

**EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO
SIN REFUERZO SOMETIDO A FUEGO**

HARRY NELSON CUESTA GONZÁLEZ

HECTOR FABIAN LUQUE PINZON

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2010

**EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO
ULTRASÓNICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO
SIN REFUERZO SOMETIDO A FUEGO**

**HARRY NELSON CUESTA GONZÁLEZ
HECTOR FABIAN LUQUE PINZÓN**

Trabajo de grado realizado para optar el título de ingeniero metalúrgico

**DIRECTOR
Ph.D. RICARDO CRUZ**

**CODIRECTORA
Msc. LUZ AMPARO QUINTERO ORTÍZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2010

Primeramente a Dios, por ser mi razón de mi vida, mi camino, mi guía en todos estos años. Todo logro se lo debo a Él. Sin Él nada hubiera sido posible.

A mis padres Armando y Elvia por ser los mejores padres del mundo, en su ejemplo, dedicación, amor, perseverancia y constancia. Por su comprensión, por sus oraciones, por su apoyo y confianza. Gracias.

A mis hermanos Boris, Geovani, Jennifer y Xilena por ser los mejores ejemplos en su capacidad, dedicación, y por todo el amor que nos ha unido toda la vida.

A mi futura esposa Darlin por ser la mujer más linda del mundo, por ser mi soporte, mi ayuda idónea, por ser la alegría que me motiva a seguir adelante, por enseñarme el verdadero sentido del amor y por permitirme vivir los mejores tiempos a su lado.

A Raúl por su amistad incondicional todos estos años, por su apoyo, por su ejemplo y por ser mi compañero de lucha.

A mi suegrita Anita por sus oraciones, por tenerme como un hijo, y por ser un ejemplo para mi vida, por su fe inquebrantable y por la confianza que ha puesto en mí todos estos años.

A la familia Coterá Alvis, por ser mi segundo hogar. A Joel, por ser un ejemplo intachable, por ser mi mentor y amigo, A Ana María por su amistad y por ser como una hermana de sangre, A Jesús Adrián por su alegría y por el amor que me ha brindado.

A toda la Iglesia Príncipe de Paz, por sus oraciones, por ser mi escuela de vida y formación como cristiano.

A mis pastores Rafael y Carolina por su amistad, ejemplo de vida, por su paciencia, por sus oraciones, por el calor humano que me han brindado todo este tiempo. Gracias a toda la Casa de oración Sekiná por ser mi soporte y por el amor que me han brindado.

A mis amigos y compañeros de la U con quienes viví momentos inolvidables.

Harry Cuesta González.

A Dios por haberme dado la oportunidad de tener una buena educación en mis primeros años de estudio, en donde me dieron buenas bases con las que pude lograr una de mis metas estudiar en la Universidad Industrial de Santander.

A mi mami por haberme acompañado y a poyado todos estos años de estudio, por entender todas las dificultades que se me presentaron, y porque siempre me motivo a seguir adelante.

A mi papi por enseñarme a luchar por mis sueños, por inculcarme valores como la honestidad, la responsabilidad, el respeto y algo muy importante haberme recalcado que estudiar es la mejor herencia que me puede dejar.

A mi familia por que de una u otra manera estuvieron pendientes de mí en estos años de universidad, porque me dieron el apoyo incondicional en todos los mementos malos y buenos que se presentaron en esta etapa culminada.

A todos los profesores que estuvieron presentes en mi formación como profesional por haber compartido sus conocimientos y experiencias.

A la profesora Luz Amparo Quintero por haberme dado la oportunidad de trabajar con ella y por toda la colaboración que me brindo en la realización de mi trabajo de grado.

Por último dedico este libro a una persona muy importante en mi vida y que nunca pudo estar presente en mi etapa universitaria, mi hermano Diego Fernando Luque Pinzón que aunque no esté él siempre me ha cuidado, a él dedico este libro y por él es que siempre he tenido presente salir adelante y luchar por las cosas que quiero. Que el señor lo tenga en su santa gloria.

Hector Fabian Luque Pinzón

AGRADECIMIENTOS

A la universidad industrial de Santander por haber sido el sitio de nuestra formación como profesionales.

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

A nuestra codirectora de proyecto Ms.C Luz Amparo Quintero, por su apoyo incondicional, por su paciencia y por brindarnos la confianza necesaria para el desarrollo de este proyecto.

A la escuela de ingeniería metalúrgica a sus profesores y técnicos por habernos colaborado en las dificultades que se presentaron en toda nuestra vida universitaria.

A la escuela de ingeniería civil, por proporcionarnos sus instalaciones y los materiales empleados en esta investigación. A su técnicos por su colaboración valiosa y amistad.

A la ingeniera Carolina por su colaboración incondicional y por brindarnos sus conocimientos sobre el tema trabajado.

Por último a nuestras familias por la confianza y paciencia entregada en toda la etapa del proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	26
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
1.2 OBJETIVOS.	27
1.2.1 Objetivo General	27
1.2.2 Objetivos Específicos	27
2. MARCO TEÓRICO	28
2.1 GENERALIDADES DEL CONCRETO	28
2.1.1 Componentes del concreto	29
2.2 EXPOSICIÓN DEL CONCRETO A FUEGO	33
2.2.1. Efecto de la temperatura sobre la pasta de cemento	35
2.2.2 Efecto de la temperatura sobre los agregados	36
2.3 ENSAYOS REALIZADOS PARA ESTUDIOS EN EL CONCRETO	36
2.3.1 Porosidad en el concreto	36
2.3.2 Resistencia a la compresión	38
2.3.3 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)	40
3. METODOLOGÍA	45
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	46
3.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS A ENSAYAR	46
3.2.1 Caracterización de la Materia Prima	47
3.2.2 Diseño de Mezcla	50
3.2.3 Elaboración de las Probetas	51
3.2.4 Fraguado y curado	52
3.3 CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DEL EQUIPO “PUNDITplus”	53

3.4 REALIZACIÓN DE PRUEBAS ANTES DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.	54
3.4.1 Peso de las probetas	54
3.4.2 Inspección visual	54
3.4.3 Ensayo de ultrasonido	55
3.4.4 Ensayo de resistencia a la compresión	58
3.4.5 Ensayo de porosidad	60
3.5 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO	62
3.5.1 Adecuación del horno	62
3.5.2 Exposición a fuego	64
3.5.3 Enfriamiento post-exposición	65
3.6 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DESPUÉS DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.	65
3.6.1 Peso de las probetas	65
3.6.2 Inspección visual	66
3.6.3 Ensayo de Ultrasonido	66
3.6.4 Ensayo de resistencia a la compresión	66
3.6.5 Ensayo de porosidad	67
3.7 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	67
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
4.1 REALIZACIÓN DE PRUEBAS ANTES DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.	68
4.1.1 Peso de las probetas	68
4.1.2 Inspección visual	69
4.1.3 Ensayo de ultrasonido	70
4.1.4 Ensayo de resistencia a la compresión	72
4.1.5 Ensayo de porosidad	73
4.2 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO	73
4.3 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DESPUÉS DE SOMETER LAS PROBETAS A FUEGO.	78

4.3.1 Pérdida de peso de las probetas	78
4.3.2 Inspección visual	79
4.3.3 Ensayo de ultrasonido	81
4.3.4 Ensayo de resistencia a la compresión	87
4.3.5 Ensayo de porosidad	89
4.4 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE EXPOSICIÓN	91
4.5 RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA POROSIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS DE EXPOSICIÓN	92
4.6 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS DE EXPOSICIÓN	94
5. CONCLUSIONES	96
6. RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	99
ANEXOS	108

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación de la resistencia a la compresión con respecto a la porosidad	40
Figura 2. Diagrama esquemático de la medida de la velocidad de pulso ultrasónico	42
Figura 3. Tipos de medición de la velocidad de pulso ultrasónico	43
Figura 4. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación.	45
Figura 5. Formaleta utilizada para la elaboración de probetas	51
Figura 6. Proceso de elaboración de las probetas	52
Figura 7. Ubicación de las termocuplas dentro de la probeta	53
Figura 8. Balanza analítica	54
Figura 9. Equipo de ultrasonido	55
Figura 10. Cuadrícula empleada para la medición de ultrasonido en probetas de referencia	56
Figura 11. Cuadrícula utilizada para la medición de ultrasonido en probetas expuestas a fuego	57
Figura 12. Máquina universal de ensayos marca TREBEL	59
Figura 13. Porosímetro de campo Ruska	61
Figura 14. Núcleo extraído de una probeta patrón	61
Figura 15. Horno utilizado para los ensayos a fuego	63
Figura 16. Fotografía de toma de mediciones de VPU	66
Figura 17. Fotografía de una probeta antes de ser expuesta a fuego	69
Figura 18. Fotografías de las superficies de las probetas expuestas a fuego	79
Figura 19. Defectos visibles en la probeta expuesta a 1200°C.	80

LISTA DE GRAFICOS

	Pág.
Gráfica 1. Perfiles de velocidad de probetas antes de ser expuestas a 200°C	70
Gráfica 2. Perfiles de velocidad de probetas antes de ser expuestas a 400°C	70
Gráfica 3. Perfiles de velocidad de probetas antes de ser expuestas a 600°C	71
Gráfica 4. Perfiles de velocidad de probetas antes de ser expuestas a 800°C	71
Gráfica 5. Perfiles de velocidad de probetas antes de ser expuestas a 1000°C	72
Gráfica 6. Perfiles de velocidad de probetas antes de ser expuestas a 1200°C	72
Gráfica 7. Temperatura vs tiempo de exposición a 200°C (Probeta 8)	75
Gráfica 8. Temperatura vs tiempo de exposición a 400°C (Probeta 10)	75
Gráfica 9. Temperatura vs tiempo de exposición a 600°C (Probeta 15)	76
Gráfica 10. Temperatura vs tiempo de exposición a 800°C (Probeta 16)	76
Gráfica 11. Temperatura vs tiempo de exposición a 1000°C (Probeta 19)	77
Gráfica 12. Temperatura vs tiempo de exposición a 1200°C (Probeta 23)	77
Gráfica 13. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 200°C	81
Gráfica 14. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 400°C	82
Gráfica 15. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 600°C	82
Gráfica 16. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 800°C	83
Gráfica 17. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1000°C	84
Gráfica 18. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1200°C	84
Gráfica 19. Relación de velocidades a diferentes temperaturas de exposición	85
Gráfica 20. Relación de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la temperatura de exposición	87
Gráfica 21. Relación de la resistencia a la compresión con respecto a la temperatura de exposición	89
Gráfica 22. Relación de la porosidad con respecto a la temperatura de exposición	90

Gráfica 23. Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico	92
Gráfica 24. Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la porosidad	93
Gráfica 25. Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad	95

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Componentes del concreto	30
Tabla 2. Tipos de cemento	31
Tabla 3. Clasificación de los agregados según el tamaño.	33
Tabla 4. Cambios Ocurridos en el concreto a diferentes temperaturas.	34
Tabla 5. Clasificación del concreto según su resistencia a la compresión	39
Tabla 6. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica	41
Tabla 7. Distribución de probetas para la respectiva exposición a fuego	47
Tabla 8. Análisis del control de calidad del agua realizado por el acueducto metropolitano de Bucaramanga	48
Tabla 9. Caracterización de la materia prima	49
Tabla 10. Distribución granulométrica del agregado fino.	49
Tabla 11. Dosificación de la mezcla de concreto	50
Tabla 12. Parámetros utilizados en el equipo de ultrasonido.	58
Tabla 13. Peso de las probetas antes de someterlas a fuego	69
Tabla 14. Resultados de resistencia a la compresión para probetas antes de ser expuestas a fuego	73
Tabla 15. Identificación de las termocuplas empleadas en las graficas de las curvas de calentamiento	74
Tabla 16. Pérdida de peso de las probetas	78
Tabla 17. Resultados de la Velocidad de pulso ultrasónico a diferentes temperaturas de exposición	86
Tabla 18. Resultados de resistencia a la compresión a diferentes temperaturas de exposición	88
Tabla 19. Resultados de porosidad a diferentes temperaturas de exposición	90

Tabla 20. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico	91
Tabla 21. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico y la porosidad	93
Tabla 22. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y la porosidad	94

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Pasos y cálculos para el diseño de mezcla	108
ANEXO B. Registro de toma de datos de la velocidad de pulso ultrasónico en los tres perfiles para la probeta 7 antes de ser expuesta a fuego.	114
ANEXO C. Registro de toma de datos de la velocidad de pulso ultrasónico en los tres perfiles para la probeta 7 después de ser expuesta a fuego.	116
ANEXO D. Cálculos para hallar la resistencia a la compresión	118
ANEXO E. Cálculos para hallar la porosidad de las probetas	120

GLOSARIO

AGREGADO FINO: El agregado fino es la porción de un aglomerado que pasa a través de una malla número 4. Por lo general, estos materiales se clasifican de modo bastante uniforme desde la malla número 4 hasta la número 100. A menos que se indique otra cosa, el agregado fino suele ser arena, el producto de la desintegración y abrasión natural de las rocas.

AGREGADO GRUESO: Los aglomerados gruesos son la porción de aglomerado que no pueden pasar a través de una criba número 4 (4.75 mm). El aglomerado grueso normal consta de grava de mina o grava triturada, además son de consistencia fuerte y durable propicios para la elaboración del concreto.

CONCRETO: El concreto es el producto resultante de la mezcla de un aglomerante (generalmente cemento, arena, grava y agua) que al fraguar y endurecer adquiere buena resistencia y desarrolla grandes propiedades mecánicas.

CURADO DEL CONCRETO: El curado consiste en el mantenimiento de contenidos de humedad y de temperaturas satisfactorios en el concreto durante un periodo definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas.

DURABILIDAD DEL CONCRETO: El ACI define la durabilidad del concreto como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca deterioro del concreto.

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

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

FUEGO: Se llama fuego a la reacción química de oxidación violenta de una materia combustible, con desprendimiento de llamas, calor, vapor de agua y dióxido de carbono. Es un proceso exotérmico. Desde este punto de vista, el fuego es la manifestación visual de la combustión.

POROSIDAD: Porcentaje entre el volumen de huecos de un material y su volumen total del material incluyendo los poros; los poros permiten el paso de gases o líquidos a través del material.

POROSIDAD ABSOLUTA: Es aquella porosidad que considera el volumen poroso del material esté o no interconectado.

POROSIDAD EFECTIVA: Se define como el volumen total de la roca que representa espacios que pueden contener fluidos y se encuentran comunicados entre sí.

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 puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial.

TERMOCUPLA: Es un transductor de temperaturas, es decir un dispositivo que convierte una magnitud física en una señal eléctrica. Está constituida por dos alambres metálicos diferentes que unidos desarrollan una diferencia de potencial eléctrica entre sus extremos libres.

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO SIN REFUERZO SOMETIDO A FUEGO.*
AUTORES: CUESTA GONZÁLEZ HARRY NELSON, LUQUE PINZÓN HECTOR FABIAN**

PALABRAS CLAVES: Concreto, Fuego, Resistencia a la compresión, Velocidad de pulso ultrasónico, Porosidad.

RESUMEN:

La velocidad de pulso ultrasónico es una técnica que durante los últimos años ha sido utilizada en la inspección de concretos. En el presente trabajo de investigación se evaluó el efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego. Para estese fabricaron 24probetas cúbicas de 20x20x20cm, hechas con una relación agua/cemento 0.5, de las cuales a 18 se les introdujo 2 termocuplas como sensores de temperaturas. Se realizaron ensayos de fuego (a 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C y 1200°C) y para cada ensayo se utilizaron tres probetas (excepto para la prueba a 1200°C, que se usaron 2). Las probetas restantes se usaron como referencia. Para la exposición a fuego se empleó 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 la 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 la temperatura de exposición asciende, los valores de resistencia a la compresión y de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) disminuyen, mientras que el porcentaje de porosidad aumenta al incrementar las temperaturas de exposición. Por último se hizo una relación de las técnicas empleadas, del cual se pudo verificar que la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión son parámetros que están directamente ligados y se ven afectados por un ataque agresivo como lo es el fuego, obteniendo como resultado un comportamiento exponencial con un índice de correlación de 0.961.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Ph.D. Ricardo Cruz, Codirectora: Msc. Luz Amparo Quintero Ortiz

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF THE EFFECT ON ULTRASONIC PULSE VELOCITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF UNREINFORCED CONCRETE SUBJECTED TO FIRE.

AUTHORS: CUESTA GONZÁLEZ HARRY NELSON, LUQUE PINZÓN HECTOR FABIAN**

KEY WORDS: Concrete, Fire, Compression strength, Ultrasonic Pulse Velocity, Porosity.

ABSTRACT:

The ultrasonic pulse velocity is a technique that has been used during last years for concrete inspection. In the present research, the effect on the ultrasonic pulse velocity and compressive strength of unreinforced concrete subjected to fire was studied. For this investigation, 24 cubic of 20x20x20cm specimens were made with a water-cement ratio of 0.5. Inside of 18 out of the 24 specimens, were introduced 2 thermocouples as temperature sensors. Fire tests were performed at (200 ° C, 400 ° C, 600 ° C, 800 ° C, 1000 ° C and 1200 ° C) and there were three specimens for each test (except for the test at 1200 ° C, which were used 2). The remaining samples were used as reference. For exposure to fire, a program developed in Labview 8.5 and an oven was used. This software allowed the registration of internal temperatures of the specimens and the control of flame temperature, showing the heating curves as a function of time of exposure for each specimen. The results showed that while temperature of exposure increased, the values of compressive strength and ultrasonic pulse velocity (VPU) decreased, while the percentage of porosity increases with increasing exposure temperatures. Finally, from a relation of the used techniques, it was verified that the ultrasonic pulse velocity and compressive strength are parameters that are directly linked and get affected by an aggressive attack as the fire, which resulted an exponential behavior with a correlation index of 0,961.

* Work of Degree

** Faculty of Physical-chemical Engineering School of metallurgical Engineering and Science of Materials. Director: Ph.D. Ricardo Cruz, Codirector: Msc. Luz Amparo Quintero Ortiz.

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más importantes en el desarrollo de la infraestructura de un país, debido a que tiene una buena calidad de servicio ante diferentes agentes agresivos como lo es el fuego. La seguridad humana en caso de incendio es una de las consideraciones en el diseño de las construcciones residenciales, públicas e industriales. A diferencia de otros materiales el concreto es incombustible y no emite humos tóxicos cuando es expuesto a altas temperaturas. A diferencia del acero, cuando se somete a temperaturas del orden de 700 ° a 800 ° C, el concreto es capaz de retener suficiente fuerza para largos períodos de tiempo, lo que permite operaciones de rescate y reduce el riesgo de colapso estructural [1].

Por estas razones se dice que el concreto tiene un alto grado de resistencia al fuego y, en la mayoría de las aplicaciones el concreto puede ser descrito como virtualmente "a prueba de fuego". Este excelente rendimiento se debe en su mayor parte a los materiales constitutivos del concreto (cemento y agregados) que, al combinarse químicamente, forma un material inerte. Sin embargo es importante decir que el concreto es afectado estructuralmente después de haber sido expuesto a fuego debido a la aparición de microfisuras, defectos, cambios químicos y físicos que actúan negativamente en la calidad del mismo [2]. Por estos motivos la industria de la construcción ha conllevado a buscar métodos más efectivos y económicos de inspección, que permitan un control rápido y confiable, entre ellos el ultrasonido [3].

En la actualidad, la velocidad de pulso ultrasónico es muy utilizada para evaluar estructuras de concreto debido a su simplicidad, versatilidad y repetibilidad. El carácter heterogéneo del concreto y el hecho de que las industrias con este material sean, la mayoría de las veces, construidas sin estricto control industrial,

provocan gran variabilidad en sus propiedades físicas; lo anterior da lugar a que no exista un único valor de la velocidad para cada valor de la resistencia a la compresión de este material [4].

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se puede diseñar de tal manera que tengan una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad, que cumplan con los requerimientos de diseño de la estructura. La resistencia a la compresión del concreto es la medida más común de desempeño que emplean los ingenieros para diseñar edificios y otras estructuras [5].

Otros de los aspectos importantes para mirar es la porosidad, que influye en la durabilidad del concreto, esta afecta su resistencia a la compresión, permite el ingreso de agentes agresivos y en general disminuye el tiempo de vida útil proyectado para la estructura, por esta razón es importante su estudio [6].

Actualmente la técnica ultrasónica más utilizada es la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), que se basa en la medición del tiempo de vuelo del haz sonoro, pudiéndose relacionar con la resistencia a la compresión del concreto [6]. Por todo lo anterior es importante realizar un estudio que permita evaluar los cambios ocurridos en este material cuando es sometido a fuego con el fin de dar un aporte a la durabilidad que pueda tener dicho material.

