



ESCUELA DE
INGENIERÍA CIVIL



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO

ASISTENCIA TÉCNICA - ÁREA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

INFORME FOLIO 2017-PUCV-LEIC-IE-1132

INFORME FINAL PROYECTO
METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RESISTENCIA POST-INCENDIO DE
ELEMENTOS DE HORMIGÓN ARMADO
Bomberos de Chile.

23 de octubre de 2017

Índice de contenidos

1.	Información general	7
2.	Antecedentes generales	7
3.	Definición de la problemática.....	7
4.	Objetivo del proyecto	8
4.1.	Objetivo general	8
4.2.	Objetivos específicos	8
5.	Alcances.....	8
6.	Metodología de la investigación.....	8
6.1.	Metodología general	8
6.2.	Materiales utilizados para las probetas	9
6.2.1.	Acero	9
6.2.2.	Agregados pétreos para el hormigón.....	9
6.2.3.	Cemento.....	9
6.2.4.	Hormigón.....	10
6.3.	Diseño de probetas de hormigón armado	10
6.4.	Fabricación de probetas	11
6.5.	Diseño e implementación del ensayo de incendio.....	11
6.6.	Ensayos no destructivos.....	12
6.6.1.	Ensayos de medición de velocidad de propagación de ondas de ultrasonido (VPOU)	12
6.6.2.	Ensayos de medición de índice esclerométrico	14
6.7.	Ensayos de incendio en cilindros de hormigón	15
6.8.	Ensayos de fuego en vigas y columnas	15
6.9.	Ensayos de resistencia (destructivos).....	16
6.9.1.	Ensayos de compresión de cilindros de hormigón	16
6.9.2.	Ensayos de flexión de vigas	17
6.9.3.	Ensayos de compresión de columnas	18
7.	Resultados y Análisis.....	19
7.1.	Compresión de cilindros.....	19
7.1.1.	Resistencia.....	19
7.1.2.	Modo de falla	19
7.1.3.	Relación entre resistencia y tiempo de exposición a incendio	20
7.2.	Flexión de vigas	20
7.2.1.	Resistencia.....	20
7.2.2.	Modos de falla.....	21
7.2.3.	Relación entre resistencia y tiempo de exposición a incendio.....	23
7.2.4.	Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición directa (VPOU-D)	23
7.2.5.	Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición semidirecta (VPOU-S).....	25
7.2.1.	Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición indirecta (VPOU-I)	25
7.2.2.	Relación entre VPOU y resistencia	27
7.2.3.	Índice esclerométrico.....	29



- 7.2.4. Relación entre índice esclerométrico y tiempo de exposición a incendio..... 30
- 7.2.5. Relación entre índice esclerométrico y resistencia..... 30
- 7.3. Compresión de columnas 32
 - 7.3.1. Resistencia..... 32
 - 7.3.2. Modos de falla..... 35
 - 7.3.3. Relación entre resistencia y tiempo de exposición a incendio 36
 - 7.3.4. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición directa (VPOU-D) 37
 - 7.3.5. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición semidirecta (VPOU-S)..... 38
 - 7.3.6. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición indirecta (VPOU-I) 40
 - 7.3.7. Relación entre VPOU y resistencia 41
 - 7.3.8. Índice esclerométrico..... 43
 - 7.3.9. Relación entre índice esclerométrico y tiempo de exposición a incendio..... 44
 - 7.3.10. Relación entre índice esclerométrico y resistencia..... 44
- 8. Propuesta de metodología para la estimación de la resistencia residual de elementos esbeltos de H.A. . 46
 - 8.1. Metodología propuesta..... 46
 - 8.2. Alcances y limitaciones 47
- 9. Conclusiones generales y recomendaciones para trabajo futuro 48
- 10. Agradecimientos 48
- 11. Bibliografía 48

Índice de figuras

Figura 1. Curva de granulometría para arena y grava utilizadas.....	9
Figura 2. Confección de armaduras; hormigonado y vibrado; y probetas terminadas.....	11
Figura 3. Elementos para manipulación de probetas.....	12
Figura 4. Ensayo de VPOU en viga.....	13
Figura 5. VPOU, medición directa.....	13
Figura 6. VPOU, medición semidirecta.....	13
Figura 7. VPOU, medición indirecta.....	14
Figura 8. Ensayo de índice esclerométrico en columna.....	14
Figura 9. Grupo de probetas cilíndricas de hormigón sometidas a ensayo de incendio.....	15
Figura 10. Elemento de viga sometido a ensayo de incendio.....	16
Figura 11. Implementación del ensayo de compresión en probetas cilíndricas de hormigón.....	16
Figura 12. Ensayo de tracción por flexión con carga P/2 aplicada en límites del tercio central de la luz. NCh1038of.1977 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1977).....	17
Figura 13. Implementación del ensayo de flexión en vigas de hormigón armado.....	18
Figura 14. Implementación del ensayo de compresión en columnas.....	18
Figura 15. Resistencia de acuerdo al tiempo de exposición al fuego en probetas cilíndricas.....	20
Figura 16. Fallas para elementos de vigas según tiempo de exposición a incendio.....	22
Figura 17. Resistencia en vigas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego.....	23
Figura 18. Deformación en vigas según el tiempo de exposición al fuego.....	23
Figura 19. Variación en la VPOU-D respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas.....	24
Figura 20. Variación en la VPOU-S respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas.....	26
Figura 21. Variación en la VPOU-I respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas.....	27
Figura 22. Relación resistencia respecto a la VPOU-D para vigas.....	28
Figura 23. Relación resistencia respecto a la VPOU-S para vigas.....	28
Figura 24. Relación resistencia respecto a la VPOU-I para vigas.....	29
Figura 25. Relación de índice esclerométrico respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas.....	30
Figura 26. Relación resistencia respecto al índice esclerométrico para vigas.....	31
Figura 27. Ensayo de compresión para columnas sin exposición al fuego.....	32
Figura 28. Ensayo de compresión para columnas con 30 minutos de exposición al fuego.....	32
Figura 29. Ensayo de compresión para columnas con 60 minutos de exposición al fuego.....	33
Figura 30. Ensayo de compresión para columnas con 90 minutos de exposición al fuego.....	33
Figura 31. Ensayo de compresión para columnas con 120 minutos de exposición al fuego.....	34
Figura 32. Ensayo de compresión para columnas con 180 minutos de exposición al fuego.....	34
Figura 33. Modos de falla para columnas.....	36
Figura 34. Resistencia a la compresión para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego.....	37
Figura 35. VPOU-D para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego.....	38
Figura 36. VPOU-S para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego.....	39
Figura 37. VPOU-I para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego.....	41
Figura 38. Relación resistencia respecto a la VPOU-D para columnas.....	42
Figura 39. Relación resistencia respecto a la VPOU-S para columnas.....	42
Figura 40. Relación resistencia respecto a la relación VPOU-I para columnas.....	43
Figura 41. Relación de índice esclerométrico respecto al tiempo de exposición al fuego en columnas.....	44



Figura 42. Relación resistencia respecto al índice esclerométrico para columnas 45
Figura 43. Esquema de metodología de evaluación de la RRPI propuesta 46



Índice de tablas

Tabla 1. Dosificación para hormigón H-25	10
Tabla 2. Trabajabilidad del hormigón. Asentamiento de Cono de Abrams.....	10
Tabla 3. Armaduras según tipo de probeta	10
Tabla 4. Resultados de ensayo de compresión en probetas cilíndricas	19
Tabla 5. Resultados ensayo de flexión de vigas	21
Tabla 6. VPOU en vigas. Medición directa.....	24
Tabla 7. VPOU en vigas. Medición semidirecta	25
Tabla 8. VPOU en vigas. Medición indirecta	26
Tabla 9. Relación final/inicial para VPOU y resistencia a la flexión en vigas.....	27
Tabla 10. Resultados ensayo Martillo Schmidt para vigas.....	29
Tabla 11. Relación final/inicial para índice esclerométrico y resistencia a la flexión en vigas	31
Tabla 12. Resistencia máxima a la compresión para columnas	35
Tabla 13. VPOU en columnas. Medición directa.....	37
Tabla 14. VPOU en columnas. Medición semidirecta.....	39
Tabla 15. VPOU en columnas. Medición indirecta	40
Tabla 16. Relación final/inicial para VPOU y resistencia a la compresión en columnas	41
Tabla 17. Resultados ensayo Martillo Schmidt para columnas.....	43
Tabla 18. Relación final/inicial para índice esclerométrico y resistencia a la compresión en columnas	45
Tabla 19. Rangos propuestos de razón de resistencia y su re	46
Tabla 20. Rangos de seguridad recomendados según razón de resultados de mediciones con métodos no destructivos. Vigas de H.A.	47
Tabla 21. Rangos de seguridad recomendados según razón de resultados de mediciones con métodos no destructivos. Columnas de H.A.....	47

1. Información general

Mandante	:	Bomberos de Chile
Solicitante	:	Alex Pérez
Fabricante	:	-
Proyecto	:	Metodología de evaluación de resistencia post-incendio de elementos de hormigón armado
Tipo de ensayo	:	-
Normas / protocolos	:	-
Descripción ensayo	:	-
Laboratorio	:	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de Ingeniería Civil. Laboratorio Escuela de Ingeniería Civil – Área Ingeniería Estructural
Fecha de ensayo	:	-

2. Antecedentes generales

En el presente informe se detallan los resultados y análisis de los ensayos realizados en el marco del proyecto de investigación denominado “Metodología de evaluación de resistencia post-incendio de elementos de hormigón armado”. Sobre esa base se presenta finalmente una propuesta preliminar de metodología para la evaluación rápida de la resistencia residual de una estructura de marcos de hormigón armado sometida a incendio.

