

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO SOMETIDO A
ALTAS TEMPERATURAS POR INCIDENCIA DEL FUEGO
DIRECTO EN LA REGIÓN TACNA, 2020”**

**PARA OPTAR
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

PRESENTADA POR:

Bach. JOSE CARLOS NAVARRO ROJAS

Bach. LUIS MIGUEL COLQUE QUISPE

TACNA – PERÚ

2021

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS

**“COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO REFORZADO SOMETIDO A ALTAS
TEMPERATURAS POR INCIDENCIA DEL FUEGO DIRECTO EN LA REGIÓN
TACNA, 2020”**

**Tesis sustentada y aprobada el 10 de diciembre de 2021; estando el jurado
calificador integrado por:**

PRESIDENTE: Mtra. DINA MARLENE COTRADO FLORES

SECRETARIO: Mtro. ULIANOV FARFÁN KEHUARUCHO

VOCAL: Mag. SANTOS TITO GÓMEZ CHOQUEJAHUA

ASESOR: Mag. EDGAR HIPOLITO CHAPARRO QUISPE

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo *Navarro Rojas, José Carlos*, en calidad de Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 70176311.

Yo *Colque Quispe, Luis Miguel*, en calidad de Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificado con DNI 44254297.

Declaro bajo juramento que:

1. Somos autores de la Tesis titulada:
“Comportamiento del concreto reforzado sometido a altas temperaturas por incidencia del fuego directo en la región Tacna, 2020”

La misma que presento para optar:

El título de Ingeniero Civil

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a *la universidad* cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a *la universidad* y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro y/o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y

sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Tacna 25 de febrero de 2022



Jose Carlos Navarro Rojas

DNI. 70176311



Luis Miguel Colque Quispe

DNI. 44254297

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la fortaleza

A mi familia por su apoyo incansable para que alcance mis metas

Jose Carlos

A Dios por su infinito aliento para continuar

A mi familia, porque estar siempre a mi lado

Luis Miguel

DEDICATORIA

A mis padres

Jose Carlos

A mi familia

Luis Miguel

ÍNDICE GENERAL

PAGINA DE JURADOS.....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA.....	vi
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA	16
1.1 Planteamiento del problema	16
1.2.1. Problema principal.....	17
1.2.2. Problemas específicos	17
1.3. Justificación de la investigación.....	17
1.4.2 Objetivos específicos	19
1.5. Hipótesis	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20
2.1 Antecedentes de la investigación	20
2.1.1 A nivel internacional	20
2.2 Bases teóricas.....	28
2.2.1. Concreto.....	28
2.2.2. Efecto del fuego sobre los materiales de construcción	28
2.2.2.1. Acero.....	30
2.2.2.2. Patología del concreto.....	31
2.2.2 Componentes del concreto.....	40
2.2.3. Respuesta física y química al fuego	41
2.2.4. Desprendimiento explosivo.....	43
2.2.5. Agrietamiento	45
2.2.6. Uso de materiales de apoyo	46
2.2.7. Desempeño del acero y refuerzo frente a la exposición de fuego.....	46

2.2.8. Estructuras compuestas	47
2.2.9. Resistencia al fuego	47
2.2.10.1. Resistencia al fuego de estructuras.....	49
2.3. Definición de términos.....	53
2.3.1. Resistencia.....	53
2.3.2. Resistencia del concreto	54
2.3.3. Ductilidad	54
2.3.4. Cambios de temperatura y humedad.....	54
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	55
3.1 Tipo y diseño de la investigación.....	55
3.2 Acciones y actividades	55
3.3. Instrumentos	55
3.4. Población y muestra.....	56
3.5. Operacionalización de Variables	56
3.7 Procedimiento y análisis de datos	57
CAPITULO IV: RESULTADOS.....	58
4.1. Características del objeto de muestra de vigas de concreto armado	58
4.2. Resultados del ensayo de flexión	58
4.3. Características del objeto de muestra de columna de concreto armado ..	60
4.4. Resultados del ensayo de compresión	62
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	68
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de la velocidad de calentamiento sobre la resistencia residual a la compresión del hormigón basáltico tras el enfriamiento desde 600°C (F=1°C/MIN, s=0,2°C/min, D=pre-secado a 105°C).....	39
Tabla 5. Operacionalización de variables	56
Tabla 6. Dimensiones de la viga	58
Tabla 7. Viga sin ser sometida a alta temperatura	59
Tabla 8. Viga sometida a diferentes temperaturas	60
Tabla 9. Dimensiones de la columna	60
Tabla 10. Cambios morfológicos de elementos estructurales	61
Tabla 11. Columna sin ser sometida a alta temperatura	62
Tabla 12. Columna sometida a alta temperatura.....	62
Tabla 13. Prueba de normalidad.....	63
Tabla 14. Análisis de varianza ANOVA.....	65
Tabla 14. Prueba post hoc HSD Tukey.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva normalizada (temperatura –tiempo) de un incendio.....	31
Figura 2. Datos sobre la resistencia a la compresión del hormigón recopilados de varias fuentesgura	32
Figura 3. Resistencia a la compresión residual del hormigón de ladrillo.....	34
Figura 4. Resistencia residual a la compresión y a la tracción de la pasta de cemento Portland.....	35
Figura 5. Grado y tasa de conversión de C-S-H en la pasta de cemento idealizada	35
Figura 6. Resistencia a la compresión a temperatura de tres hormigones no sellados calentados sin carga	35
Figura 7. Efecto de la velocidad de calentamiento sobre la resistencia residual a la compresión	38
Figura 8. Prueba de fuego estándar ASTM E119.....	50
Figura 9. Curva de temperatura	51
Figura 10. Elemento horizontal y vertical de fuego compartamental	53
Figura 11. Gráfico Q_Q normal de carga kg de la muestra.....	64
Figura 12. Gráfico Q_Q normal de carga kg de la muestra 2	64
Figura 13. Gráfico de medias.....	66

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia	78
Anexo 2. Matriz de datos experimentales	79
Anexo 3. Imágenes de experimentación con la viga	80

RESUMEN

El estudio denominado *Comportamiento del concreto reforzado sometido a altas temperaturas por incidencia del fuego directo en la región Tacna en 2020*, tuvo como objetivo determinar la variación de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a altas temperaturas. Metodología: se utilizó una viga de concreto armado de una dimensión $L= 180\text{cm}$, $b= 15\text{ cm}$, $h= 10\text{cm}$, acero de refuerzo $f_y= 4200\text{ Kg/cm}^2$, refuerzo longitudinal $4\ \varnothing\ 10\text{ mm}$ superior e inferior, refuerzo transversal $7\ \varnothing\ 8\text{ mm}$ @ 10 cm y recubrimiento $e=2,5\text{ cm}$ y expuesto al fuego con una resistencia de diseño de $f'c = 210\text{ Kg/cm}^2$. Resultados: La observación de los ensayos realizados, determinó que la resistencia del concreto según el incremento de temperatura de 100°C cada 15 minutos, disminuye en forma progresiva con efectos incrementales; El nivel de afectación crítico ocurrió con un tiempo de exposición al fuego de 180 minutos, temperatura de 750°C , carga $\text{kN } 32$, carga $\text{kN } 3263,04$, en que se produce la rotura de la viga. Conclusión: la resistencia del concreto sometido a diferentes temperaturas de fuego, disminuye significativamente cuando la temperatura es de $\geq 750^\circ\text{C}$ ($F= 20,3446$; p valor $0,001$) en que se produjo la rotura de la viga.

Palabras clave: resistencia, concreto armado, alta temperaturas

ABSTRACT

The study called Behavior of reinforced concrete subjected to high temperatures due to the incidence of direct fire in the Tacna region in 2020, aimed to determine the variation of the mechanical property of resistance of an experimental piece of reinforced concrete subjected to high temperatures. Methodology: a reinforced concrete beam with a dimension $L = 180\text{cm}$, $b = 15\text{ cm}$, $h = 10\text{cm}$, reinforcing steel $f_y = 4200\text{ Kg / cm}^2$, longitudinal reinforcement $4 \text{ } \varnothing 10\text{ mm}$ superior and inferior, transverse reinforcement $7 \text{ } \varnothing 8$ was used $\text{mm @ } 10\text{ cm}$ and covering $e = 2.5\text{ cm}$ and exposed to fire with a design resistance of $f 'c = 210\text{ Kg / cm}^2$. Results: The observation of the tests carried out, determined that the resistance of the concrete according to the increase in temperature of $100\text{ }^\circ\text{C}$ every 15 minutes, decreases progressively with incremental effects; The critical level of damage occurred with a fire exposure time of 180 minutes, temperature of $750\text{ }^\circ\text{C}$, load. $\text{kN } 32$, load $\text{kN } 3263.04$, in which the beam breaks. Conclusion: the resistance of concrete subjected to different fire temperatures, decreases significantly when the temperature is $\geq 750\text{ }^\circ\text{C}$ ($F = 20, 3446$; $p\text{ value } 0.001$) when the beam broke.

Keywords: resistance, reinforced concrete, high temperatures

INTRODUCCIÓN

Es necesario mencionar que la falla de las estructuras en situaciones de desastre como es un incendio por la exposición a altas temperaturas, ha tenido consecuencias para la vida humana, ya que la infraestructura frente a la agresión del fuego. Esta problemática, nos ha llevado a desarrollar el presente estudio de investigación, con el anhelo de aportar al conocimiento de la ciencia de la ingeniería sobre el comportamiento del concreto estructural frente a la exposición de diferentes temperaturas bajo condiciones experimentales.

El estudio de los efectos que tiene el fuego en el concreto armado de las infraestructuras, es un tópico que no ha sido investigado con frecuencia, lo que amerita realizar estudios científicos para indagar las variaciones en sus propiedades tanto mecánicas como físicas, teniendo en cuenta los agregados convencionales y no convencionales que se utilizan para su diseño y preparación.

En este sentido, se ha estructurado el presente estudio, de acuerdo con la estructura capitular, establecida por la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Privada de Tacna. En el capítulo primero, se expone el *planteamiento del problema*, el cual precisa la situación crítica en relación a las variables de estudio y en el que se formula la pregunta de investigación, la justificación y los objetivos del estudio. En el capítulo segundo, se consigna la fundamentación teórica del estudio bajo la denominación de *Marco Teórico*, que abarca los antecedentes, la base teórica conceptual.

El tercer capitulado, comprende el *marco metodológico* y contiene la hipótesis, la operacionalización de las variables y el tipo y diseño del estudio, el ámbito y tiempo social de la investigación, y los métodos y técnicas seleccionadas para ejecutar el estudio.

En el cuarto capitulado se presentan los *resultados* organizados en forma lógica y metodológica según el procedimiento que se siguió para el experimento. Y finalmente, se plantean las *Conclusiones y Recomendaciones*.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Desde hace muchos años, se conoce el fuego y la utilidad que ha tenido para la humanidad su uso, siendo Galileo quien estudió la dilatación de los elementos expuestos al fuego. En el campo de la ingeniería, las estructuras y los sistemas de concreto en relación a la protección contra el fuego, han sido diseñados en base a estándares y reglamentos de carácter preceptivos, en los que los valores de desempeño son suministrados según cálculos matemáticos. Empero, existen varias limitaciones metodológicas preceptivas para establecer la resistencia al fuego (Ashley, 1971).

En este sentido, la exposición del concreto armado al fuego durante un incendio, constituye una amenaza por los efectos sobre el hormigón armado, ya que las diferentes temperaturas provocará movimientos y dilataciones y consecuentemente empujes sobre otros elementos adyacentes que pueden resultar dañados o producirse tensiones internas sobre el propio elemento, si éste tuviese una escasa posibilidad de dilatar, lo que se suman a los normales de carga, dando lugar a un colapso de la estructura (Ashley, 1971).

El comportamiento del concreto armado expuesto al fuego, es un fenómeno complejo, ya que el fuego actúa sobre un material compuesto entre acero y concreto, elementos que presentan un comportamiento diferente ante la presencia de altas temperaturas, a pesar de que el hormigón armado es un material que exhibe una resistencia aceptable cuando se le somete a altas temperaturas, empero, la exposición a altas temperaturas durante periodos largos de tiempo, como un incendio, pueden derivar en modificaciones físico-químicas en los materiales que lo componen, además de presentar alteraciones de sus propiedades mecánicas que sin duda, provocarán un menoscabo de la seguridad de la estructura de concreto. Las investigaciones disponible sobre el comportamiento de resistencia al fuego de hormigón armada aún son deficientes (Zhou et al., 2021).

En Tacna, hay diversas estructuras tal como lo es la Prefectura, edificio construido entre los años 1905 a 1909, el cual ha sido hecha a base de piedra de cantería y con revestimiento de adobe como acabado en paredes. También contamos con la estructura con riesgo alto como lo es la Casa Museo Basadre,

ubicada frente al paseo cívico de la ciudad de Tacna , la cual cuenta con una estructura integra de piedra de cantería con muros de adobe, quincha y muros de madera. Así mismo, podría decirse que en Tacna se cuentan con varias construcciones de épocas coloniales en pie y como última referencia que tiene riesgo alto es la conocida Casa Zela, ubicada en la calle homónima a esta casa, la cual es de estilo colonial construida de piedra de cantería con muros de adobe y quincha, sobresale los acabados en madera tanto de manera estructural como columnas como de tipo adorno tales como los frisos.

Frente a la situación expuesta, es necesario evaluar el comportamiento que presenta una estructura de concreto armado frente a diferentes temperaturas, bajo condiciones experimentales, específicamente para analizar su resistencia.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema principal

¿Cuál es el comportamiento de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a altas temperaturas por incidencia de fuego directo en la región de Tacna en 2020?

1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es la variación de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (°C) para intervalos de 15 minutos?

- a) ¿Cuál es el nivel de afectación crítico de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (°C) para intervalos de 15 minutos?

1.3. Justificación de la investigación

El estudio se justifica desde una perspectiva pragmática, en el sentido, de que los estudios realizados sobre el efecto del fuego sobre la resistencia del concreto armado sometido a altas temperaturas, especialmente, a partir de un diseño

experimental, permite precisar específicamente las variables de esta característica mecánica como es la resistencia frente a las variaciones del fuego, lo que permitirá llenar un vacío del conocimiento en el campo de la ingeniería.

La conveniencia del estudio, se basa en la utilidad de los resultados para fines del diseño de estructuras en el que se utiliza concreto armado, teniendo en cuenta, que siempre existe un riesgo de incendio, que podría además de las consecuencias directas de exposición al fuego, aumentar el riesgo para las personas por el daño que podría ocasionarse en el hormigón armado. Se han realizado estudios que aportan al conocimiento del comportamiento de resistencia al fuego del hormigón armado de acero tubular circular y una propuesta de método de diseño práctico de evaluación de resistencia al fuego de columnas (Yang et al., 2021). En otro caso, la cuantificación de la resistencia al quemado completo de columnas de hormigón armado (Gernay, 2019); al igual que la ejecución de ensayos de fuego en columnas de apoyo de hormigón armado de acero tubular circular para establecer la influencia del nivel de carga y el espesor del tubo de acero en la resistencia a diferentes grados de temperatura (Zhou et al., 2019). También, se ha investigado ensayos de resistencia al fuego, realizados en vigas de hormigón armado, con o sin refuerzo de polímeros con un reforzamiento de fibras de carbono, con resultados que conducen a diferentes modelos de cálculos del espesor de protección contra incendios (Turkowski et al., 2017). También, se mencionan investigaciones experimentales sobre el comportamiento de columnas de hormigón armado expuestas al fuego para estudiar el fenómeno de alargamiento térmico restringido (Martins y Rodrigues, 2010). De otra parte, se realizó el análisis de elementos finitos Galerkin no lineal para estructuras de hormigón armada sometido a elevados grados de calor por fuego y posteriores cálculos de la rigidez del elemento (Kwon et al., 2013). Actualmente, también se recurre a estudios basados en modelos matemáticos de elementos finitos sobre el comportamiento global de la sección circular hueca de columnas con relleno de hormigón reforzado con acero que sugiere una mejor resistencia a la exposición al fuego (Tretyakov et al., 2021) que En tal sentido, la utilización frecuente del hormigón en la construcción amerita una evaluación de sus propiedades en situaciones particulares, como es la exposición al fuego o incendios, situación extrema que representa una de las más graves situaciones a las que una estructura podría estar sometida.

La innovación en el presente estudio, es que se analiza los cambios en la resistencia de una pieza de hormigón expuesta a fuego bajo condiciones

experimentales preestablecidas en forma intencional a diferencia de otros estudios, en los que se analiza los daños en la estructura del hormigón post incendio.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Determinar la resistencia de la pieza experimental de concreto reforzado sometido a altas temperaturas por incidencia de fuego directo en la región de Tacna en 2020.

1.4.2 Objetivos específicos

- b) Identificar la variación de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (°C) para intervalos de 15 minutos.
- c) Identificar el nivel de afectación crítico de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (°C) para intervalos de 15 minutos.