1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las propiedades del concreto se ven sustancialmente modificadas cuando es expuesto a fuego debido a la aparición de fisuras que afectan la estructura. La permanencia del concreto a altas temperaturas hace que se produzcan cambios físicos y químicos que depende tanto de la composición de la matriz como el tipo de agregados empleados [7]. La composición de concreto es importante porque tanto la pasta de cemento como el conjunto de componentes se pueden descomponer por el calor. La permeabilidad de concreto, el tamaño del elemento, y la tasa de aumento de temperatura son importantes, ya que rigen el desarrollo de las presiones internas de los productos de descomposición gaseosos [1].

Los daños producidos por el fuego son más notorios cuando el concreto supera los 500°C ya que se considera que en este nivel los cambios que se producen son prácticamente irreversibles [7].

Por las razones mencionadas anteriormente es de suma importancia hacer un estudio mediante ensayos no destructivos, el cual permita valorar daños producidos por el fuego en el concreto (no reforzado), y posteriormente hacer una correlación con pruebas destructivas, como aporte al estudio de la durabilidad del concreto.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar el efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo sometido a fuego.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto sobre la resistencia a la compresión en concreto sin refuerzo con una relación agua/ cemento (a/c) igual a 0.5, expuesto al fuego.
- Evaluar el efecto sobre la velocidad de pulso ultrasónico "VPU" de las muestras de concreto en estudio expuestas al fuego.
- Establecer relaciones entre los resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES DEL 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.

Se ha convertido en el material de construcción más ampliamente utilizado a nivel mundial en razón a su extraordinaria versatilidad en cuanto a las formas que se puede obtener; sus propiedades físicas y mecánicas para ser usado como elemento estructural además de la economía de su uso, son razones que lo hacen muy competente frente a construcciones de madera, mampostería o acero [8].

El concreto, se produce a partir de un diseño de mezcla que consiste en la selección de los constituyentes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y su dosificación en cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, una masa volumétrica con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas [9].

Las propiedades requeridas 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. En general, cada tipo de construcción tiene requerimientos particulares que dependen de las condiciones climáticas, del sistema constructivo, del tiempo y de los costos de ejecución [9].

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 que con mayor frecuencia se hace referencia es la resistencia a la compresión, debido a que es muy fácil evaluar y en la mayoría de los casos es suficiente para garantizar un buen comportamiento estructural [10].

Las propiedades en estado fresco del concreto deben permitir que se llenen adecuadamente las formaletas, y los espacios, así como también obtener una masa homogénea sin grandes burbujas de aire o agua atrapada [10].

Las propiedades en estado fresco, que pueden ser determinados mediante métodos de ensayo, son: Trabajabilidad o manejabilidad, segregación, exudación o sangrado, masa unitaria, contenido de aire, contenido de agua [10].

Otras de las maneras de encontrar el concreto es en estado endurecido, el cual es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión, dependiendo de las propiedades tanto físicas, químicas, mecánicas de sus componentes y de la interacción de cada uno de ellos [11].

Desde el punto de vista de la resistencia a compresión se considera que un concreto es de resistencia normal cuando no supera los 42 MPa. Por otra parte actualmente se considera que un concreto es de alta resistencia cuando esta es superior a 42 MPa e inferior a 100MPa a 28 días [11].

2.1.1 Componentes del concreto. El concreto es una mezcla homogénea compuesta por una pasta adhesiva de cemento y agua, que mantiene ligadas a las partículas de material inerte, denominados agregados finos y gruesos [12].

El concreto se elabora con arena y grava (agregado grueso) que constituyen entre el 70 y 75 por ciento del volumen y una pasta cementante endurecida formada por cemento hidráulico con agua, que con los vacíos forman el resto [13]. Los agregados son partículas con resistencia mecánica adecuada y a condiciones de exposición a la intemperie; no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto [14]. A continuación se presenta una tabla de los componentes del concreto con algunas funciones químicas y físicas.

Tabla 1. Componentes del concreto

	Componente	Función Química	Función Física
Pasta	Cemento Agua	Activa Ocurre reacción Química, desprende calor inicial, contracción, gel fragua y endurece.	Pega: Unir agregados Durabilidad Resistencia mecánica
Agregados	Arena Piedras	Inerte (sin reacción)	Estabilidad del volumen Relleno económico, dureza Resistencia mecánica

Fuente: El concreto [15]

2.1.1.1 Cemento. Los cementos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, porque reaccionan químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes. El más utilizado, es cemento Portland hidráulico tipo 1, el cual tiene propiedades de adhesión y cohesión, que permiten aglutinar los agregados para conformar el concreto [16].

Estas propiedades dependen de su: composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar [16].

El cemento de Portland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso [17].

Estos se presentan en forma de cuatro fases mineralizadas, en conjunto con una fase vítrea, integrada por los dos últimos. Estas fases constituyen un 95 % del peso total del clínker, siendo el 5 % restante componentes menores, principalmente óxidos de sodio, potasio, titanio, residuos insolubles y otros [18].

De acuerdo a las necesidades que se tienen hoy en día se fabrican diferentes tipos de cementos para cumplir con propósitos específicos. La norma NTC 30 [19] estipula ciertas clases de cemento para las diferentes necesidades existentes.

Tabla 2. Tipos de cemento

CEMENTO	APLICACIÓN
Tipo 1	De uso general, destinado a obras de concreto que no estén sujetas al contacto de factores agresivos.
Tipo 2	Se usa en obras de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos.
Tipo 3	Desarrolla altas resistencias a edades tempranas, normalmente a una semana o menos.
Tipo 4	Se usa para estructuras de concreto masivo, como presas de gravedad grandes.
Tipo 5	Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas.

Fuente. Colección básica del concreto. Tecnología y propiedades [20].

2.1.1.2 Agua de mezcla. Es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto y mortero debido a que desempeña una función importante en estado

fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente que para usarla en el lavado de agregados, en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física [21].

El agua se adiciona junto con los agregados y el cemento. Se necesita este último para producir una pasta hidratada con fluidez tal, que permita la lubricación adecuada de la mezcla de concreto cuando se encuentra en estado plástico, esta pasta va estructurándose de forma diferente para producir el gel de cemento [22].

2.1.1.3 Agregados. Los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del 70 por ciento del material en un metro cúbico de concreto y son los que hacen que éste sea un material económico de construcción. En la elaboración del concreto, usado en la mayoría de las construcciones, los agregados frecuentemente son obtenidos de arenas naturales y depósitos de grava [23].

La calidad de los agregados está determinada por el origen, por su distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Se han clasificado en agregado grueso y agregado fino, fijando un valor en tamaño de 4.76 mm a 0.075 mm para el fino o arena y de 4.76 mm en adelante para el grueso. Frecuentemente la fracción de agregado grueso es subdividida dentro de rangos, tales como, 4.76 mm a 19 mm para la gravilla y de 19 mm a 51 mm para la grava [23].

El agregado fino o arena deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C33 [24], es decir, no deberá contener cantidades dañinas de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales [25].

Tabla 3. Clasificación de los agregados según el tamaño.

Tamaño de las partículas en mm (tamiz)	Denominación corriente	Clasificación como agregado para concreto
0.075 – 4.76 (No. 200) – (No. 4)	Arena	Agregado fino
4.79 – 19.1 (No. 4) – (3/4")	Gravilla	Agregado grueso
19.1 – 50.8 (3/4") – (2")	Grava	Agregado grueso
50.8 – 152.4 (2") – (6")	Piedra	Agregado grueso

Fuente. Colección básica del concreto. Tecnología y propiedades [26].

2.1.2 Proceso de fabricación del concreto. El ACI (American Concrete Institute) recomienda que se lleven a cabo ciertas actividades con el fin de llevar un adecuado proceso en la fabricación del concreto: caracterización de la materia prima, diseño de mezcla, fraguado y curado [27]. Esto se puede ver con mejores detalles en el anexo A.

2.2 EXPOSICIÓN DEL CONCRETO 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. [28]

Es comúnmente entendido en el sector de la construcción que el concreto es el material de construcción más resistente al fuego de uso cotidiano. Debido a la alta capacidad de calor específico del concreto, un incendio por lo general no causa un rápido aumento de su temperatura y no puede causar un daño significativo. [29]

Las propiedades del concreto se ven sustancialmente modificadas por la exposición a fuego, debido a la aparición de micro y macrofisuras que afectan su

estructura. En diversos trabajos se ha verificado 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 los agregados) y del tipo de enfriamiento [7].

Estos daños causados en el concreto por el fuego pueden variar desde leves defectos superficiales a daños más graves, tales como la delaminación, grietas externas y desprendimiento, en la microfisuración y cambios químicos [29].

En la microestructura del concreto se presentan fisuras y otras imperfecciones, que en muchos de los casos se extienden hasta la macroestructura. Cuando el material se somete a elevadas temperaturas, debido a que está compuesto por distintos materiales que poseen distintos coeficientes de dilatación, se generan cambios volumétricos diferentes, incrementándose las micro y macrofisuras, además surgen aumentos en la presión de poros y se descomponen los productos de hidratación. Todo esto genera una acción combinada de contracción y expansión de la pasta cementicia, que afecta su microestructura [30].

Los cambios que sufre el concreto dependiendo del nivel de temperatura alcanzado se pueden observar en la tabla siguiente:

Tabla 4. Cambios Ocurredos en el concreto a diferentes temperaturas.

TEMPERATURAS	CAMBIOS OCURRIDOS EN EL CONCRETO
100° C	Expulsión del agua evaporable.
180° C	Comienzo de la deshidratación del silicato de calcio hidratado.
500° C	Descomposición del hidróxido de calcio y la mayoría de los agregados es estable hasta los 500° C.
500° C - 600° C	Ocurre la transformación alotrópica del cuarzo α (trigonal) a cuarzo β (hexagonal) y es acompañada por una significativa expansión del orden de 1.2%
< 800° C	Los basaltos no muestran cambios de fase.
600° C – 900° C	Ocurre la de carbonatación de los agregados calcáreos

Fuente: Hormigones expuestos a altas temperaturas: evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas [7]

La deshidratación y los cambios de porosidad de la pasta de cemento y las deformaciones diferenciales o procesos de transformación de los agregados que generan la exposición a altas temperaturas afectan como era de esperar la resistencia y la deformabilidad del concreto. Los principales efectos se traducen en el debilitamiento en la zona de interfaces, reducción en la resistencia de la matriz por incremento de la porosidad o destrucción de los productos de hidratación, alteraciones de los agregados y desarrollo de la microfisuración [7].

La mayor parte de los estudios sobre los efectos de las altas temperaturas refieren a los cambios en las propiedades mecánicas del concreto (resistencia, deformabilidad) o en los procesos fisicoquímicos en las pastas de cemento. Sin embargo es obvio que los primeros resultan de la alteración de la estructura del material y que dicha alteración no es uniforme en toda la masa si no que se producirá en mayor medida en las capas superficiales. En consecuencia es posible asumir grandes diferencias entre las características de la masa y de las capas externas de una estructura expuesta a altas temperaturas [31].

2.2.1. Efecto de la temperatura sobre la pasta de cemento. El efecto del incremento de la temperatura sobre la pasta de cemento hidratado depende del grado de hidratación y el estado de humedad. Una pasta de cemento Portland bien hidratado, consiste principalmente de silicatos de calcio hidratado (CSH), hidróxido de calcio, y sulfoaluminato de calcio hidratado. Una pasta saturada contiene grandes cantidades de agua libre y el agua capilar, además del agua adsorbida. Los distintos tipos de agua son fácilmente perdidos en el aumento de la temperatura del concreto [32].

Sin embargo, desde el punto de vista de protección contra incendios, cabe señalar que, debido al fuerte calor de vaporización necesaria para la conversión del agua en vapor, la temperatura del concreto no se levantará hasta que toda el agua evaporable se ha eliminado [32].

La presencia de grandes cantidades de agua evaporable puede causar un problema. Si la velocidad de calentamiento es alta y la permeabilidad de la pasta de cemento es baja, el daño al concreto se da por el desprendimiento de la superficie. El 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 atmósfera [32].

2.2.2 Efecto de la temperatura sobre los agregados. La porosidad y mineralogía del agregado parecen ejercer una influencia importante sobre el comportamiento del hormigón expuestos al fuego. Dependiendo de la velocidad de calentamiento, el tamaño, la permeabilidad y el estado de humedad del agregado, el agregado poroso, puede ser también susceptible a la expansión perturbadora [33].

Por ejemplo, la mineralogía del agregado determina la diferencia de expansión térmica entre el agregado y la pasta de cemento y la resistencia a la rotura de la zona de transición de la interfase [33].

2.3 ENSAYOS REALIZADOS PARA ESTUDIOS EN EL CONCRETO

2.3.1 Porosidad en el concreto. Normalmente el concreto es una mezcla de cuatro ingredientes básicos: arena, grava, cemento y agua. En el proceso de mezcla, una cierta cantidad de aire se mezcla en el concreto. El agua y el aire toman espacio dentro del concreto aún después que el concreto es derramado en el lugar y durante las primeras etapas del fraguado [34].

Cuando el concreto es trabajado en su lugar y empieza a cuajarse o endurecerse, los ingredientes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras los ingredientes más livianos flotan arriba. Siendo el agua el más liviano de los cuatro ingredientes básicos, flota hacia arriba donde se evapora o se exprime por los

lados o el fondo. El agua, al ocupar espacio, deja millones de huecos entrecruzados en todas direcciones. Según el aire escapa, tiene el mismo efecto. Estos espacios huecos se atan entre sí creando lo que se llama porosidad. Frecuentemente los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del concreto, debilitándolo [34].

La estructura de la porosidad en el concreto influye fuertemente en el actuar del mismo. Específicamente, la porosidad determina las proporciones a que las especies agresivas pueden entrar en la masa y causar destrucción [34].

2.3.1.1 Técnicas para medir la porosidad. Se han usado tipos importantes de técnicas experimentales para medir la porosidad y/o su distribución en los materiales porosos. Una de estas técnicas es por un instrumento llamado porosímetro, en este caso, el porosímetro de campo Ruska, que gracias al avance tecnológico facilita la medición y sobretodo la precisión de los resultados que se pueden obtener en una muestra de concreto [35].

El principio de este método está basado por la ley de Boyle, la cual sirve para determinar la porosidad efectiva, que es el porcentaje de espacio poroso intercomunicado con respecto al volumen del concreto [35].

Otro tipo de porosidad es la absoluta, la cual es el porcentaje de espacio total con respecto al volumen de la roca sin tener en cuenta si los poros están interconectados entre sí o no [35].

La determinación de la porosidad consiste en la medida del volumen de sólidos o granos del núcleo de la probeta, seguida por la medición del volumen total del mismo [35]. Para la hallar la porosidad se tiene en cuenta las siguientes ecuaciones por la ley de Boyle:

$$Porosidad = \frac{V_{poros}}{V_{total}} \quad (1)$$

$$V_{poros} = V_{total} - V_{granos} \quad (2)$$

$$Porosidad = \frac{V_{total} - V_{granos}}{V_{total}} \quad (3)$$

$$Porosidad (\%) = \left(1 - \frac{V_{granos}}{V_{total}}\right) * 100 \quad (4)$$

2.3.2 Resistencia a la compresión. La resistencia de un material se define como la habilidad para resistir esfuerzos sin fallar. La falla se identifica algunas veces con la aparición de grietas. Sin embargo, debe hacerse notar que a diferencia de la mayoría de los materiales estructurales, el concreto contiene algunas grietas finas aun antes de estar sujeto a esfuerzos externos. En el concreto por lo tanto, la resistencia se relaciona con el esfuerzo requerido para causar fractura y es sinónimo del grado de falla en el que el esfuerzo aplicado alcanza su valor máximo. En las pruebas de tensión, la fractura de la pieza probada generalmente significa falla; en la compresión, la pieza probada se considera que ha fallado cuando, no habiendo señas de fractura externas visibles, el agrietamiento interno es tan avanzado que el espécimen es incapaz de soportar una carga mayor sin fracturarse [36]. El concreto se puede clasificar de acuerdo a su resistencia a la compresión, esta clasificación se especifica en la tabla 5.

Tabla 5. 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

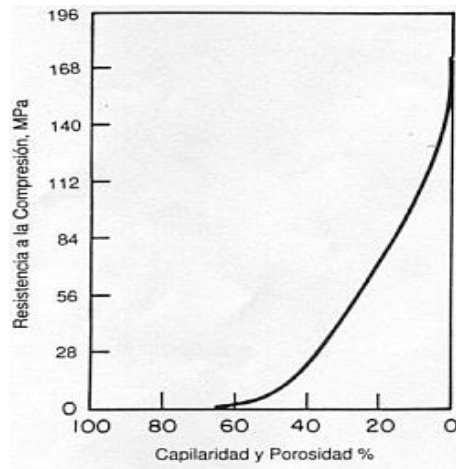
Fuente: Clasificación de concretos por su resistencia [37]

Las pruebas a 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 concreto [36].

2.3.2.1 Efectos y relación entre la resistencia y la porosidad. Existe una relación muy importante entre la porosidad (la parte de huecos en el volumen) y la resistencia. Por consecuencia, en materiales de múltiples fases como el concreto, la porosidad de la estructura de cada uno de los componentes que unificándolos produce la porosidad del concreto son un límite a la resistencia [36].

La respuesta del concreto al esfuerzo aplicado depende no solamente del tipo de esfuerzo, sino también de cómo una combinación de varios factores afecta la porosidad de los distintos componentes estructurales del concreto. Desde el punto de vista de la resistencia, la relación entre la relación agua/cemento y la porosidad es indudablemente el factor más importante, porque independientemente de otros factores afecta la porosidad de ambos, la matriz de la pasta de cemento y de la zona de transición entre la matriz y el agregado grueso [38]. A continuación se muestra la relación existente entre la porosidad y la resistencia a la compresión (ver fig. 1).

Figura 1. Relación de la resistencia a la compresión con respecto a la porosidad



Fuente: Concrete, Microstructure, Properties and Materials. [39]

2.3.3 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU). La medición de la velocidad del pulso ultrasónico como una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años [4].

Los ensayos no destructivos son una herramienta útil para determinar la calidad del concreto endurecido, pero en ningún caso reemplazan a los destructivos. En el caso de estructuras de dudosa calidad, ya sea afectada por esfuerzos o ataques de elementos agresivos al concreto, se suele aplicar esta técnica con el fin de efectuar un diagnóstico preliminar del elemento en estudio. Efectuado éste, se podrán investigar las zonas con mayor daño con técnicas destructivas, y emitir una opinión más fundada sobre la estructura. En general se puede señalar, que los ensayos no destructivos son la etapa previa de los ensayos [40].

Tabla 6. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica

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

Fuente. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico [41].

La técnica cubre la determinación de la velocidad de propagación de pulsos de una onda longitudinal a través del material. Las ondas longitudinalmente usadas tienen frecuencias entre 20 a 150 KHz, las cuales son bajas comparándolas con las del acero, por la heterogeneidad del concreto [42], según lo indica la norma ASTM C 597 [44].

La técnica de velocidad de pulso ultrasónico, VPU, consiste en determinar el tiempo durante el cual una onda de pulso ultrasónico atraviesa una dimensión conocida del elemento de concreto. Así, la longitud de la trayectoria dividida por el tiempo que la onda tarda en recorrer esta trayectoria da como resultado la Velocidad de Pulso Ultrasónico [43].

$$V = \frac{L}{t} \quad (5)$$

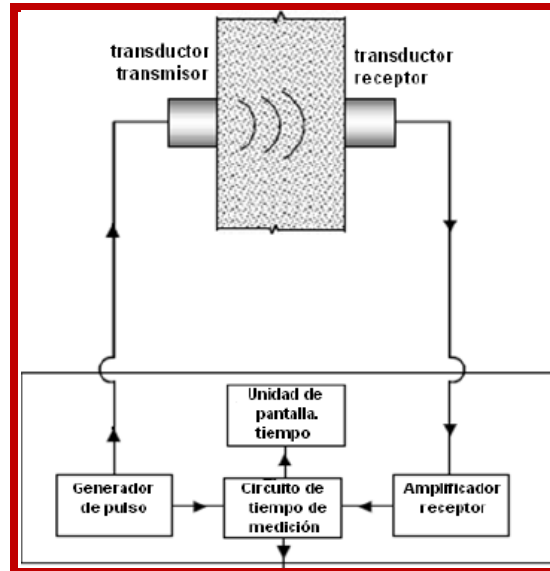
Donde:

V = Velocidad de pulso

L = Longitud o distancia recorrida por la onda

t = Tiempo gastado

Figura 2. Diagrama esquemático de la medida de la velocidad de pulso ultrasónico

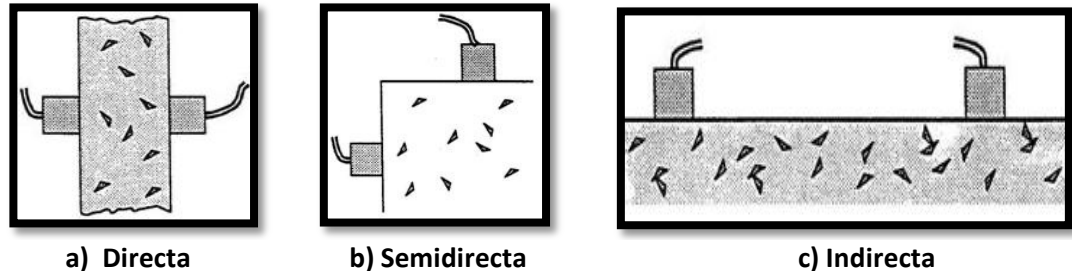


Fuente: ASTM C 597 [44]

La medición de la velocidad de pulso ultrasónico se puede hacer de tres maneras diferentes: Directa, semidirecta e indirecta.