3. Definición de la problemática

Basado en la experiencia recopilada tras el estudio forense de incendios pasados (Sailer, 2007; Plataforma Tecnológica Española del Hormigón, 2008; Flores, 2012; Señas, Maiza, Priano, Marfil, & Valea, 2010; Fletcher, Welch, Torero, Carvel, & Usmani, 2007), es reconocido principalmente en forma cualitativa y descriptiva, que las estructuras de H.A. presentan un adecuado comportamiento ante la acción del fuego, debido a que su baja conductividad térmica limita la velocidad del aumento de la temperatura en las armaduras en función del espesor del recubrimiento de éstas. Sin embargo, existe poca cuantificación sistemática de este comportamiento que permita evaluar el real estado de la estructura una vez extinguido el incendio.

Algunas investigaciones previas (Señas, Maiza, Priano, Marfil, & Valea, 2010) han propuesto el uso de ensayos destructivos y no destructivos de materiales para determinar la variación de las propiedades físico-mecánicas del hormigón armado sometido a la acción del fuego y así estudiar la capacidad resistente residual de estructuras de esta naturaleza. Sin embargo, los resultados se han limitado a casos específicos de estructuras donde se realiza una caracterización del deterioro luego de consumado el incendio sin considerar el comportamiento intermedio, es decir a diferentes tiempos de exposición de los materiales, y utilizando para ello métodos que resultan ser complejos, cuyos datos tardan en obtenerse. De esta forma, evaluar la resistencia residual con este tipo de metodología se vuelve extremadamente ineficiente cuando se desea obtener resultados expeditos.

En virtud de lo anterior, se puede identificar una deficiencia relevante en el conocimiento y reconocimiento del estado estructural de una edificación o parte de ella cuando ha sido sometida a la acción de un incendio, lo que redundaría en una exposición no controlada a riesgo de colapso total o parcial de la misma durante las faenas de control y extinción o durante los peritajes correspondientes exponiendo la integridad del personal de bomberos, al mismo tiempo que no se puede tomar una decisión técnicamente bien justificada respecto a qué hacer con la estructura siniestrada conduciendo en muchos casos a demoliciones innecesarias o a reparaciones y refuerzos no efectivos e inseguros.

4. Objetivo del proyecto

A partir de lo expuesto en la sección 3, para el presente proyecto, se definen los objetivos listados en 4.1 y 4.2.

4.1. *Objetivo general*

Proponer un procedimiento rápido de evaluación de la resistencia residual post-incendio (RRPI) de elementos estructurales esbeltos de hormigón armado (H.A.) mediante instrumentos y ensayos no destructivos de bajo costo.

4.2. *Objetivos específicos*

- Estudiar la RRPI de elementos esbeltos de H.A.
- Analizar la correlación entre la RRPI de elementos esbeltos de H.A. con índices físicos de fácil obtención (p.e. Velocidad propagación de ondas de ultra sonido y/o índice esclerométrico).
- Evaluar la aplicabilidad de instrumentos de ensayos no destructivos de bajo costo para estimar la RRPI de elementos de H.A.
- Proponer una metodología simple, rápida y económica para la evaluación de RRPI de elementos esbeltos de H.A.

5. Alcances

El presente estudio se limita a la presentación de una metodología de evaluación de la resistencia post-incendio de elementos esbeltos de hormigón armado basada en los resultados experimentales obtenidos sobre probetas diseñadas, fabricadas y ensayadas en los laboratorios de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

La metodología de evaluación de la RRPI de elementos esbeltos de H.A. (vigas y columnas) a proponer se basa en la potencial correlación entre parámetros o propiedades físicas de superficie en el H.A. y su resistencia estructural. Las propiedades físicas definidas en este estudio como sensibles a la acción del fuego y por lo tanto a estudiar son la velocidad de propagación de ondas de ultrasonido y el índice esclerométrico, con los que se espera generar tablas de correlación entre la razón de variación del parámetro y la variación de la resistencia mecánica del elemento estructural analizado.

Los ensayos de fuego fueron realizados sobre la base de la norma NCh935/1.Of97 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1997) o condición validada equivalente utilizando distintos tiempos de exposición con el fin de caracterizar distintos niveles de incendio.

Los parámetros de resistencia a analizar corresponden a la resistencia a la compresión para el caso de las columnas y la resistencia a la flexión para las vigas.

6. Metodología de la investigación

6.1. *Metodología general*

Para lo anterior, se diseñaron y fabricaron 18 columnas de H.A. de 20cmx20cm de sección y 60cm de longitud; 18 vigas de H.A. de 15cmx25cm de sección y 65cm de longitud y 18 cilindros de hormigón simple de 15cm de diámetro y 30cm de longitud. Para cada uno de los tipos de probetas se formaron 6 grupos de 3 probetas cada uno. Uno de estos grupos no será sometido a la acción del fuego, mientras que los otros cinco grupos serán sometidos uno a uno a la acción del fuego simulada a partir del tiempo de exposición a altas temperaturas en un horno (entre 700 y 1000°C) de manera similar a lo realizado en otros programas experimentales publicados en la literatura (Alvarado, 2016). Los tiempos de exposición considerados son 30, 60, 90, 120 y 180min.

6.2. Materiales utilizados para las probetas

6.2.1. Acero

Se consideró la utilización de barras de acero de refuerzo para hormigón A440-280H con propiedades nominales de 2800 kgf/cm² para la tensión de fluencia mínima garantizada, 2100000 kgf/cm² para el módulo de elasticidad y 4400 kgf/cm² para la tensión de rotura mínima.

6.2.2. Agregados pétreos para el hormigón

Se consideró el uso de arena y grava comercial de canto vivo bien graduada con tamaño máximo de partícula 10mm con la finalidad de garantizar un correcto hormigonado.

En la Figura 1 se muestran las curvas granulométricas obtenidas en el Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil, Área Ingeniería Geotécnica (LEIC-IG) de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, tanto para la arena como para la gravilla utilizada.

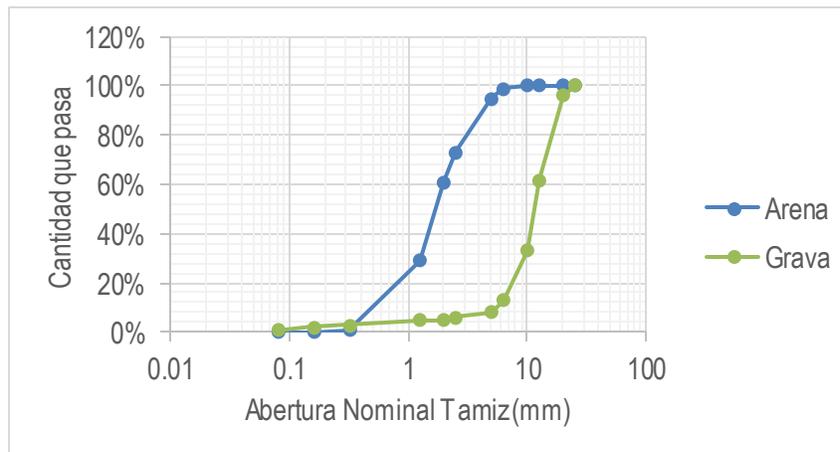


Figura 1. Curva de granulometría para arena y grava utilizadas.

6.2.3. Cemento

Se consideró la utilización de cemento tipo Portland Puzolánico Especial de alta resistencia de carácter comercial.

6.2.4. Hormigón

Se consideró la utilización de un hormigón H-25 al 95% de confianza, es decir, se consideró un valor de resistencia a la compresión cilíndrica de proyecto f_c' de 200 kgf/cm², para lo cual se diseñó una dosificación según se indica en la Tabla 1 para una relación agua/cemento (A/C) de 0.50.

Tabla 1. Dosificación para hormigón H-25

Material	Cemento	Arena	Gravilla	Agua
% en peso	18.2	36.4	36.4	9.1
Cantidad por m ³ (kg)	436	873	873	218

En cada proceso de hormigonado desarrollado en el Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil, Área Ingeniería Estructural (LEIC-IE) se controló la trabajabilidad del hormigón a partir del Cono de Abrams en conformidad con lo establecido en la norma NCh1019.EOf1974 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1974). A modo de ejemplo, los valores obtenidos para las vigas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Trabajabilidad del hormigón. Asentamiento de Cono de Abrams

Viga	Asentamiento de cono (cm)						
1	5	5	7	9	9	13	7
2	5	6	7	10	8	14	8
3	7	7	9	11	8	15	7
4	6	8	7	12	6	16	8

6.3. Diseño de probetas de hormigón armado

En conformidad con lo establecido en la normativa NCh430of.2007 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 2007) y código ACI318-08 (ACI - American Concrete Institute, 2008) y considerando las dimensiones límite admisibles en el horno Lindberg de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (donde se llevaron a cabo los ensayos de incendio, ver sección 6.8) se realizó el diseño de las armaduras de vigas y columnas de forma que ambas presentaran un comportamiento dúctil con el objetivo de representar adecuadamente el diseño de los elementos estructurales reales presentes en los edificios.