1.5. Hipótesis

La exposición al fuego directo influye significativamente en el comportamiento de la resistencia a la flexión del concreto reforzado.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

Se ha revisado las investigaciones realizados en el campo de la ingeniería, especialmente sobre estructuras de hormigón armado y exposición al fuego, siendo identificados los siguientes estudios:

2.1.1 A nivel internacional

Agra et al. (2021), investigaron sobre el *Effect of high temperature on the mechanical properties of concrete reinforced with different fiber contents*. Se analizó el comportamiento mecánico de muestras sometidas a altas temperaturas ($25\text{ °C} \leq T \leq 750\text{ °C}$) y producidas variando el contenido de fibra. Las propiedades de tracción se determinaron mediante la prueba de división en cuña de doble filo (DEWS), que demostró ser una metodología viable para evaluar el comportamiento posterior a la fisuración del SFRC expuesto a altas temperaturas. La tasa de degradación en la resistencia a la compresión y a la tracción se redujo para contenidos más altos de fibras de acero después de la exposición a temperaturas elevadas. Las reducciones en la resistencia a la compresión y el módulo elástico fueron más severas que las prescritas por las guías europeas. Además, las propiedades de tracción se redujeron significativamente para $T \geq 450\text{ °C}$. Además, se parametrizó una tasa de reducción relacionada con la temperatura en las propiedades de tracción después de la fisuración para todas las muestras de contenido de fibra, en las que solo el 20 % de los valores de temperatura ambiente de f_{Fts} y 30 % de f_{Ftu} se mantuvieron después de la exposición a 600 °C , que son valores más altos en comparación con las directrices europeas.

García-Troncoso et al. (2021), realizaron un estudio *Comparative study on the properties and high temperature resistance of self-compacting concrete with various types of recycled aggregates*. Las actividades de construcción y demolición generan numerosos residuos que podrían reutilizarse como áridos reciclados. La sustitución de áridos naturales por áridos reciclados generalmente tiene un impacto negativo en el rendimiento del hormigón convencional. Este impacto se encuentra menos significativo

en el hormigón autocompactante (SCC), debido a la mejor calidad del aglomerante que modifica la zona de transición interfacial y la menor cantidad de áridos gruesos utilizados. Teniendo en cuenta las amplias fuentes de agregados reciclados, como el hormigón, los ladrillos y los bloques, se realizaron pocos estudios para comparar el desempeño de SCC incorporando diferentes tipos de agregados reciclados. Además, dado que el SCC se usa más comúnmente en edificios de gran altura que pueden experimentar riesgos de incendio, es importante determinar la correspondiente resistencia a altas temperaturas. En este papel, Se consideran tres tipos diferentes de agregados reciclados, a saber, agregado de concreto reciclado (RCA), agregado de ladrillo reciclado (RBA) y agregado de bloque de concreto reciclado (CBA). El reemplazo del 100 % es factible para SCC-CBA y SCC-RCA debido a las reducciones menores de resistencia. Los resultados también mostraron que los hormigones RBA y CBA superaron al hormigón NA a alta temperatura (400 °C y 600 °C). Se sugiere que el RBA reemplace parcialmente el agregado natural, ya que da un desempeño inferior a temperatura ambiente, pero es más recomendable su uso en ambientes de alta temperatura. Los resultados también mostraron que los hormigones RBA y CBA superaron al hormigón NA a alta temperatura (400 °C y 600 °C). Se sugiere que el RBA reemplace parcialmente el agregado natural, ya que da un desempeño inferior a temperatura ambiente, pero es más recomendable su uso en ambientes de alta temperatura. Los resultados también mostraron que los hormigones RBA y CBA superaron al hormigón NA a alta temperatura (400 °C y 600 °C). Se sugiere que el RBA reemplace parcialmente el agregado natural, ya que da un desempeño inferior a temperatura ambiente, pero es más recomendable su uso en ambientes de alta temperatura.

Goudar et al. (2021) *A Review on Mechanical and Microstructure Properties of Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures*. Los daños a nivel macro se pueden medir con la degradación de las propiedades mecánicas, como la reducción de la resistencia a la compresión, la pérdida de peso, cambios en propiedades elásticas, reducción de la fuerza de unión en reforzado hormigón, etc. Las macrogrietas en la superficie de hormigón causa desconchado que se puede observar después de exponer el hormigónmuestras a más de 300 °C. La resistencia a la compresión del hormigón se reduce ligeramente hasta 400 °C, y cuando la temperatura aumentó a 600 °C, hubo una reducción exponencial en la resistencia a la compresión de hormigón. Otro parámetro importante es la degradación de la resistencia de la unión, que juega un papel crucial en los problemas de durabilidad. Comprender el fenómeno del deterioro y cambios en propiedades mecánicas, los cambios a nivel de la microestructura de hormigón necesita ser entendido. La deshidratación de los

productos provoca el deterioro de las propiedades mecánicas y la pérdida de peso de hormigón cuando expuesto a altas temperaturas. A diferentes temperaturas, la microestructura cambia y se recopila y discute la respuesta de productos de hidratación como el hidróxido de calcio (CH), el gel de CSH, el cemento no hidratado y el agua capilar informada por investigadores anteriores.

Du et al.(2021) estudiaron *Experimental study on fire resistance of ultra-high strength concrete encased steel columns* En este estudio se ensayaron bajo compresión axial catorce columnas de acero con revestimiento de hormigón reforzado con fibras expuestas al fuego de la norma ISO 834. Se estudiaron las influencias del espesor de la cubierta de hormigón, el tamaño de la sección transversal, la relación de carga, la relación de esbeltez y la separación entre aros en la capacidad portante de la columna a temperatura elevada. Los modos de fallo y las curvas de desplazamiento vertical-histórico de las probetas muestran que el uso de un 0,15 % de fibra de polipropileno (PP) en volumen puede evitar eficazmente el desconchado del hormigón de ultra alta resistencia. Con el aumento de la relación de esbeltez, el fallo de resistencia de la sección transversal cambia a fallo de pandeo. En general, las curvas de desplazamiento vertical-histórico constan de tres fases: expansión térmica, acortamiento gradual por compresión y desarrollo rápido de la deflexión antes del fallo. Con el aumento de la relación de esbeltez y la relación de carga, la resistencia al fuego disminuye. Con el aumento del tamaño de la sección transversal y del espesor de la cubierta de hormigón, la resistencia al fuego aumenta. La variación de la distancia entre aros de 80 mm a 150 mm tiene poca influencia en la resistencia al fuego. En comparación con la resistencia al fuego medida, las resistencias al fuego evaluadas por la norma EN 1994-1-2 son inferiores entre un 30 % y un 186 %. La desviación entre la resistencia al fuego evaluada por el DBJ/T 15-81-2011 y el valor medido oscila entre el -49 % y el 16 %. Esto indica que los códigos existentes no son adecuados para el diseño de la resistencia al fuego de los pilares de acero revestidos de hormigón de ultra alta resistencia reforzado con fibra de 120 MPa a temperaturas elevadas y deben ser modificados.

Borgohain y Bhattacharyya (2021) estudiaron *A study on moment–curvature relationships for reinforced concrete beams with varying fire loading conditions* . Las tres etapas asociadas con el procedimiento numérico para evaluar fuego resistencia de las vigas RC, a saber fuego el cálculo de temperatura, el análisis térmico y el análisis de resistencia se modelan utilizando un modelo de elementos finitos (FE). El modelo FE se prepara en el software ABAQUS para estudiar la respuesta de un haz RCC bajo fuego durante las condiciones de carga. Los haces RCC se analizan para

diferentes condiciones finales y fuegos superficies de carga. Inicialmente se mantiene a 25 °C. Luego, la carga uniforme de un tercio de la resistencia a la compresión de hormigón se aplica como una carga de presión en la viga (elemento sólido 3D). Las otras caras del haz RCC tienen condiciones de límite de temperatura. La condición de límite de temperatura se rige por la curva de temperatura-tiempo según ASTM E119. Las relaciones momento-curvatura ($M - k$) se desarrollan para la viga en algunas posiciones críticas de la viga RCC para diversas condiciones finales, así como condiciones de límite de temperatura. Estas relaciones $M - k$ pueden usarse para realizar el análisis de resistencia del miembro de la viga y sacar conclusiones importantes.

Benedict Darwin y Jose Ravindraraj (2018) realizaron el estudio *Behaviour of reinforced concrete slab subjected to fire* (Comportamiento de losas de hormigón armado sometidas a fuego). Resultados: se ha desarrollado un modelo preciso de elementos finitos mediante el uso de ABAQUS para estudiar el comportamiento de la losa de hormigón armado cuando se somete al fuego. En base a las comparaciones entre los resultados obtenidos de los modelos de elementos finitos y los resultados experimentales de losas BRE disponibles, se observó que están en buen acuerdo. La desviación del intervalo medio con la duración del calentamiento se predice con precisión por el modelo de elementos finitos y se observó una discrepancia máxima del 6 % al comparar el modelo de elementos finitos con estudios experimentales. La distribución de temperatura se estudió para diferentes capas de la losa a lo largo de la profundidad de la losa cuando la temperatura cambia de acuerdo con el tiempo y se descubrió que la temperatura disminuye a lo largo de la profundidad de la losa. El papel del ancho de la losa, el papel de la barra de refuerzo y el papel del espesor de la losa también se observaron en este documento y se descubrió que: a. Para una losa con soporte simple, el desplazamiento aumenta cuando aumenta el ancho de la losa; b. El desplazamiento disminuye cuando aumenta el porcentaje de acero en la losa RCC; c. El desplazamiento disminuye cuando aumenta el grosor y d. También se observó el papel de la condición límite y se descubrió que los fijos tienen la temperatura segura más alta y seguida por los rodillos fijos, los rodillos fijos y los rodillos fijos.

Ureña y Alvarado (2018) investigó el *Efecto del tiempo de exposición al fuego en la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado*. Metodología: se utilizó ensayos regulados por la Norma Técnica del Ecuador del Instituto Ecuatoriano de Normalización, para preparar vigas de hormigón armado de sección cuadrada con una dimensión de 150 mm de lado y 750 mm de longitud, además de un recubrimiento de

25 mm. Se le aplicó un reforzamiento transversal y longitudinal con acero corrugado (fluencia 420 MPa). En cuanto a los tiempos de exposición de las vigas al fuego, fueron de 30', 60', 90', 120', 150' y 180', para lo cual se utilizó un horno de fundición, y siendo la temperatura medida con un pirómetro, y observándose los cambios según la secuencia temporal. Principales resultados: se presentó una disminución de la carga máxima y resistencia a la flexión en aproximadamente 50 % frente a temperaturas de 900 °C, alcanzando incluso una disminución o decremento del 90,7 % con temperaturas de 1050 °C, comparativamente frente a las vigas que no estuvieron expuestas al fuego. Asimismo, el valor de la deflexión a la rotura disminuye conforme la temperatura y el tiempo de exposición al fuego se incrementan, presentándose una disminución máxima en un 70,9 % en relación a la deflexión a la rotura media de las vigas que se utilizaron como testigos. También, se obtuvo una resistencia máxima a la flexión de 14,2 MPa a un T.E=0 y una resistencia mínima de 1,3 MPa para un tiempo de exposición al fuego de 180 minutos y con una temperatura que asciende a 1 050 °C, lo que evidenciaría que en este tiempo se describe únicamente el 9,3 % de la resistencia de una viga no expuesta al fuego. Conclusiones: se aprecia una tendencia a la disminución de la resistencia a la flexión y a la carga máxima soportada a medida que aumenta la temperatura, lo que pudiera tener consecuencias de fallas estructurales no deseadas; la resistencia a la flexión disminuye en un 50 % aproximadamente cuando las vigas alcanzan una temperatura de 900 °C y ésta disminuye por debajo del 10 °C a 1050 °C. También se aprecia alteraciones de color en las vigas de hormigón armada y fisuras cuya gravedad se intensifica a medida que la temperatura se eleva. La temperatura que se produce en el concreto, también afecta el acero, el que disminuye su resistencia y cambia su aspecto. La temperatura superficial que se alcanzó en las vigas, durante la exposición al fuego fue de 800 °C a la hora, de 950 °C a las dos horas y de 1050 °C a las tres horas, siendo, la disminución de aproximadamente de 30 % por cada hora de exposición.

Alvarado(2016) realizó el *Estudio del comportamiento del concreto estructural expuesto al fuego*. El objeto del estudio fue establecer los cambios en la resistencia del diseño de $F'c=210 \text{ kg/cm}^2$ y refuerzo de acero de fluencia $f_y=4200 \text{ Kg/cm}^2$ en especímenes de laboratorio. Principales resultados: la preparación de las probetas comprendió agregados pétreos grueso y fino, los elementos sometidos en el ensayo presentaron una baja de la resistencia aproximadamente de un 17 %, derivado de la alteración física de los agregados expuestos a temperaturas superiores a los 750 °C, lo que se tradujo en que el acero y el concreto presentaran el mismo comportamiento que la probeta no expuesta al fuego. Los elementos que se expusieron al fuego durante 1 hora, si presentaron cambios en sus propiedades mecánicas y físicas,

disminuyendo ostensiblemente la resistencia alrededor del 25 % con temperaturas que alcanzaron los 800 °C. La exposición al fuego por un periodo de 1 hora y medios (90 minutos) determinó una variación de disminución de 37 %, siendo evidente la pérdida de la sección de las vigas, ya que este elemento había perdido en el recubrimiento un valor de 10 mm con temperaturas que alcanzan los 900°C. Cuando las vigas se exponen a 2 horas (120 minutos) la disminución de la resistencia es drástica, alrededor de 46 % con alteraciones ostensibles en el comportamiento de los especímenes. Con temperaturas mayores a 1100 °C (180 minutos) la resistencia del material cae hasta un 75 %. Conclusión: la resistencia a flexión en función de la temperatura y la exposición aumenta progresivamente. Se identificaron diferentes niveles de afectación, siendo el peso la propiedad física que mayor variación presentó, la presión interna del agua en los poros durante el calentamiento de los elementos determinó alteraciones en el comportamiento del material.

Alonso y Flor Laguna (2013), realizaron el estudio *Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio*. El propósito de la investigación fue evaluar las estructuras de hormigón expuestas al fuego después de un incendio. Resultados: En este trabajo, se han estudiado tres tipos de estructuras afectadas por incendios de diferente intensidad. La heterogeneidad en la distribución del daño ha sido identificada y determinada la profundidad del concreto afectado. El estudio permite proponer el gradiente de temperatura alcanzado en el hormigón. También se ha determinado la profundidad máxima del concreto que alcanzó la temperatura crítica de 500 °C. Finalmente, se propone un protocolo para la evaluación de estructuras de concreto afectadas por incendios que incluye métodos no destructivos y destructivos y análisis de daños en el micro y macro estructura. Conclusión: el fuego de un incendio provoca diferentes profundidades de daño en el hormigón, lo que depende de la tipología de la estructura de y de las características de la exposición. Es plausible identificar con bastante precisión la isoterma de 500° mediante ensayos sobre la microestructura.

Tomás (2015) indagó sobre la Pérdida de la resistencia mecánica del hormigón paraguayo debido a la acción del fuego. El propósito fue determinar las alteraciones macro-estructurales y de resistencia a la compresión del hormigón elaborado a base de materiales paraguayos, después de ser sometido a temperaturas elevadas. La metodología empleada, se basó en la fabricación de 504 probetas de hormigón con diferentes dosificaciones, siendo variado el tamaño máximo de agregados y las composiciones de agua/cemento. Estas fueron quemadas en un horno para materiales cerámicos, lo que permitió la graduación de diferentes niveles de temperatura.

Posteriormente se distinguieron según grupos, lo que permitió evaluar la recuperación de resistencia y masa según el tiempo, para lo cual se pesaron las probetas y se realizaron los ensayos de comprensión 24 horas después, en diferentes lapsos de tiempo (28 y 56 días), a partir de que las probetas fueron quemadas. Los resultados se expresan en proporciones y no en valores absolutos, hallándose que las dosificaciones que contenían un máximo de agregado de 25mm y preparadas con piedra triturada de cuarta, presentaron una pérdida mayor de resistencia frente a las altas temperaturas que las otras dosificaciones probadas, como las dosificaciones con tamaño máximo de agregado de 12,5 con piedra triturada de quinta. Conclusiones: un hormigón elaborado con un tamaño máximo de árido menor, tiene una menor resistencia frente a la acción del fuego que el hormigón con áridos mayores. La resistencia se pierde en mayor medida cuando el hormigón es enfriado rápidamente con agua, que el hormigón que es enfriado con mayor lentitud. Las relaciones A/C no tuvieron influencia en la resistencia residual, luego de 24 horas después de quemados los cuerpos de prueba, ni tampoco en la recuperación de resistencia, para dosificaciones con volúmenes máximos de agregados iguales.

Hernández (2010) estudió el *efecto que tiene sobre la resistencia a compresión de concreto de resistencia de kg/cm^2* , tras ser expuesto durante determinado periodo de tiempo al fuego, basado en un experimento laboratorial, en el que se diseñó intencionalmente, el concreto, se llenaron los moldes para obtener las probetas para el experimento, se les expuso al fuego. Se obtuvieron los siguientes resultados: la resistencia a compresión de un elemento de concreto de resistencia de diseño 210 kg/cm^2 expuesta a fuego, se afectó en un 19,98 %, además de disminuir su capacidad portante. El concreto bajo las condiciones experimentales, presentó alteraciones en sus propiedades y características, como cambio de color, agrietamientos, disminución de la resistencia a la compresión.