- **Directa:** El método de transmisión directa es la más conveniente y la más satisfactoria ya que la máxima energía del pulso es transmitida y recibida [45], como se muestra en la fig. 3a.
- **Semidirecta:** Se puede utilizar de manera satisfactoria, pero requiere de cuidado en que los transductores no estén muy alejados, de lo contrario la transmisión de pulsos puede disminuir y las señales del pulso puede no ser detectadas [45].
- **Indirecta:** Es menos satisfactoria, porque la señal recibida es significativamente inferior a la recibida por el método de transmisión directa. Este método es más propenso a errores [45].

Figura 3. Tipos de medición de la velocidad de pulso ultrasónico



Fuente: Testing Of Concrete In Structures [46]

2.3.3.1 Factores que afectan la velocidad de pulso ultrasónico. La aplicación efectiva de este método en el estudio del concreto está condicionada por el conocimiento de una serie de factores que afectan la velocidad de pulso. Los factores derivados directamente de las propiedades del concreto son los siguientes:

- **Relación agua/cemento:** A medida que se aumenta esta relación la velocidad y la resistencia a la compresión disminuyen, suponiendo que no hay ningún otro cambio en la composición del concreto [47].
- **Contenido de agua:** El valor de la velocidad de pulso puede aumentar o disminuir significativamente según su contenido de agua, es decir, se incrementa en condiciones de saturación, sin embargo las variaciones en la resistencia a la compresión no es significativa [47].
- **Cantidad y tipos de agregados:** Normalmente las rocas usadas como agregados en el concreto tienen mayores velocidades de onda que en la pasta de cemento, a fin de aumentar la cantidad total de una determinada matriz de pasta de cemento, también aumenta la medida de la velocidad de las ondas

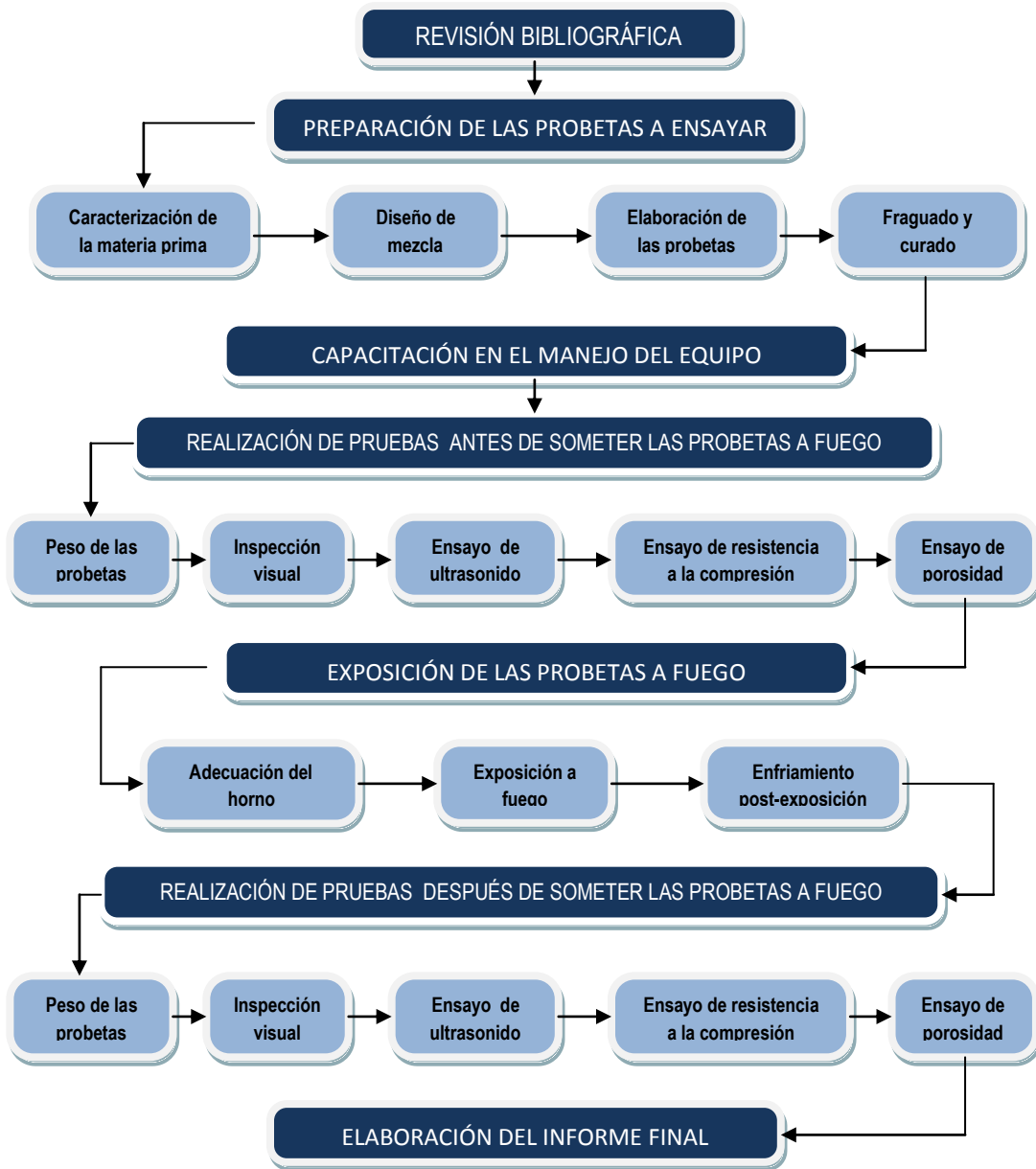
del compuesto. El tipo de agregado no tiene efecto significativo sobre el VPU [47].

- **Temperatura:** El concreto, en condiciones climáticas extremas, ya sean de altas temperaturas o de bajas temperaturas, influye de manera directa en sus propiedades físicas y mecánicas. Ello constituye una preocupación, por las evidentes consecuencias negativas que puede tener en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico [48].

3. METODOLOGÍA

En la figura 4 se muestra el esquema de la metodología que se llevó a cabo en la realización del presente trabajo de investigación.

Figura 4. Esquema de la metodología para el desarrollo de la investigación.



Fuente: Los autores

A continuación se presentan detalles de cada una de las etapas presentadas en el esquema de la metodología:

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Inicialmente se realizó una recopilación de la información necesaria y relacionada con el tema de investigación constituida por tesis, trabajos de grado, artículos y libros. Adicionalmente se consultaron normas técnicas como las ASTM, ISO y las ICONTEC de donde se pudo extraer información importante para el desarrollo de la presente investigación.

Con esta información recopilada se pudieron establecer las variables a considerar durante la realización de este trabajo tales como el tamaño de 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 realización de la presente investigación se estableció emplear probetas cúbicas de concreto de 0.2 m x 0.2 m x 0.2 m, según la norma italiana ENV 206 [49], con relación a/c de 0.5 y tamaño máximo de agregado de 3/4" proveniente de la zona de Pescadero (Santander) y un tiempo de curado húmedo de 28 días.

Se elaboraron 24 probetas, todas con la relación a/c ya establecida. En la tabla 7 se muestra la distribución de las probetas con sus respectivas temperaturas a las que fueron expuestas.

Tabla 7. Distribución de probetas para la respectiva exposición a fuego

Temperatura de exposición (°C)	Número de probetas
Probetas Patrón	6
200	3
400	3
600	3
800	3
1000	3
1200	3
Total probetas	24


Fuente: Los autores

Para la realización de estas muestras se llevaron a cabo las siguientes actividades: caracterización de la materia prima, diseño de mezcla, elaboración de las probetas, fraguado y curado de las mismas.

3.2.1 Caracterización de la Materia Prima. En la fabricación del concreto utilizado para este estudio fue necesario el uso de los siguientes materiales para obtener la mezcla deseada: Agua, agregados grueso, fino y cemento Portland Tipo I. A continuación se mostrara alguna de las características de estos materiales y los métodos de caracterización de los mismos:

- **Agua:** El agua que se utilizó es agua potable suministrada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. En la tabla 8 se muestra el análisis fisicoquímico y microbiológico promedio obtenido en los meses en que se realizó la presente investigación.

Tabla 8. Análisis del control de calidad del agua realizado por el acueducto metropolitano de Bucaramanga

No Aplica		CALIDAD FISICOQUIMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA RED DE DISTRIBUCION																		
FCC 507-006		LABORATORIO DE CONTROL CALIDAD AGUAS																		
Rev:0																				
MUNICIPIO:		BUCARAMANGA				AÑO:		2010												
PARAMETROS	Parámetros Físicoquímicos											Parámetros Microbiológicos						Σ IRCA MENSUAL		
	No. Muestras Físicoquímicas	Cloro residual mg Cl ₂ /L	Turbiedad UNT	Color Aparente UPC	pH Unidades	Oloro y Sabor e: Aceptable 1: No Aceptable	Aluminio mg A/L	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Dureza mg CaCO ₃ /L	Cloruros mg Cl/L	Sulfatos mg SO ₄ /L	Hierro mg Fe/L	Nitratos mg NO ₃ /L	Nitritos mg NO ₂ /L	No de Muestras Microbiológicas	Muestras Positivas Coliformes Totales	% Aceptabilidad Coliformes Totales		Muestras positivas E. Coli	% Aceptabilidad E. Coli
Enero	90	1,02	0,57	3,1	7,70	0	0,05	80,9	74,9	4,9	23,9	0,10	1,0	N.D.	180	0	100	0	100	0,00
Febrero	84	0,92	0,56	2,4	7,58	0	0,05	59,6	77,5	4,4	28,9	N.D.	0,9	N.D.	168	0	100	0	100	0,14
Marzo	93	0,92	0,60	2,8	7,44	0	0,05	57,7	77,3	4,7	31,1	0,10	0,9	N.D.	186	0	100	0	100	0,16
PROMEDIO	89	0,95	0,58	2,8	7,57	0	0,05	59,4	76,6	4,7	28,0	0,10	0,9	N.D.	178	0,0	100	0,0	100	0,10
RES. 2115/07	30	1,5	2,0	5	8,5	0	0,2	200	300	250	250	0,5	10	0	50	0	100	0	100	0,5
Convenções:		mg/L: miligramos por litro UNT: Unidades Nefelométricas de Turbiedad UPC: Unidades de Platino Cobalto IRCA: Índice de Riesgo de Calidad del Agua ND: No Detectable																		
Nota:		El agua distribuida por el amb durante este periodo es APTA para el consumo humano y está conforme con los parámetros ensayados y establecidos por el Gobierno Nacional en la Resolución 2115 de 2007. IRCA entre 0 y 5. AGUA SIN RIESGO, continuar el control y la vigilancia.																		
Elaboró:		Ulris Salomon Barragan																		
Revisó y Aprobó:		CARLOS MANUEL PARRA GOMEZ Jefe de Control Calidad Aguas																		

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga [50].

- **Agregados:** En la mezcla utilizada para la realización de las probetas se trabajó con materiales procedentes del municipio de pescadero (Santander), los agregados que se utilizaron en esta investigación fueron grava como agregado grueso y arena como agregado fino.

Para poder realizar la caracterización de estos agregados se hizo un análisis granulométrico en donde se determinó la gravedad específica, el peso específico, el porcentaje de absorción y el módulo de finura, para cada uno de los agregados, este análisis se realizó bajo las normas NTC 92 [51], NTC 176 [52] y NTC 237 [53].

En la tabla 9 se presenta la caracterización que se hizo al agregado grueso (3/4) y al agregado fino, en donde se presentan sus principales propiedades físicas.

Tabla 9. Caracterización de la materia prima

CARACTERÍSTICAS	AGREGADO FINO	AGREGADO GRUESO (3/4 ")
Gravedad Especifica Aparente S.S.S	2,65	2,61
Peso Unitario del Agregado S.S.S. Compactado (Kg/m3)	1585,55	1503,72
Peso Unitario del Agregado S.S.S. Suelto (Kg/m3)	1401,35	1378,55
Porcentaje de Absorción (%)	0,022	1,26
Porcentaje de Vacios (%)	40,15	42,39

Fuente: Los autores

La clasificación de los agregados por tamaños se realizó siguiendo las normas NTC 77 [54] y NTC 78 [55]. Para la clasificación del agregado fino se utilizó la serie de tamices 4, 8, 16, 30, 50 y 100 y siguiendo este orden el material retenido en cada tamiz se pesó para obtener el análisis granulométrico. Otra clasificación que se realizó fue para el agregado grueso y se hizo por medio de una serie de tamices de 3/4", 3/8" y 4 en donde se seleccionó agregados con tamaño máximo de 3/4".

Una vez caracterizado el material se realiza el análisis granulométrico del agregado fino, del cual se obtuvo los siguientes resultados (ver tabla 10).

Tabla 10. Distribución granulométrica del agregado fino.

TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO (%)	ACUMULADO (%)	PASANTE (%)
4	12,8	1,28	1,28	98,72
8	24,8	2,48	3,76	96,24
16	78	7,8	11,56	88,44
30	223,2	22,32	33,88	66,12
50	354,8	35,48	69,36	30,64
100	197,7	19,77	89,13	10,87
Fondo	108,6	10,86	99,99	0,01
Total	999,9	99,99	PESO MUESTRA	1000 gr
Modulo de finura: 2,09				

Fuente: Los autores

La caracterización de estos materiales se realizó en el centro de Caracterización de materiales Álvaro Beltrán Pinzón de Ingeniería Civil que se encuentra ubicado en la Universidad Industrial de Santander.

- **Cemento:** El cemento que se utilizó en esta investigación fue cemento Portland Tipo I, el cual cumple con las especificaciones indicadas en las normas NTC 121 [56] y NTC 321 [57], según información suministrada por el fabricante.

3.2.2 Diseño de Mezcla. El diseño de mezcla se realizó para una sola relación a/c de 0.5, con un tamaño máximo de agregados (3/4”), como se planteó en los objetivos de esta investigación. El diseño de mezcla realizado se presenta en el anexo A.

La dosificación que se utilizó en la mezcla de concreto, para un total de 24 probetas cúbicas con dimensiones de 0.2x0.2x0.2 m y un volumen de 0.008 m³ se muestra a continuación en la tabla 11. Se tomó como base de cálculo 1m³ de concreto.

Tabla 11. Dosificación de la mezcla de concreto

Material (Kg)	Dosificación (Kg) (1 Probeta)	Dosificación (%) (1 Probeta)	Dosificación (Kg) (24 Probetas)	Dosificación (%) (24 Probetas)
Agregado Grueso	8,304	44,06	199,296	44,11
Agregado Fino	5,72	30,35	137,28	30,38
Cemento	3,2	16,98	76,8	16,99
Agua	1,6	8,49	38,4	8,49

Fuente: Los autores

3.2.3 Elaboración de las Probetas. Para la elaboración de las probetas se construyeron 4 formaletas de madera (triplex) de 1 cm de grosor con dimensiones internas de 0.2x0.2x0.2 m (ver figura 5), las cuales fueron adecuadas, impregnándolas con grasa para su posterior uso.

Figura 5. Formaleta utilizada para la elaboración de probetas



Fuente: Los autores

Posteriormente se elaboró la pasta de concreto pesando todos los materiales utilizados en una balanza analítica según las dosificaciones obtenidas en el diseño de mezcla mostrado anteriormente. Estos materiales se mezclaron con el fin de obtener la pasta de concreto con las especificaciones ya mencionadas para la elaboración de las probetas (ver figura 6a).

Luego de homogenizar la mezcla se procede al llenado de las formaletas compactando cada 1/3 del volumen de la formaleta. La compactación se hizo con una varilla metálica dando 30 golpes en toda la mezcla buscando una mejor uniformidad de la probeta. Para eliminar el aire atrapado dentro de la probeta y ayudar a la homogenización de la mezcla, se golpeó la parte exterior de la formaleta con un martillo de caucho. Por último se introdujeron las termocuplas tipo K dentro de la probeta una a 4 cm y la otra a 10 cm (ver figuras 6b y 7) de distancia con respecto a la cara de exposición a fuego con el fin de detectar el cambio de temperatura en el interior de la probeta.

3.2.4 Fraguado y curado. Después de realizadas las probetas se sometieron las mismas a un periodo de fraguado de 24 horas, cumplido este lapso las probetas se desencofraron (ver figura 6c) y se llevaron a un proceso de curado húmedo a condiciones estándar de temperatura y humedad (23° C y 100% de humedad) durante 28 días (ver figura 6d) según la norma ICONTEC 1377 [58].

Figura 6. Proceso de elaboración de las probetas



(a) Preparación de la mezcla



(b) Probeta elaborada



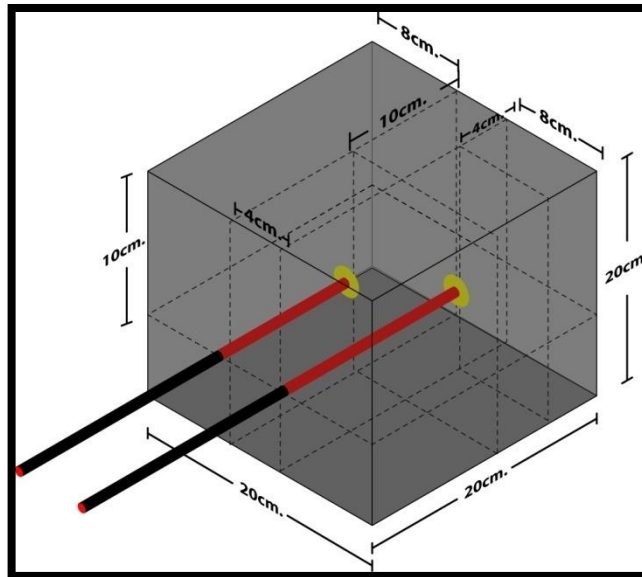
(c) Desencofrado de las probetas



(d) Proceso de curado

Fuente: Los autores

Figura7.Ubicación de las termocupas dentro de la probeta



Fuente: Los autores

Se fabricaron en total 24 probetas cúbicas de concreto con las dimensiones ya especificadas, a las cuales se le realizaron los ensayos de inspección visual, resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y porosidad, estos ensayos se realizaron antes y después de someter las probetas a fuego. Vale la pena aclarar que solo 17 probetas fueron sometidas a fuego y las 6 restantes se utilizaron como probetas de referencia sin exposición a fuego. La probeta faltante durante el proceso de calentamiento accidentalmente explotó, por tal motivo solo se pudo hacer el estudio de 17 probetas sometidas a fuego.

3.3 CAPACITACIÓN EN EL MANEJO DEL EQUIPO “PUNDITplus”

Simultáneamente con el proceso de elaboración de las probetas, se llevó a cabo la capacitación en el manejo del equipo de ultrasonido de baja frecuencia marca CNS FARNELL LIMITED tipo PUNDITplus modelo PC1006.

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

En esta etapa se llevaron a cabo las pruebas de inspección visual, determinación del peso, ensayo de ultrasonido, resistencia a la compresión y porosidad. Esta última prueba se aplicó a una probeta sin exposición a fuego y a probetas expuestas a las temperaturas de 400°C, 800°C y 1200°C. La inspección visual, determinación del peso y velocidad de pulso ultrasónico debido a que estos son ensayos no destructivos se les realizó a todas las probetas.

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

3.4.1 Peso de las probetas. La determinación del peso de las probetas se realizó a los 90 días después del tiempo de curado antes de ser expuestas a fuego por medio una balanza analítica que permite la lectura de tres cifras significativas (ver figura 8).

Figura 8. Balanza analítica



Fuente: Los autores

3.4.2 Inspección visual. Trascurrido el tiempo de curado de las probetas, se pesaron y secaron para realizar un análisis visual con el fin de observar su

estructura superficial y principales características físicas, tales como: porosidad, presencia de grietas superficiales o malos acabados.

3.4.3 Ensayo de ultrasonido. El equipo que se utilizó para realizar los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) fue el MODEL PC 1006 tipo PUNDIT PLUS marca CNS FARNELL LTDA, con transductores 54 KHz de frecuencia (ver figura 9). Este equipo mide el tiempo de propagación de la onda ultrasónica a través del material con relación a la distancia que hay entre los transductores.