Lo anterior se traduce en que en vigas se establece el requisito de presentar una falla con fluencia del acero y compresión secundaria del hormigón, mientras que en las columnas el requisito es que la resistencia del núcleo confinado tenga una resistencia igual a la de la sección completa sin confinar. Ambas condiciones involucran un detallado especial de la armadura transversal de los elementos en cuestión. Las armaduras obtenidas se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Armaduras según tipo de probeta

Probeta	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Armadura superior	Armadura inferior	Estribos y/o Trabas
Viga	65	15	25	2 ϕ 6	2 ϕ 8	ϕ 8@10cm
Columna	60	20	20	2 ϕ 8	2 ϕ 8	ϕ 8@5cm

6.4. Fabricación de probetas

Las probetas cilíndricas de hormigón fueron confeccionadas de acuerdo la norma NCh1017EOf1975 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1975) cumpliendo con las especificaciones allí detalladas.

Las probetas de hormigón armado se fabricaron en conformidad con lo establecido en el diseño (ver sección anterior) y bajo el control definido tanto para cada uno de los materiales según se definió en la sección 6.1.

Una vez confeccionadas las armaduras, éstas se dispusieron dentro de los moldajes previamente acondicionados con desmoldante, utilizando separadores plásticos estándar para mantener los espesores de recubrimiento constantes (2.5cm) y las armaduras alineadas durante el proceso de vaciado y vibrado del hormigón (ver Figura 2).

La confección de la mezcla de hormigón se realizó en un trompo estándar de 120 litros de capacidad, hormigonando uno, o un y medio elemento por cada vaciado de trompo, excepto en el caso de las probetas cilíndricas, en cuyo caso la cantidad de probetas resultó mayor.

Los elementos una vez hormigonados se almacenaron en las dependencias del LEIC-IE durante al menos 28 días en los cuales se cuidó de mantener su humedad superficial para un correcto curado y así evitar agrietamiento por retracción.



probetas con rapidez y seguridad al ingresarlas y extraerlas del horno con la finalidad de tener las mínimas pérdidas de temperatura en el horno y así poder dar la mayor continuidad posible a la realización de los ensayos de incendio.

Para lo anterior, se modificó el alcance de un apilador manual a fin de poder manipular las probetas a una distancia segura en la cual el calor de las mismas o del horno no afecten al usuario.

Del mismo modo, para la adecuada manipulación de las probetas dentro del horno, se fabricaron dos tipos de bases fungibles simples: (1) una base tipo doble U invertida de hormigón armado para la manipulación de vigas, ya que éstas deben tener sólo 3 caras expuestas directamente a la fuente de calor y (2) una base metálica consistente en dos pares de perfiles UPN de acero cruzados formando un # para apoyar las columnas, ya que estas deben tener sus caras expuestas a la fuente de calor.

Las fotografías de la Figura 3 muestran las piezas del apilador modificadas y una base doble U invertida para la manipulación de las vigas (y cilindros).

Paralelamente, a partir de la gestión de Sr. Alex Pérez en Bomberos de Chile, se pudo conseguir la vestimenta adecuada de seguridad para la manipulación de las probetas en caliente y el trabajo en el horno.



Figura 3. Elementos para manipulación de probetas.

6.6. Ensayos no destructivos

Se definió la fabricación de un total de 18 probetas cilíndricas de hormigón, 18 vigas y 18 columnas. Cada elemento a ensayar fue agrupado en 6 subconjuntos de 3 probetas cada uno. De estos 6 grupos, uno fue el referencial de control (no sometido a ensayos de incendio), mientras que los restantes 5 grupos fueron sometidos a ensayos de incendio de 30, 60, 90, 120 y 180min de duración según lo descrito en el informe 2017-PUCV-LEIC-IE-1001 (Alcaíno, 2017), para luego ser sometidos a los ensayos destructivos de resistencia.

Previamente, tanto vigas como columnas fueron sometidas a ensayos físicos no destructivos para la obtención de parámetros superficiales de integridad y uniformidad: velocidad de propagación de ondas de ultrasonido e índice esclerométrico.

6.6.1. Ensayos de medición de velocidad de propagación de ondas de ultrasonido (VPOU)

La velocidad de propagación de ondas de ultrasonido (VPOU) es un método que utiliza la relación entre densidad y elasticidad de un material para caracterizar su calidad y estimar su resistencia a la compresión. Para ello se

utiliza un equipo ultrasónico que permite de forma indirecta calcular la resistencia del hormigón, además de estimar in situ su uniformidad y localizar grietas, fisuras y otros defectos (ver Figura 4).

El equipo funciona mediante un transductor-emisor de un pulso ultrasónico con frecuencias que van desde 20Hz a los 150Hz, el que es detectado por un receptor (segundo transductor) para posteriormente determinar a través de un computador central el tiempo que tarda la onda en recorrer el material, y con ello correlacionar propiedades y defectos como los anteriormente mencionados. Existen a su vez, tres variaciones de este método que fueron realizados: medición directa (VPOU-D), medición semidirecta (VPOU-S) y medición indirecta (VPOU-I).



Figura 4. Ensayo de VPOU en viga

La medición directa (VPOU-D) consiste en posicionar ambos transductores; emisor y receptor, a una misma distancia relativa en costados opuestos del material (ver Figura 5). Este método en particular permite determinar resultados bastante precisos debido a que la transmisión de las ondas es en línea recta teniendo una menor dispersión.

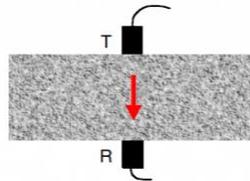


Figura 5. VPOU, medición directa

La medición semidirecta o VPOU-S, es una variación del método anterior, en que los transductores se posicionan en caras mutuamente perpendiculares del elemento a analizar (ver Figura 6), de esta forma el emisor y receptor forman un ángulo de 90° . Este método permite obtener resultados bastante buenos cuando la longitud del elemento a analizar es de consideración o bien cuando las caras opuestas del mismo no son accesibles, sin embargo, la incertidumbre es mayor al no conocer con precisión la distancia entre transductores y por lo tanto el recorrido de las ondas.

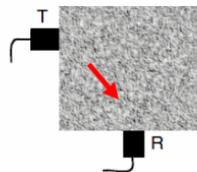


Figura 6. VPOU, medición semidirecta

La medición indirecta de la velocidad de propagación de ondas de sonido o VPOU-I, consiste en ubicar los transductores tanto emisor como receptor, en una misma cara del material a ensayar como se muestra en la Figura 7. La medición se debe realizar de modo que estos queden a una distancia L para posteriormente posicionarlos al doble de la distancia anterior entre sí ($2L$), siendo la medición final el promedio simple entre las dos mediciones. Su utilización prácticamente está destinada a determinar fisuras de grandes dimensiones y profundidad. Los resultados, no obstante, están sujetos a la realización de hipótesis en cuanto al recorrido de las ondas, existiendo además una dispersión y atenuación de las mismas debido a que sólo el 3% de la amplitud de la señal es transmitida.

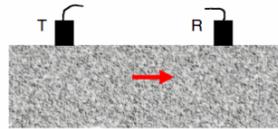


Figura 7. VPOU, medición indirecta

6.6.2. Ensayos de medición de índice esclerométrico

El índice esclerométrico relaciona la dureza superficial del hormigón con su resistencia mediante un valor adimensional obtenido de un ensayo llevado a cabo con un esclerómetro o Martillo Schmidt. Dicho ensayo, de carácter no destructivo, está regulado por la norma NCh1565of.1979 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1979) y establece que el instrumento utilizado debe ser un martillo de acero impulsado por un resorte que al dispararse golpea un émbolo de acero en contacto con la superficie de hormigón (ver Figura 8). La distancia de rebote se indica en una escala lineal graduada en el instrumento y éste debe funcionar de tal modo que la velocidad en el disparo sea fija y reproducible.

Además, la norma establece que los ensayos llevados a cabo deben realizarse con el mismo instrumento de modo que los resultados sean comparables, el golpe debe ser perpendicular a la superficie del material por lo que el martillo se posiciona firmemente contra la cara del elemento aumentando gradualmente la fuerza aplicada hasta que éste dispare. El valor del rebote se debe registrar aproximando a la menor división de la escala del instrumento, si el impacto produce trituración o bien golpea en algún intersticio en el hormigón este resultado se debe descartar. Se deben efectuar diez mediciones uniformemente distribuidas sobre la superficie del elemento ensayado, en caso que algún valor supere en siete unidades al promedio este también debe ser descartado.

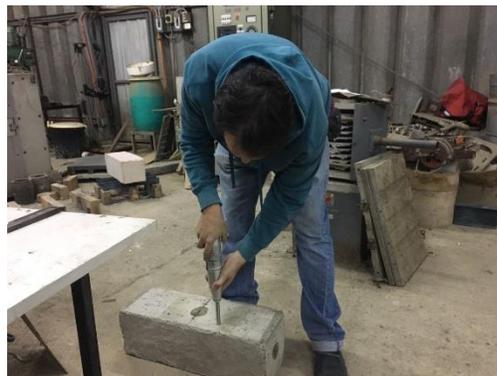


Figura 8. Ensayo de índice esclerométrico en columna

6.7. Ensayos de incendio en cilindros de hormigón

Según se definió, 3 de los 18 cilindros no fueron sometidos a ensayo de incendio con la finalidad de obtener la resistencia a la compresión cilíndrica f_c' patrón (valor de referencia para hormigón sin daño). Las restantes 15 probetas cilíndricas han sido sometidas en grupos de 3 (ver Figura 9), a ensayos de incendio de 30, 60, 90, 120 y 180 minutos respectivamente.