2.1.2. A nivel nacional

Chauca y Cruz (2014) realizó la tesis *Evaluación del concreto $F'c=210 \text{ kg/cm}^2$ a altas temperaturas*. Su objeto fue evaluar el comportamiento del concreto $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a altas temperaturas, para establecer el comportamiento del concreto y su resistencia varía como cuando se somete a altas temperaturas de calor controladas, para lo cual las muestras fueron empleadas probetas. La metodología usada, se basó en habilitar los agregados tanto finos como gruesos provenientes de las canteras Dulong y Besique respectivamente, posteriormente se realizaron 36 sondas con los

agregados seleccionados y uso de cemento portland Tipo I. El diseño de la mezcla para las relaciones $a / c = 0,45, 0,50, 0,60$ fue realizado en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Nacional del Santa, después del diseño se realizó el procedimiento de las sondas de concreto en el laboratorio de dicha universidad. Las dosificaciones de las probetas son de $f'c = 210 \text{ kg / cm}^2$, separados en grupos de 12 por cada dosificación, y a continuación fueron sometidas a diferente al fuego de diferentes temperaturas controladas las cuales son de $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $600 \text{ }^\circ\text{C}$, $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Resultados: las fallas del concreto por causa del fuego, se debe especialmente a la acción contraria entre la pasta, la que tiende a contraerse, en razón a la pérdida de humedad, lo que puede verificarse con el incremento de los diámetros en los cilindros de concreto, así como también del agregado, el que según su composición mineralógica se expande con la elevación de la temperatura, lo que genera descaramiento y agrietamiento, y a su vez un desprendimiento explosivo del concreto. Conclusión: a partir del experimento se concluye que los concretos de mayor resistencia en relación con las temperaturas del fuego, son menos resistentes a temperaturas de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ a $550 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que derivaría de la mayor cantidad de cemento en el elemento estructural, este basa fundamentalmente su resistencia a la calidad y resistencia que proveen los agregados, razón por la que los concretos que tienen menor resistencia ofrecen una resistencia más elevada frente al fuego. El deterioro del concreto es mayor frente a temperaturas de $500 \text{ }^\circ\text{C}$ o más elevadas, asimismo, se subraya que el deterioro se produciría con temperaturas que oscilan entre $250\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$ hacia arriba.

Oncoy (2018) realizó el estudio denominado Comportamiento de la resistencia del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ expuesto a cambios bruscos de temperaturas, debido a la extinción de un incendio. Su objeto fue evaluar frente a la exposición de cambios bruscos de temperatura, cual fue el comportamiento de la resistencia del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$. Principales resultados: se aprecia que cuando se compara la resistencia patrón y la temperatura de 350°C , la disminución de la resistencia no es muy evidente, sin embargo, se produce tal variación. Asimismo, por encima de temperaturas de $350 \text{ }^\circ\text{C}$, si se aprecia una caída de la resistencia, según se incrementa la temperatura. Conclusiones: los efectos que tiene los cambios repentinos de temperatura sobre el concreto tienen son negativos, por cuanto, se observa una reducción progresiva de la resistencia a la compresión, siendo el punto crítico la temperatura de $350 \text{ }^\circ\text{C}$, ya que a partir de este nivel de calor la resistencia varía muy levemente, llegando hasta la mitad de la resistencia inicial u original, convirtiendo el concreto estructural a un tipo de concreto simple a partir de temperaturas de $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Se encontró diferentes valores de resistencia según el grado de temperatura. Se ha

verificado, que la circunstancia en la que ocurre la variación en la resistencia del concreto, es posterior a la exposición al fuego y cuando se ha extinguido éste con agua, lo que provoca fisuras en la probeta, evidenciándose una disminución de la resistencia. Una infraestructura que ha estado expuesta a cambios bruscos de temperatura, es insegura a partir de los 550 °C.

2.2 Bases teóricas

2.2.1. Concreto

El concreto es uno de los materiales de construcción más antiguos y comunes en el mundo, principalmente debido a su bajo costo, disponibilidad, su larga durabilidad y su capacidad para soportar ambientes climáticos extremos. La producción mundial de hormigón es 10 veces mayor que la del acero por tonelaje (Li, 2011). Por otro lado, otros materiales de construcción como el acero y los polímeros son más caros y menos comunes que los materiales de hormigón. El concreto es un material quebradizo que tiene una alta resistencia a la compresión, pero una baja resistencia a la tracción. Por lo tanto, se requiere refuerzo del concreto para permitirle manejar tensiones de tracción (Nowak et al., 1988).

Es un material compuesto que consiste esencialmente en un medio aglutinante, como una mezcla de cemento portland y agua, dentro del cual hay partículas incrustadas o fragmentos de agregado, generalmente una combinación de agregado fino y grueso. El hormigón es, con mucho, el material de construcción más versátil y más utilizada en todo el mundo. Se puede diseñar para satisfacer una amplia gama de especificaciones de rendimiento, a diferencia de otros materiales de construcción, como la piedra natural o el acero, que generalmente deben usarse tal como están. Debido a que la resistencia a la tracción del concreto es mucho menor que su resistencia a la compresión, generalmente se refuerza con barras de acero, en cuyo caso se le conoce como concreto reforzado (ACI Committee 225, 2001).

2.2.2. Efecto del fuego sobre los materiales de construcción

Una consideración de diseño importante para el concreto incluye los efectos del fuego. El comportamiento de las losas de concreto sometidas a condiciones de

incendio es complejo. En un incendio completamente desarrollado, para evitar que el fuego se propague a los pisos superiores, la losa debe transportar y soportar las cargas aplicadas y evitar el colapso durante y después del incendio. La conductividad térmica es la capacidad de un material para conducir calor, y se define como la relación entre el flujo de calor x y el gradiente de temperatura. Representa el flujo uniforme de calor a través del concreto de espesor unitario sobre un área unida sujeta a una diferencia de temperatura unitaria entre las dos caras opuestas (Darwin y Ravindraraj, 2018).

Un método relativamente nuevo para determinar la exposición al fuego utilizado por los ingenieros de protección contra incendios es calcular primero la densidad de la carga de fuego en un compartimento.

Luego, según las condiciones de ventilación y una supuesta fuente de combustión, determine la temperatura del compartimento en varios momentos. Otro factor considerado en el análisis es el efecto de los sistemas activos de protección contra incendios, p. aspersores o bomberos sobre el crecimiento del fuego. El tamaño y el momento del crecimiento del fuego determinado por el análisis del fuego son sensible a los cambios en la carga de combustible a lo largo del tiempo y a las condiciones cambiantes de ventilación durante el incendio.

Este método de análisis de incendios requiere un software especial y una amplia capacitación y se usa solo en edificios muy grandes o inusuales. Una vez que se determina la relación temperatura-tiempo utilizando una curva estándar o del método descrito anteriormente, se puede determinar el efecto del aumento de la temperatura en la estructura. El aumento de la temperatura hace que el agua libre en el concreto cambie de un estado líquido a un estado gaseoso. Este cambio de estado provoca cambios en la velocidad con la que el calor se transmite desde la superficie hacia el interior del componente de hormigón (Darwin y Ravindraraj, 2018).

El aumento de la temperatura provoca una disminución en la resistencia y el módulo de elasticidad para el refuerzo de hormigón y acero. Sin embargo, la velocidad a la que disminuyen la resistencia y el módulo depende de la velocidad de aumento de la temperatura del fuego y de las propiedades aislantes del hormigón. Tenga en cuenta que el hormigón no se quema. El cambio en las propiedades del concreto debido a la alta temperatura depende del tipo de agregado grueso utilizado. El agregado utilizado en el concreto se puede clasificar en tres tipos: carbonato, silíceo y liviano. Los agregados de carbonato incluyen piedra caliza y dolomita. El

agregado silíceo incluye materiales que consisten en sílice e incluyen granito y arenisca. Los agregados livianos generalmente se fabrican calentando lutitas, pizarras o arcilla. La figura 1 muestra el efecto de la alta temperatura sobre la resistencia a la compresión del hormigón. Las muestras representadas en la figura se estresaron al 40 % de su resistencia a la compresión durante el período de calentamiento (Darwin y Ravindraraj, 2018).

Después de alcanzar la temperatura de prueba designada, se aumentó la carga gradualmente hasta que el espécimen falló. La resistencia del concreto que contiene agregado silíceo comienza a disminuir a aproximadamente 800 °F y se reduce a aproximadamente 55 % a 1200 °F. El concreto que contiene agregados livianos y agregados de carbonato retiene la mayor parte de su resistencia a la compresión hasta aproximadamente 1200 °F. El concreto liviano tiene propiedades aislantes, y transmite calor a una velocidad más lenta que el concreto de peso normal con el mismo espesor y, por lo tanto, generalmente proporciona una mayor resistencia al fuego. Además, a altas temperaturas, la fluencia y la relajación del hormigón aumentan significativamente

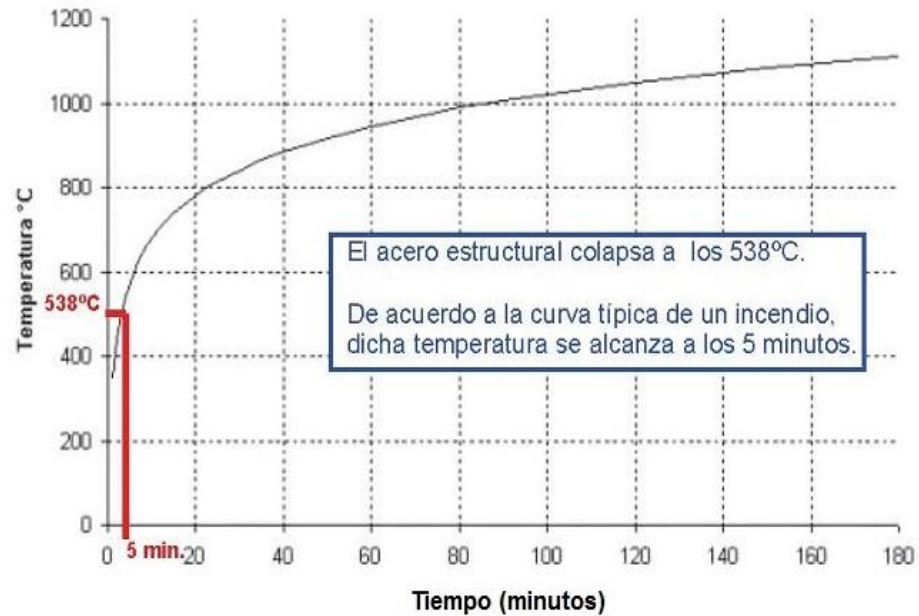
2.2.2.1. Acero

El acero de refuerzo es mucho más sensible a las altas temperaturas que el hormigón. Los aceros laminados en caliente (barras de refuerzo) retienen gran parte de su límite elástico hasta aproximadamente 800 °F, mientras que los aceros estirados en frío (filamentos de pretensado) comienzan a perder resistencia a aproximadamente 500 °F. Por lo tanto, las clasificaciones de resistencia al fuego varían entre pretensado y elementos no pretensados, así como para diferentes tipos de hormigón.

Las propiedades mecánicas del acero son diferentes según se trate de temperaturas a 20 °C, que las que pueda presentar a temperaturas de 200 °C, 400 °C o a 1 000 °C. Cabe mencionar que en ensayos realizados en base a la Norma NFPA251, el acero estructural colapsa al someterlo a una temperatura de 538 °C, la que fácilmente se puede alcanzar en caso de incendio, lo que directamente o indirectamente puede afectar la estructura. En la Figura 1, se presenta la curva de temperatura que se puede alcanzar aproximadamente a los cinco minutos en un incendio tipo (ingemecánica.com, 2020).

Figura 1

Curva normalizada (temperatura-tiempo) de un incendio



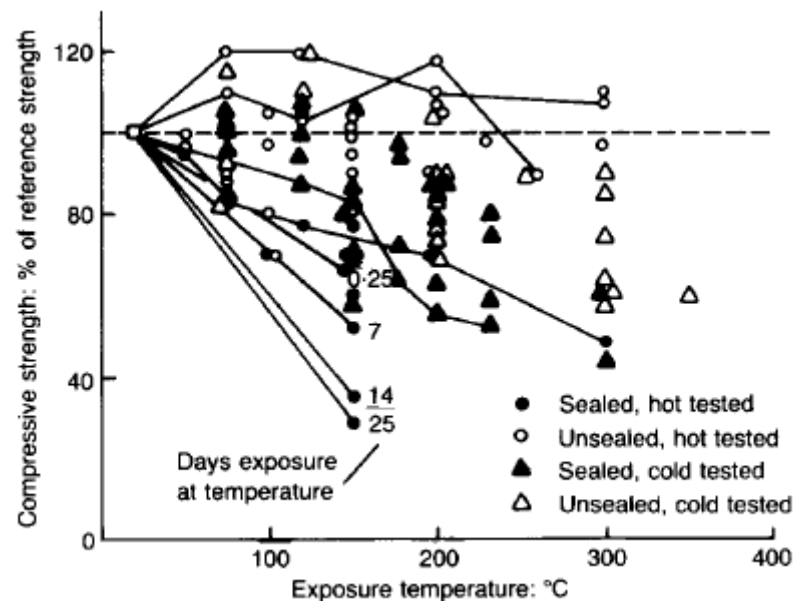
Nota. Adaptado de Ingemecanica.com (2022).

2.2.2.2. Patología del concreto

Las transformaciones físicas y químicas tienen lugar en hormigón durante el primer calentamiento que puede resultar en señales de una pérdida significativa de fuerza. Muchos factores se combinan para influir en la resistencia del hormigón durante el primer calentamiento. Muchos factores se combinan para influir en la resistencia del hormigón durante el primer calentamiento, de modo que las mediciones de la resistencia a la compresión a 150 °C pueden arrojar resultados que oscilan entre un 30 % y un 120 % del valor original. Hasta el 120 % de la resistencia original en frío (Figura 2)

Figura 2

Datos sobre la resistencia a la compresión del hormigón recopilados de varias fuentes



No es de extrañar que los datos de la resistencia del hormigón a temperaturas elevadas tomados de diferentes fuentes difieran sustancialmente, y en varios casos incluso parezcan contradictorios.

Por lo tanto, representar el comportamiento típico de la resistencia del hormigón a altas temperaturas con una curva media puede ser engañoso a menos que se especifiquen las condiciones específicas de la mezcla y del entorno.

También se cree generalmente que la resistencia a la compresión del hormigón no sellado disminuye bruscamente a temperaturas superiores a unos 350°C. La mayoría de los ensayos anteriores a altas temperaturas implicaban el uso de hormigón con áridos silíceos/cemento Portland, que tiende a perder resistencia de forma apreciable por encima de unos 350 °C.

La experiencia con este tipo de hormigón ha influido en las opiniones de algunos investigadores e ingenieros, que tienden a considerar que el hormigón en general tiene un comportamiento similar.

De la revisión histórica, se tiene la evidencia de los últimos 70 años para demostrar que la resistencia a la compresión de la pasta de cemento a base de Portland, y del hormigón, puede mantenerse sin pérdidas significativas para

temperaturas de hasta unos 550 a 600 °C mediante la elección acertada de los materiales.

Lea y Stradling 2,3 exploraron en sus publicaciones clásicas de 1920 a 22 los factores que pueden influir en la resistencia del hormigón a temperaturas elevadas. Probablemente fueron los primeros en apreciar el papel potencialmente destructivo de la incompatibilidad térmica entre el árido y la pasta de cemento. Basándose en un análisis de la tensión elástica de un único grano esférico de arena en expansión rodeado por una capa de pasta de cemento en contracción, concluyeron que "teóricamente el hormigón debería romperse a unos 100 °C", pero también señalaron que "en realidad suele aumentar su resistencia hasta unos 300 °C". Su modelo teórico no podía predecir el comportamiento real porque no tenía en cuenta el gran componente de fluencia térmica transitoria (descubierto cuarenta años después).

La fluencia térmica transitoria tiende a relajar y redistribuir las tensiones de forma significativa en el hormigón, lo que hace que el análisis de las tensiones elásticas de tensiones elásticas en las estructuras calentadas por primera vez.

Lea y Stradling también merecen ser reconocidos por otras importantes ideas y descubrimientos. Reconocieron que la descomposición del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en cal (CaO) y agua durante el calentamiento puede provocar graves daños en el hormigón tras el enfriamiento, ya que la cal se expande al rehidratarse.