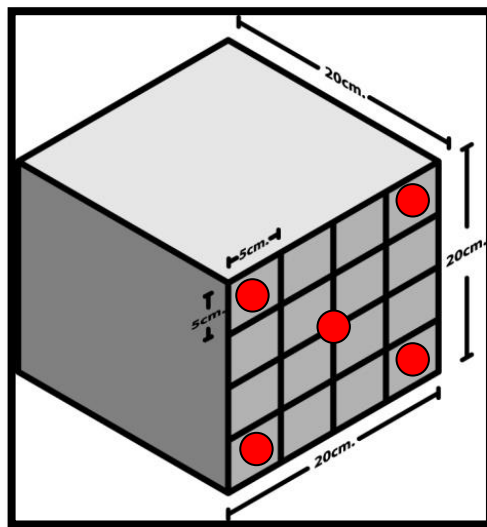
Figura 9. Equipo de ultrasonido



Fuente: Los autores

Las probetas se ensayaron mediante el método directo utilizando dos formas de medición; el primero se aplicó a las probetas de referencia a las que se les dibujó una cuadrícula de 5x5 cm para facilitar la ubicación de los transductores a lado y lado de la probeta. La toma de mediciones se hizo en 5 puntos y por cada punto se hicieron 2 mediciones (ver figura 10).

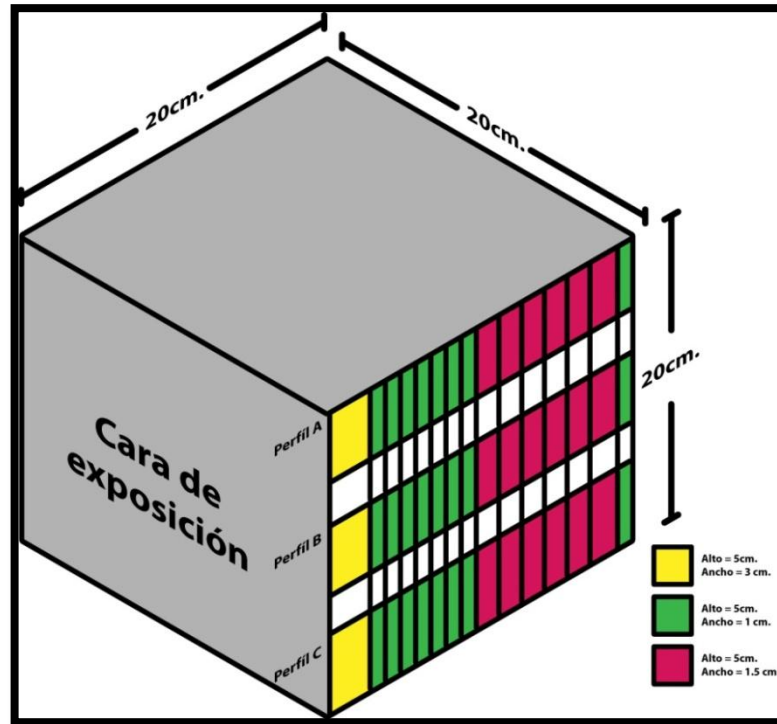
Figura 10. Cuadrícula empleada para la medición de ultrasonido en probetas de referencia



Fuente: Los autores

La segunda forma de medición se realizó a las 17 probetas antes de ser sometidas a fuego, utilizando una guía dibujada sobre la superficie de la muestra de 1x5 cm para ayudar a la ubicación de los transductores, 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 15 puntos y por cada punto se realizaron dos mediciones (ver figura 11).

Figura 11. Cuadrícula utilizada para la medición de ultrasonido en probetas expuestas a fuego



Fuente: Los autores

El procedimiento que se llevó a cabo para realizar este ensayo se encuentra dentro de los lineamientos de la norma ASTM C597-02 [44].

Para realizar las mediciones se hizo un pulido y una limpieza previa de las caras de las probetas, con el fin de obtener una superficie lisa y plana que permitiera un mejor acople de los transductores y unas mediciones más confiables. El acoplante utilizado para los palpadores fue vaselina pura.

Después de tener las probetas limpias, se conectaron los transductores del equipo en sus puertos correspondientes y se ajustó el equipo con los parámetros establecidos en la tabla 12.

Tabla 12. Parámetros utilizados 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	0.20m
LÍMITE SUPERIOR	9999
LÍMITE INFERIOR	1

Fuente: Los autores

3.4.4 Ensayo de resistencia a la compresión. El equipo utilizado para el ensayo de resistencia a la compresión fue la máquina universal de ensayos marca TREBEL, dentro de los rangos de velocidad y carga permitidas, bajo la norma ASTM C39/C39M-04 [59] (Ver figura12).

Figura 12. Máquina universal de ensayos marca TREBEL



Fuente: Los autores

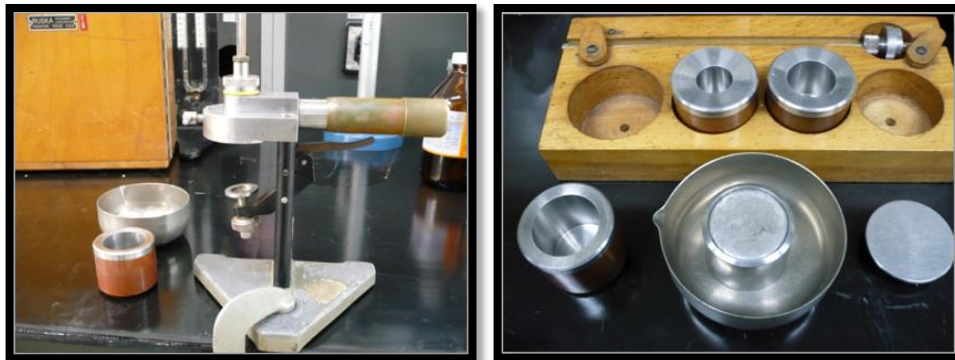
El ensayo de resistencia a la compresión realizado en esta investigación se hizo teniendo en cuenta los siguientes pasos:

- Se hizo la preparación de las probetas, que consistió en hacer una nivelación de las caras (de contacto con la máquina) de cada una de las probetas mediante desbaste, esto con el fin de eliminar cualquier irregularidad de las mismas al momento de hacer el ensayo. También fue importante determinar las dimensiones de las caras de contacto de cada una de las probetas, para luego calcular el área al cual se le aplicó la carga.
- Se realizó la preparación del equipo, para esto se hizo una adaptación de la plataforma del equipo para poder emplear probetas cúbicas.
- Luego se pasó a la aplicación de la carga, esta se hizo a una velocidad uniforme y continua hasta que se produjo la falla en la probeta.

El ensayo de resistencia a la compresión se le realizó a 21 probetas, de las cuales 3 de ellas fueron de referencia, y las otras 17 correspondieron a las probetas que se les aplicó el ensayo al fuego.

3.4.5 Ensayo de porosidad. Para la realización de esta prueba se utilizó el porosímetro de campo RUSKA perteneciente a la Escuela de Ingeniería de Petróleos, ubicado en la sede de Guatiguará (ver figura 13a). Con este instrumento se pudo medir la porosidad efectiva para núcleos de concreto.

Figura 13. Porosímetro de campo Ruska



(a) Equipo

(b) Copas para núcleos.

Fuente: Los autores

El porosímetro de campo RUSKA es un equipo de alta presión y cuenta con un bloque colector al que se le adjunta un cilindro de medición y un montaje de pistón con el cual se mide el desplazamiento de volumen. Además este instrumento cuenta con un manómetro de mercurio que indica la presión del sistema. Este equipo también cuenta con un juego de tres copas para núcleos de concreto de diferentes tamaños (ver figura 13b). Estos núcleos fueron extraídos del centro de la cara de la probeta expuesta a fuego con dimensiones de 2x2x2 cm (ver figura 14).

Figura 14. Núcleo extraído de una probeta patrón



Fuente: Los autores

Este ensayo se le realizó a una de las probetas patrón con el fin de obtener un valor significativo de la porosidad antes de someterlas a fuego.

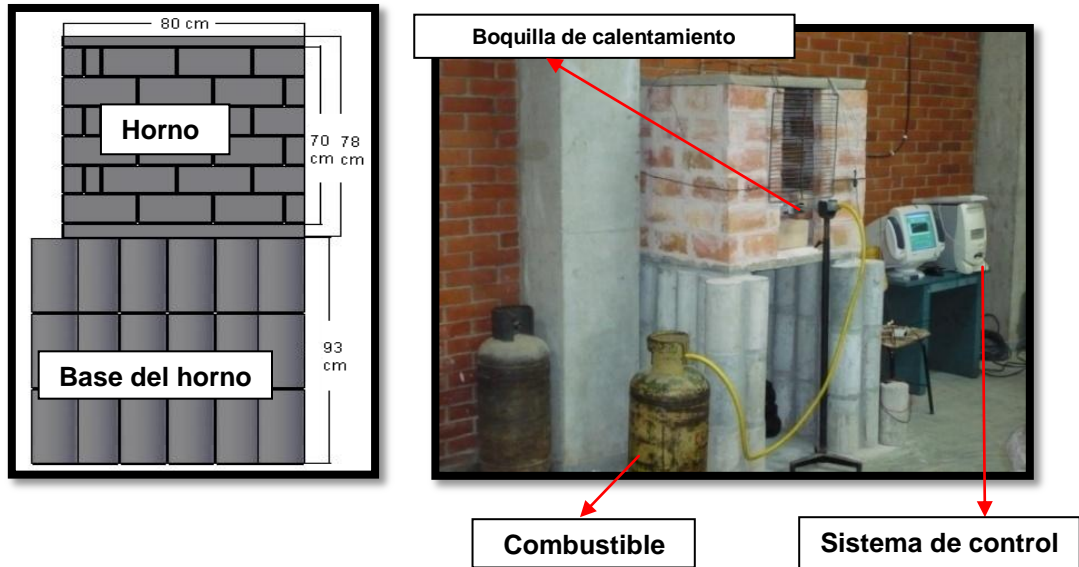
3.5 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO

Para la realización de esta etapa se tuvieron en cuenta las siguientes actividades: adecuación del horno, exposición a fuego y enfriamiento post-exposición.

3.5.1 Adecuación del horno. El horno se construyó con unas dimensiones externas de 80cm x 90cm x 70cm empleando ladrillos refractarios tipo “Tolete”. Para hacer la pega de los ladrillos se elaboró una masilla refractaria compuesta de arena sílice, ladrillo refractario molido (chamota) y caolín. Esta mezcla se hizo con un día de anticipación a la elaboración del horno para darle una mejor consistencia. El horno fue construido sobre una estructura constituida por cilindros de concreto y una placa de concreto reforzado que sirvió como base del horno (ver en figura 15a y 15b).

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 15d).

Figura 15. Horno utilizado para los ensayos a fuego



(a) Vista lateral del horno

(b) Horno utilizado



(c) Tarjeta de adquisición



(d) Boquilla de calentamiento

Fuente: Los autores

Para el control de la temperatura se le adecuó una termocupla tipo K con la que se midió y controló la temperatura de la llama que incidió sobre la cara expuesta de la probeta. Esta termocupla se conectó a una tarjeta de adquisición (ver figura15c), la cual enviaba los datos de las temperaturas al computador. Para el registro y toma de datos se utilizó un programa elaborado en Labview 8.5, el cual permitió ver los datos de la temperatura de la llama y la temperatura interna de la probeta. Este programa suministra la temperatura con respecto al tiempo mediante

una curva de calentamiento patrón, la cual mostró el calentamiento que se debía llevar en los ensayos de exposición a fuego, según la norma ISO 834 [60]. Es importante aclarar que la estandarización de la curva de calentamiento del horno para probetas expuestas a fuego fue llevada a cabo por el grupo de investigación INME a través de investigaciones anteriores y para la realización de este trabajo se realizaron algunos ajustes.

Durante el proceso de exposición a fuego el nivel de temperatura de la llama se reguló siguiendo la curva básica de calentamiento originada por el software disponible en el grupo de investigación INME.

3.5.2 Exposición a fuego. En esta etapa se realizó la exposición de las probetas a fuego siguiendo la norma ISO 834 [60]. Para comenzar se ubicó la probeta a exponer dentro del horno, luego se conectaron todas las termocuplas en la tarjeta de adquisición y por medio del programa mencionado se verificaba si las mediciones de temperatura antes de comenzar la prueba correspondían a las condiciones ambientales. Después de comprobar las temperaturas iniciales, se dio inicio al calentamiento con una llama considerablemente baja y simultáneamente se puso en marcha el programa con el fin de tener un control de la temperatura con relación al tiempo, buscando seguir el calentamiento indicado por la curva patrón.

La temperatura fue controlada mediante la válvula de salida del cilindro del gas, buscando siempre mantener una llama con temperatura acorde a la curva patrón. Una vez conseguida la temperatura de ensayo esta se mantuvo constante durante una hora para los respectivos ensayos de 200, 400, 600 y 800 grados centígrados.

Para las temperaturas de 1000°C y 1200°C el tiempo de exposición constante fue más corto, ya que para alcanzar estas temperaturas siguiendo la curva, el tiempo

transcurrido era muy extenso, por tal motivo una vez alcanzada la temperatura deseada se mantuvo constante en un lapso de 15 minutos. Es importante anotar que para el ensayo planteado a la temperatura de 1200°C solo se alcanzo una temperatura de 1160°C bajo las condiciones de operación indicada.

3.5.3 Enfriamiento post-exposición. Una vez terminado el ensayo, las probetas expuestas a temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C y 800°C se dejaron enfriar dentro del horno durante aproximadamente 30 minutos, luego se sacaron del horno y se dejaron a temperatura ambiente.

Para las probetas expuestas a temperaturas de 1000°C y 1200°C el enfriamiento dentro del horno fue de aproximadamente 120 minutos, con el fin de evitar cambios bruscos de temperatura que produjeran daños mayores en la misma. Por último se sacaron del horno y de igual forma que las probetas anteriores se dejaron a temperatura ambiente.

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

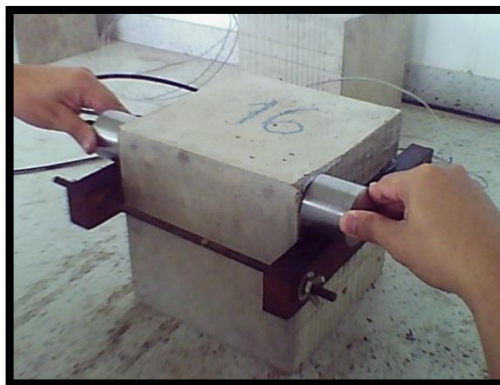
Terminada la exposición a fuego, se les realizó a las probetas los mismos ensayos descritos en el numeral 3.4, esto se hizo con el fin de tener parámetros de comparación para después ser discutidos en los resultados y análisis de resultados. Las pruebas ejecutadas fueron: peso de las probetas, inspección visual, ensayo de ultrasonido, ensayo de resistencia a la compresión y ensayo de porosidad.

3.6.1 Peso de las probetas. Se pesaron todas las probetas con el fin de conocer la pérdida de peso que tuvieron las probetas durante el ensayo a fuego.

3.6.2 Inspección visual. En esta etapa se observaron los cambios superficiales ocurridos después de someter las probetas a fuego, tales como: presencia de grietas o descascaramiento en las mismas. En este ensayo se observó el deterioro que hubo en cada una de las muestras a medida que se sometieron a las diferentes temperaturas.

3.6.3 Ensayo de Ultrasonido. En esta etapa se hizo la prueba de ultrasonido a 17 probetas sometidas a fuego, utilizando una guía dibujada sobre la superficie de la muestra de 1x5 cm para ayudar a la ubicación de los transductores, 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 15 puntos mencionados en el numeral 3.4.3 y por cada punto se realizaron dos mediciones (ver figura 16). Este ensayo se realizó 24 horas después de la prueba a fuego para todas las probetas.

Figura16. Fotografía de toma de mediciones de VPU



Fuente: Los autores

3.6.4 Ensayo de resistencia a la compresión. En este ensayo se siguió el mismo procedimiento descrito en el numeral 3.4.4, esto con el fin de observar las variaciones de resistencia a la compresión en las probetas teniendo en cuenta la temperatura a la que fueron sometidas. Este ensayo se hizo a cada probeta 24 horas después de haber sido expuestas a fuego.

3.6.5 Ensayo de porosidad. Este ensayo se efectuó a 3 de las 17 probetas sometidas a fuego (una de cada temperatura: 400° C, 800° C y 1200° C) con el fin de observar los cambios en la porosidad de las probetas al someterlas a diferentes temperaturas. Este ensayo se hizo con el fin de tener un dato adicional para mostrar el deterioro que sufre el concreto al ser expuesto a fuego.

3.7 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Con base en los resultados obtenidos y su análisis respectivo se preparó el informe final de la investigación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión y porosidad en las probetas de concreto sin refuerzo, y sus respectivos análisis.

Adicionalmente se muestran las relaciones obtenidas entre la resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, la porosidad y la resistencia a la compresión, y finalmente la porosidad y la velocidad de pulso ultrasónico. Cada gráfica se hizo diferentes temperaturas de exposición.

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

En esta etapa se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las probetas antes de ser expuestas a fuego mediante los siguientes ensayos: peso de las probetas, inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión y porosidad.

4.1.1 Peso de las probetas. En la tabla 13 se presentan los pesos promedios obtenidos en las probetas antes de ser expuestas a fuego de acuerdo a la distribución que se mostró en la tabla 7.

Tabla 13. Peso de las probetas antes de someterlas a fuego

Temperatura a la cual van a ser sometidas (°C)	Promedio de Pesos antes (Kg)
200	18,62
400	18,69
600	18,71
800	18,74
1000	18,66
1200	18,68

Fuente: Los autores

Como se puede observar en la tabla 13 los pesos obtenidos no varían considerablemente antes de someterlas a fuego, por lo que se puede decir que las probetas registraron pesos similares.

4.1.2 Inspección visual. En la figura 17 se muestra la fotografía de una probeta antes de ser expuesta a fuego en donde se puede apreciar algunas características físicas de la superficie.

Figura 17. Fotografía de una probeta antes de ser expuesta a fuego

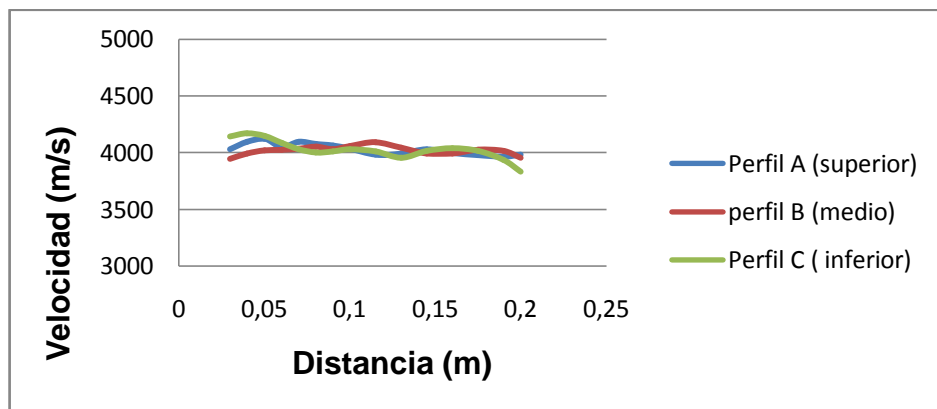


Fuente: Los autores

Al observar una a una las probetas antes de ser expuestas a fuego se encontró que todas presentaron un estado superficial bueno en lo que respecta al cuerpo, con superficies poco rugosas y de forma muy uniformes, poca porosidad superficial y con ausencia de descascaramientos y fisuras visibles.

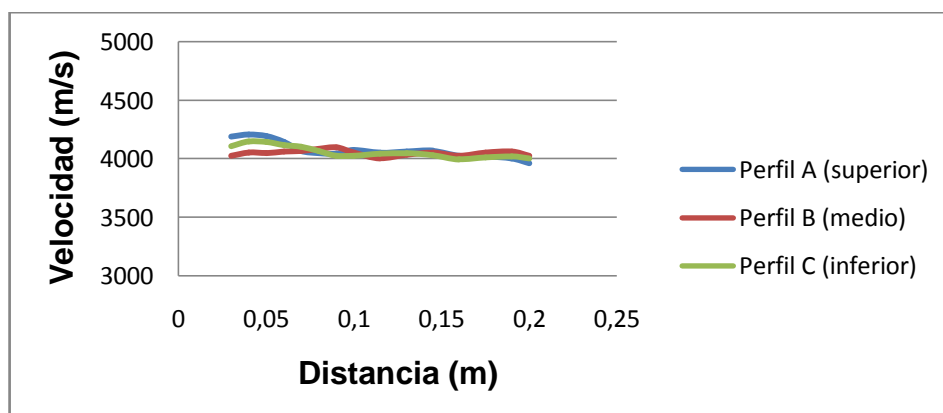
4.1.3 Ensayo de ultrasonido Las graficas 1 a la 6 muestran los diferentes perfiles de velocidad de pulso ultrasónico antes de ser sometidas a sus respectivas temperaturas de exposición. Un ejemplo de los datos tomados de VPU a las probetas antes de ser sometidas a fuego se presenta en el ANEXO B.