Figura 9. Grupo de probetas cilíndricas de hormigón sometidas a ensayo de incendio

6.8. Ensayos de fuego en vigas y columnas

De forma análoga a los cilindros tanto vigas como columnas fueron agrupados en subconjuntos de 3 unidades cada uno. Estos grupos, a excepción de uno, que se consideró para caracterizar las propiedades iniciales, fueron sometidos a ensayos de incendio de 30, 60, 90, 120 y 180 minutos.

Una vez definida la distribución y los tiempos de exposición se procedió al quemado de las probetas en un horno industrial de fabricación argentina marca Lindberg tal como se indica en el apartado 6.5, siguiendo principalmente recomendaciones de bibliografía investigada y datos experimentales internacionales. Allí se precisa que una buena caracterización de la acción de un incendio es mantener la temperatura de la cámara del horno entre los 700 y 1100°C en todo momento.

Con los resultados obtenidos de pruebas anteriores realizadas, se realizó el pre-calentamiento del horno por 4 a 5 horas, alcanzando temperaturas cercanas a los 1000°C para luego insertar el elemento a ensayar, con la finalidad de que la curva empírica temperatura-tiempo nominal del horno - ver Informe 2017-PUCV-LEIC-IE-1 100 (Alcaíno, 2017) - la curva empírica obtenida en cada caso y la curva de referencia indicada en la NCh935 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1997), sean comparables a partir de aproximadamente 30min de exposición en adelante, al mismo tiempo de generar una condición comparable con investigaciones internacionales mencionadas previamente (Alvarado, 2016).

Las características del horno utilizado permiten mantener una temperatura uniforme al interior gracias a un sistema de celdas metálicas que calientan las cuatro paredes de la cámara. Utilizando los elementos de manipulación presentados en el apartado 6.5 se introdujeron las probetas a través de la compuerta frontal, dejando para el caso de las vigas, 3 de las 4 caras longitudinales expuestas al calor (ver Figura 10). Esto último permite representar de forma fidedigna las condiciones de una viga en un sistema estructural, donde la cara superior se encuentra en contacto con algún otro elemento de hormigón armado.



Figura 10. Elemento de viga sometido a ensayo de incendio

6.9. Ensayos de resistencia (destructivos)

6.9.1. Ensayos de compresión de cilindros de hormigón

Los ensayos de compresión de los cilindros de hormigón se realizaron siguiendo las disposiciones de la norma NCh1037of.1977 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1977) determinando la tensión en compresión de las probetas y su deformación unitaria axial. Para lo cual se utilizó un sistema oleohidráulico consistente en una central hidráulica, un cilindro de simple efecto de 100tonf de capacidad y un sistema de medición indirecta de la carga consistente en un cilindro hidráulico de 5tonf de capacidad conectado en paralelo al cilindro de 100tonf (por lo que ambos siempre tienen la misma presión de aceite), que reacciona contra una celda de carga de 4.5tonf de capacidad, permitiendo medir la fuerza real aplicada en función de la fuerza medida en la celda de carga y de la razón entre las áreas efectivas de ambos cilindros.

Por otro lado, se dispuso de un transductor de desplazamiento de origen alemán marca Novotechnik modelo TR25 de 25mm de capacidad, anclado a un sistema compresímetro de origen italiano marca Matest modelo C133 para medir la deformación por compresión de la probeta en una longitud de 200mm (ver Figura 11).

Tanto la celda de carga como el transductor de deformación son conectados a un sistema de adquisición de datos con 16 canales y 24bit de origen alemán marca HBM modelo QuantumX - MX840B, realizando la adquisición de datos con el software Catman Easy V5.0.2.43.



Figura 11. Implementación del ensayo de compresión en probetas cilíndricas de hormigón

6.9.2. Ensayos de flexión de vigas

Los ensayos de resistencia en vigas corresponden a un ensayo de tracción por flexión a la rotura siguiendo las disposiciones de la norma NCh1038of.1977 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1977), especificadas para probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas. Se aplicaron cargas $P/2$ en los límites del tercio central de la luz de ensayo tal como se observa en el siguiente esquema (ver Figura 12).

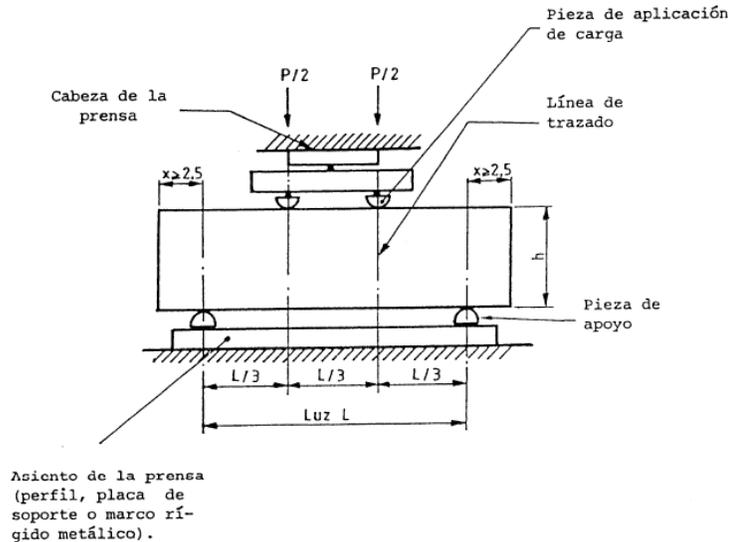


Figura 12. Ensayo de tracción por flexión con carga $P/2$ aplicada en límites del tercio central de la luz. NCh1038of.1977 (INN - Instituto Nacional de Normalización, 1977)

Las cargas $P/2$ se aplicaron mediante el uso de un dispositivo rotulado de flexión cargado, además de un sistema oleohidráulico consistente en una central hidráulica, un cilindro de simple efecto de 32tonf de capacidad y un sistema medición indirecta de la carga consistente en un cilindro hidráulico de 5tonf de capacidad conectado en paralelo al cilindro de 32tonf (por lo que ambos siempre tienen la misma presión de aceite), que reacciona contra una celda de carga de 4.5tonf de capacidad, permitiendo medir la fuerza real aplicada en función de la fuerza medida en la celda de carga y de la razón entre las áreas efectivas de ambos cilindros.

Por otro lado, se dispuso de dos transductores de desplazamiento de origen alemán marca Novotechnik modelo TR75 de 75mm de capacidad, anclados a un sistema rígido inercial diseñado y fabricado en el Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil, área Ingeniería Estructural (LEIC-IE) de manera de medir la deformación promedio (de ambos lados de la viga) por flexión en el centro de la luz de la probeta (ver Figura 13).

Tanto la celda de carga como los transductores de deformación son conectados a un sistema de adquisición de datos con 16 canales y 24bit de origen alemán marca HBM modelo QuantumX - MX840B, realizando la adquisición de datos con el software Catman Easy V5.0.2.43.



Figura 13. Implementación del ensayo de flexión en vigas de hormigón armado

6.9.3. Ensayos de compresión de columnas

Los ensayos de compresión en las columnas fueron realizados en un marco rígido de reacción de 400tonf de capacidad. La carga de compresión es aplicada mediante un sistema oleohidráulico consistente en una central hidráulica, un cilindro de simple efecto de 200tonf de capacidad y un sistema de medición indirecta de la carga consistente en un cilindro hidráulico de 5tonf de capacidad conectado en paralelo al cilindro de 200tonf (por lo que ambos siempre tienen la misma presión de aceite), que reacciona contra una celda de carga de 4.5tonf de capacidad, permitiendo medir la fuerza real aplicada en función de la fuerza medida en la celda de carga y de la razón entre las áreas efectivas de ambos cilindros.

Por otro lado, se dispuso de dos transductores de desplazamiento de origen alemán marca Novotechnik modelo TR75 de 75mm de capacidad, anclados a un sistema rígido anclado en dos secciones transversales de la columna ensayada distanciadas a 400mm entre sí (ver Figura 14). Estos sensores de desplazamiento permiten medir el acortamiento de la distancia entre las secciones indicadas a ambos lados la columna, obteniendo así la deformación promedio.

Tanto la celda de carga como los transductores de deformación son conectados a un sistema de adquisición de datos con 16 canales y 24bit de origen alemán marca HBM modelo QuantumX - MX840B, realizando la adquisición de datos con el software Catman Easy V5.0.2.43.



Figura 14. Implementación del ensayo de compresión en columnas

7. Resultados y Análisis

7.1. Compresión de cilindros

7.1.1. Resistencia

Los cilindros de hormigón fueron sometidos a un ensayo de compresión determinándose la tensión máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) a la rotura. Los resultados para cada una de las probetas se resumen en la Tabla 4, donde además se presentan promedios y desviaciones estándar por grupo según tiempo de exposición al fuego.

Tabla 4. Resultados de ensayo de compresión en probetas cilíndricas

Probeta	$\sigma_{\text{máx}}$ (kgf/cm ²)	Promedio grupo (kgf/cm ²)	Desviación Estándar (kgf/cm ²)
P1-000	114.97		
P2-000	118.01	153.08	51.77
P3-000	226.27		
P1-030	118.48		
P2-030	92.93	95.64	17.65
P3-030	75.51		
P1-060	40.89		
P2-060	51.45	47.05	4.49
P3-060	48.80		
P1-090	23.29		
P2-090	21.84	23.49	1.43
P3-090	25.33		
P1-120	14.68		
P2-120	19.43	17.56	2.06
P3-120	18.56		
P1-180	8.26		
P2-180	7.07	7.70	0.49
P3-180	7.78		

7.1.2. Modo de falla

Las fallas observadas para las probetas cilíndricas, resultaron ser bastante particulares, no produciéndose las típicas grietas diagonales que se presentan regularmente en este tipo de ensayo. A medida que aumenta el tiempo de exposición se produjo, con mayor facilidad, un desmoronamiento del concreto superficial en la mayoría de las probetas dejando en evidencia el deterioro creciente de la resistencia del hormigón en función del tiempo de exposición a altas temperaturas. Del mismo modo, se pudo observar que mientras mayor es el tiempo de exposición al efecto del incendio, el modo de falla (desmoronamiento) es más uniforme al igual que la resistencia (ver, en Tabla 4, que la desviación estándar decrece sistemáticamente con el aumento del tiempo de exposición a la acción del fuego).