También señalaron que el desarrollo de grietas, y la separación entre el agregado y la pasta de cemento, pueden tener lugar durante el enfriamiento, y apreciaron la influencia de la velocidad de enfriamiento. Advertieron que "la transformación cc-p de cuarzo parece ser la causa final de fracaso con la arena como agregado fino", y elaboraron un gráfico que demuestra el efecto térmico reversible de esta transformación. Sin embargo, su hormigón con ladrillo (grueso y fino) no presentaba ninguna pérdida en los resultados de sus especímenes de pasta de cemento Portland indicaron una pérdida significativa de la resistencia a la compresión para los especímenes con arena y con cemento fino. Indicaron una pérdida significativa de la resistencia a la compresión para temperaturas de ensayo superiores a 300 °C en comparación con la resistencia inicial en frío. Es evidente que la inclusión del ladrillo refractario ha tenido un efecto globalmente beneficioso.

Sus ensayos de resistencia a la tracción en probetas de pasta de cemento Portland (figura 3) mostraron de forma interesante que no se redujo en la resistencia residual para temperaturas de hasta 500 °C, aunque el C-S-H habría perdido alrededor del 70 % de su agua ligada químicamente a esta temperatura (figura. 4).

Las probetas parecían tener un mejor comportamiento en tensión que en compresión entre 300 y 500 °C (Figura 3), pero la inclusión de arena ha dado lugar a un peor comportamiento a la tracción de tracción.

Siguiendo a Lea y Stradling, se reconoció que el problema del hidróxido de calcio podría ser el talón de Aquiles del hormigón en aplicaciones de alta temperatura.

Esto ha llevado al cisma entre el uso de los cementos Portland para aplicaciones "ordinarias" y los cementos aluminosos (aunque en estado de enlace cerámico y no hidráulico) para aplicaciones refractarias (el hidróxido de calcio no es un producto de la hidratación de los cementos aluminosos). Sin embargo, la adición de materiales que se combinan con la cal libre, como la puzolana, plantea el problema potencial de la pasta de cemento Portland.

Parece que sólo en algunos países de Europa del Este se ha encontrado un campo útil para la unión del cemento portland en el hormigón refractario. Irónicamente, es el efecto de la temperatura, moderadamente por encima de la ambiental, en presencia de la humedad lo que provoca la conversión y la pérdida de resistencia de la pasta de cemento de alta alúmina cuando está en ligazón hidráulica.

Figura 3

Resistencia a la compresión residual del hormigón de ladrillo

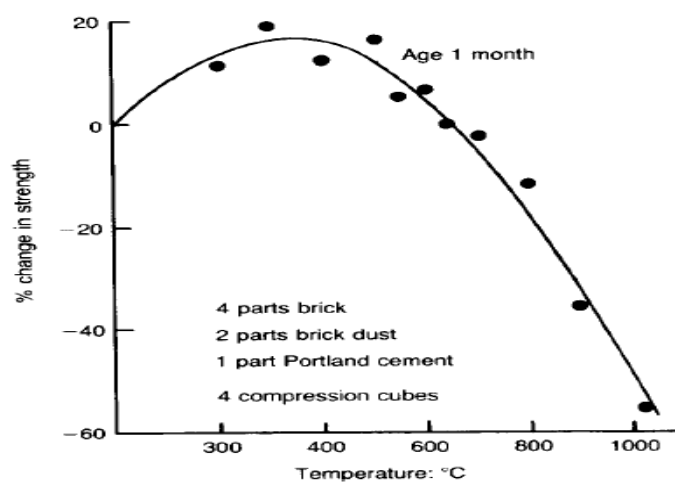


Figura 4

Resistencia residual a la compresión y a la tracción de la pasta de cemento Portland

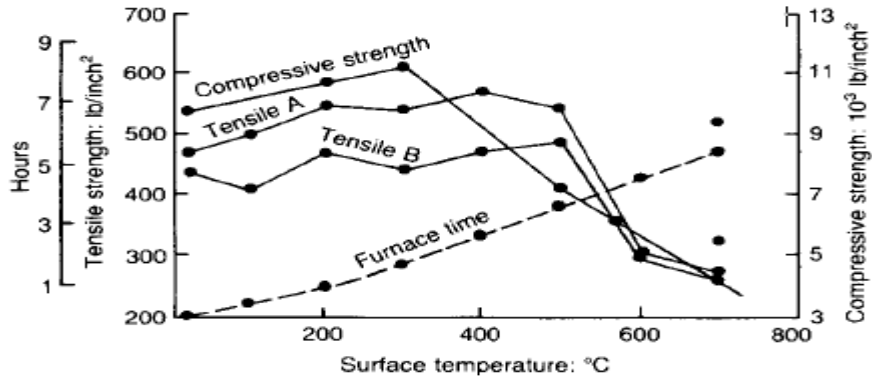


Figura 5

Grado y tasa de conversión de C-S-H en la pasta de cemento idealizada

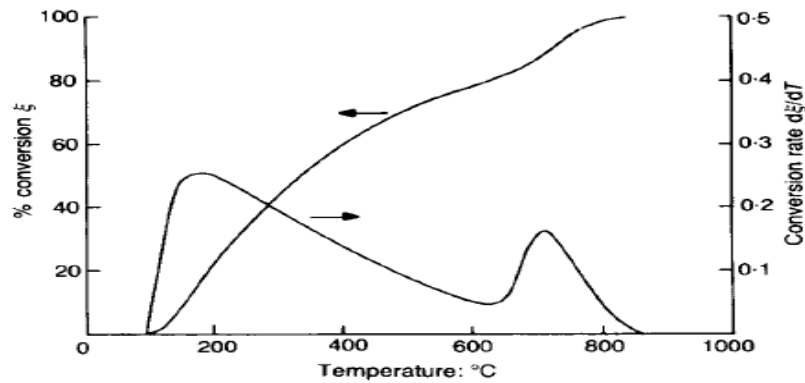
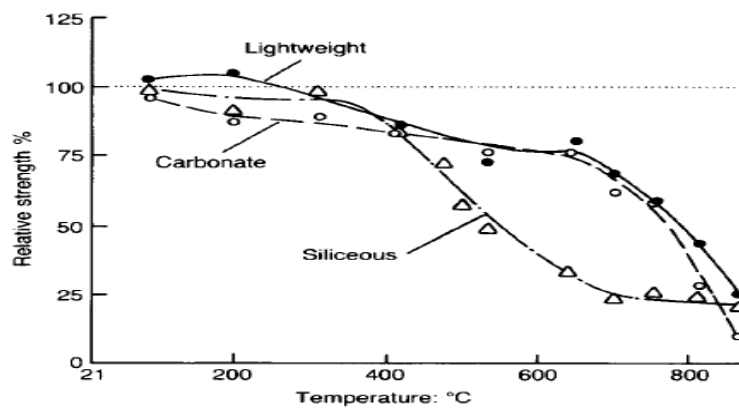


Figura 6

Resistencia a la compresión a temperatura de tres hormigones no sellados calentados sin carga



La disociación del hidróxido de calcio no se produce por debajo de 350 a 400 °C.

Incluso cuando se expone a temperaturas más altas, el problema relativo a la rehidratación de la cal libre aparece después del enfriamiento y no puede, por tanto, explicar la pérdida de resistencia a la temperatura, o inmediatamente después del enfriamiento en ausencia de humedad.

Se necesitaban otras explicaciones, y los investigadores del hormigón volvieron a centrar su atención en los años 50 y 60 en el problema potencial que planteaba la incompatibilidad térmica entre los áridos y la pasta de cemento. Dougill consideró de nuevo la teoría de la incompatibilidad térmica empleando la analogía de la red de Baker para el hormigón⁷ y empleó la expresión "tensiones térmicas parásitas [es decir, entre partículas]". Esto fue antes del desarrollo del método de análisis por elementos finitos. El trabajo de Dougill tampoco consideraba el efecto de la fluencia térmica transitoria, ya que en ese momento no se comprendía del todo. De la fluencia térmica transitoria, ya que en aquella época no se comprendía del todo. A principios de la década de 1970 empezaron a aparecer informes que sugerían que el hormigón enfriado a partir de temperaturas de hasta 400°C no mostraba signos de daño en relación con el hormigón no calentado.

Asimismo, Abrams informó, basándose en el examen petrográfico de muestras de hormigón calentado, de que "los hormigones con agregados de carbonato calentados a 427 °C e inferiores eran similares al hormigón no calentado". Lankard et al⁹ también informaron, en relación con el hormigón de grava, que "las muestras calentadas a 500 °F [es decir, 260 °C] y enfriadas lentamente hasta la temperatura ambiente muestran un patrón de grietas que no difiere materialmente de la muestra curada". Con estos resultados, y tras el descubrimiento de la fluencia térmica transitoria transitorio, los investigadores se centraron en la incompatibilidad de la incompatibilidad térmica y dedicaron su esfuerzo al estudio de la transformación química transformación química en de la pasta de cemento para explicar la importante pérdida de resistencia de resistencia que experimentan algunos hormigones durante el primer calentamiento.

Schneider y Weiss¹⁰ informaron en 1977 que "una serie de cambios y reacciones tienen lugar en las fases de ligante y las reacciones que tienen lugar son degenerativas. Son degenerativas estas reacciones degenerativas se producen

principalmente en la pasta de cemento endurecida , sin excepción se produce un debilitamiento del hormigón proporcional al aumento de la temperatura".

En 1980, Rostasy et al. Informaron de que "las altas temperaturas activan una serie de reacciones en la pasta de cemento pasta de cemento endurecida. Estas reacciones comienzan con la desecación completa del sistema de poros, a la que sigue a la que sigue, con el aumento de la temperatura, la descomposición de los productos de hidratación y la destrucción de la estructura del gel".

Estos estudios han dado lugar a la actual de la resistencia del hormigón a altas temperaturas. Aunque la resistencia del hormigón basado en el 100 % de cemento Portland y áridos silíceos se reduce significativamente por encima de los 350 °C, otros estudios muestran que el uso de diferentes áridos y mezclas de cemento puede dar lugar a un mejor rendimiento. Por ejemplo, Abrams informó en 1971 de que las muestras de hormigón ligero y carbonatado presentaban una mayor resistencia a la compresión en caliente que el hormigón con áridos silíceos cuando se calentaba a 600 °C (Figura 5). Más recientemente, Grainger descubrió que si se empleaba PFA (ceniza de combustible pulverizada) o escoria como sustituto del cemento, se reducían las pérdidas normalmente encontradas en la resistencia a la compresión residual de las probetas de pasta OPC (significativas por encima de 300 °C, Figura 16), y en algunos casos observó un aumento de la resistencia para temperaturas de hasta 550 °C (Figs. 8 y 9).

La pérdida de resistencia, por tanto, no parece estar simplemente con la deshidratación del C-S-H por encima de los 100 °C. La pérdida de agua de hidratación puede no ser un proceso totalmente destructivo desde el punto de vista de la resistencia. Tanto el material (por ejemplo, el tipo de agregado y la mezcla de cemento) como los factores ambientales (por ejemplo, el régimen de temperatura, carga y humedad durante el calentamiento) influyen en la resistencia del hormigón a altas temperaturas.

El calentamiento puede influir significativamente en la resistencia del hormigón a lo largo de su vida útil; es decir, durante las fases iniciales de fraguado y endurecimiento, el ciclo de calor de hidratación, el periodo de curado y en la fase de maduración.

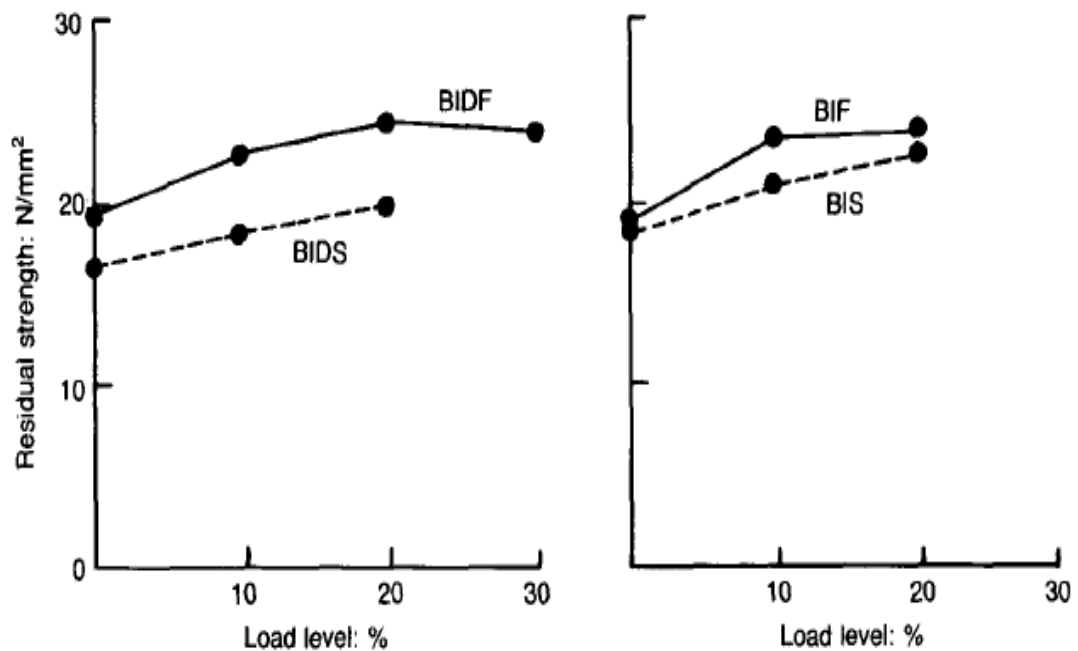
– *Desprendimiento del concreto*

Tasa de calentamiento. El hormigón calentado a 600 °C a la velocidad lenta de 0,2 °C/min dio lugar a una resistencia residual menor que la de una muestra idéntica calentada a la velocidad más rápida del °C/min (Figura).

Dado que las presiones de los poros y las tensiones térmicas no son influencias importantes a esos ritmos de calentamiento, parece que la duración de la temperatura fue el factor significativo, ya que permitió que el espécimen calentado a la velocidad lenta tuviera más tiempo para sufrir transformaciones perjudiciales. Sin embargo, el desprendimiento explosivo del hormigón puede tener lugar a ritmos de calentamiento factoriales.

Figura 7

Efecto de la velocidad de calentamiento sobre la resistencia residual a la compresión del hormigón basáltico tras el enfriamiento desde 600 °C ($F=1^{\circ}\text{C}/\text{MIN}$, $s=0,2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $D=\text{pre-secado a } 105^{\circ}\text{C}$)



Nota. Adaptado de Rostasy 1980.

Tabla 1

Mecanismos que influyen en la resistencia del hormigón no sellado durante el primer calentamiento (no se indica la importancia relativa indicada)

Mecanismo	Rango de temperatura aproximado: °C	Ganancia o pérdida en la resistencia
Inestabilidad térmica de los áridos	Dependiente de los agregados	L
Incompatibilidad térmica y tensiones parásitas (relajado por la fluencia transitoria)	20-600 †	L
Cambios en la resistencia de la capa de adherencia	20	G o L*
Reacción química entre el árido y la pasta	20-200 †	G o L*
Aumento de la temperatura del sistema agua-gel	20-200§	L
Hidratación acelerada	20-90§	G
Hidratación acelerada	90-200§	G o L (dependiente de la relación C/S)
Pérdida de agua libre	20-200§	G
Pérdida de agua ligada físicamente		
Aumento de la tensión superficial	80-200§	G
Reacciones hidrotérmicas	100-200§	G o L (depende de la relación C/S)
Tensiones de presión de poros	100-200§	L
Tensiones de contracción (relajadas por fluencia transitoria)	20-200§	L
Cambios en el enlace químico en la deshidratación del C-S-H	100-300 †	G (?)
Disminución de la porosidad	20-80 †	G (?)
Aumento de la porosidad	?80-600 †	L †
Disociación del Ca(OH) ₂	390-450	L (quizás insignificante)
Efecto térmico	20-600 † (fusión a 1350°C)	L †
2ª etapa de ruptura de los enlaces químicos	600-750	L
Unión de la cerámica		Resistencia en caliente insignificante pero mejora la resistencia en frío
	800	
Agrietamiento por estrés térmico	20	L

Nota. *Depende de los componentes de la mezcla. †Más pronunciada por encima de 300 °C debido al agrietamiento alrededor del Ca(OH)₂, y de los granos de cemento. ‡Significativo por encima de 600 °C. §Se supone que la humedad se pierde a 200 °C. ¶ Aunque las tensiones se relajan por la fluencia transitoria, pueden producirse desprendimientos explosivos a altas velocidades de calentamiento.

2.2.2 Componentes del concreto

El concreto es una mezcla heterogénea que consta de los siguientes componentes:

Agregado: forma aproximadamente el 75 % del volumen de concreto. Los agregados pueden ser arena o roca triturada o escombros de hormigón reciclado de otros materiales (Tamtawi, 2015).

Cemento: comprende alrededor de 7-14 % de hormigón (Fahl, 2009). El propósito del cemento es unir el concreto. La Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) clasifica el cemento Portland en cinco tipos.