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



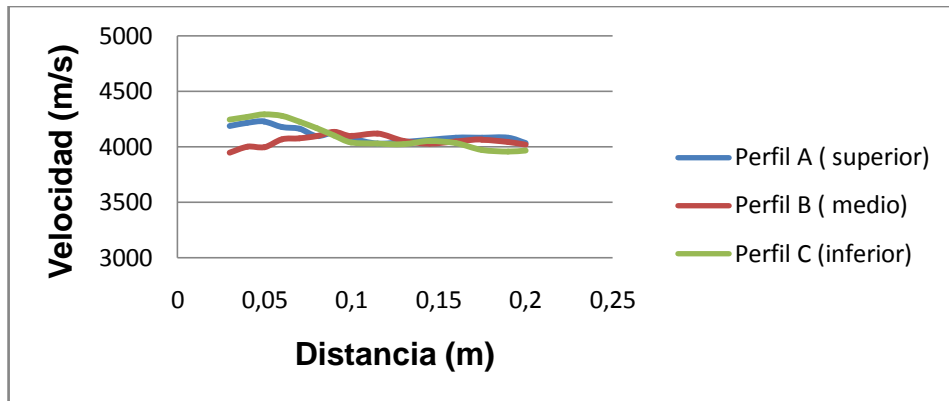
Fuente: Los autores

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



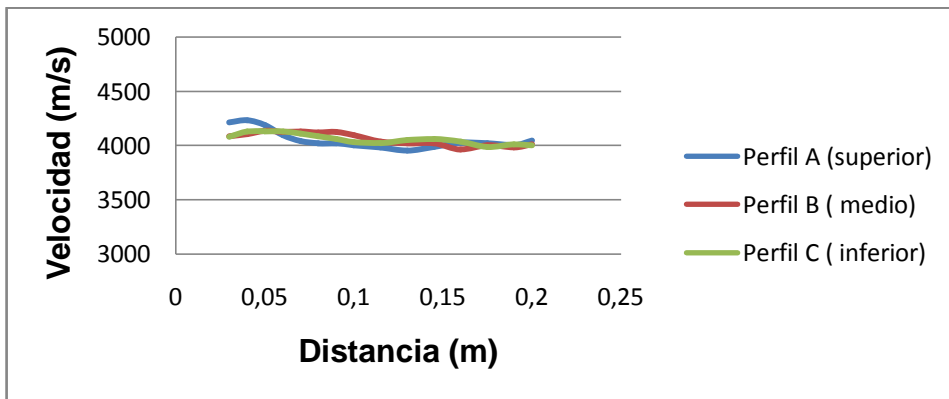
Fuente: Los autores

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



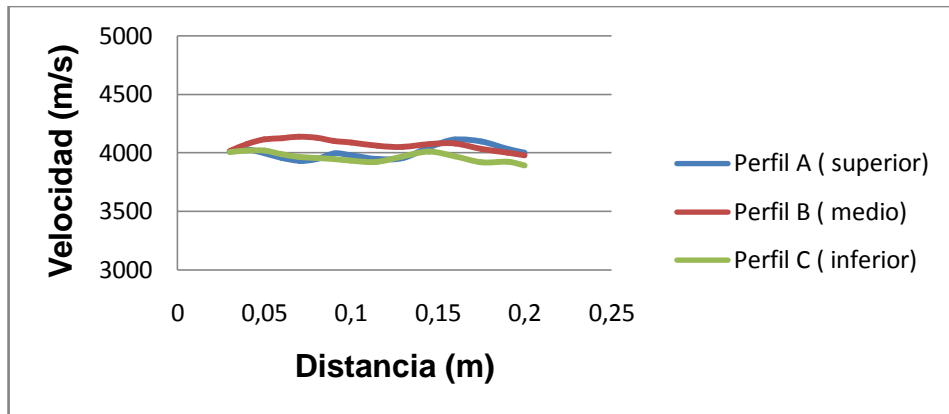
Fuente: Los autores

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



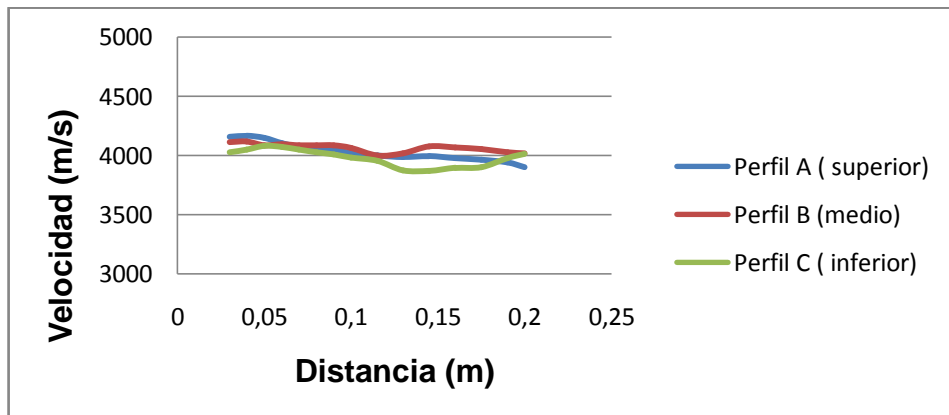
Fuente: Los autores

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

Los perfiles de velocidad mostrados en las graficas 1 hasta la 6 muestran un comportamiento muy parecido en los datos obtenidos, indicando una homogeneidad en la probeta con respecto a este parámetro.

4.1.4 Ensayo de resistencia a la compresión. En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión para probetas antes de ser expuestas a fuego y su respectivo promedio.

Tabla 14. Resultados de resistencia a la compresión para probetas antes de ser expuestas a fuego

Probeta patrón (N°)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia promedio (Mpa)
1	17,23	17,14
2	16,18	
3	18,01	

Fuente: Los autores

De la observación de la tabla se puede decir que el concreto obtenido se puede clasificar como un concreto de resistencia moderada de acuerdo con lo establecido en la literatura (ver tabla 5).

4.1.5 Ensayo de porosidad. La porosidad obtenida para el concreto antes de ser expuesta a fuego fue de **8.94%** lo que indicó una porosidad relativamente baja. En el numeral 4.3.5 se presentará una comparación con los resultados obtenidos después de la exposición a fuego.

4.2 EXPOSICIÓN DE LAS PROBETAS A FUEGO

El proceso de calentamiento realizado a las probetas de concreto se hizo de acuerdo a la curva característica establecida en la norma ISO 834 [60]. A continuación se muestran las curvas obtenidas en el calentamiento de algunas de las probetas (ver gráficas 7 a la 12). Para la lectura adecuada de las gráficas se presenta a continuación la tabla de identificación de las termocuplas utilizadas.

Tabla 15. Identificación de las termocuplas empleadas en las graficas de las curvas de calentamiento

Termocupla	Descripción
1	Termocupla que registró la temperatura de la llama a lo largo de cada prueba.
2	Termocupla que registró la temperatura interna de la probeta a 4 cm de la cara de exposición (ver figura 6b)
3	Termocupla que registró la temperatura interna de la probeta a 10 cm de la cara de exposición (ver figura 6b).

Fuente: Los autores

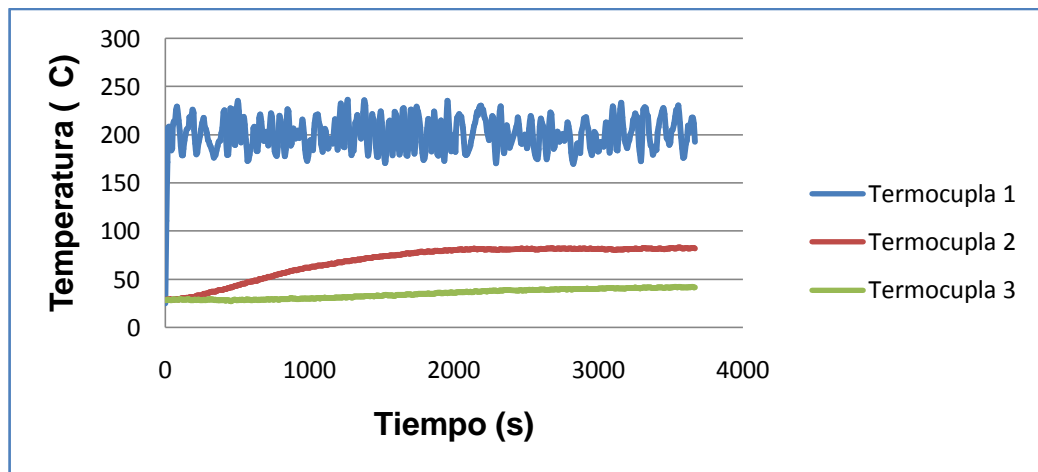
• **Curvas de calentamiento de las probetas obtenidas en el ensayo a fuego.**

Los gráficos del 7 al 12 muestran la curva de calentamiento que se le realizó a cada una de las probetas expuestas a sus respectivas temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C y 1200°C. El calentamiento de las probetas a lo largo del ensayo se efectuó buscando un comportamiento lo más acorde posible a la curva de calibración ya establecida. Posteriormente al llegar a la temperatura deseada esta se mantuvo relativamente constante, ocurriendo fluctuaciones hasta de $\pm 25^{\circ}\text{C}$ con respecto a la temperatura de estudio, como se puede observar en algunas de las gráficas.

En las gráficas 7, 8 y 9 se observa el calentamiento efectuado a las probetas, mostrando fluctuaciones notables en la gráfica 1 (200°C), esta fluctuación se da en la temperatura de la termocupla 1 a lo largo del ensayo debido a la difícil manipulación que se tuvo de la válvula de salida del combustible con respecto a las demás graficas. Las curvas de las temperaturas internas registran un aumento progresivo estable mostrando una temperatura más alta en la termocupla 2.

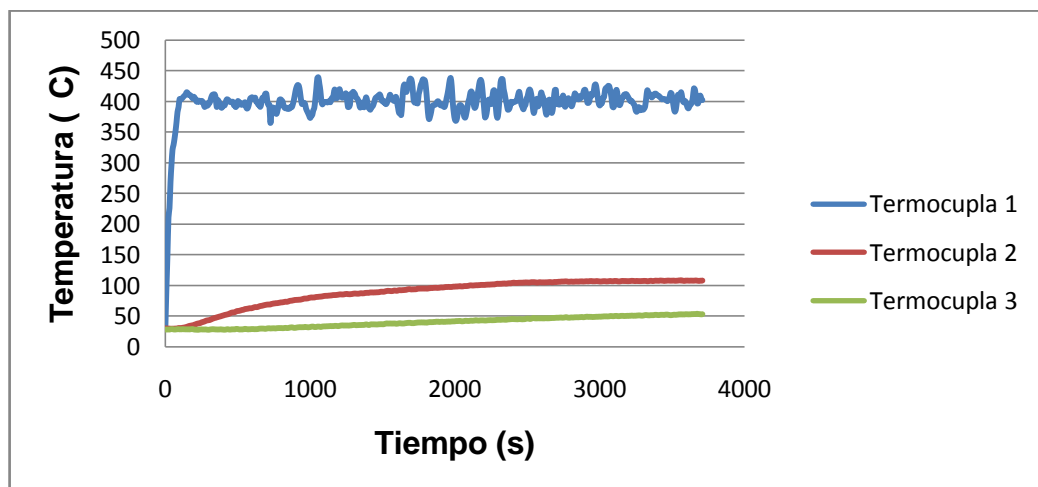
El comportamiento de las temperaturas en las gráficas 10, 11 y 12 es similar y se puede apreciar con mejor detalle la curva de calentamiento obtenida a lo largo del ensayo al fuego. Las temperaturas internas muestran un crecimiento con tendencia lineal de la temperatura a medida que aumenta el tiempo.

Gráfica 7. Temperatura vs tiempo de exposición a 200°C (Probeta 8)



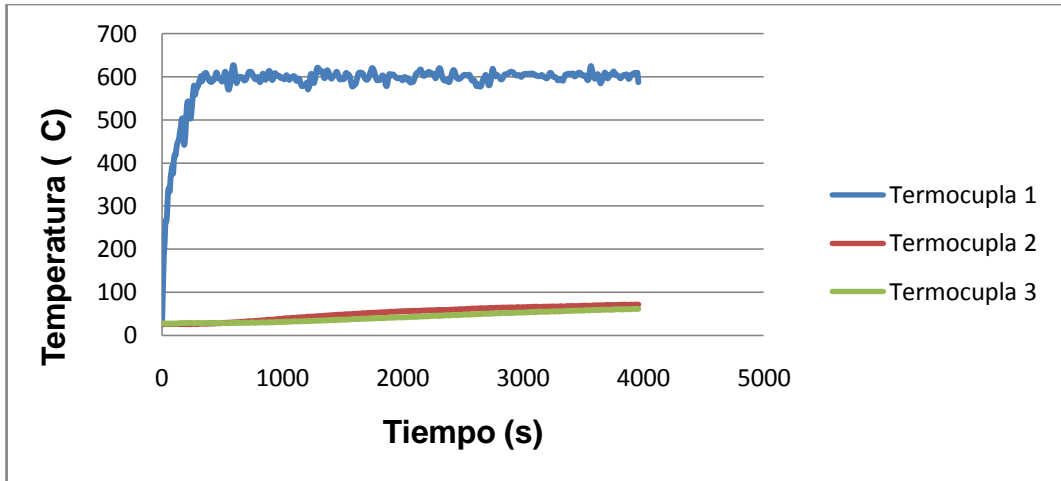
Fuente: Los autores

Gráfica 8. Temperatura vs tiempo de exposición a 400°C (Probeta 10)



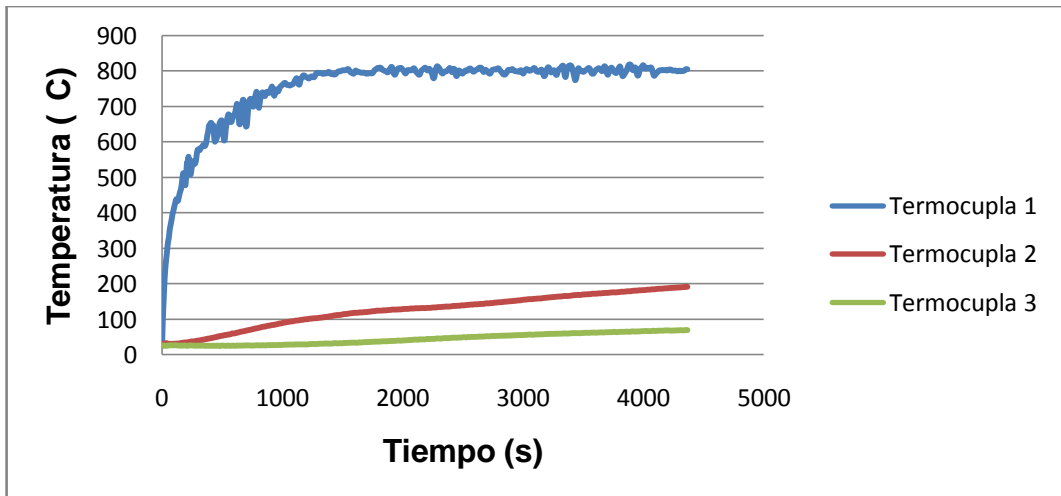
Fuente: Los autores

Gráfica 9. Temperatura vs tiempo de exposición a 600°C (Probeta 15)



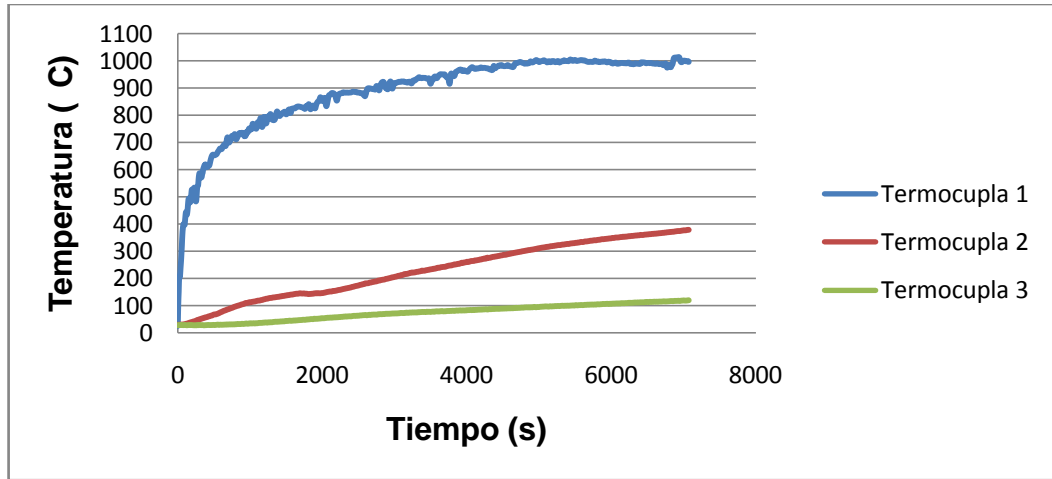
Fuente: Los autores

Gráfica 10. Temperatura vs tiempo de exposición a 800°C (Probeta 16)



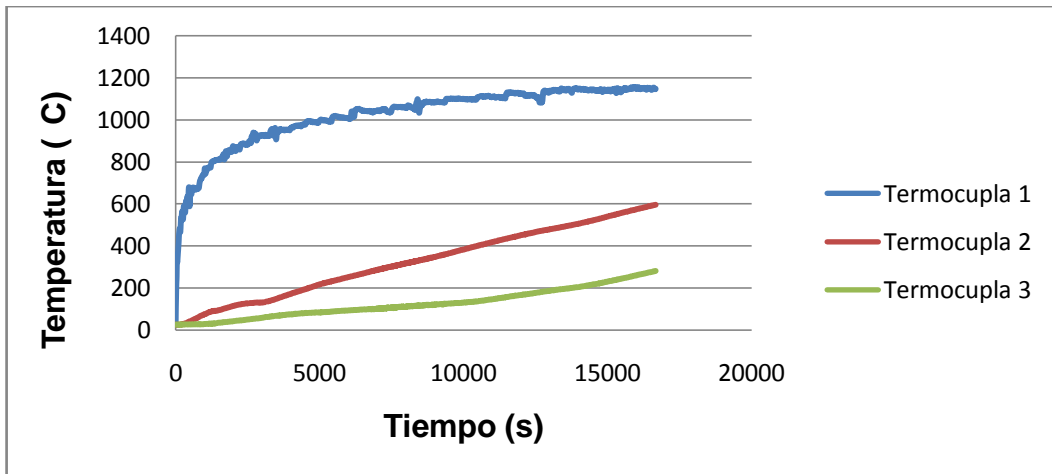
Fuente: Los autores

Gráfica 11. Temperatura vs tiempo de exposición a 1000°C (Probeta 19)



Fuente: Los autores

Gráfica 12. Temperatura vs tiempo de exposición a 1200°C (Probeta 23)



Fuente: Los autores

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

En esta etapa se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las muestras después de ser expuestas a fuego, y se hará una comparación con los datos obtenidos en las pruebas antes de ser expuestas a fuego mediante ensayos de pérdida de peso, inspección visual, velocidad de pulso ultrasónico, resistencia a la compresión y porosidad.

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

Tabla 16. Pérdida de peso de las probetas

Temperatura (°C)	Promedio de Pesos antes (Kg)	Promedio de Pesos después (Kg)
200	18,62	18,44
400	18,69	18,46
600	18,71	18,44
800	18,74	18,29
1000	18,66	17,87
1200	18,68	16,75

Fuente: Los autores

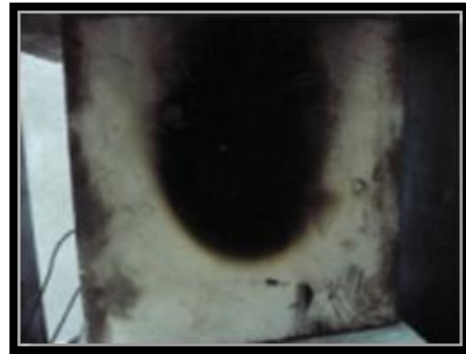
Como era de esperarse, la acción del fuego produjo una disminución en el peso de las probetas, causada principalmente por la pérdida de humedad, aparición de grietas y aumento de la porosidad. En la tabla 13 se aprecia que a medida que aumenta la temperatura de exposición, disminuye notoriamente el peso de las probetas y por ende ocurre un aumento en la diferencia entre los pesos final e inicial.

