593
8	0,08	79,1	78,9	78,7	78,6	0,00007883	3851,379638
9	0,09	78,5	78,6	78,7	78,8	0,00007865	3859,949142
10	0,1	79,3	79,2	78,7	78,4	0,00007890	3847,718631
11	0,12	79,3	79,1	78,6	77,9	0,00007873	3856,271832
12	0,14	80,1	80	78,5	77,9	0,00007913	3836,777251

ANEXO D. Cálculos para hallar la resistencia a la compresión

$$f'_c = \sigma = \frac{F}{A}$$

f'_c = Resistencia a la compresión

F= Fuerza aplicada

A = Área de la sección donde se aplica la fuerza

Los valores de carga entregados maquina universal de ensayos MODELCT-1500 tipo AUTOMAX están expresados en KN.

Para calcular la resistencia a la compresión se realizaron las siguientes operaciones:

- Los núcleos extraídos presentan un diámetro de 7.4 cm y se calculó el área mediante la expresión:

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} = 43.008 \text{ cm}^2$$

- Para poder pasar de KN a KgF es necesario multiplicar la carga por un factor de conversión ya definido y de esta manera obtener el resultado del esfuerzo en KgF/cm².
- A continuación se presenta el cálculo de resistencia la compresión para la probeta P₁ 200 expuesta a 200°C.

$$f'_c = \sigma = \frac{(95.90 * 101.972)[Kg]}{43.008 [cm^2]}$$

$$f'_c = 227.37 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

Luego de obtener el valor en $[Kg/cm^2]$ se convierte a $[MPa]$ para efectos comparativos de la siguiente manera:

$$f'c = 227.37 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \left[\frac{0.098 MPa}{1 \frac{Kg}{cm^2}} \right]$$

$$f'c = \sigma = 22.27 MPa$$

Resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de las probetas

Muestra	Temperatura Exposición [°C]	Carga Aplicada [KN]	Resistencia [MPa]	Resistencia Promedio [MPa]
Patrón 1	-----	96,79	22,47	22,32
Patrón 2		95,44	22,16	
P ₁ 200	200	95,90	22,27	22,27
P ₃ 400	400	92,19	21,41	21,41
P ₁ 600	600	86,06	19,98	20,21
P ₂ 600		90,54	21,02	
P ₃ 600		87,98	20,43	
P ₁ 800	800	82,66	19,19	18,82
P ₂ 800		80,31	18,65	
P ₃ 800		79,44	18,44	
P ₁ 1000	1000	71,47	16,59	15,87
P ₂ 1000		67,77	15,74	
P ₃ 1000		65,22	15,14	
P ₁ 1200	1200	59,78	13,88	13,77
P ₂ 1200		61,43	14,26	
P ₃ 1200		58,85	13,67	
P ₁ Sin fibra	1200	55,36	12,85	12,02
P ₃ Sin fibra		48,19	11,19	