- **Cemento tipo I:** este es el cemento Portland estándar de uso general y el tipo más común de cemento. Se usa cuando la exposición al sulfato es mínima (Tamtawi, 2015).
- **Cementos Tipo II:** utilizados para concreto que puede estar expuesto a un bajo contenido de sulfato, como los suelos que contienen una baja concentración de sulfato (Tamtawi, 2015).
- **Cementos Tipo III:** utilizados para aplicaciones que requieren resistencia a una edad temprana (Tamtawi, 2015).
- **Cementos Tipo IV:** utilizados para aplicaciones que requieren un tiempo de fraguado rápido, como en presas y lugares que requieren grandes cantidades de concreto (Tamtawi, 2015).
- **Cementos Tipo V:** estos son los cementos Portland de alta resistencia a los sulfatos, se utilizan en aplicaciones donde el concreto está expuesto a una alta concentración de sulfato, como el agua de alcantarillado (Tamtawi, 2015).

Agua

Cuanto mayor es el contenido de agua en el hormigón, mayor es la trabajabilidad del hormigón, ya que el agua hace que el hormigón sea más delgado. Cuando se agrega agua al concreto, se produce una reacción de hidratación del concreto y endurecimiento posterior. El agua debe tener un valor de pH en el rango de 6-8. El agua no debe contener sal si se usa para hormigón armado, ya que puede corroer el material de acero de refuerzo (Tamtawi, 2015).

Aditivos

Se utilizan muchos aditivos para aumentar la trabajabilidad del hormigón. Se agregan en proporciones que no exceden el 2 % del contenido de cemento, generalmente del 1 al 2 %. Cabe señalar que a medida que aumenta el contenido de aditivos, disminuye la resistencia del hormigón (Tamtawi, 2015).

Aditivos superplastificantes

Son utilizados para mejorar la trabajabilidad del concreto y reducir la cantidad de agua requerida para la mezcla de concreto.

Aditivos aceleradores

Estos aditivos se usan para acortar el tiempo de fraguado y aumentar la resistencia temprana del concreto (Fahl, 2009). Los aditivos aceleradores se usan en ambientes de clima frío que hacen que se demore el tiempo de fraguado del concreto.

El cloruro de calcio (CaCl_2) es el material más utilizado como aditivo acelerador. Una desventaja de estos aditivos es que pueden causar corrosión en el acero de refuerzo (los aditivos de cloruro en particular) y reducir la resistencia del concreto.

Aditivos retardantes

Estos aditivos se agregan al concreto para retrasar el tiempo de fraguado del concreto. Se usan en entornos de clima cálido, o cuando el concreto tiene que ser transportado para un sitio de construcción que está lejos del lugar de la mezcla. Los aditivos retardantes también mejoran la trabajabilidad del hormigón. Uno de los retardadores más comunes es el azúcar (Tamtawi, 2015).

2.2.3. Respuesta física y química al fuego

El hormigón y el fuego tienen una interacción compleja, debido a la composición del hormigón y las condiciones térmicas extremas que a menudo se encuentran en el fuego. El concreto está lejos de ser un material homogéneo, que

consiste en un compuesto de gel de cemento, agregado y, con frecuencia, acero (u otro) refuerzo. Cada uno de estos componentes tiene una reacción diferente a las exposiciones térmicas en sí mismo, y el comportamiento del sistema compuesto en el fuego no es fácil de definir o modelar (Tamtawi, 2015).

Además, la baja conductividad térmica del hormigón impide el uso de la simplificación del "parámetro agrupado" comúnmente adoptada en el análisis térmico de estructuras metálicas como el acero, donde se ignoran los gradientes térmicos dentro del sólido. Es común que los códigos de diseño; por ejemplo, BS 8110 (BSI, 2018) pasen por alto las complejidades de las distribuciones de temperatura simplemente especificando una cierta profundidad de cubierta de concreto a las barras de refuerzo en una estructura compuesta, proporcionando un efecto aislante sobre el acero.

Las incertidumbres en los detalles de la respuesta térmica son sustituidas por pruebas exhaustivas, basadas principalmente en curvas de calentamiento estándar y presentado como un tiempo de "resistencia al fuego", típicamente una función de espesor o cubierta, para diferentes tipos de concreto. Hay una serie de cambios físicos y químicos que ocurren en el concreto sometido al calor. Algunos de estos son reversibles al enfriarse, pero otros no son reversibles y pueden debilitar significativamente la estructura de concreto después de un incendio. La mayoría de los hormigones porosos contienen una cierta cantidad de agua líquida. Esto comienza a vaporizarse si la temperatura supera los 100 °C, lo que generalmente provoca una acumulación de presión dentro del concreto. En la práctica, el rango de temperatura de ebullición tiende a extenderse de 100 a aproximadamente 140 °C debido a los efectos de la presión (Beard et al., 2005) (Khoury, 2000)

Más allá de la meseta de humedad, cuando la temperatura alcanza aproximadamente 400 °C, el hidróxido de calcio en el cemento comenzará a deshidratarse, generando más vapor de agua y también provocando una reducción significativa en la resistencia física del material. Otros cambios pueden ocurrir en el agregado a temperaturas más altas. Por ejemplo, los agregados a base de cuarzo aumentan de volumen, debido a una transformación mineral, a aproximadamente 575 °C, mientras que los agregados de piedra caliza comenzarán a descomponerse a aproximadamente 800 °C. En forma aislada, la respuesta térmica del agregado en sí puede ser directa, pero la respuesta general del concreto debido a los cambios en el agregado puede ser muy diferente. Por ejemplo, la expansión diferencial entre el

agregado y la matriz de cemento puede causar grietas y desprendimientos (I. Fletcher et al., 2006; Fletcher et al., 2007)

En combinación, estos cambios físicos y químicos en el concreto tendrán el efecto de reducir la resistencia a la compresión del material. En la práctica, las temperaturas críticas para una reducción significativa de la resistencia dependen en gran medida del tipo de agregado, los valores aproximados son: arena de concreto liviano (650 °C), carbonato (660 °C) y silíceo (430 °C). A temperaturas más bajas, la influencia de la temperatura en la resistencia también puede ser muy variable, dependiendo tanto de la composición como de los factores ambientales, como el grado en que el hormigón está "sellado" debido a la humedad (Khoury, 2000).

Sin embargo, como se señaló anteriormente, todas estas relaciones de temperatura proporcionan solo enlaces indirectos al rendimiento de resistencia al fuego de las estructuras de hormigón debido a los gradientes de temperatura empinados que se exhiben típicamente dentro de la profundidad del material. La falla estructural a menudo solo ocurre cuando la resistencia efectiva de cualquier refuerzo de acero se pierde por calentamiento. (Fletcher et al., 2007)

Después de un incendio, los cambios en las propiedades estructurales del concreto no se revierten, a diferencia de las estructuras de acero donde el enfriamiento a menudo restaurará el material efectivamente a su estado original. Esto se debe a las transformaciones irreversibles en las propiedades físicas y químicas del cemento mismo. Dichos cambios pueden usarse como indicadores de temperaturas máximas de exposición, en base al examen posterior al incendio del estado de la superficie del concreto (Alarcon-Ruiz et al., 2005) (Placido, 1980). Cabe señalar que, en algunas circunstancias, una estructura de hormigón puede debilitarse considerablemente después de un incendio, incluso si no hay daños visibles.

2.2.4. Desprendimiento explosivo

Una de las características de comportamiento más complejas y, por lo tanto, poco conocidas en la reacción del hormigón a altas temperaturas o incendios es el fenómeno de "desprendimiento explosivo" (Khoury, 2000) Este es el proceso por el cual los trozos de hormigón se desprenden y son expulsados de la superficie de la losa de hormigón, a menudo a velocidades bastante altas.

A menudo se supone que este proceso ocurre solo a altas temperaturas, pero también se ha observado en las primeras etapas de un incendio y a temperaturas tan bajas como 200 ° C (Gawin et al., 2007). Si es grave, el desconchado puede tener un efecto perjudicial sobre la resistencia de las estructuras de hormigón armado, debido a un mayor calentamiento del refuerzo de acero (Fletcher et al., 2006).

Otro impacto significativo del desprendimiento sobre la resistencia física de las estructuras se produce a través de la reducción de la sección transversal del concreto disponible para soportar la carga impuesta, aumentando la tensión en las áreas restantes de concreto. Esto puede ser importante, ya que el desprendimiento puede manifestarse a temperaturas relativamente bajas, antes de que se produzca cualquier otro efecto negativo del calentamiento sobre la resistencia del hormigón. En general, se cree que el mecanismo que conduce al desprendimiento implica grandes tensiones térmicas resultantes del calentamiento rápido y / o grandes acumulaciones de presión dentro del concreto poroso, que la estructura del concreto no puede disiparse debido a la evaporación de la humedad.

Estas acciones conducen al desarrollo de fracturas y la expulsión de trozos de material de las capas superficiales (Fletcher et al., 2007). Más específicamente, los requisitos previos principales para el desconchado se han establecido como: contenido de humedad de al menos 2 % y gradientes de temperatura pronunciados dentro del material. Para este último, un valor de 5K / mm es un mínimo aproximado y a 7-8K / mm es muy probable el desprendimiento (Hasan et al., 2018).

Los gradientes de temperatura dependen no solo de las temperaturas de la fase gaseosa sino también de las tasas de calentamiento, por lo que no es posible definir un umbral de temperatura per se; más bien, se puede definir un límite equivalente en términos de tasas de calentamiento, que es del orden de 3K / min. Sin embargo, estos valores críticos para el desprendimiento también pueden verse afectados por el tipo de hormigón, incluida la resistencia del material y la presencia de fibras , como se describe a continuación (Khoury, 2000).

Recientemente se ha realizado una gran cantidad de investigaciones sobre el potencial para la inclusión de varios tipos de fibras en el concreto para mitigar los efectos del desprendimiento (Khoury, 2000)(Kalifa et al., 2001), han incluido fibras de polipropileno en la matriz de hormigón. La teoría principal es que cuando el

concreto se somete a calor, el polipropileno se derrite, creando vías dentro del material para el escape de vapor de agua y cualquier otro producto gaseoso, lo que reducirá la acumulación de presión. Se ha debatido si las fibras monofilamento o multifilamento pueden mitigar mejor el desprendimiento (Shuttleworth, 2001).

Recientemente se ha utilizado cada vez más el hormigón de "alta resistencia" (o "alto rendimiento"). Este material generalmente tiene una resistencia a la compresión considerablemente mayor que el concreto de resistencia normal, pero es notablemente menos poroso y absorbente de humedad. Si bien esto generalmente reduce el contenido de agua del cemento, también es más difícil que escape el vapor de agua durante el calentamiento. A veces se argumenta que el concreto de alta resistencia es más propenso a astillarse, debido a su menor porosidad y, por lo tanto, a la mayor probabilidad de que se desarrolle una alta presión dentro de la estructura del concreto (Hertz y Sørensen, 2005).

Sin embargo, otra investigación reciente ha demostrado que este no es necesariamente el caso, con algunas pruebas que muestran una mayor resistencia al desprendimiento en estos materiales (Ali et al., 2004) atribuible al hecho de que sus propiedades de tracción mejoradas pueden contrarrestar efectivamente el aumento de las fuerzas que promueven una tendencia a descascarado

2.2.5. Agrietamiento

En general, se cree que los procesos que conducen al agrietamiento son similares a los que generan descascarado. La expansión térmica y la deshidratación del hormigón debido al calentamiento pueden conducir a la formación de fisuras en el hormigón en lugar de, o además de, desprendimientos explosivos. Estas fisuras pueden proporcionar vías para el calentamiento directo de las barras de refuerzo, posiblemente provocando más estrés térmico y más grietas. Bajo ciertas circunstancias, las grietas pueden proporcionar vías para que el fuego se extienda entre compartimentos adyacentes (Fletcher et al., 2007).

Geogali y Tsakiridis (Georgali y Tsakiridis, 2005) hicieron un estudio de caso de grietas en un edificio de concreto sometido a fuego, con énfasis particular en las profundidades a las cuales las grietas penetran el concreto. Se descubrió que la profundidad de penetración está relacionada con la temperatura del fuego y que, en general, las grietas se extendían bastante profundamente en el elemento de hormigón.

El daño mayor se limitó a la superficie cercana al origen del incendio, pero la naturaleza del agrietamiento y la decoloración del concreto señalaron que el concreto alrededor del refuerzo alcanzó los 700 ° C. Las grietas que se extendieron más de 30 mm en la profundidad de la estructura se atribuyeron a un corto ciclo de calentamiento / enfriamiento debido a la extinción del fuego. Debe destacarse la importancia de las condiciones de tensión en el concreto. Las cargas compresivas que pueden surgir de la expansión térmica pueden ser muy beneficiosas para compactar el material y suprimir la formación de grietas (Khoury, 2000); Esto da como resultado una degradación mucho menor de la resistencia a la compresión y el módulo elástico que en las muestras con carga reducida.

2.2.6. Uso de materiales de apoyo

Se han realizado investigaciones sobre los efectos de envolver un miembro de concreto en una variedad de telas para evaluar cualquier mejora de la resistencia al desprendimiento que esto pueda proporcionar (Bisby et al., 2005).

Se descubrió que un tejido metálico tenía un efecto beneficioso sobre la resistencia al desprendimiento, con menos efecto utilizando telas de fibra de carbono y fibra de vidrio. Se observó que todas las pruebas tenían menos o ningún desprendimiento cuando se agregaron fibras de polipropileno a la mezcla de concreto (Han et al., 2005).

La tela de acero reduce el desprendimiento al proporcionar presión de confinamiento lateral al miembro de concreto que es mayor que la presión de vapor interna que causa el desprendimiento. El efecto reducido de las telas de carbono y fibra de vidrio se debe a que la resistencia de la unión de estos materiales se reduce a altas temperaturas y la reducción correspondiente de la capacidad de la tela para proporcionar confinamiento. No parece que la técnica induzca grietas más profundas dentro de la estructura (Fletcher et al., 2007).

2.2.7. Desempeño del acero y refuerzo frente a la exposición de fuego

El desempeño del acero durante un incendio se entiende en mayor medida que el desempeño del concreto, y la resistencia del acero a una temperatura dada

puede predecirse con una confianza razonable. En general, se sostiene que las barras de refuerzo de acero deben protegerse de la exposición a temperaturas superiores a 250-300 ° C (Fletcher et al., 2007).

Esto se debe al hecho de que se sabe que los aceros con bajo contenido de C exhiben "fragilidad azul" entre 200 y 300 ° C. El hormigón y el acero exhiben una expansión térmica similar a temperaturas de hasta 400 ° C; sin embargo, temperaturas más altas resultarán en una expansión significativa del acero en comparación con el concreto y, si se alcanzan temperaturas del orden de 700 ° C, la capacidad de carga del refuerzo de acero se reducirá a aproximadamente el 20 % de su valor de diseño (Fletcher et al., 2007).

2.2.8. Estructuras compuestas

Una forma común de construcción para losas de piso se conoce como "construcción compuesta". En este método, una losa de hormigón se proyecta sobre vigas de acero. El encofrado para la losa es una lámina de metal perfilada, conocida como cubierta, que se extiende entre las vigas. Los "espárragos de corte" están soldados a la parte superior de las vigas de acero, a través de esta plataforma perfilada. Estos postes permiten que se forme una unión mecánica entre el concreto y el miembro de acero, y por lo tanto permiten que la viga y la losa actúen como un solo elemento con una mayor resistencia. La plataforma de acero se deja permanentemente en su lugar después de que el concreto se haya fundido. El refuerzo de acero generalmente se agrega sobre la plataforma perfilada (Fletcher et al., 2007).

2.2.9. Resistencia al fuego

Al igual que otros miembros estructurales, la evaluación del rendimiento de los elementos de hormigón normalmente se realiza con respecto a una curva de calentamiento estándar desarrollada en un horno de prueba de resistencia al fuego (Drysdale, 2011) (Buchanan y Kwabena, 2017).

Este régimen de calentamiento se define únicamente en términos de una curva de temperatura-tiempo, originalmente concebida como representativa del

desarrollo de un incendio en una sala de estar estándar, y expresada en una forma esencialmente idéntica en una serie de estándares, tanto internacionalmente, es decir, el ISO -834 curva de fuego (ISO, 1975) y a nivel nacional, es decir, la curva BS-476 en el Reino Unido, ASTM E-119 en los Estados Unidos.

Existen otras curvas de fuego estándar que tienen la intención de replicar los desarrollos de temperatura en otros escenarios supuestos. Por ejemplo, la "curva de hidrocarburos"(Shipp, 1985) se usa comúnmente en la industria de procesamiento químico para representar el desarrollo de un incendio que involucra combustibles líquidos. Esta curva tiene una fase de crecimiento mucho más rápida y se alcanzan altas temperaturas (más de 1000 ° C) dentro de los primeros 20 minutos del incendio.

Si bien estos métodos de prueba tienen la ventaja de proporcionar un grado de estandarización de los regímenes de calentamiento, sus limitaciones intrínsecas son ampliamente reconocidas (Drysdale, 2011) (Buchanan y Kwabena, 2017).

En primer lugar, aunque el desarrollo de la temperatura se estandariza mediante el control del horno, el impacto real del calentamiento en la estructura depende de otros factores variables, incluidas las propiedades ópticas de los gases del horno y la respuesta térmica de la estructura (Welch et al., 2007) .