4.3.2 Inspección visual. Los resultados obtenidos mediante la inspección visual se pueden ver en la figura 18.

Figura 18. Fotografías de las superficies de las probetas expuestas a fuego



(a) Probeta expuesta a 200°C



(b) Probeta expuesta a 400°C



(c) Probeta expuesta a 600°C



(d) Probeta expuesta a 800°C



(e) Probeta expuesta a 1000°C



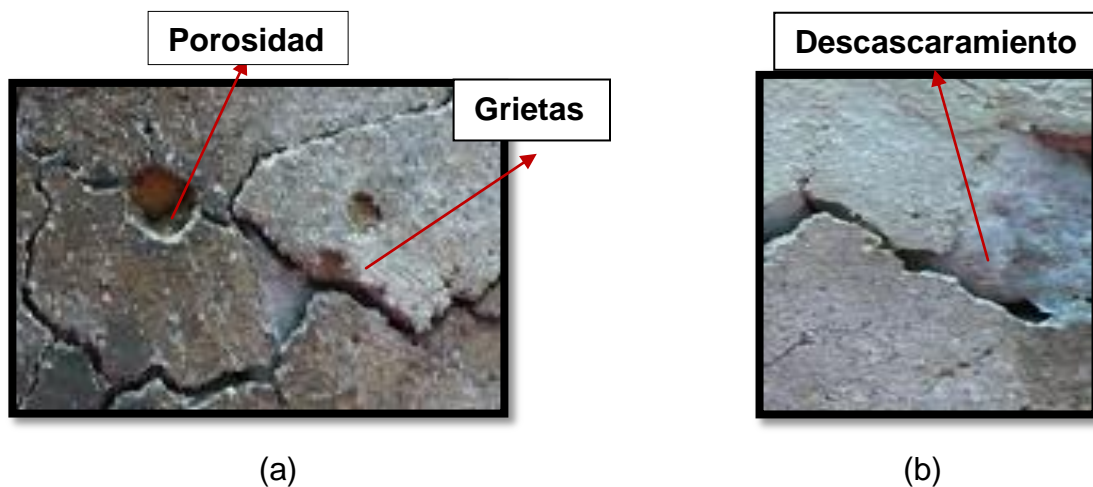
(f) Probeta expuesta a 1200°C

Fuente: Los autores

Las probetas expuestas a 200°C, 400°C y 600°C mostraron una marca oscura producida por la combustión de la llama en la superficie del concreto, debido a que para alcanzar estas temperaturas se requirió emplear una llama amarilla (oxidante), caracterizada por ser una llama ahumante y con un bajo potencial calorífico, causado por la presencia excesiva de combustible frente a poca cantidad de oxígeno, generando una combustión incompleta en la superficie de la probeta (ver figuras 18a, 18b y 18c). En estas probetas se presentaron pequeñas fisuras poco visibles a simple vista, que probablemente fueron causadas por la deshidratación que presentó el concreto y por la descomposición del hidróxido de calcio para la probeta expuesta a 600°C. El tamaño de las probetas no tuvo cambios considerables, ni tampoco hubo cambios en la porosidad superficial que pudieran alterar la estructura de la probeta.

Las probetas expuestas a 800°C, 1000°C y 1200°C presentaron una apariencia de mayor deterioro con respecto a las probetas anteriores (ver figuras 18d, 18e y 18f). A partir de la temperatura de 800°C los cambios superficiales fueron más evidentes debido a que a estas temperaturas se presentan cambios irreversibles que producen deterioro del material presentando un aumento en la porosidad, aparición de grietas pronunciadas (ver figura 19a) y descascaramiento (ver figura 19b).

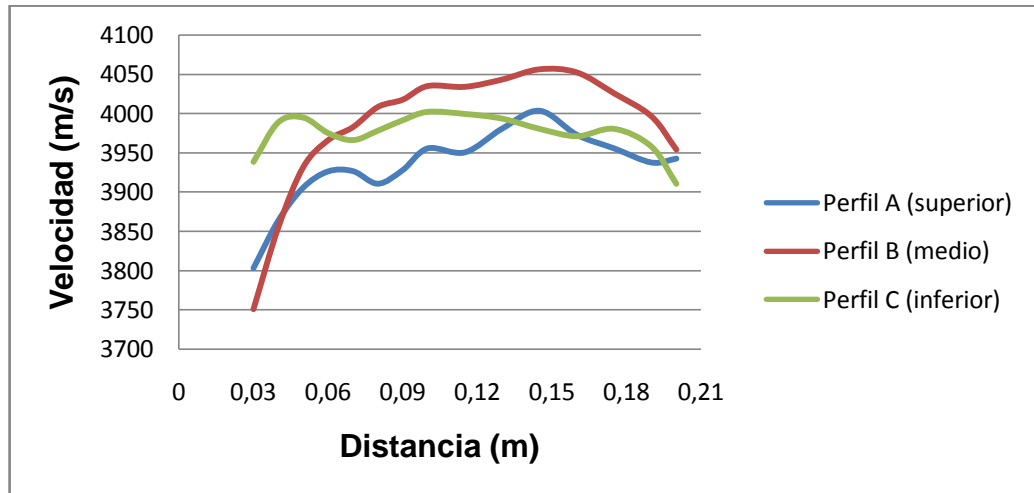
Figura 19. Defectos visibles en la probeta expuesta a 1200°C.



Fuente. Los autores

4.3.3 Ensayo de ultrasonido. A continuación se muestran los diferentes perfiles de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos a diferentes temperaturas de exposición y finalmente se muestra una relación entre estos perfiles:

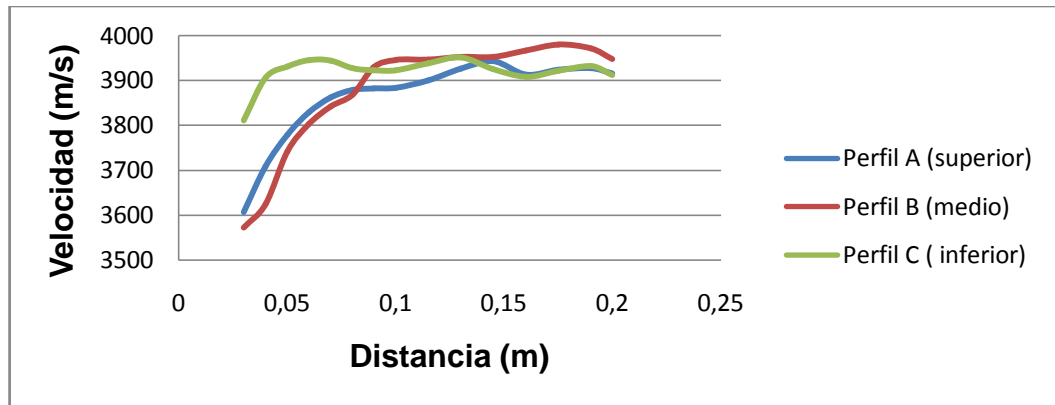
Gráfica 13. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 200 °C



Fuente: Los autores

La gráfica 13 muestra los diferentes valores de velocidad de pulso ultrasónico promedio alcanzado por las probetas expuestas a 200°C en los diferentes perfiles analizados. Se aprecian valores máximos de velocidad para el perfil B, que corresponde al perfil medio de la probeta, pero también se aprecian los valores más bajos para este perfil, lo que indican la presencia de mayores variaciones de las velocidades y por consiguiente los daños más notables en la probeta se dan a medida que el palpador de medición se acercaba a la cara de exposición siguiendo el perfil medio.

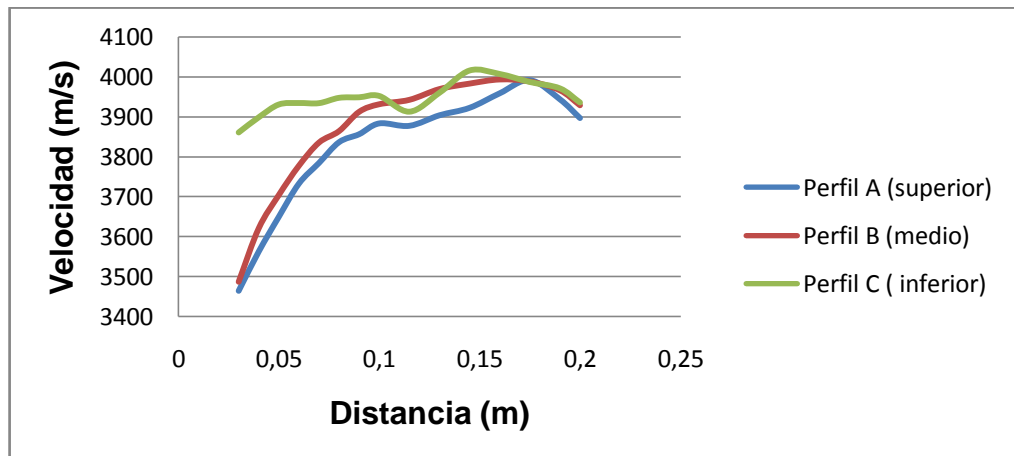
Gráfica 14. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 400°C



Fuente: Los autores

En la gráfica 14 se puede ver que a medida que se hacen las mediciones de velocidad en los diferentes perfiles de la probeta expuestas a fuego, los daños más evidentes lo registran los perfiles A y B, mostrando el perfil B los menores valores de velocidad lo que indica que fue el perfil de mayor contacto con la llama de exposición.

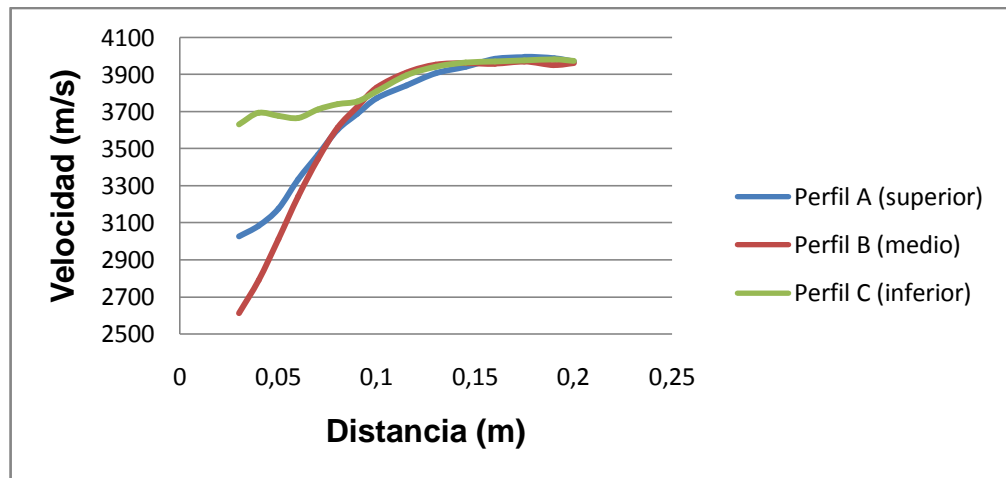
Gráfica 15. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 600°C



Fuente: Los autores

En la gráfica 15 se puede observar que el perfil C no muestra variaciones significativas con respecto a las anteriores graficas aunque según el gráfico 9 el perfil C registra el mayor valor de velocidad de pulso, las velocidades de pulso menores las presenta el perfil A, lo cual quiere decir que este perfil fue el más afectado por la temperatura.

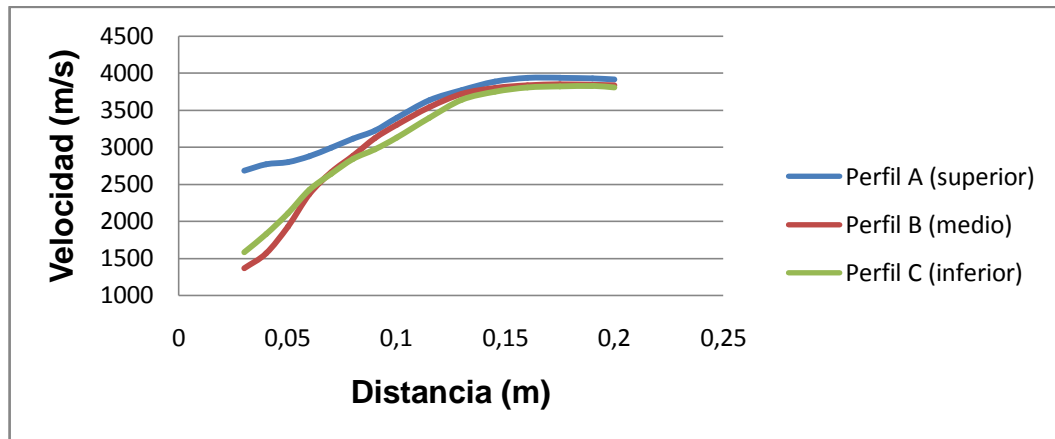
Gráfica 16. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 800 °C



Fuente: Los autores

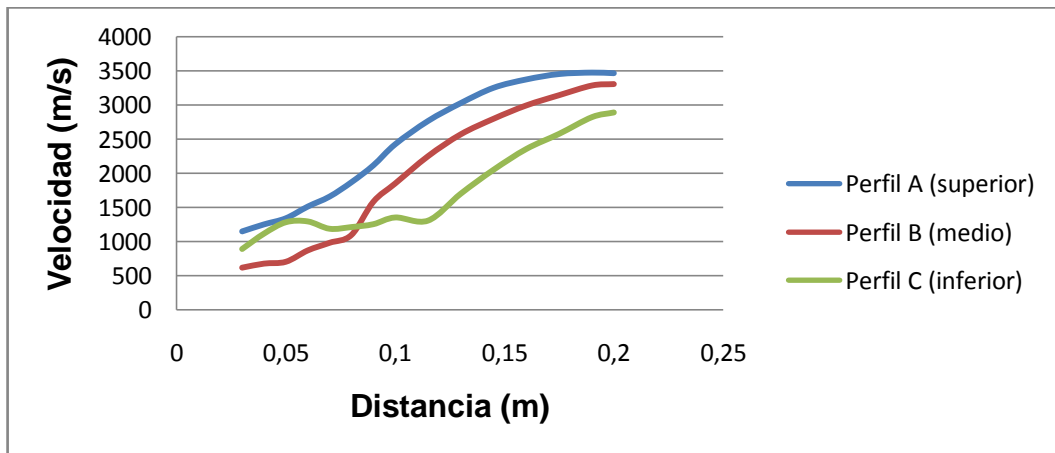
En la gráfica 16 se puede ver que el perfil B empieza a registrar velocidades por debajo de los 3000 m/s cerca de la cara de exposición y a medida que se aleja de la misma muestra valores cerca los 4000 m/s, esto nos indica que a medida que se va aumentando la temperatura los perfiles de velocidades de pulso van disminuyendo, indicando una mayor variación en la velocidad. La velocidad de pulso más baja la muestra el perfil B indicando nuevamente que fue el perfil más afectado por la temperatura.

Gráfica 17. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1000 °C



Fuente: Los autores

Gráfica 18. Perfiles de velocidad de probetas expuestas a 1200 °C

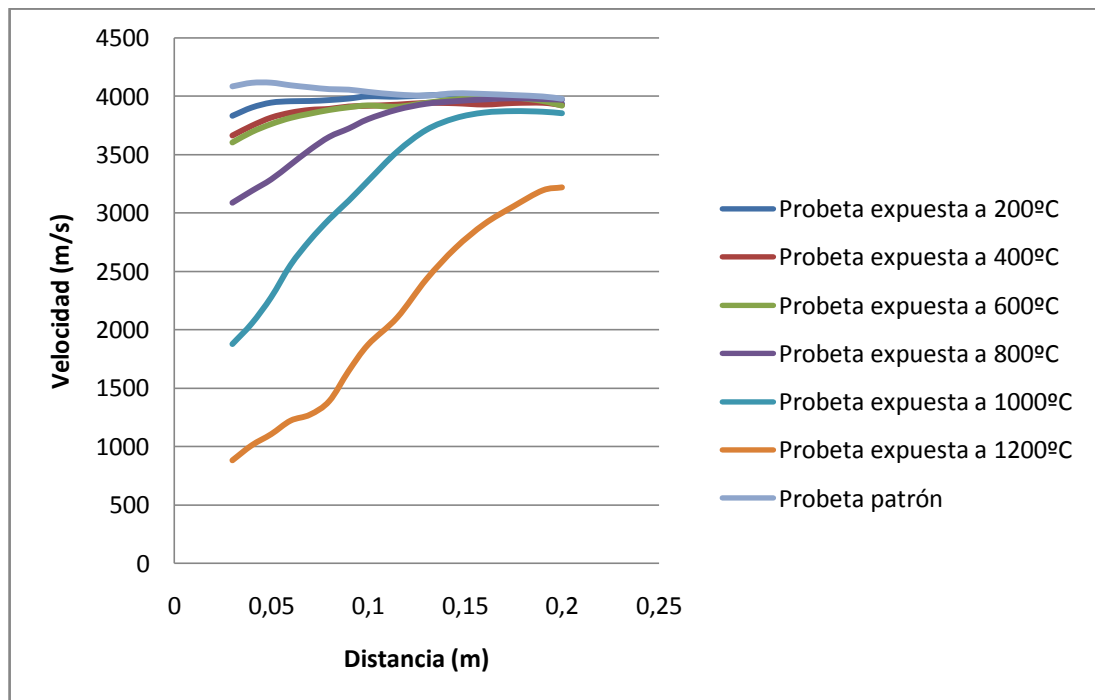


Fuente: Los autores

En las gráficas 17 y 18 se puede apreciar el cambio que hubo en la velocidad de pulso en el perfil C con respecto a las anteriores gráficas, disminuyendo considerablemente. Por consiguiente la temperatura afectó con mayor intensidad los perfiles B y C, sin embargo sigue la tendencia del perfil B a presentar menores velocidades de pulso. También se puede apreciar la disminución que hay en la

velocidad de pulso a lo largo de los perfiles debido a la penetración del calor en el interior de la probeta.

Gráfica 19. Relación de velocidades a diferentes temperaturas de exposición



Fuente: Los autores

La gráfica 19 muestra la relación que hay entre las velocidades de pulso y la distancia de medición con respecto a la cara de exposición a diferentes temperaturas y la probeta patrón. Es notable la disminución de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta la temperatura de exposición para cada probeta. Además se puede apreciar que la velocidad de pulso es menor cuando las mediciones se hacen más cerca de la cara de exposición, debido a que los cambios más notorios ocurren en esta zona. En la gráfica también se puede apreciar que la probeta expuesta a 1200°C presentó disminuciones considerables en la VPU a lo largo de toda la probeta en comparación con las demás, indicando la presencia de daños en todo el cuerpo de la probeta.

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

En la tabla 17 se muestran los resultados promedios obtenidos de la velocidad de pulso ultrasónico para cada temperatura de exposición de las probetas. Se puede apreciar que después de someter las probetas a 1200°C se obtuvo una velocidad de pulso de 2002 m/s siendo esta el menor valor registrado en los ensayos. Un ejemplo del procedimiento de la toma de datos de la VPU se puede ver en el ANEXO C.

Tabla 17. Resultados de la Velocidad de pulso ultrasónico a diferentes temperaturas de exposición

Temperatura de exposición (°C)	Velocidad Promedio (m/s)
Probeta patrón	4013
200	3962
400	3883
600	3875
800	3692
1000	3157
1200	2002

Fuente: Los autores

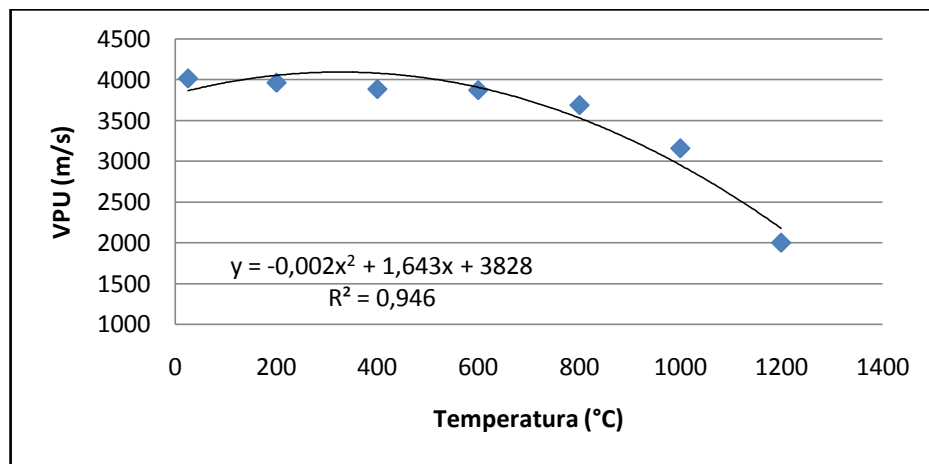
En la gráfica 20 se puede visualizar un comportamiento decreciente de la velocidad de pulso ultrasónico a medida que aumenta la temperatura de exposición. La tendencia que más se ajusta a este comportamiento se puede indicar mediante la expresión $V = -0,0025T^2 + 1,6438T + 3828$ con un índice de correlación $R^2 = 0,9469$.

Analizando la gráfica se puede ver que entre el rango de temperatura de 25°C a 800°C el cambio de velocidades no es tan notorio con respecto al comportamiento mostrado 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 analizadas.

De acuerdo a los parámetros establecidos en la tabla 6, teniendo en cuenta los valores de velocidad de pulso ultrasónico, el concreto se considera bueno hasta el obtenido en la exposición a 800°C, por otro lado, la probeta sometida a 1000°C mostró un comportamiento que lo clasifica como cuestionable. Finalmente al analizar los valores de la velocidad de pulso ultrasónico en la probeta expuesta a 1200°C, el concreto mostró valores de velocidad inferiores a 2135 m/s, motivo por el cual se clasifica como un concreto de calidad muy pobre, que lo inhabilita para posteriores usos según este parámetro.