7.1.3. Relación entre resistencia y tiempo de exposición a incendio

El comportamiento de las probetas cilíndricas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego se resume en la Figura 15, donde claramente se puede observar un decaimiento exponencial en la resistencia a la compresión con un coeficiente de correlación R^2 mayor a 0.95 considerado más que aceptable.

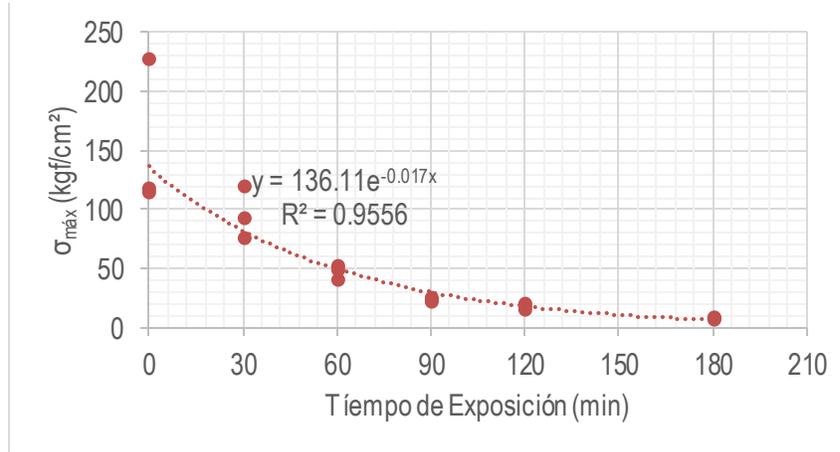


Figura 15. Resistencia de acuerdo al tiempo de exposición al fuego en probetas cilíndricas

7.2. Flexión de vigas

7.2.1. Resistencia

Los ensayos de flexión en vigas se realizaron según lo descrito en la sección 6.9 determinándose la carga total máxima (P_{\max}), el momento resistente máximo (M_{\max}) y la deformación (flecha) promedio en el centro de la probeta (Δ) expresada como un porcentaje de la luz ensayada. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 5, junto con los respectivos promedios y desviaciones estándar de cada uno de los 6 grupos según tiempo de exposición al fuego.

Tabla 5. Resultados ensayo de flexión de vigas

Probeta	$M_{\text{máx}}$ (kgf-cm)	Δ (%)	$P_{\text{máx}}$ (kgf)
P1-000	146170	0.46%	17196
P2-000	162963	0.55%	19172
P3-000	141723	0.48%	16673
Promedio P-000	150285	0.50%	17681
Desv.Est. P-000	9146	0.04%	1076
P1-030	112585	0.41%	13245
P2-030	108434	0.71%	12757
P3-030	123488	0.72%	14528
Promedio P-030	114836	0.61%	13510
Desv.Est. P-030	6348	0.14%	747
P1-060	64179	0.84%	7550
P2-060	100889	0.89%	11869
P3-060	98314	1.32%	11566
Promedio P-060	87794	1.02%	10329
Desv.Est. P-060	16731	0.22%	1968
P1-090	83444	0.94%	9817
P2-090	75185	0.85%	8845
P3-090	67588	0.79%	7952
Promedio P-090	75406	0.86%	8871
Desv.Est. P-090	6475	0.06%	762
P1-120	37608	0.99%	4424
P2-120	61010	1.02%	7178
P3-120	64288	1.40%	7563
Promedio P-120	54302	1.14%	6388
Desv.Est. P-120	11880	0.19%	1398
P1-180	31803	1.84%	3742
P2-180	28329	1.54%	3333
P3-180	27821	1.07%	3273
Promedio P-180	29317	1.48%	3449
Desv.Est. P-180	1770	0.32%	208

7.2.2. Modos de falla

Distintos tipos de falla se pueden observar en las vigas de hormigón armado una vez realizados los ensayos de resistencia, lo que se suma además a la coloración rojiza cada vez más intensa de acuerdo al tiempo de exposición a incendio del que fueron objeto.

Las vigas sin exposición, por ejemplo, presentaron falla por corte con grietas debido a la flexión tal como se puede observar en la Figura 16. Similar comportamiento tuvo el grupo de vigas con 30 minutos de quemado, además de surgir pequeños daños por aplastamiento en los apoyos. Para el grupo de 60 minutos se observó falla balanceada en una probeta en particular además de una gran grieta central producto de la flexión, la falla por corte sigue presentándose con un aumento del aplastamiento en los apoyos y desprendimiento del recubrimiento en la misma zona. Dicho aplastamiento se incrementa para el grupo de 90 minutos en adelante, siendo de gran consideración para las vigas expuestas a 120 y 180 minutos con pérdida total de recubrimiento, falla por corte y sin fisuras por flexión. Es importante mencionar que se observó desprendimiento del concreto al contacto en las probetas expuestas a 180 minutos de incendio.



Figura 16. Fallas para elementos de vigas según tiempo de exposición a incendio.

7.2.3. Relación entre resistencia y tiempo de exposición a incendio

El comportamiento de las vigas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego se puede observar en la Figura 17, donde la resistencia máxima decae de forma lineal a medida que aumenta dicha exposición.

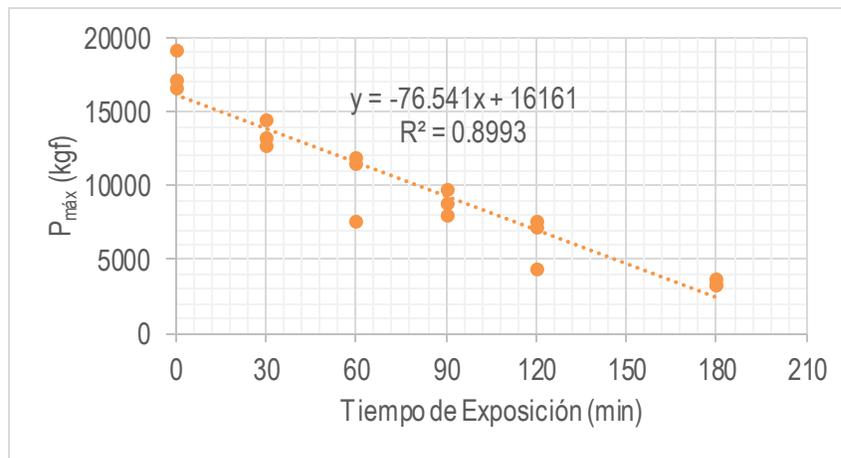


Figura 17. Resistencia en vigas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego

Caso opuesto ocurre con la deformación alcanzada por las probetas, aumentando en el tiempo de exposición como es esperable. Un comportamiento de tipo lineal se puede observar en la Figura 18 con un coeficiente de correlación R^2 mayor a 0.69 que se considera aceptable.

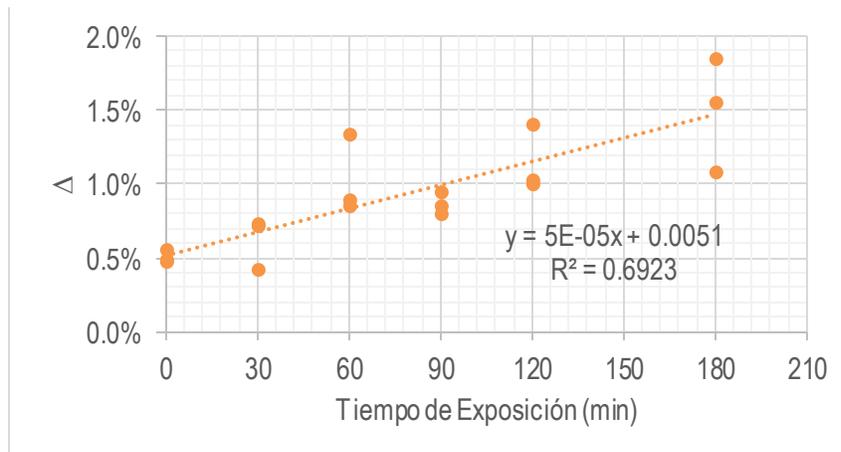


Figura 18. Deformación en vigas según el tiempo de exposición al fuego

7.2.4. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición directa (VPOU-D)

Existe una clara relación de disminución de la VPOU en los elementos ensayados respecto al tiempo de incendio al que fueron expuestos. Esto se puede observar en la Tabla 6 con los valores para todas las probetas ensayadas junto con los correspondientes promedios y desviaciones estándar de cada grupo.