En segundo lugar, los resultados de la prueba proporcionan muy poca información sobre el rendimiento probable de los elementos estructurales in situ, es decir, teniendo en cuenta la interacción entre las diferentes partes de una estructura, los efectos de la restricción, etcétera (Welch et al., 2007) .

En tercer lugar, si bien puede haber gradientes en exposiciones térmicas incluso dentro del entorno de "calentamiento uniforme" de los hornos de resistencia al fuego, incluso los gradientes más pronunciados son comunes en los incendios de compartimentos totalmente desarrollados (Welch et al., 2007) .

Los efectos sobre el rendimiento estructural de las no uniformidades espaciales en la calefacción son poco conocidos, aunque desde hace tiempo se reconoce que el desprendimiento puede estar relacionado con estas condiciones. Finalmente, las curvas estándar no intentan explicar la importante etapa de enfriamiento posterior al incendio de un incendio (Franssen, 2005)

La importancia potencial del enfriamiento en el desempeño del concreto se demostró durante una prueba de algunos elementos estructurales de concreto en la galería de pruebas de Hagerbach, Suiza (Wetzing, 2001).

Durante la prueba, una muestra de concreto resistió temperaturas de hasta 1600 ° C durante dos horas sin fallas, pero media hora después de la fase de enfriamiento, la muestra colapsó explosivamente. Actualmente no se sabe, en la mayoría de los casos, cuánto astillamiento exhibido en un incendio real en un edificio tiene lugar como resultado del enfriamiento en lugar del calentamiento (Fletcher et al., 2007).

2.2.10. Clasificación de resistencia al fuego

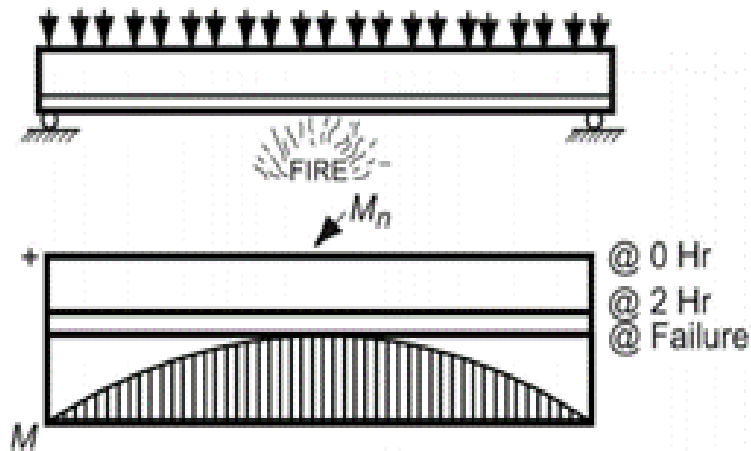
La resistencia al fuego se puede definir como la capacidad de los elementos estructurales para resistir el fuego o para protegerlo (2). Esto incluye la capacidad de limitar un incendio o continuar realizando una función estructural determinada, o ambas. El índice de resistencia al fuego (o índice de incendio) se define como la duración de tiempo que un ensamblaje (techo, piso, viga, pared o columna) puede soportar un "incendio estándar" como se define en ASTM E 119 (3).

2.2.10.1. Resistencia al fuego de estructuras

Para poder comprender el comportamiento del fuego, es vital estudiar cómo se produce, se desarrolla y se extingue, ya que los escenarios son diferentes, por cuanto incluye dimensiones, configuración y compartimentación disímil.

En la Figura 8, se muestra el efecto del fuego sobre la resistencia de una losa de hormigón armado con soporte simple. Si el lado inferior de la losa se somete al fuego, la resistencia del hormigón y el refuerzo el acero disminuirá a medida que aumente la temperatura. Sin embargo, puede tomar hasta tres horas para que el calor penetre a través de la cubierta de concreto hasta el refuerzo de acero. A medida que disminuye la resistencia del refuerzo de acero, disminuye la capacidad de momento de la losa.

Cuando la capacidad de momento de la losa se reduce a la magnitud del momento causado por la carga aplicada, se producirá un colapso de flexión. Es importante señalar que la duración del fuego hasta el refuerzo el acero alcanza la resistencia crítica depende de la protección al refuerzo provisto por la cubierta de concreto

Figura 8*Prueba de fuego estándar ASTM E119*

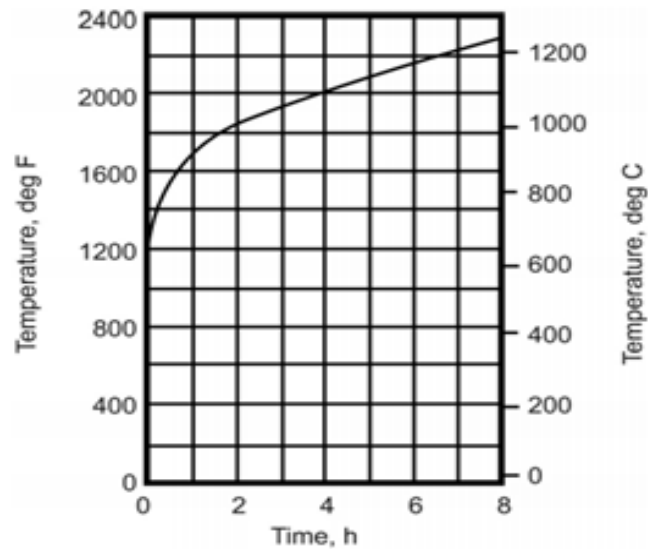
Nota. Adaptado de ASTM E119

Las propiedades de resistencia al fuego de los componentes del edificio y los ensamblajes estructurales se determinan mediante métodos de prueba de fuego.

El procedimiento de prueba más utilizado y aceptado a nivel nacional es el desarrollado por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM). Está designado como ASTM E 119, Métodos estándar de pruebas de fuego de construcción de edificios y materiales.

Se realiza una prueba de fuego estándar colocando un conjunto de tamaño completo en un horno de prueba. Las muestras de piso y techo están expuestas a un fuego controlado desde abajo, las vigas están expuestas desde el fondo y los lados, las paredes desde un lado y las columnas están expuestas al fuego desde todos los lados.

La temperatura se eleva en el horno durante un período de tiempo determinado de acuerdo con la curva estándar ASTM E 119 de tiempo-temperatura que se muestra en la Figura 9.

Figura 9*Curva de temperatura*

Esta relación tiempo-temperatura especificada proporciona una temperatura del horno de 1000 °C.

F a los cinco minutos del comienzo de la prueba, 1300 °C

F a los 10 minutos, 1700 °C

F a una hora,

1850 °C

F a las dos horas, y 2000 °C

F a las cuatro horas. Se alcanza el final de la prueba y el fuego

La resistencia del espécimen se establece cuando se produce una de las siguientes condiciones:

- a) Para paredes, pisos y conjuntos de techos, la temperatura de la superficie no expuesta se eleva

Promedio de 150 °C

F por encima de su temperatura inicial de 325 °C

F en cualquier lugar.

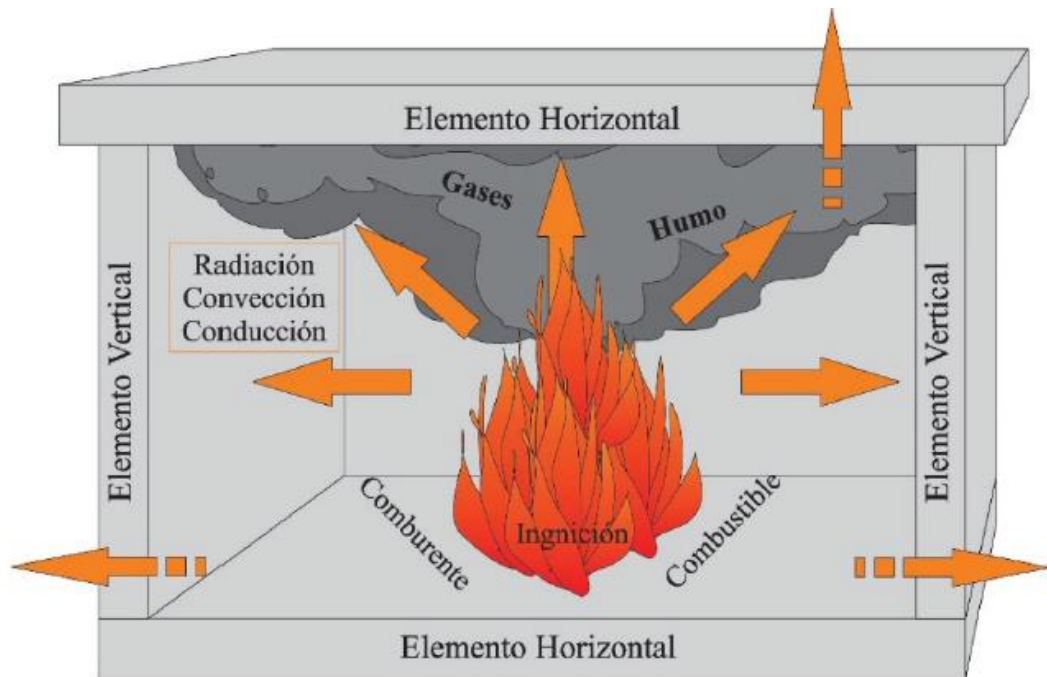
Además, las paredes que alcanzan una clasificación de clasificación de una hora o más deben resistir los efectos de impacto, erosión y enfriamiento de una prueba de vapor de manguera.

- b) Los desechos de algodón colocados en el lado no expuesto de una pared, piso o sistema de techo se encienden a través de grietas o fisuras que se desarrollan en la muestra durante la prueba.
- c) El conjunto de prueba no puede sostener la carga de servicio aplicada.
- d) Para ciertos pisos, techos y vigas restringidos y no restringidos, la temperatura del acero de refuerzo aumenta a 1100 °F.

Los requisitos completos de ASTM E 119 y las condiciones de aceptación son mucho más detallados que los resumidos anteriormente. La experiencia muestra que los conjuntos y paredes de piso / techo de concreto generalmente fallan por transmisión de calor (elemento 1); y columnas y vigas por no sostener las cargas aplicadas (elemento 3), o por el refuerzo de la viga que no cumple con el criterio de temperatura (elemento 4).

Asimismo, el aspecto de compartimentación, denominado también fuego compartamental es fundamental en una edificación, por lo que algunos, consideran que este elemento en una estructura es ideal, ya que su propósito, no solo es separar funciones de las arras, sino también de servir de contención al fuego, debido a sus características separadores (muros, entrepisos), escenario crítico para las variables verticales como los muros y las columnas y los horizontales que son las vigas y las losas.

Según Ruvalcaba y Covarrubias (2017) , resulta importante el diseño para que se produzca el menor daño y conserven además sus propiedades de aislamiento en contra de la extensión del fuego.

Figura 10*Elemento horizontal y vertical de fuego compartamental*

Nota. Obtenido de Ruvalcaba y Covarrubias (2017)

Es importante tener en cuenta, que en el fuego compartamental la transferencia del calor se produce a partir de tres aspectos (a) radiación, (b) convección y (c) conducción, debido a la presencia de gases con un perfil variable de temperatura desde la parte superior a la inferior, que proyecta a llenar el compartimiento alejado de la zona de fuego (Zhang et al., 2012).

2.3. Definición de términos

2.3.1. Resistencia

Dentro de la ingeniería la resistencia de un elemento cualquiera se define como la capacidad para soportar esfuerzos y fuerzas aplicadas sin llegar al estado de rotura, adquiriendo deformaciones temporales o permanentes (Ottazzi, 2004).

2.3.2. Resistencia del concreto

La resistencia del concreto depende de la calidad de la pasta de cemento y de las características de los agregados pétreos. La primera es controlada por la relación agua - cemento, mientras que las propiedades de los agregados generalmente no pueden ser manipuladas ya que se utilizan habitualmente aquellos que están disponibles cerca de la construcción (Solís et al., 2012)

2.3.3. Ductilidad

La ductilidad es una de las propiedades más importantes en el comportamiento de las edificaciones de concreto armado ante sismos severos y poco frecuentes. El comportamiento dúctil de una sección de concreto armado se logra principalmente por la ductilidad del acero de refuerzo, permitiendo alcanzar grandes deformaciones luego de superar el límite de elasticidad. Caso contrario sucede con el concreto, el cual es un material frágil y con poca resistencia a la tracción. (Wendel y Keller, 2013)

2.3.4. Cambios de temperatura y humedad

Los cambios de temperatura producen variaciones de volumen en el concreto, ya que el concreto tiende a dilatarse cuando aumenta su temperatura y tiende a contraerse cuando disminuye su temperatura. Del mismo modo sucede con los cambios en el contenido de humedad en el concreto, el concreto tiende a expandirse cuando aumenta su contenido de humedad y tiende a contraerse cuando disminuye su contenido de humedad. (Helene, 2003).

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación

El tipo de investigación tiene un enfoque cuantitativo, mientras que el diseño es experimental, unifactorial con siete niveles que corresponde a las temperaturas de 100 °C; 200 °C; 300 °C; 400 °C; 500 °C; 600 °C y 750 °C. El diseño de la investigación corresponde al diseño experimental prospectivo.

Así mismo el nivel de investigación es explicativo, ya que se manipula la variable independiente como causa del fenómeno bajo estudio para determinar los efectos en la variable dependiente

3.2 Acciones y actividades

- *Observación*, que se vale de la percepción directa de los fenómenos y variaciones experimentales
- *Análisis documental*: mediante el examen cualitativo de la bitácora de los sucesos que ocurren durante el experimento, a fin de consignar los valores de la resistencia a la comprensión del concreto en cada una de las réplicas experimentales y su referente teórico.
- *Técnica experimental* : disponer las condiciones experimentales bajo una situación de control para obtener respuestas a reacciones específicas (Abanto, 2015).
-

3.3. Instrumentos

Ficha de recolección de datos

Nombre Ficha de recolección de datos

Autor : Luis Colque y Jose Navarro

Año : 2019

Elementos consignados: Modelo, tiempo de exposición, temperatura °C, edad (días), peso inicial, peso final, Carga Kn, Carga Kg, Módulo de rotura kilogramos, Def. Final (mm)

Validación : Prueba de expertos

3.4. Población y muestra

Población: réplicas

Muestra: número de réplicas (n=24 réplicas):

Unidad de análisis: pieza de concreto armado con las siguientes características:

Dimensión L= 180 cm, b= 15 cm, h= 10 cm, acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$, refuerzo longitudinal 4 \varnothing 10 mm superior e inferior, refuerzo transversal 7 \varnothing 8 mm @ 10 cm y recubrimiento $e = 2,5 \text{ cm}$ y expuesto al fuego con una resistencia de diseño de $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$.

3.5. Operacionalización de Variables

Variable Independiente

V. I: Temperatura

Variable dependiente

V.D: Comportamiento de la resistencia

Las variables en función de la matriz de consistencia se observa en el anexo 1.

Tabla 5*Operacionalización de variables*

Factor	Nivel (temperatura (°C))	Tiempo (min)	Muestras
<i>Temperatura</i>	100	15	<i>2 dos muestras +1 control</i>
	200	30	<i>2 dos muestras +1 control</i>
	300	45	<i>2 dos muestras +1 control</i>
	400	60	<i>2 dos muestras +1 control</i>
	500	90	<i>2 dos muestras +1 control</i>
	600	120	<i>2 dos muestras +1 control</i>
	600	150	<i>2 dos muestras +1 control</i>
	750°	180	<i>2 dos muestras +1 control</i>

3.7 Procedimiento y análisis de datos

Se utilizó la técnica del análisis de ANOVA con una probabilidad F alfa 0,05. Para la comparación de los promedios de tratamientos se utilizó la prueba de Rango Múltiple de Tukey nivel de alfa 0,05. Los resultados de los experimentos fueron analizados mediante el software estadístico Staphgraphics plus versión demo y SPSS versión 25. Para el análisis de los datos se utilizó estadística descriptiva e inferencial.

CAPITULO IV RESULTADOS

4.1. Características del objeto de muestra de vigas de concreto armado

Las dimensiones las vigas se observan en la tabla 6, donde su longitud es 180 cm, con una resistencia a la compresión es 210 kg/cm^2 y otras características afines que son propias del diseño.

Tabla 6

Dimensiones de la vigas

Características	Medidas
Dimensiones	L= 180 cm, b= 15 cm, h= 10cm
Resistencia a la compresión	$f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$
Acero de refuerzo	$f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
Refuerzo longitudinal	4 \emptyset 3/8"
Refuerzo transversal	\emptyset 8 mm @ 10 cm
Recubrimiento	e=2,5 cm

4.2. Resultados del ensayo de flexión

En la tabla 7, se observan las características de la viga sin ser sometida a altas temperaturas, a la cual se le hizo el ensayo, falló de la manera esperada, la deformación final de esta es la adecuada en cuestión de información recabada. Este hecho demuestra que cuando se realiza un ensayo referente a flexión al concreto armado se tiene una medida de la resistencia a la falla por momento de esta viga., así mismo en esta tabla los valores de carga ejercida y soportada para una viga de esta naturaleza son normales. Se entiende que el concreto armado es menos resistente frente a ensayos de flexión que de compresión.