Gráfica 20. 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 18 se presentan los resultados promedios de la resistencia a la compresión obtenidos para las diferentes temperaturas de exposición. Los resultados en este ensayo se expresan en MPa y fueron calculados de acuerdo a la ecuación presentada a continuación (ver ANEXO D).

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (6)$$

En donde, f_c es la resistencia a la compresión en el concreto, P es la fuerza aplicada y A es el área de la sección transversal de la probeta.

El valor más bajo de resistencia a la compresión lo registró la probeta que fue sometida a 1200°C y el más alto lo obtuvo la probeta de referencia (ver tabla 18). Estos resultados fueron acordes al comportamiento esperado de acuerdo a la bibliografía.

Tabla 18. Resultados de resistencia a la compresión a diferentes temperaturas de exposición

Temperatura de exposición (°C)	Resistencia a la compresion Promedio (Mpa)
Probeta patrón	17,14
200	16,73
400	15,42
600	14,93
800	13,9
1000	13,14
1200	8,63

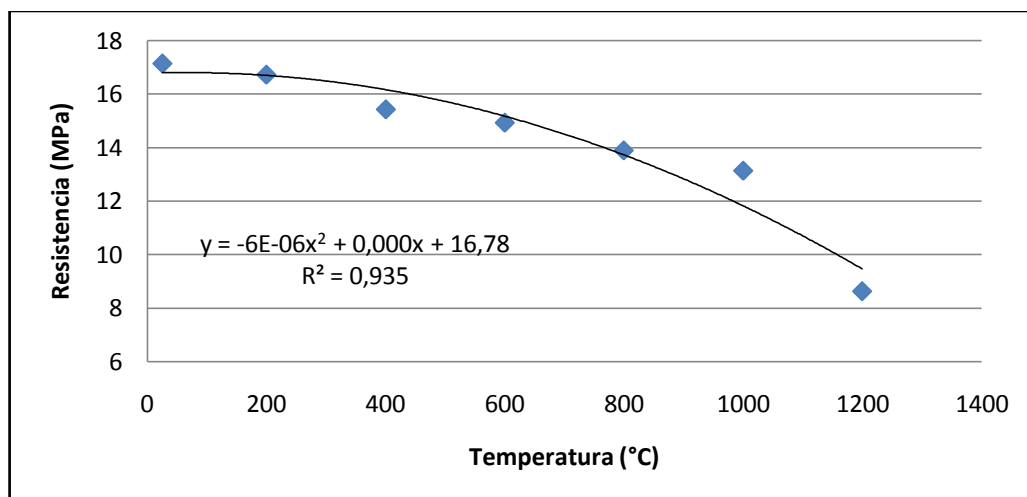
Fuente: Los autores

En la gráfica 21 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 $f_c = - 6e^{-6} T^2 + 0,0007T + 16,786$ con un índice de correlación $R^2 = 0,9352$.

Observando la gráfica se puede decir 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.

De acuerdo a los parámetros establecidos en la tabla 5, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos de resistencia a la compresión, se obtuvo un concreto de resistencia moderada para las probetas sometidas hasta los 600°C, a partir de los 800°C hasta los 1200°C el concreto que se obtuvo se considera de baja resistencia.

Gráfica 21. Relación de la resistencia a la compresión con respecto a la temperatura de exposición



Fuente: Los autores

4.3.5 Ensayo de porosidad. En la tabla 19 se registran los resultados obtenidos de porosidad para algunas temperaturas de exposición. Según estos valores se puede apreciar que el mayor porcentaje se presentó en las probetas expuestas a 1200°C. Los cálculos de estos resultados se pueden ver en el ANEXO E.

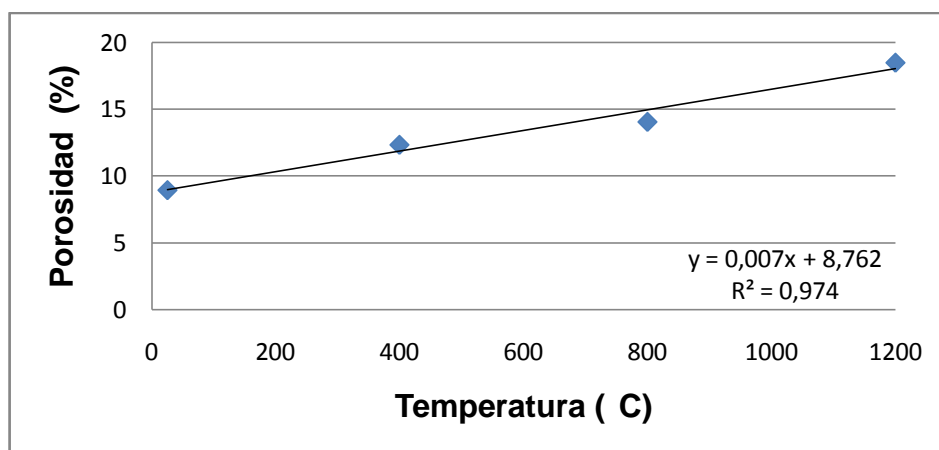
Tabla 19. Resultados de porosidad a diferentes temperaturas de exposición

Temperatura de exposición (°C)	Porosidad (%)
Probeta patrón	8,94
400	12,33
800	14,06
1200	18,49

Fuente: Los autores

La gráfica 22 muestra los valores de porosidad de las probetas con relación a las temperaturas de exposición en las pruebas a fuego hechas a 400°C, 800°C y 1200°C. La curva tiene un comportamiento creciente en la porosidad a medida que aumenta la temperatura de exposición, cuya tendencia se ajusta de acuerdo a la expresión $\Phi = 0,007T + 8,762$ con un índice de correlación $R^2 = 0,974$.

Gráfica 22. Relación de la porosidad con respecto a la temperatura de exposición



Fuente: Los autores

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

En la tabla 20 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, seguidamente se muestra su respectiva gráfica relacionando estos dos parámetros.

Tabla 20. 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)
Probeta patrón	4013	17,14
200	3962	16,73
400	3883	15,42
600	3875	14,93
800	3692	13,9
1000	3157	13,14
1200	2002	8,63

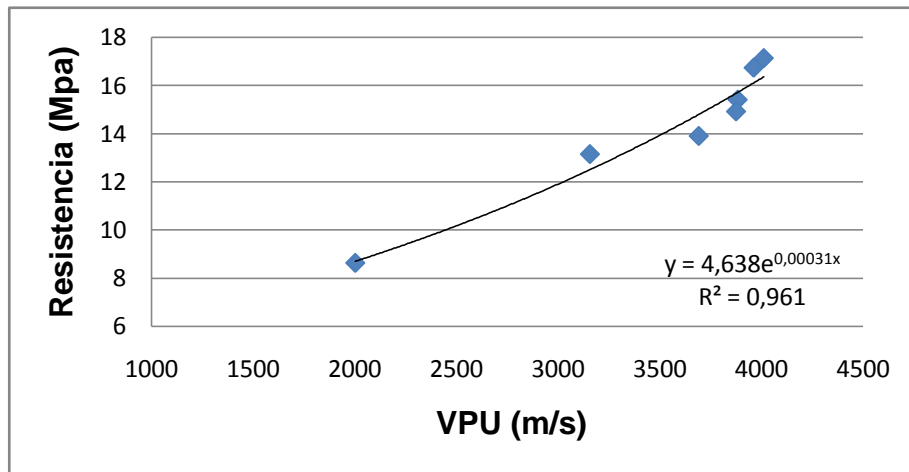
Fuente: Los autores

También se puede observar que a medida que se aumenta la temperatura los resultados de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistencia a la compresión disminuyen notablemente.

En la gráfica 23 se muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión con relación a la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), apreciándose una relación de proporcionalidad entre estos dos parámetros, esto nos indica que a medida que decrece la resistencia a la compresión decrece la velocidad de pulso ultrasónico.

La relación de la resistencia a la compresión vs la velocidad de pulso ultrasónico se puede representar mediante la ecuación $f_c = 4,638e^{0,00031V}$ con un índice de correlación de $R^2 = 0,961$.

Gráfica 23. Relación entre la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico



Fuente: Los autores

4.5 RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO Y LA POROSIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS DE EXPOSICIÓN

En la tabla 21 se presentan los datos obtenidos de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y porosidad a las diferentes temperaturas de exposición, posteriormente se muestra la grafica con la relación entre estos dos parámetros.

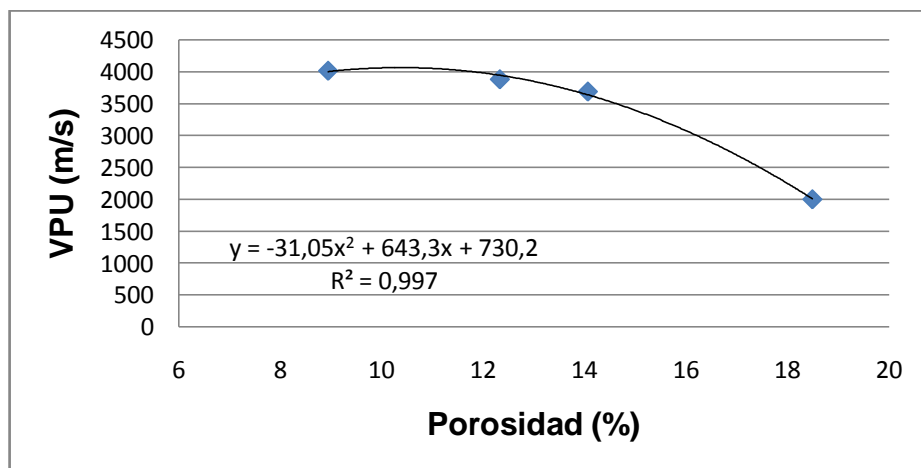
Tabla 21. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico y la porosidad

Temperatura (°C)	Porosidad (%)	Velocidad Promedio (m/s)
Probeta patrón	8,94	4013
400	12,33	3883
800	14,06	3692
1200	18,49	2002

Fuente: Los autores

En la grafica 24 se puede apreciar el comportamiento de la curva que relaciona la velocidad de pulso ultrasónico con la porosidad de las probetas después del ensayo al fuego. Según la curva se puede interpretar, que a medida que aumenta la porosidad, disminuye la velocidad de pulso ultrasónico. La expresión que más se acomoda a este comportamiento es $V = -31,05 \Phi^2 + 643,35 \Phi + 730,25$, mostrando un índice de correlación de $R^2 = 0,9975$.

Gráfica 24. Relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la porosidad



Fuente: Los autores

4.6 RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS DE EXPOSICIÓN

En la tabla 22 se muestra los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión con relación a la porosidad, los cuales fueron tomados a las diferentes temperaturas de exposición mostradas. Adicional a esto se presenta la curva que describe el comportamiento de la resistencia a la compresión con relación a la porosidad.

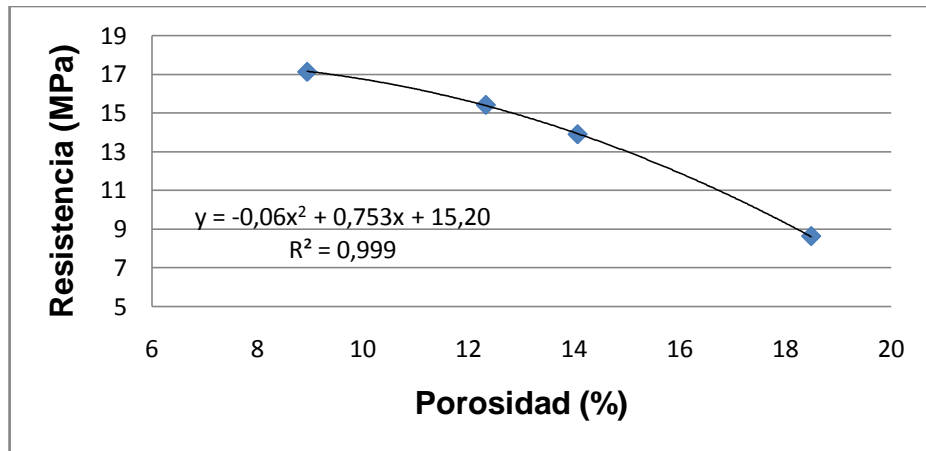
Tabla 22. Relación de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión y la porosidad

Temperatura (°C)	Porosidad (%)	Promedios de la Resistencia a la Compresión (Mpa)
Probeta patrón	8,94	17,14
400	12,33	15,42
800	14,06	13,9
1200	18,49	8,63

Fuente: Los autores

La gráfica 25 muestra la relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad. Según la curva, a medida que aumenta la porosidad, disminuye la velocidad de pulso ultrasónico, mostrando un comportamiento similar al presentado en la grafica 18. Este comportamiento decreciente se ajusta a la expresión $f_c = -0,06 \Phi^2 + 0,7536 \Phi + 15,209$, con $R^2 = 0,9999$.

Gráfica 25. Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad



Fuente: Los autores

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en probetas de concreto sin refuerzo expuestas a fuego se puede concluir que:

Al interpretar y analizar los valores de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) para las diferentes temperaturas de exposición, se encontró que a medida que aumenta la temperatura de exposición, la VPU medida en las probetas disminuye considerablemente, indicando que el material sufre daños notorios (como aumento en la porosidad y aparición de grietas), especialmente a 1000° y 1200°C. Lo anterior puede explicarse ya que cuando un concreto es expuesto a fuego, el tiempo de recorrido del haz sonoro es mayor debido a los cambios ocurridos en el material, y por ende la VPU disminuye. La expresión obtenida que representa la relación entre la velocidad de pulso y la temperatura está dada por $V = -0,0025T^2 + 1,6438T + 3828$, con un índice de correlación $R^2 = 0,9469$.

En cuanto a los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión de las probetas expuestas a fuego, se encontró que a medida que se incrementa la temperatura de exposición la resistencia del concreto disminuye, debido al ataque severo que sufre al ser expuesto a altas temperaturas debilitando la estructura interna del mismo. Esta relación está dada por la expresión $f_c = -6e^{-6T^2} + 0,0007T + 16,786$ con un índice de correlación $R^2 = 0,9352$.

Al hacer el estudio de la porosidad en algunas de las probetas se comprobó que a medida que la temperatura de exposición es mayor, la porosidad en este material también lo es. La relación que muestra este comportamiento está dada por la expresión $\Phi = 0,007T + 8,762$ con un índice de correlación $R^2 = 0,974$. Este aumento en el porcentaje de la porosidad es producto probablemente de las transformaciones internas del material, tales como deshidratación y

descomposición del hidróxido de calcio cuando se supera los 500°C, lo que hace que se generen espacios vacíos en el interior del concreto.

La velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión dependen en gran medida del porcentaje de porosidad que se pueda encontrar en la probeta, y ésta depende de la temperatura de exposición a la cual haya sido sometida, esto no quiere decir necesariamente que la porosidad sea el único parámetro determinante en los resultados que se obtienen en la velocidad de pulso y en la resistencia a la compresión, sino también la presencia de grietas y pérdida de humedad, entre otros.

Teniendo en cuenta el comportamiento que mostraron las probetas en los ensayos realizados en la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a la compresión se puede concluir que al someter probetas de concreto a elevadas temperaturas el comportamiento que muestran los dos parámetros es el mismo, es decir, disminuyen. Los resultados obtenidos muestran una tendencia de tipo exponencial, dada por la expresión $f_c = 4,638e^{0,00031V}$ con un índice de correlación $R^2 = 0,961$.

De esta investigación se puede concluir que el fuego es un agente de ataque muy agresivo para el concreto, en especial cuando es sometido a altas temperaturas, debido a que le proporciona un deterioro severo en su estructura ocasionándole daños internos que afectan su durabilidad.

La velocidad de pulso ultrasónico es un ensayo útil para evaluar cambios ocurridos en el concreto causados por exposiciones a fuego, ya que tiene la capacidad de captar la presencia de porosidades y grietas y otros cambios generados en el mismo y además sirve como complemento para los ensayos de evaluación de concreto tradicionales.

6. RECOMENDACIONES

Al finalizar este trabajo de investigación se recomienda lo siguiente:

Buscar un mecanismo que permita controlar la temperatura de la llama con mayor eficiencia al momento de efectuar el calentamiento de la probeta, esto con el fin de obtener una curva de calentamiento más acorde a la expedida por la norma establecida.

Utilizar el ensayo de difracción de rayos x como prueba paralela a la VPU, resistencia a la compresión y la porosidad, lo que permitiría un mejor análisis en los resultados y mayores posibilidades de conocimiento en el deterioro químico del concreto.

Se recomienda hacer todas las pruebas a un mismo tiempo de exposición, es decir, que todas las pruebas demoren el tiempo transcurrido para la exposición a 1200°C, que correspondió a unas 4 horas aproximadamente, esto con el fin de que todas las pruebas se hagan bajo las mismas condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] KUMAR MEHTA P. y MONTEIRO Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD, p.148-149.
- [2] CONCRETE AND FIRE < Disponible en: http://www.irishconcrete.ie/downloads/Concrete_and_Fire.pdf> visitada en Septiembre de 2010.
- [3] RODRÍGUEZ GONZÁLEZ, Manuel y BONAL CACERES, Rolando. El contenido de agua en el concreto y su incidencia sobre el valor de la velocidad del pulso ultrasónico. p. 2.
- [4] SOLÍS R; MORENO Erick. y R William. 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] EL CONCRETO EN LA OBRA. PROBLEMAS, CAUSAS Y SOLUCIONES< Disponible en: <http://www.imcyc.com/ct2006/junio06/PROBLEMAS.pdf>> visitada en agosto de 2010.
- [6] CORZO PATIÑO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre 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.1, 2008.
- [7] DI MAIO, A., FERREYRA HIRSCHI, E, GIACCIO, G. y ZERBINO, R. Hormigones expuestos a elevadas temperaturas: Evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas. 1999. p. 204.

- [8] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades.2000. p. 11.
- [9] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades.2000. p. 12.
- [10] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades.2000. p. 107.
- [11] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades.2000. p. 127.
- [12] TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN < Disponible en: <http://dspace.universia.net/bitstream/2024/644/1/4791944-Tecnologia-del-Hormigon.pdf>> visitada en Agosto de 2010.
- [13] COMPOSICIÓN DEL CONCRETO SIMPLE < Disponible en:<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080020/Lecciones/Capitulo%203/COMPOSICION%20DEL%20CONCRETO%20SIMPLE.htm>> visitada en Junio de 2010
- [14] SIERRA LEMUS, Diana Carolina. Sustancias reactivas nocivas en los agregados para concreto. 2006. p. 11.
- [15] EL CONCRETO. < Disponible en: http://www.guayabaverde.com/melinnava/Petreos5_MEP.pdf> visitada en Mayo de 2010.

- [16] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 13.
- [17] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 31.
- [18] TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://www.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/generalT2.htm>> visitada en Mayo de 2010.
- [19] _____.NTC 30 Cementos Pórtland. Clasificación y Nomenclatura. NTC - Norma Técnica Colombiana.
- [20] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 37- 38.
- [21] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 59.
- [22] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 60.
- [23] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 67.
- [24]_____. ASTM C33–01. Standard Specification for Concrete Aggregates. Philadelphia, USA, 2001.
- [25] CORZO PATIÑO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre 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. 8 .2008.

[26] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 72.

[27] ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación del efecto 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 33, 2010.

[28] 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.

[29] EFFECTS OF FIRE ON CONCRETE. < Disponible en: http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5363/is_200604/ai_n21397067/?tag=rbxcra. 2.a.11> Visitada en junio de 2010.

[30] 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.

[31] DI MAIO, A., FERREYRA HIRSCHI, E, GIACCIO, G. y ZERBINO, R. Hormigones expuestos a elevadas temperaturas: Evaluación de la permeabilidad y otras propiedades físicas. 1999. p. 204-205.

[32] KUMAR MEHTA P. y MONTEIRO Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD, p. 149.

[33] KUMAR MEHTA P. y MONTEIRO Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD, p. 150.

[34] LÓPEZ OROZCO, Juan Orlando. Porosidad del concreto. Universidad de San Carlos de Guatemala, enero de 2004. P. 1-2.

[35] CORZO PATIÑO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre 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. 21-22, 2008.

[36] LÓPEZ OROZCO, Juan Orlando. Porosidad del concreto. Universidad de San Carlos de Guatemala, enero de 2004. P. 33-34.

[37] CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS POR SU RESISTENCIA. < Disponible en: <http://www.imcyc.com/concretohistoria/resistencia.htm>> visitada en junio de 2010.

[38] LÓPEZ OROZCO, Juan Orlando. Porosidad del concreto. Universidad de San Carlos de Guatemala, enero de 2004. P. 38.

[39] KUMAR MEHTA P. y MONTEIRO Paulo J.M, CONCRETE Microstructure, Properties and Materials, Edition THIRD, p. 51.

[40] EQUIPO ULTRASONIDO. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEL HORMIGÓN. < Disponible en: <http://icc.ucv.cl/hormigon/ultrasonido.doc>> visitada en junio de 2010.

[41] SOLÍS R; MORENO Erick. y R William. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. p. 42.