Tabla 6. VPOU en vigas. Medición directa

Probeta	VPOU-D (m/s)	Promedio grupo (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
P1-000	4025		
P2-000	3968	3934	92
P3-000	3807		
P1-030	2897		
P2-030	2298	2515	271
P3-030	2348		
P1-060	1934		
P2-060	2147	1997	106
P3-060	1911		
P1-090	1955		
P2-090	1681	1688	216
P3-090	1427		
P1-120	1082		
P2-120	1413	1272	139
P3-120	1320		
P1-180	838		
P2-180	435	661	168
P3-180	711		

Este decaimiento se observa claramente en la Figura 19, graficándose los resultados para el método de medición directa (VPOU-D) en vigas, donde el ajuste de tipo exponencial cuenta con un valor en el coeficiente R^2 mayor a 0.92 lo que indica una correlación más que aceptable.

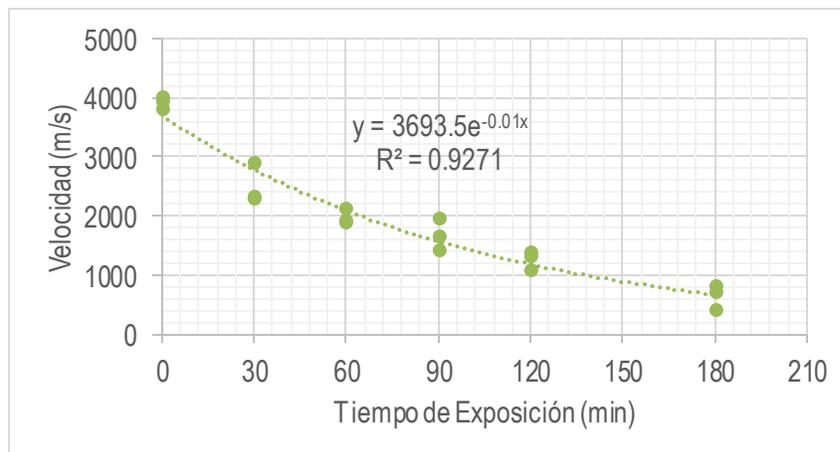


Figura 19. Variación en la VPOU-D respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas.

7.2.5. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición semidirecta (VPOU-S)
 Situación similar se presenta en la Tabla 7, para el caso de la medición semidirecta (VPOU-S) en vigas, donde la velocidad de propagación de ondas sigue también una tendencia de disminución respecto al tiempo de exposición al fuego. Se informa la medición individual por probeta, y el promedio y desviación estándar para cada grupo.

Tabla 7. VPOU en vigas. Medición semidirecta

Probeta	VPOU-S (m/s)	Promedio grupo (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
P1-000	4345		
P2-000	4031	4226	139
P3-000	4303		
P1-030	2158		
P2-030	2098	2231	148
P3-030	2437		
P1-060	1235		
P2-060	1398	1452	202
P3-060	1721		
P1-090	1599		
P2-090	1075	1248	248
P3-090	1071		
P1-120	413		
P2-120	863	729	224
P3-120	910		
P1-180	545		
P2-180	472	430	115
P3-180	273		

Graficando los valores obtenidos se puede observar que la velocidad de propagación decae de manera exponencial respecto al tiempo de exposición al fuego (ver Figura 20) con un coeficiente de correlación R^2 mayor a 0.89 considerándose también un buen ajuste a los valores obtenidos.

7.2.1. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición indirecta (VPOU-I)
 Para el caso de la medición indirecta (VPOU-I) en vigas la disminución fue más rápida para un mismo tiempo de exposición al fuego en comparación con las mediciones precedentes. En la Tabla 8, se informa tanto la medición individual por probeta como el promedio y desviación estándar de cada grupo.

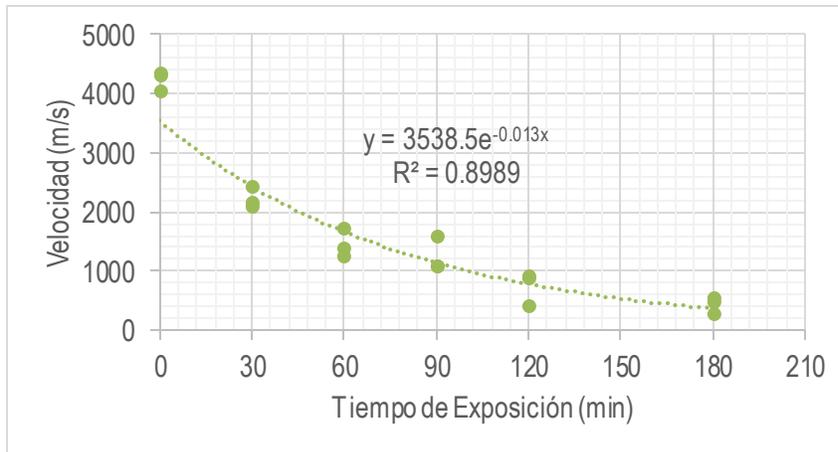


Figura 20. Variación en la VPOU-S respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas

Tabla 8. VPOU en vigas. Medición indirecta

Probeta	VPOU-I (m/s)	Promedio grupo (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
P1-000	3706	3600	75
P2-000	3544		
P3-000	3551		
P1-030	1002	742	196
P2-030	529		
P3-030	694		
P1-060	208	387	129
P2-060	501		
P3-060	454		
P1-090	515	380	100
P2-090	348		
P3-090	277		
P1-120	61	177	119
P2-120	341		
P3-120	129		
P1-180	192	119	55
P2-180	105		
P3-180	59		

Como se puede apreciar en la Figura 21, donde el ajuste que se obtiene al graficar los valores anteriores resulta ser también de tipo exponencial, el coeficiente de correlación R^2 resulta mayor a 0.75 considerándose un buen ajuste a las mediciones obtenidas.

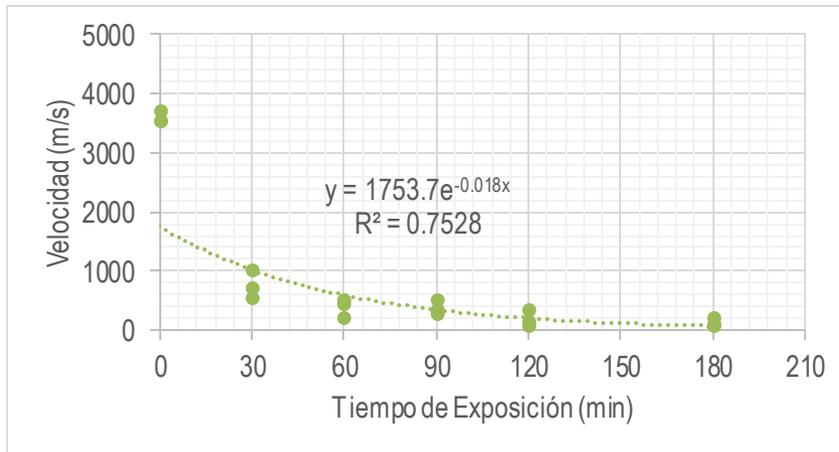


Figura 21. Variación en la VPOU-I respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas

7.2.2. Relación entre VPOU y resistencia

Se puede relacionar la VPOU y la resistencia a la flexión en vigas tomando la razón entre los resultados luego de la exposición al fuego y los medidos inicialmente, esto se presenta en la Tabla 9 para cada medición de velocidad y la resistencia de cada probeta.

Tabla 9. Relación final/inicial para VPOU y resistencia a la flexión en vigas

Viga	Relación VPOU-D (V/V ₀)	Relación VPOU-S (V/V ₀)	Relación VPOU-I (V/V ₀)	Relación Resistencia (R/R ₀)
P1-000	1.00	1.00	1.00	1.00
P2-000	1.00	1.00	1.00	1.00
P3-000	1.00	1.00	1.00	1.00
P1-030	0.75	0.51	0.30	0.75
P2-030	0.59	0.52	0.15	0.72
P3-030	0.59	0.60	0.22	0.82
P1-060	0.50	0.31	0.07	0.43
P2-060	0.54	0.32	0.14	0.67
P3-060	0.50	0.44	0.13	0.65
P1-090	0.49	0.35	0.14	0.56
P2-090	0.44	0.23	0.09	0.50
P3-090	0.37	0.27	0.08	0.45
P1-120	0.29	0.10	0.02	0.25
P2-120	0.39	0.18	0.09	0.41
P3-120	0.33	0.19	0.03	0.43
P1-180	0.23	0.12	0.05	0.21
P2-180	0.10	0.11	0.03	0.19
P3-180	0.18	0.06	0.02	0.19

Graficando los valores representados en la tabla anterior se puede observar de forma más clara la relación que existe entre la resistencia a la flexión y la VPOU. La Figura 22 muestra el comportamiento de las probetas para el caso de la medición directa, como se observa el comportamiento es de tipo lineal con un coeficiente de correlación mayor a 0.92 que puede considerarse más que aceptable. La Figura 23 por su parte presenta la medición semidirecta, donde se aprecia un comportamiento dado por una correlación de tipo polinómica de orden 2 con un coeficiente R^2 mayor a 0.96. Por último, la Figura 24 para la medición indirecta, muestra una correlación de tipo logarítmica con un coeficiente R^2 mayor a 0.91 que puede considerarse también más que aceptable.