Tabla 7*Viga sin ser sometida a alta temperatura*

Viga sin ser sometida a alta temperatura			Fecha	15/09/2019	
			dimensiones	0,15*0,10*1,80 m	
Modelo	Edad	Peso Inicial	Carga Ejercida	Carga Ejercida	Def final
	días	kg	kN	kg	mm
1	28	72,5	1,7676	180,25	9,68

En las vigas sometidas a altas temperaturas, se puede apreciar el cambio de pesos en las estructuras debido al desprendimiento ya explicado en el marco teórico. La pérdida de peso oscila entre 5 % al 10 % tal como se observa en la tabla 8

Las vigas sometidas a altas temperaturas muestran una resistencia menor hacia el ensayo de flexión en comparación a la viga sin someter a altas temperaturas. La deformación final de las vigas sometidas a altas temperaturas son bajas a comparación de la deformación de la viga sin someter a altas temperaturas y esto va en relación a su resistencia mermada por afectación del fuego, las vigas fallan con menor carga ejercida y se puede apreciar el fallo en una deformación baja, no resistente, en consecuencia a esto.

Dentro de los valores obtenidos, se puede interpretar que las vigas sometidas a altas temperaturas fallan mucho antes que una viga sin ser sometida a altas temperaturas, su valor de carga ejercida es del 60% del total que puede soportar una viga sin ser sometida a altas temperaturas.

Tabla 8

Vigas sometidas a diferentes temperaturas

Viga sometida a altas temperaturas				Fecha		15/09/2019		
				Dimensión		0,15*0,10*1,80m		
Modelo	Tiempo de Exposición	Temperatura	Edad	Peso inicial	Peso final	Carga Ejercida	Carga Ejercida	Def final
	Minutos	°C	días	kg	kg	kN	kg	mm
2	180	650	28	72,3	68,2	0,812	82,8	6,95
3	180	650	28	72,9	71,4	0,895	91,3	7,51

4.3. Características del objeto de muestra de columna de concreto armado

Las Características de la columna de concreto armado se observan en la tabla 9.

Tabla 9

Dimensiones de la columnas

Características	Medidas
Dimensiones	L= 40cm, b= 25 cm, h= 25cm
Resistencia a la compresión	f 'c =210 Kg/cm ²
Acero de refuerzo	fy= 4200 Kg/cm ²
Refuerzo longitudinal	4 ø 1/2"
Refuerzo transversal	ø 3/8" @ 13 cm
Recubrimiento	e=4 cm

Los cambios morfológicos de elementos estructurales tales como columnas de concreto armado expuestos al fuego según tiempo, temperatura, cambios de color, desprendimiento, fisuramiento y deformaciones se aprecian en la tabla 10.

Tabla 10

Cambios morfológicos de elementos estructurales (columnas) de concreto armado expuestos al fuego según tiempo, temperatura, cambios de color, desprendimiento, fisuramiento y deformaciones

Temperatura (°C)	Tiempo (Minutos)	Cambios	Desprendimiento	Fisuramiento	Deformaciones
450	60	Cambio del tono plomo a una tonalidad ligeramente más oscura	Sin desprendimiento	Sin fisuramiento	Sin deformaciones
450	120	Decoloración superficial a un color plomo claro	Escaso desprendimiento del concreto	Fisuramiento de un espesor menor de 0,5 cm	Deformaciones mínimas pero visibles en su estructura (contracción del concreto)
450	180	Decoloración superficial a un color plomo amarillento)	Franco desprendimiento de concreto en varias de sus caras (pedazos de 8 cm ²)	Fisuramiento de un espesor menor de 0,5 cm	Deformaciones severas y visibles en su estructura (contracción del concreto)

4.4. Resultados del ensayo de compresión

En la tabla 11 se observa las características de la columna sin ser sometida a altas temperaturas muestra un compartamiento normal frente al ensayo de compresión. La columna sin ser sometida a altas temperaturas presenta una resistencia alta frente a la compresión. Esta característica es normal en los elementos de concreto armado, la resistencia de estas es alta comparada a un ensayo de flexión.

Según la tabla 10, las columnas sometidas a altas temperaturas fallan en el ensayo a un promedio de carga ejercida del 70% en relación a lo que puede soportar la columna sin ser sometida a altas temperaturas.

La matriz de datos de experimentación se observa en el anexo 2, en ella se observa los tiempos de exposición en minutos, las temperaturas aplicadas y las cargas aplicadas, mientras que en el anexo 3 se observan las imágenes del experimento

Tabla 11

Columna sin ser sometida a alta temperatura

Columna sin ser sometida a alta temperatura				Fecha 15/09/2019	
				Dimensión 0,25*0,25*0,4 m	
Modelo	Edad	Peso Inicial	Carga Ejercida	Carga Ejercida	
	días	kg	Kn	Kg	
1	28	29	361,84	36897,4	

Las columnas sometidas a altas temperaturas tuvieron desprendimiento de cobertura de concreto en un valor promedio de 2 %, según se observa en la tabla 12.

Tabla 12

Columna sometida a alta temperatura

Columnas sometidas a altas temperaturas					Fecha	18/08/2021	
					Dimensión	0,25*0,25*0,4m	
Modelo	Tiempo de Exposición	Temperatura	Edad	Peso inicial	Peso final	Carga Ejercida	Carga Ejercida
	Minutos	°C	días	Kg	Kg	Kn	Kg
1	60	450	28	25,4	25,3	246,6	25150,3
2	120	450	28	24,9	24,5	288,35	29403,51
3	180	450	28	28,2	27,5	232,7	23728,8

4.5 Prueba de hipótesis

La exposición al fuego directo influye significativamente en el comportamiento de la resistencia a la flexión del concreto reforzado.

Prueba de hipótesis

Para la contratación de la hipótesis, se optó por un análisis de varianza, ya que nos permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de K poblaciones ($K > 2$) son iguales, frente a la hipótesis alterna que afirma de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Este contraste, es fundamental en el análisis de un estudio experimental, en los que resulta interesante comparar los resultados de K tratamientos con respecto a la variable dependiente.

Sin embargo, el análisis de la varianza o ANOVA requiere del cumplimiento de los siguientes presupuestos:

- a) *Normalidad*: distribuciones de probabilidad de la variable dependiente correspondiente a cada factor.
- b) *Las K muestras* sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
- c) *Homocedasticidad*: las poblaciones tienen todas igual varianza.

En tal sentido, se realizó la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* y *Shapiro-Wilk*:

H_0 : Los puntajes del grupo i siguen una distribución normal.

H_1 : Los puntajes del grupo i no siguen una distribución normal.

Tabla 13

Prueba de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Muestra 1_sometida a fuego	0,135	8	0,200*	0,968	8	0,884
Muestra 2_sometida a fuego	0,164	8	0,200*	0,966	8	0,861

Nota. a. Corrección de la significación de Lilliefors

Figura 11

Gráfico Q-Q normal de carga kg de la muestra 1

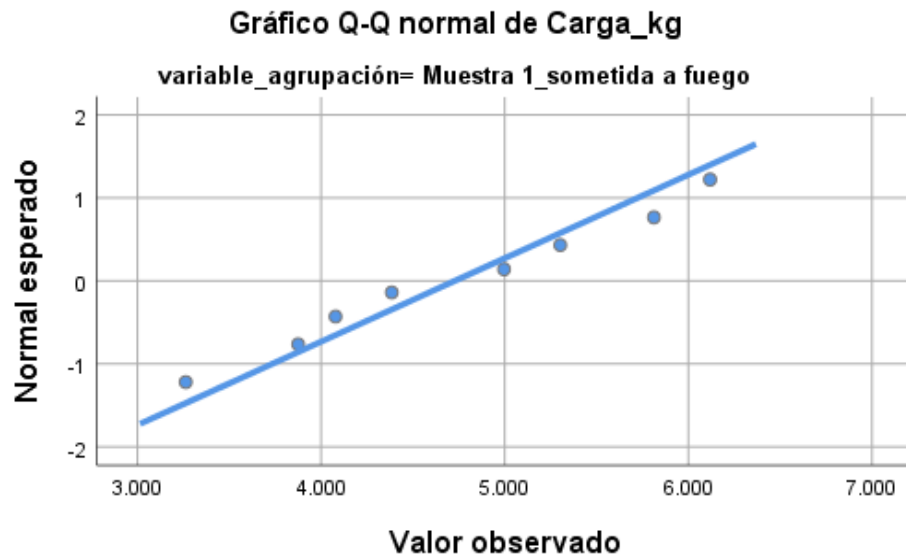
**Figura 12**

Gráfico Q-Q normal de carga kg de la muestra 2



En la Tabla 13 y Figura 11 y 12, se aprecia que para la distribución de los datos de la carga kg, el estadístico de prueba Kolmogorov –Smirnov y la prueba de Shapiro-Wilk, presenta un nivel de significación mayor a 0,05; en consecuencia no se rechaza la hipótesis de normalidad; la Figura Q-Q normal ratifica la conclusión de no rechazo de la hipótesis nula, ya que los valores observados se sitúan sobre la recta esperada bajo el supuesto de normalidad.

Hipótesis estadísticas

H_0 : $\mu_{a1} = \mu_{a2} = \mu_{a3} = \mu_{a0}$ (En promedio las tres condiciones producen la misma respuesta)

H_1 : *Alguna μ_i es distinta* (Al menos una condición produce una respuesta promedio diferente del promedio de cuando menos una de las demás condiciones)

Tabla 14*Análisis de varianza ANOVA*

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	28082076,841	2	14041038,420	200,345	0,000
Intra-grupos	14493346,239	21	690159,345		
Total	42575423,080	23			

Decisión: Como p (sig) es menor de 0,05, se rechaza la igualdad de medias y se dice que existen diferencias significativas entre los tratamientos de exposición al fuego de las barras (t_1 , t_2 y t_0) (Tabla 15). La tabla ANOVA descompone la varianza de kg en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 20,3446, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de kg entre un nivel de muestra y otro, con un nivel del 95.0% de confianza. Para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras, se optó por la prueba de HSD Tukey.

Tabla 15*Prueba post hoc HSD Tukey*

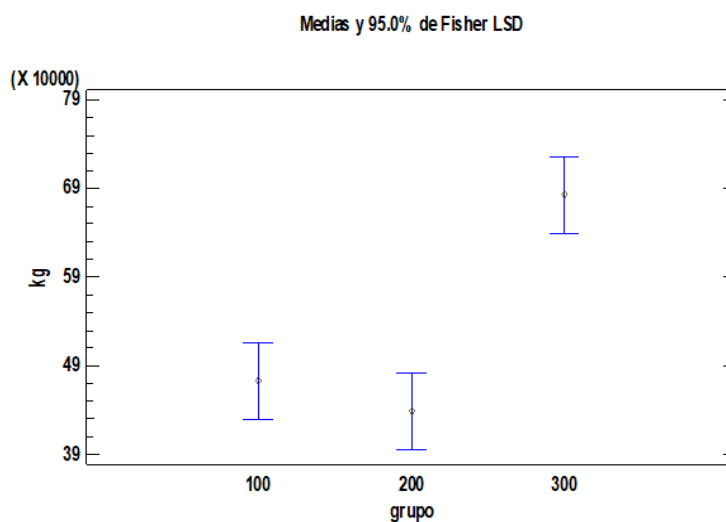
Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0,05	
		1	2
Muestra 2_sometida a fuego	8	4384,7100	
	8	4728,8587	
Muestra 1_sometida a fuego	8		6831,9900
Muestra 3_no sometida a fuego		,690	1,000

Nota. Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 8,000.

Fuente: Elaboración propia

Se aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 2 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0 % de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento HSD Tukey, tal como se observa en la Tabla 15.

Figura 13*Gráfico de medias*

Esta la figura 13 se muestra la media de kg para cada uno de los niveles de grupo. También muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0 % de las veces. Cualquier par de intervalos que no se traslapen verticalmente corresponden a pares de medias que tienen una diferencia estadísticamente significativa.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

Cuando se somete la concreta armada sometido a altas temperaturas, el hormigón responde no solo a cambios físicos instantáneos, como la expansión, sino también al sufrir varios cambios químicos. Esta respuesta es especialmente compleja debido a la falta de uniformidad del material. El hormigón contiene cemento y elementos agregados, y estos pueden reaccionar al calentamiento de diversas formas. En primer lugar, hay una serie de cambios físicos y químicos que se producen en el cemento sometido al calor (Bazant et al., 1996). Algunos de estos son reversibles al enfriarse, pero otros no son reversibles y pueden debilitar significativamente la estructura de concreto después de un incendio. Muchos hormigones porosos contienen una cierta cantidad de agua líquida, la que se vaporizará si la temperatura excede significativamente el rango de meseta de humedad de 100-140 °C aproximadamente, normalmente provocando una acumulación de presión dentro del hormigón (Fletcher et al., 2006).

En este sentido, de las observaciones realizadas durante el experimento, se halló que la resistencia a la exposición al fuego del concreto estructural según diferentes grados de temperatura, falló con la rotura de la viga, cuando la temperatura alcanzó valores por encima de los 600 °C (Tabla 13), hallazgos no congruentes con los de Ureña y Alvarado (2018) quien reportó que la resistencia del concreto disminuyó a temperaturas de 900 °C; y con los hallazgos de Alvarado (2016), quien halló que la resistencia cae drásticamente con temperaturas mayores de 1100 °C; sin embargo, se encontró similitud con los resultados de (Hernández, 2010), quien afirma que la resistencia de un elemento concreto de resistencia de diseño 210 kg/cm², bajo condiciones experimentales tras ser expuesto al fuego presentó alteraciones en sus propiedades y características, y agrietamientos. De otro lado, los hallazgos en el presente estudio son coherentes con la base teórica, en la que se afirma que si la temperatura alcanza aproximadamente 400 °C, el hidróxido de calcio en el cemento comenzará a deshidratarse, lo cual generará más vapor de agua y provocará una reducción significativa en la resistencia física del material. Pueden ocurrir otros cambios en el agregado a temperaturas más altas, por ejemplo, los agregados a base de cuarzo incrementan su volumen, debido a una transformación mineral, a aproximadamente 575 °C, mientras que los agregados de piedra caliza se descompondrán a aproximadamente 800 °C. De forma aislada, la respuesta térmica

del agregado en sí es más sencilla, pero la respuesta general del concreto debido a cambios en el agregado puede ser mucho mayor. Es así que, la expansión diferencial entre el agregado y la matriz de cemento puede causar agrietamiento y desconchado. Estos cambios físicos y químicos en el hormigón tendrán el efecto de reducir la resistencia a la compresión del material (Fletcher et al., 2006).

En el presente estudio, la variación de la resistencia del concreto estructural expuesto al fuego, se contrastó con una prueba de análisis de varianza, obteniéndose para el ANOVA, una razón F de 20,3446 y un valor de significancia o p valor de 0,001 (rechazo de la hipótesis nula), con lo que se demostró la diferencia de medias entre los diferentes grados de temperatura a los que fue sometida la viga.

Las consecuencias teóricas, que se deducen de los resultados empíricos de caída de la resistencia del concreto cuando es expuesto a temperaturas por encima de 750 °C o más, , afianzan la base teórica, que postula que el concreto mantendrá su resistencia a la compresión hasta que se alcance una temperatura crítica, por encima de la cual caerá rápidamente. Esto generalmente ocurre alrededor de los 600 °C. Esto es solo un poco más alto que las temperaturas críticas para el acero, pero debido a la conductividad mucho más baja del concreto, el calor tiende a no penetrar mucho en la profundidad del material, lo que significa que la estructura en su conjunto normalmente conserva gran parte de su resistencia (Fletcher et al., 2006).

Se han identificado cuatro etapas del ciclo térmico, a saber, el primer calentamiento, la temperatura constante, el enfriamiento y la fase posterior al enfriamiento. En cada etapa del ciclo térmico predomina un conjunto diferente de mecanismos diferentes en cada etapa del ciclo térmico .La opinión generalizada es que la resistencia a la compresión del hormigón no sellado disminuye bruscamente por encima de los 300-350°C. Esta opinión es demasiado pesimista si se considera sólo desde el punto de vista de la temperatura. Punto de vista de la temperatura solamente. La representación del comportamiento típico de la resistencia del hormigón a altas temperaturas con una curva media puede ser puede ser engañosa a menos que se especifiquen las condiciones ambientales y de la mezcla. Condiciones ambientales.

Hasta la fecha, se ha prestado poca atención al diseño del hormigón para una posible exposición a altas temperaturas durante los accidentes, como los que podrían ocurrir en los incendios y en los recipientes de presión de los reactores nucleares.

CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos del experimento realizado, la resistencia a la flexión del concreto reforzado sometido a altas temperaturas de fuego directo, disminuye significativamente cuando la temperatura es de $\geq 750^{\circ}\text{C}$ ($F= 20,3446$; p valor $0,001$) en que se produjo la rotura de la viga.

La observación de los ensayos realizados, determinó que la resistencia del concreto reforzado según el incremento de temperatura de 100°C cada 15 min, disminuye en forma progresiva con efectos incrementales.