[42] CORZO PATIÑO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre 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.

[43] ARIZA DÍAZ, Diana Marcela y ATUESTA ESPARZA, Javier Andrés. Evaluación del efecto 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.

[44] _____. ASTM C597-02. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. USA, 2003.

[45] CORZO PATIÑO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre 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. 27-28, 2008.

[46] BUNGEY, J. H. y MILLARD, S. G. Testing Of Concrete In Structures. An imprint of Chapman andHall. Third Edition. 1996. p. 53.

[47] CORZO PATIÑO, Laura y GARCÍA DUARTE, Johana. Relación entre 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. 29, 2008.

[48] INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO HIDRÁULICO. < Disponible en: http://www.ingenieria.uady.mx/revista/volumen11/influencia_de_la_temperatura.pdf > visitada en agosto de 2010.

[49] TECHNICAL HANDBOOK – ASIA. p. 9. <Pdf. disponible en: http://www.fischer.de/en/PortalData/1/Resources/fixing_systems/sales_information/_documents/technicalhandbook/2009_thba_001-038.pdf> visitada en Abril de 2010.

[50] ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA “Acueducto Metropolitano de Bucaramanga” <Disponible en: http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/control_calidad_bga2010.pdf > visitada en junio de 2010.

[51]____. NTC 92 (1995). Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregado compactado. NTC - Norma Técnica Colombiana.

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

[53]____. NTC 237 (1995). Método para determinar la densidad y absorción de agregados finos. NTC - Norma Técnica Colombiana.

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

[55] _____. NTC 78 (1995). Agregados para hormigón. Determinación del porcentaje de material que pasa por el tamiz ICONTEC 74. Método de lavado. NTC - Norma Técnica Colombiana.

[56] _____. NTC 121 (1995). Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas. NTC - Norma Técnica Colombiana.

[57] _____. NTC 321 (1995). Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones químicas. NTC - Norma Técnica Colombiana.

[58] _____. ICONTEC 1377 (1995). Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

[59] _____. ASTM C39/C39M-04. United States. ASTM – international American Society for Testing and Materials.

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

[61] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. 2000. p. 190.

[62] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PRODUCTORES DE CONCRETO. Colección básica del concreto. Libro 1. Tecnología y propiedades. p. 189-199. 2000.

[63] FRAGUADO DEL CONCRETO. < Disponible en: <http://www.arqhys.com/construccion/concreto-fraguado.html> > visitada en junio de 2010.

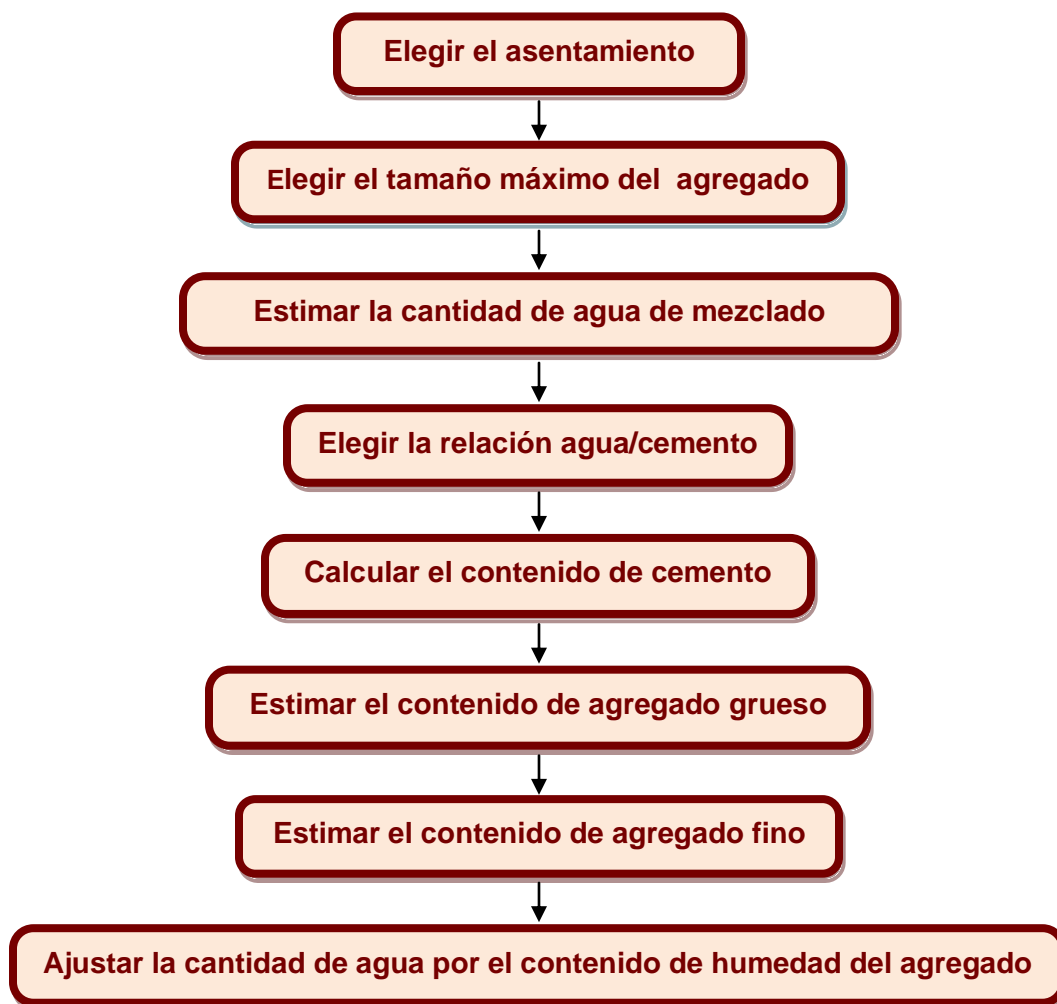
[64] _____. ACI 308R (2001). Guide to Curing Concrete. ACI - American Concrete Institute.

[65] CURADO DEL CONCRETO. < Disponible en: http://www.sika.com.co/co-curado_concreto.pdf > visitada en mayo de 2010.

ANEXOS

ANEXO A. Pasos y cálculos para el diseño de mezcla

Figura 1. Pasos para el diseño de mezcla



Fuente. Colección básica del concreto [61]

I. Selección del asentamiento

Si el asentamiento no se encuentra especificado puede cogerse un valor apropiado para la obra. Los valores del asentamiento indicados se aplican cuando

la vibración se utiliza en la compactación del concreto. Deben usarse las mezclas con la mínima consistencia que permita una colocación eficiente.

Teniendo en cuenta los objetivos de la investigación, se determinó usar un asentamiento para consistencia media, con valores de asentamiento de 5.0 a 10 cm [62].

II. Selección del tamaño máximo de agregado

Los agregados bien gradados con mayor tamaño máximo tienen menos vacíos que los de menor tamaño máximo; por consiguiente, si el tamaño máximo de los agregados en una mezcla de concreto se aumenta, para un asentamiento dado, los contenidos de cemento y agua disminuirán. En general, el tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura.

Con una dimensión mínima de 100 mm, se determinó el tamaño máximo de agregado a usar igual a $\frac{3}{4}$ " (19.05 mm) [62].

III. Estimación del contenido de agua

Se puede decir que la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que se requiere para producir un asentamiento dado depende del tamaño máximo del agregado, la forma y textura de las partículas así como de la gradación de los agregados, de la cantidad de aire incluido y de los aditivos reductores de agua (cuando son utilizados).

Teniendo en cuenta que el asentamiento para nuestro diseño de mezcla se encontraba entre 5 y 10 cm y que el tamaño máximo de agregado seleccionado es 19.05 mm, se halla en la tabla 2 el contenido de agua igual a 200 [62].

IV. Selección de la relación agua/cemento

La relación agua/cemento requerida se determina no solo por los requisitos de resistencia, sino también por los factores como la durabilidad y propiedades para el acabado. Puesto que distintos agregados y cementos producen generalmente resistencias diferentes con la misma relación agua cemento, es conveniente

conocer o desarrollar la relación entre la resistencia y la relación agua cemento de los materiales que se usaran realmente [62].

La relación de agua cemento que se utilizó en esta investigación fue de 0.5.

V. Calcular el contenido de cemento

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones hechas en los pasos III y IV: el contenido de cemento requerido es igual al contenido estimado de agua en la mezcla dividido por la relación agua/cemento.

$$\text{Contenido de cemento } C = \frac{A}{A/c}$$

Para el caso de nuestro diseño, el contenido de cemento es $C = \frac{200}{0.5} = 400 \text{ kg}$ para un metro cúbico de concreto [62].

VI. Estimación del contenido de agregado grueso

Los agregados que tengan esencialmente la misma granulometría y tamaño máximo, producirán un concreto de trabajabilidad satisfactorio cuando se emplea un volumen determinado de agregado grueso seco y compactado, por un volumen unitario de concreto [62].

$$\text{Contenido de agregado grueso } b = \left(\frac{b}{b_o} \right) * b_o$$

b = Volumen absoluto de agregado grueso por volumen unitario de concreto

b / b_o = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto

b_o = Relación entre la masa unitaria seca compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso.

El módulo de finura del agregado fino caracterizado para este diseño de mezcla es de 2.1 y el tamaño máximo del agregado grueso de 19.05 mm, se halla la relación b/b_0 igual a 0.692 y b_0 igual a 1500

Con los datos anteriores se puede estimar el contenido de agregado grueso $b = (0.692) \times 1500 = 1038 \text{ kg}$ para un metro cubico de concreto.

VII. Estimación del contenido de agregado fino

Al terminar el paso anterior, todos los ingredientes del concreto están estimados, a excepción del agregado fino. Esta cantidad se determina por la diferencia entre el volumen total de la mezcla (1m^3) y la suma de los volúmenes de cemento, agua y agregado grueso.

$$V_{af} = 1000 - (V_a + V_c + V_{ag})$$

Donde:

V_{af} = Volumen de agregado fino

V_a = Volumen de agua

V_c = Volumen de cemento

V_{ag} = Volumen de agregado grueso (Cantidad de agregado grueso/Densidad aparente ag)

Este volumen se multiplica por la densidad aparente del agregado fino determinada en la caracterización, con el fin de calcular su cantidad en Kilogramos [62].

Cada uno de estos volúmenes es calculado a partir de los pesos hallados en los pasos anteriores y dividido por su respectiva densidad.

Así para nuestro diseño los volúmenes se calculan como sigue:

$$V_a = 200 \text{ L}$$

$$V_c = 132.013 \text{ L}$$

$$V_{ag} = 396.4 L$$

$$V_{af} = 1000 - (200 + 132.013 + 396.4) = 271.587 L$$

Con el valor del volumen de agregado fino y su densidad aparente SSS, hallamos el contenido de agregado fino igual a 715 kg por un metro cúbico de concreto [62].

VIII. Ajuste por humedad de los agregados

Hay que tener en cuenta la humedad de los agregados para pesarlos correctamente. Generalmente los agregados están húmedos y a su peso deben sumarse el peso del agua que contienen, tanto absorbida como superficial [62].

Fraguado del concreto

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final [63].

La determinación de estos dos estados, cuyo lapso comprendido entre ambos se llama tiempo de fraguado de la mezcla, es muy poco precisa y sólo debe tomarse a título de guía comparativa. El tiempo de fraguado inicial es el mismo para los cinco tipos de cemento enunciados y alcanza un valor de 45 a 60 minutos, el tiempo de fraguado final se estima en 10 horas aproximadamente. En resumen, puede definirse como tiempo de fraguado de una mezcla determinada, el lapso necesario para que la mezcla pase del estado fluido al sólido. Así definido, el fraguado no es sino una parte del proceso de endurecimiento. Es necesario

colocar la mezcla en los moldes antes de que inicie el fraguado y de preferencia dentro de los primeros 30 minutos de fabricada [63].

Curado del concreto

El curado, según el ACI 308 R [64] 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 [65].

El tiempo de curado del concreto consiste en una combinación de condiciones que promueven la hidratación del cemento, es decir, tiempo, temperatura, humedad y condiciones posteriores a la colocación de una mezcla de concreto en el encofrado.

El tiempo y la humedad son importantes factores en el proceso de hidratación controlada por la difusión del agua. También, al igual que todas las reacciones químicas, la temperatura tiene un efecto de aceleración de las reacciones de hidratación.

ANEXO B. Registro de toma de datos de la velocidad de pulso ultrasónico en los tres perfiles para la probeta 7 antes de ser expuesta a fuego.

Perfil A				
Probeta 7	Tiempo 1 (μs)	Tiempo 2 (μs)	Tiempo Promedio (s)	Velocidad Promedio (m/s)
Punto 1	49,6	49,6	0,0000496	4032
Punto 2	48,7	48,9	0,0000488	4098
Punto 3	48,6	48,4	0,0000485	4124
Punto 4	49,6	49,2	0,0000494	4049
Punto 5	48,9	48,7	0,0000488	4098
Punto 6	49	49,1	0,00004905	4077
Punto 7	49,3	49,1	0,0000492	4065
Punto 8	49,5	49,6	0,00004955	4036
Punto 9	50,3	50,1	0,0000502	3984
Punto 10	50,1	50,1	0,0000501	3992
Punto 11	49,7	49,5	0,0000496	4032
Punto 12	50,1	49,9	0,00005	4000
Punto 13	50,4	50,1	0,00005025	3980
Punto 14	50,3	50,5	0,0000504	3968
Punto 15	50,1	50,3	0,0000502	3984

Perfil B				
Probeta 7	Tiempo 1 (μs)	Tiempo 2 (μs)	Tiempo Promedio (s)	Velocidad Promedio (m/s)
Punto 1	50,7	50,6	0,00005065	3949
Punto 2	50	50,1	0,00005005	3996
Punto 3	49,7	49,7	0,0000497	4024
Punto 4	49,6	49,7	0,00004965	4028
Punto 5	49,5	49,6	0,00004955	4036
Punto 6	49,3	49,4	0,00004935	4053
Punto 7	49,7	49,5	0,0000496	4032
Punto 8	49,2	49,3	0,00004925	4061
Punto 9	48,8	48,9	0,00004885	4094
Punto 10	49,4	49,5	0,00004945	4044
Punto 11	50,1	50	0,00005005	3996
Punto 12	50	50,1	0,00005005	3996
Punto 13	49,6	49,7	0,00004965	4028
Punto 14	49,7	49,9	0,0000498	4016
Punto 15	50,5	50,6	0,00005055	3956

Perfil C				
Probeta 7	Tiempo 1 (μs)	Tiempo 2 (μs)	Tiempo Promedio (s)	Velocidad Promedio (m/s)
Punto 1	48,3	48,2	0,00004825	4145
Punto 2	48	47,9	0,00004795	4171
Punto 3	48,2	48,2	0,0000482	4149
Punto 4	49	48,9	0,00004895	4086
Punto 5	49,7	49,5	0,0000496	4032
Punto 6	49,9	50	0,00004995	4004
Punto 7	49,8	49,9	0,00004985	4012
Punto 8	49,6	49,6	0,0000496	4032
Punto 9	49,8	49,9	0,00004985	4012
Punto 10	50,9	50,2	0,00005055	3956
Punto 11	49,9	49,7	0,0000498	4016
Punto 12	49,4	49,6	0,0000495	4040
Punto 13	49,7	49,9	0,0000498	4016
Punto 14	50,8	50,8	0,0000508	3937
Punto 15	52,2	52,1	0,00005215	3835

ANEXO C. Registro de toma de datos de la velocidad de pulso ultrasónico en los tres perfiles para la probeta 7 después de ser expuesta a fuego.

Perfil A				
Probeta 7	Tiempo 1 (μs)	Tiempo 2 (μs)	Tiempo Promedio (s)	Velocidad Promedio (m/s)
Punto 1	50,9	50,7	0,0000508	3937
Punto 2	50,6	50,6	0,0000506	3953
Punto 3	50,2	50,2	0,0000502	3984
Punto 4	50,3	50,2	0,00005025	3980
Punto 5	50,3	50,8	0,00005055	3956
Punto 6	50,9	50,8	0,00005085	3933
Punto 7	50,8	50,7	0,00005075	3941
Punto 8	50,7	50,6	0,00005065	3949
Punto 9	51,4	51,2	0,0000513	3899
Punto 10	50,9	50,5	0,0000507	3945
Punto 11	50,4	50,3	0,00005035	3972
Punto 12	50,9	50,9	0,0000509	3929
Punto 13	51,1	50,6	0,00005085	3933
Punto 14	51	50,9	0,00005095	3925
Punto 15	50,6	50,6	0,0000506	3953

Perfil B				
Probeta 7	Tiempo 1 (μs)	Tiempo 2 (μs)	Tiempo Promedio (s)	Velocidad Promedio (m/s)
Punto 1	52,7	52,5	0,0000526	3802
Punto 2	51,5	51,6	0,00005155	3880
Punto 3	51	50,9	0,00005095	3925
Punto 4	50,6	50,6	0,0000506	3953
Punto 5	50,5	50,4	0,00005045	3964
Punto 6	50,4	50,3	0,00005035	3972
Punto 7	50,1	50,2	0,00005015	3988
Punto 8	49,6	49,5	0,00004955	4036
Punto 9	49,3	49,2	0,00004925	4061
Punto 10	49,9	49,9	0,0000499	4008
Punto 11	50,3	50,4	0,00005035	3972
Punto 12	50,4	50,3	0,00005035	3972
Punto 13	50,1	50,2	0,00005015	3988
Punto 14	50,5	50,4	0,00005045	3964
Punto 15	51,4	51,2	0,0000513	3899

Perfil C				
Probeta 7	Tiempo 1 (μs)	Tiempo 2 (μs)	Tiempo Promedio (s)	Velocidad Promedio (m/s)
Punto 1	49,8	50	0,0000499	4008
Punto 2	49,6	49,5	0,00004955	4036
Punto 3	50	49,9	0,00004995	4004
Punto 4	50,6	50,6	0,0000506	3953
Punto 5	51,1	51,2	0,00005115	3910
Punto 6	51,2	51,2	0,0000512	3906
Punto 7	50,9	50,9	0,0000509	3929
Punto 8	50,6	50,7	0,00005065	3949
Punto 9	50,8	50,7	0,00005075	3941
Punto 10	51	51	0,000051	3922
Punto 11	50,6	50,6	0,0000506	3953
Punto 12	50	50,1	0,00005005	3996
Punto 13	50,1	50,2	0,00005015	3988
Punto 14	50,9	50,8	0,00005085	3933
Punto 15	52	52,1	0,00005205	3842

ANEXO D. Cálculos para hallar la resistencia a la compresión

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

Donde:

f_c : Resistencia a la compresión

F: Fuerza aplicada

A: Área de la sección donde se aplica la fuerza

Luego de hallar σ se divide por un valor de conversión ya establecido para expresarlo en Psi.

Para calcular la resistencia a la compresión se opero de la siguiente manera:

- El área de la sección donde se aplicó la fuerza fue de 400cm^2 para todas las probetas.
- Cálculo de la resistencia a la compresión para la probeta 7 expuesta a 200°C .

$$\sigma = \left(\frac{68000 \text{ kgf}}{400 \text{ m}^2} \right) / 0.07$$

$$\sigma = 2428.57 \text{ Psi}$$

Después de obtener el resultado en Psi se convierte a MPa de la siguiente manera:

$$2428.57 \text{ Psi} \left(\frac{1 \text{ Mpa}}{145.038 \text{ Psi}} \right) = 16.74 \text{ MPa}$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de las probetas ensayadas:

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

Probeta	Temperatura de exposición (°C)	Fuerza aplicada (kgf)	Resistencia (Mpa)
1	-----	70300	17,31
2		66000	16,25
3		73500	18,10
7	200	68000	16,74
8		71800	17,68
9		65000	16,01
10	400	64000	15,76
11		61800	15,22
13	600	61000	15,02
24		59800	14,73
15		62000	15,27
16	800	57500	14,16
17		56000	13,79
19	1000	51500	12,68
20		53800	13,25
21		55600	13,69
22	1200	34500	8,50

ANEXO E. Cálculos para hallar la porosidad de las probetas

$$\Phi(\%) = \left(1 - \frac{V_{gr}}{V_t}\right) * 100$$

Donde:

Φ : Porosidad efectiva

V_{gr} : Volumen de granos

V_t : Volumen total

Para calcular la porosidad efectiva para la probeta 12 expuesta a 400°C se procedió de la siguiente manera:

$$\Phi(\%) = \left(1 - \frac{53}{62}\right) * 100$$

$$\Phi(\%) = 14.51 \%$$

En la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos en el ensayo de porosidad con sus respectivos promedios.

Valores obtenidos en el ensayo de porosidad con sus respectivos promedios.

Probeta	Temperatura de exposición (°C)	Volumen de granos	Volumen total	Porosidad efectiva (%)	Promedios de la porosidad (%)
4	-----	56	61,5	8,94	8,94
12	400	53	62	14,51	12,33
		57,5	64	10,15	
18	800	48	57	15,78	14,06
		52	58	12,34	
23	1200	47,5	59	19,49	18,49
		49,5	60	17,5	