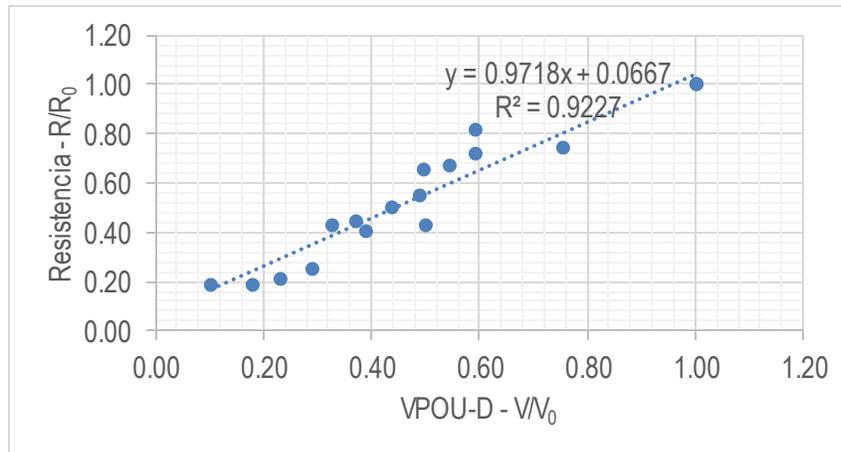


Figura 22. Relación resistencia respecto a la VPOU-D para vigas

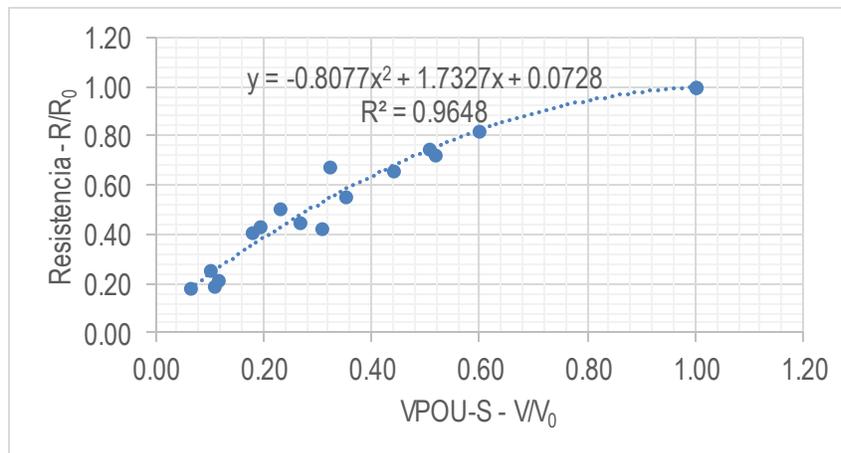


Figura 23. Relación resistencia respecto a la VPOU-S para vigas

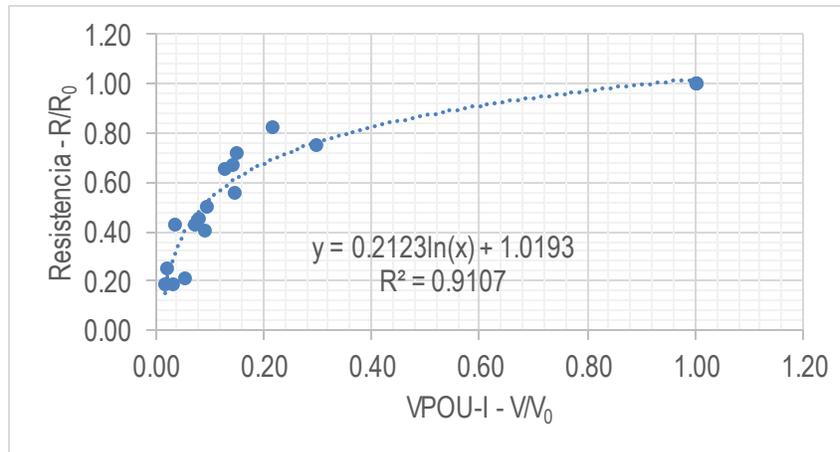


Figura 24. Relación resistencia respecto a la VPOU-I para vigas

7.2.3. Índice esclerométrico

La determinación del índice esclerométrico siguió lo especificado en el apartado 6.6, y sus resultados se presentan en Tabla 10 para las vigas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego al que fueron sometidas. Se presentan los resultados por cada probeta ensayada además del promedio y desviación estándar de cada grupo.

Tabla 10. Resultados ensayo Martillo Schmidt para vigas

Probeta	Índice Esclerométrico	Promedio Grupo	Desviación Estándar
P1-000	30.0		
P2-000	26.0	27.0	2.2
P3-000	25.0		
P1-030	28.0		
P2-030	25.7	26.7	1.0
P3-030	26.4		
P1-060	24.4		
P2-060	25.7	25.4	0.8
P3-060	26.2		
P1-090	24.1		
P2-090	20.7	22.1	1.5
P3-090	21.5		
P1-120	17.8		
P2-120	22.9	20.8	2.2
P3-120	21.7		
P1-180	15.6		
P2-180	15.1	15.2	0.3
P3-180	14.9		

7.2.4. Relación entre índice esclerométrico y tiempo de exposición a incendio

La relación entre el índice esclerométrico respecto al tiempo de exposición al fuego queda representada en la Figura 25, donde se puede apreciar su disminución a medida que aumenta el tiempo de exposición al fuego correlacionándose de forma lineal con un coeficiente R^2 mayor a 0.84 considerado más que aceptable.

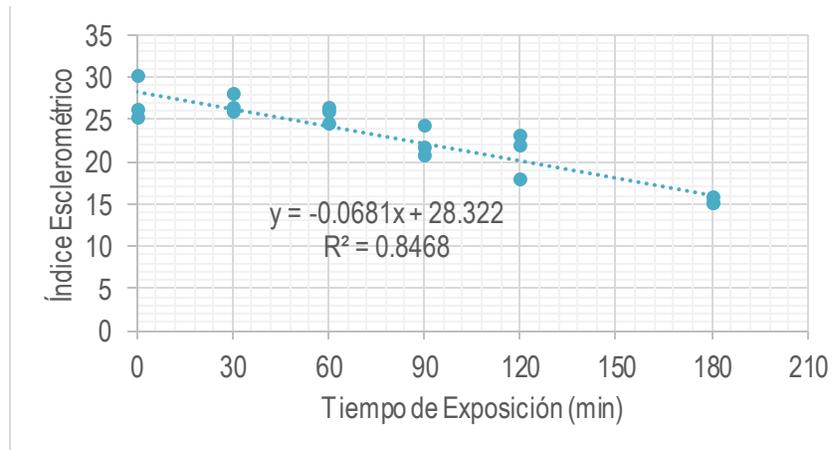


Figura 25. Relación de índice esclerométrico respecto al tiempo de exposición al fuego en vigas

7.2.5. Relación entre índice esclerométrico y resistencia

Con los resultados obtenidos de los ensayos hasta aquí presentados es posible caracterizar el comportamiento de las vigas de hormigón armado tomando la razón entre los valores finales (luego de la exposición al fuego) y los iniciales tanto del ensayo destructivo como de los no destructivos, obteniendo un valor que va entre 0 y 1 tal como se observa en la Tabla 11. Allí se presenta esta razón o relación para el índice esclerométrico y resistencia máxima obtenida del ensayo de flexión para vigas, para cada uno de los seis grupos de exposición al fuego.

Tabla 11. Relación final/inicial para índice esclerométrico y resistencia a la flexión en vigas

Viga	Relación Índice Esclerométrico (IE/IE ₀)	Relación Resistencia (R/R ₀)
P1-000	1.00	1.00
P2-000	1.00	1.00
P3-000	1.00	1.00
P1-030	0.84	0.75
P2-030	0.83	0.72
P3-030	0.88	0.82
P1-060	0.82	0.43
P2-060	0.83	0.67
P3-060	0.92	0.65
P1-090	0.79	0.56
P2-090	0.62	0.50
P3-090	0.72	0.45
P1-120	0.57	0.25
P2-120	0.71	0.41
P3-120	0.76	0.43
P1-180	0.53	0.21
P2-180	0.51	0.19
P3-180	0.48	0.19

El resultado de graficar los valores para cada grupo de exposición al fuego de la tabla precedente se puede observar en la Figura 26. Donde existe una relación de tipo lineal entre las razones resistencia e índice esclerométrico con un coeficiente de correlación mayor a 0.87 que se considera aceptable.

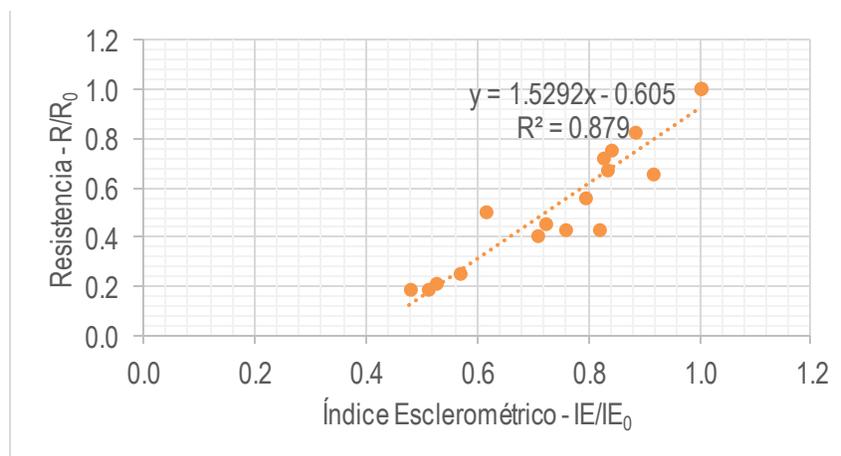


Figura 26. Relación resistencia respecto al índice esclerométrico para vigas

7.3. Compresión de columnas

7.3.1. Resistencia

La resistencia a la compresión en las columnas de hormigón armado se obtuvo de acuerdo a lo indicado en el apartado 6.9. Los gráficos obtenidos de los ensayos de compresión en los seis grupos de probetas se pueden observar desde la Figura 27, para un tiempo de exposición al fuego de cero (sin exposición), hasta la Figura 32 para 180 minutos de exposición.