El nivel de afectación crítico de la barra de concreto reforzado ocurrió con un tiempo de exposición al fuego de 180 minutos, temperatura de 750°C , carga $\text{kN } 32$, carga $\text{kN } 3263,04$, en que se produce la rotura de la viga.

RECOMENDACIONES

En base a los resultados encontrados, se recomienda a los profesionales de la ingeniería civil, en la selección del agregado para el concreto, el cumplimiento de los estándares de calidad según el análisis granulométrico, ya que ello influirá en la resistencia que presente el concreto frente a la probabilidad de un sometimiento a fuego por incendio.

Se recomienda a los profesionales de ingeniería, el control de calidad estricto del vaciado de las obras, especialmente, del espesor del recubrimiento, ya que el agrietamiento del concreto reforzado por exposición al fuego provoca un desprendimiento explosivo, que compromete la resistencia al concreto y el acero de las estructuras.

Se recomienda a los profesionales de ingeniería, continuar la presente línea de investigación, ya que es posible que las aproximaciones de resistencia de concreto al fuego, establecidos en los estándares y normas para las construcciones se basan en valores aproximados de valores críticos, los que sin duda, deben de cumplirse, sin embargo, las investigaciones científicas, pueden aportar elementos y aproximaciones específicas y ajustadas según los diversos contextos y materiales, para fines preventivos.

Para las estructuras de riesgo, como las mencionadas dentro del planteamiento del problema tales como la Prefectura de Tacna, Casa Basadre y la Casa Zela se recomienda el mantenimiento constante de ellas, reducir el tipo de barnizado con combustible que se suele hacer a las estructuras de madera para que perduren y optar por un tipo de barniz menos inflamable. Mientras en el caso de los muros que en su mayoría son de adobe y quincha, se recomienda el mantenimiento de estos en cuanto a su protección superficial a fin de que la quincha no quede expuesta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto, W. (2015). *Diseño y desarrollo del proyecto de investigación. Guía de aprendizaje*. Universidad César Vallejo.
- ACI Committee 225. (2001). *Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements, ACI Report 225R-99*. American Concrete Institute.
- Agra, R. R., Serafini, R., y de Figueiredo, A. D. (2021). Effect of high temperature on the mechanical properties of concrete reinforced with different fiber contents. *Construction and Building Materials*, 301, 124242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124242>
- Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., y Ehlacher, A. (2005). The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 609–613. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.015>
- Ali, F., Abid, A., y Ali, N. (2004). *Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns*. https://www.researchgate.net/publication/245054358_Outcomes_of_a_major_research_on_fire_resistance_of_concrete_columns
- Alonso, M. C., y Flor Laguna, V. (2013). Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio. *Revista ALCONPAT*, 3(1), 1–16. <https://doi.org/10.21041/ra.v3i1.39>
- Alvarado, G. (2016). *Estudio del comportamiento del concreto estructural expuesto al fuego* [Universidad Técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23040>
- Ashley, E. (1971). *The role of performance -Based Design in Concrete Fire Resistance*. University of Chicago Press.
- Bazant, Z. P., Kaplan, M. F., y Haslach, H. W. (1996). Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models. *Applied Mechanics Reviews*, 412.
- Beard, A., Carvel, R., y Carvel, R. (2005). 6. Fire protection in concrete tunnels. In *The handbook of tunnel fire safety* (pp. 110–126). Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/10.1680/hotfs.31685.0006>
- Benedict Darwin, G., y Jose Ravindraraj, B. (2018). Behaviour of reinforced concrete

slab subjected to fire. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(4), 1467–1472.

- Bisby, L. A., Green, M. F., y Kodur, V. K. R. (2005). Modeling the Behavior of Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete Columns Exposed to Fire. *Journal of Composites for Construction*, 9(1), 15–24. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:1(15))
- Borghain, A., y Bhattacharyya, S. K. (2021). *A study on moment–curvature relationships for reinforced concrete beams with varying fire loading conditions* (Vol. 81, pp. 335–352). https://doi.org/10.1007/978-981-15-5235-9_25
- BSI. (2018). *BS 8110-1:1997 - Structural use of concrete. Code of practice for design and construction*. <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030161093>
- Buchanan, A., y Kwabena, A. (2017). *Structural Design for Fire Safety* (2nd Editio). <https://www.wiley.com/en-us/Structural+Design+for+Fire+Safety+%2C+2nd+Edition-p-9780470972892>
- Chauca, D., y Cruz, M. (2014). *Evaluación del concreto $F'c=210$ KG/CM² a altas temperaturas* [Universidad Nacional del Santa]. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/2703>
- Darwin, B. G., y Ravindraraj, J. B. (2018). Behaviour of reinforced concrete slab subjected to fire. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(4), 1467–1472. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJCIET/VOLUME_9_ISSUE_4/IJCIET_09_04_162.pdf
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. <https://www.wiley.com/en-us/An+Introduction+to+Fire+Dynamics+%2C+3rd+Edition-p-9780470319031>
- Du, Y., Zhou, H., y Richard, L. J. Y. (2021). Experimental study on fire resistance of ultra-high strength concrete encased steel columns . *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*, 42(9), 82–90. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0839>
- Fahl, T. (2009). *Concrete Principles*. ATP.
- Fletcher, I., Borg, A., Hitchen, N., y Welch, S. (2006). Performance of concrete in fire: A review of the state of the art, with a case study of the Windsor Tower fire. *4th*

International Workshop in Structures in Fire, 779–790.
<http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/1987>

- Fletcher, I., Welch, S., Torero, J. L., Carvel, R. O., y Usmani, A. (2007). Behaviour of concrete structures in fire. *Thermal Science*, 11(2), 37–52.
<https://doi.org/10.2298/TSCI0702037F>
- Franssen, J. M. (2005). Structures in fire, yesterday, today and tomorrow. *Fire Safety Science, March*, 21–35. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-21>
- Garcia-Troncoso, N., Li, L., Cheng, Q., Mo, K. H., y Ling, T.-C. (2021). Comparative study on the properties and high temperature resistance of self-compacting concrete with various types of recycled aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00678.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00678>
- Gawin, D., Pesavento, F., y Schrefler, B. (2007). *Comments to the paper “An application of a damage constitutive model to concrete at high temperature and prediction of spalling” by Rosen Tenchev and Phil Purnell [Int. J. Solids Struct. 42 (26) (2005) 6550–6565]*.
https://www.researchgate.net/publication/256733920_Comments_to_the_paper_An_application_of_a_damage_constitutive_model_to_concrete_at_high_temperature_and_prediction_of_spalling_by_Rosen_Tenchev_and_Phil_Purnell_Int_J_Solids_Struct_42_26_2005_6550-6566
- Georgali, B., y Tsakiridis, P. E. (2005). Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 255–259.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.022>
- Gernay, T. (2019). Fire resistance and burnout resistance of reinforced concrete columns. *Fire Safety Journal*, 104, 67–78.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.007>
- Goudar, S. K., Gedela, S. K., y Das, B. B. (2021). A Review on Mechanical and Microstructure Properties of Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 75, pp. 719–728).
https://doi.org/10.1007/978-981-15-4577-1_62
- Han, C., Hwang, Y., Yang, S., y Gowripalan, N. (2005). *Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement*.

- https://www.researchgate.net/publication/223240602_Performance_of_spalling_resistance_of_high_performance_concrete_with_polypropylene_fiber_contents_and_lateral_confinement
- Hasan, G., Abdalla, M. A., y Suliman, H. (2018). *The effect of heat on the concrete strength*.
https://www.researchgate.net/publication/335571955_The_effect_of_heat_on_the_concrete_strength
- Helene, Paulo y Fernanda Pereira 2003 Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. CYTED.
- Hernández, N. (2010). Efecto del fuego sobre la resistencia a compresión de un elemento de concreto de resistencia de diseño de 210 kg/cm². *Revista INGENIERÍA UC*, 17(2), 38–43.
- Hertz, K. D., y Sørensen, L. S. (2005). Test method for spalling of fire exposed concrete. *Fire Safety Journal*, 40(5), 466–476.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.04.001>
- INGEMECÁNICA.COM. (2020). *Comportamiento del Acero con la Temperatura*.
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn107.html>
- ISO. (1975). *ISO - ISO 834:1975 - Fire-resistance tests — Elements of building construction*. <https://www.iso.org/standard/5197.html>
- Kalifa, P., Chéné, G., y Gallé, C. (2001). *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres*.
https://www.researchgate.net/publication/223953309_High-temperature_behaviour_of_HPC_with_polypropylene_fibres
- Khoury, G. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429–447.
<https://doi.org/10.1002/pse.51>
- Kwon, Y., Kim, D., Kang, S., Kim, B., Han, B., Lee, J., y Kazunori, H. (2013). Fire Resistance Performance Analysis of Reinforced Concrete Members Using Galerkin Finite Element Method. *Procedia Engineering*, 62, 725–735.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.119>
- Li, Z. (2011). *Advanced Concrete Technology*. John Wiley y Sons Inc.
- Martins, A. M. B., y Rodrigues, J. P. C. (2010). Fire resistance of reinforced concrete

- columns with elastically restrained thermal elongation. *Engineering Structures*, 32(10), 3330–3337.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.07.005>
- Nowak, A., Hong, Y., y Hwang, E. (1988). Modeling live load and dynamic load for bridges. *Transportation Research Record*.
- Oncoy, J. (2018). *Comportamiento de la resistencia del concreto $F'c=210\text{KG/cm}^2$ expuesto a cambios bruscos de temperaturas, debido a la extinción de un incendio*. Universidad Cesar Vallejo.
- Ottazzi, Gianfranco (2004) Material de Apoyo para la Enseñanza de los Cursos de Diseño y Comportamiento del Concreto Armado. Tesis para optar el Grado Académico de Magíster en Ingeniero Civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería Departamento de Ingeniería Sección Ingeniería Civil
- Placido, F. (1980). Thermoluminescence test for fire-damaged concrete. *Magazine of Concrete Research*, 32(111), 112–116.
<https://doi.org/10.1680/mac.1980.32.111.112>
- Ruvalcaba, F. R., y Covarrubias, M. (2017). La Ingeniería Estructural de Fuego un enfoque nacional y ejemplo de aplicación. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 253–264.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.023>
- Shipp, M. (1985). Hydrocarbon Fire Standard: An Assessment of Existing Information. *Building Research Establishment, Fire Research Station*.
- Shuttleworth, P. (2001). Fire Protection of Concrete Tunnel Linings. *Third International Conference on Tunnel Fires*, 157–165.
<https://www.adfil.com/media/2017/fire-protection-of-concrete-tunnel-linings.pdf>
- Solís, R. G., Moreno, E., & Arjona, E. (2012). Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. *Revista ALCONPAT*, 2(1), 21-28.
- Tamtawi, H. (2015). Introduction to Concrete. *Advanced Concrete Technology*, April, 1–22. <https://doi.org/10.1002/9780470950067.ch1>
- Tomás, J. (2015). Pérdida De La Resistencia Mecánica Del Hormigón Paraguayo Debido a La Acción Del Fuego. *Obras Civiles*. <http://www.ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/26ho-ma-pa-26.pdf>

- Tretyakov, A., Tkalenko, I., y Wald, F. (2021). Fire response model of the steel fibre reinforced concrete filled tubular column. *Journal of Constructional Steel Research*, 186, 106884. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106884>
- Turkowski, P., Łukomski, M., Sulik, P., y Roszkowski, P. (2017). Fire Resistance of CFRP-strengthened Reinforced Concrete Beams under Various Load Levels. *Procedia Engineering*, 172, 1176–1183. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.137>
- Ureña, M., y Alvarado, G. (2018). Efecto del tiempo de exposición al fuego en la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado. *Gaceta Técnica*, 19(2), 7–18. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10804.35203>
- Welch, S., Jowsey, A., Deeny, S., Morgan, R., y Torero, J. L. (2007). BRE large compartment fire tests-Characterising post-flashover fires for model validation. *Fire Safety Journal*, 42(8), 548–567. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.04.002>
- Wetzing, V. (2001). *Destruction mechanisms in concrete material in case of fire, and protection* s. <https://www.semanticscholar.org/paper/DESTRUCTION-MECHANISMS-IN-CONCRETE-MATERIAL-IN-CASE-Wetzig/e563ba6390b5a79a8ce67e8c5b23cd0419ca39cd>
- Yang, J., Liu, J., Wang, S., y Wang, W. (2021). Experimental and analytical investigation on fire resistance of circular tubed steel reinforced concrete medium-long columns. *Journal of Building Engineering*, 44, 102968. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102968>
- Zhang, J., Lu, S., Li, Q., Yuen, R. K. K., Chen, B., Yuan, M., y Li, C. (2012). Smoke filling in closed compartments with elevated fire sources. *Fire Safety Journal*, 54, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.08.003>
- Zhou, X., Wang, W., Song, K., y Chen, Y. F. (2019). Fire resistance studies on circular tubed steel reinforced concrete stub columns subjected to axial compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 159, 231–244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.04.032>
- Zhou, X., Yang, J., Liu, J., Wang, S., y Wang, W. (2021). Fire resistance of thin-walled steel tube confined reinforced concrete middle-length columns: Test and numerical simulation. *Structures*, 34(May), 339–355. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.078>

Anexo 1. Matriz de consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema General</p> <p>¿Cuál es el comportamiento de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a altas temperaturas por incidencia de fuego directo en la región de Tacna en 2020?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Determinar la resistencia de la pieza experimental de concreto reforzado sometido a altas temperaturas por incidencia de fuego directo en la región de Tacna en 2020.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>El comportamiento de la pieza experimental de concreto reforzado que se han sometido a altas temperaturas sufren daños importantes en sus propiedades mecánicas.</p>	<p>Variable Independiente</p> <p>La temperatura.</p>	<p>Tipo de Investigación</p> <p>El tipo de investigación que se realizó es explicativo, ya que tiene como fin explicar el comportamiento de la resistencia del concreto armado (variable dependiente) en función a la temperatura (variable independiente).</p>
<p>Problema Específico</p> <p>¿Cuál es la variación de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (° C) para diferentes intervalos de tiempo?</p> <p>¿Cuál es el nivel de afectación crítico de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (° C) para diferentes intervalos de tiempo?</p>	<p>Objetivos Específicos</p> <p>Identificar la variación de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (° C) para diferentes intervalos de tiempo.</p> <p>Identificar el nivel de afectación crítico de la propiedad mecánica de resistencia de una pieza experimental de concreto reforzado sometido a diferentes grados de temperatura (° C) para diferentes intervalos de tiempo.</p>	<p>Hipótesis Específica</p> <p>Los daños se han generado a diferentes intervalos de tiempo y temperatura, a los 450°C sufren daños muy importantes.</p> <p>El nivel de afectación crítico de la propiedad mecánica en su parte física es cuando cambia de coloración en la muestra.</p>	<p>Variable Dependiente</p> <p>La resistencia del concreto armado.</p>	<p>Nivel de Investigación</p> <p>El nivel de la investigación que se realizó es aprehensivo, ya que corresponde a una investigación de análisis de resultados.</p>

Anexo 2. Matriz de datos experimentales

Tiempo_expos_min		variable_agrupación	Temperatura	Carga kN	Carga kg
Exposicion_fuego_15'	15	1	100	60	6118,2
Exposicion_fuego_30'	30	1	200	57	5812,29
Exposicion_fuego_45'	45	1	300	52	5302,44
Exposicion_fuego_60'	60	1	400	49	4996,53
Exposicion_fuego_90'	90	1	500	43	4384,71
Exposicion_fuego_120'	120	1	600	40	4078,8
Exposicion_fuego_150'	150	1	600	38	3874,86
Exposicion_fuego_180'	180	1	750	32	3263,04
Exposicion_fuego_15'	15	2	100	60	6118,2
Exposicion_fuego_30'	30	2	200	54	5506,38
Exposicion_fuego_45'	45	2	300	47	4792,59
Exposicion_fuego_60'	60	2	400	42	4282,74
Exposicion_fuego_90'	90	2	500	39	3976,83
Exposicion_fuego_120'	120	2	600	38	3874,86
Exposicion_fuego_150'	150	2	600	35	3568,95
Exposicion_fuego_180'	180	2	750	29	2957,13
Exposicion_fuego_15'	15	3	0	67	6831,99
Exposicion_fuego_30'	30	3	0	67	6831,99
Exposicion_fuego_45'	45	3	0	67	6831,99
Exposicion_fuego_60'	60	3	0	67	6831,99
Exposicion_fuego_90'	90	3	0	67	6831,99
Exposicion_fuego_120'	120	3	0	67	6831,99
Exposicion_fuego_150'	150	3	0	67	6831,99
Exposicion_fuego_180'	180	3	0	67	6831,99

Anexo 2. Imágenes de experimentación con la viga

Preparación de candela para someter a la viga a altas temperaturas



Presentación de viga antes de ser sometida a altas temperaturas



Medición de temperatura con pirómetro para el control del ensayo (329°C)



Medición de temperatura con pirómetro para el control del ensayo (509°C)



Viga sometida a ensayo a fin de determinar sus propiedades ante las cargas externas



Viga ya resquebrajada luego de ser sometida a cargas externas