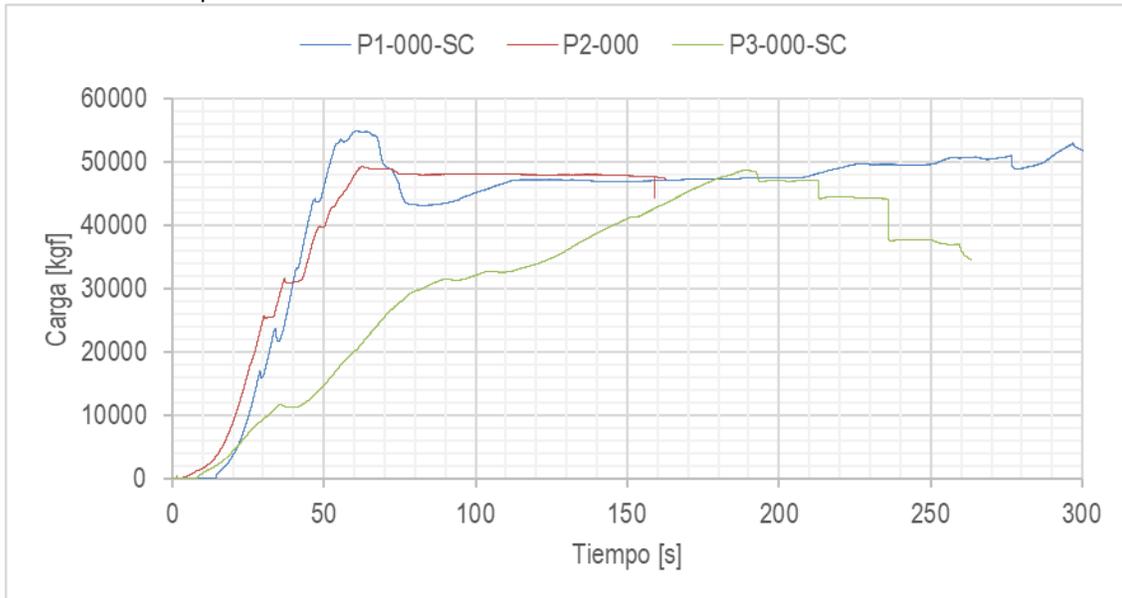


Figura 27. Ensayo de compresión para columnas sin exposición al fuego

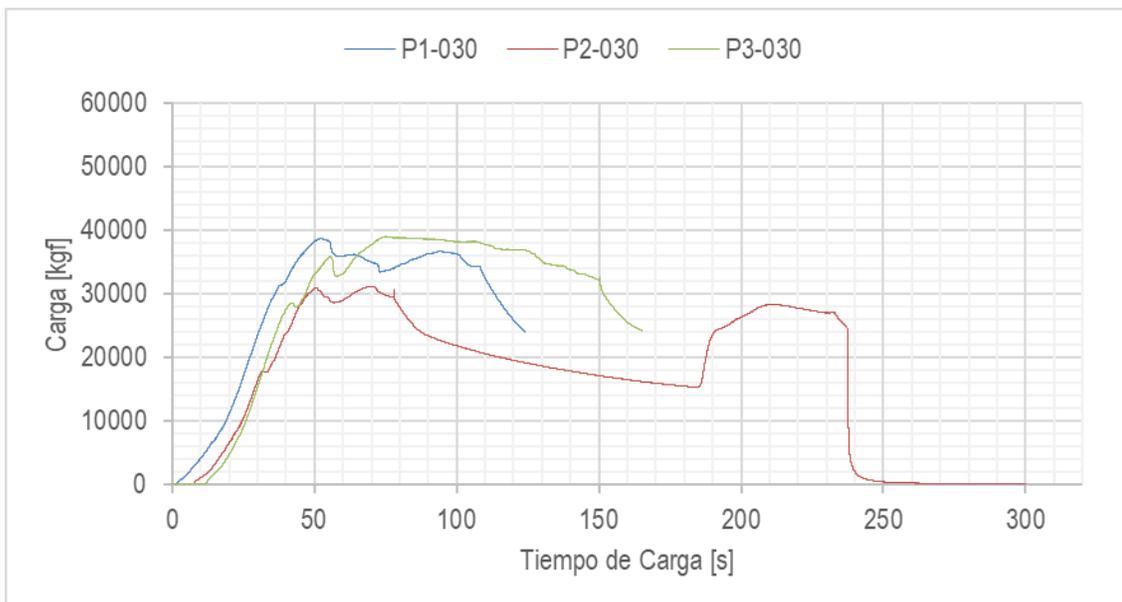


Figura 28. Ensayo de compresión para columnas con 30 minutos de exposición al fuego

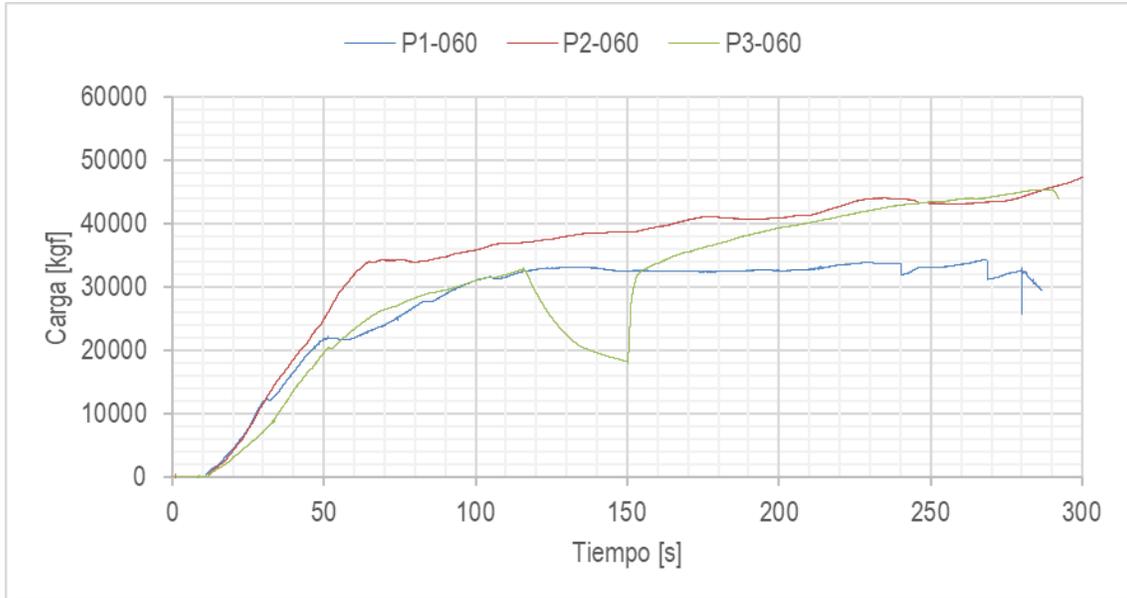


Figura 29. Ensayo de compresión para columnas con 60 minutos de exposición al fuego

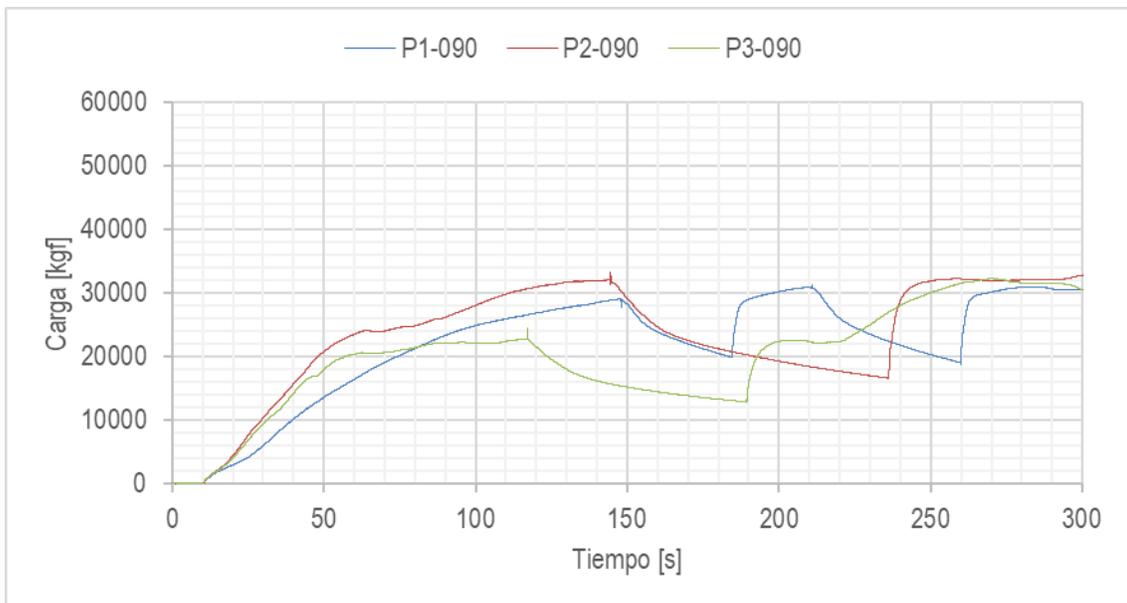


Figura 30. Ensayo de compresión para columnas con 90 minutos de exposición al fuego

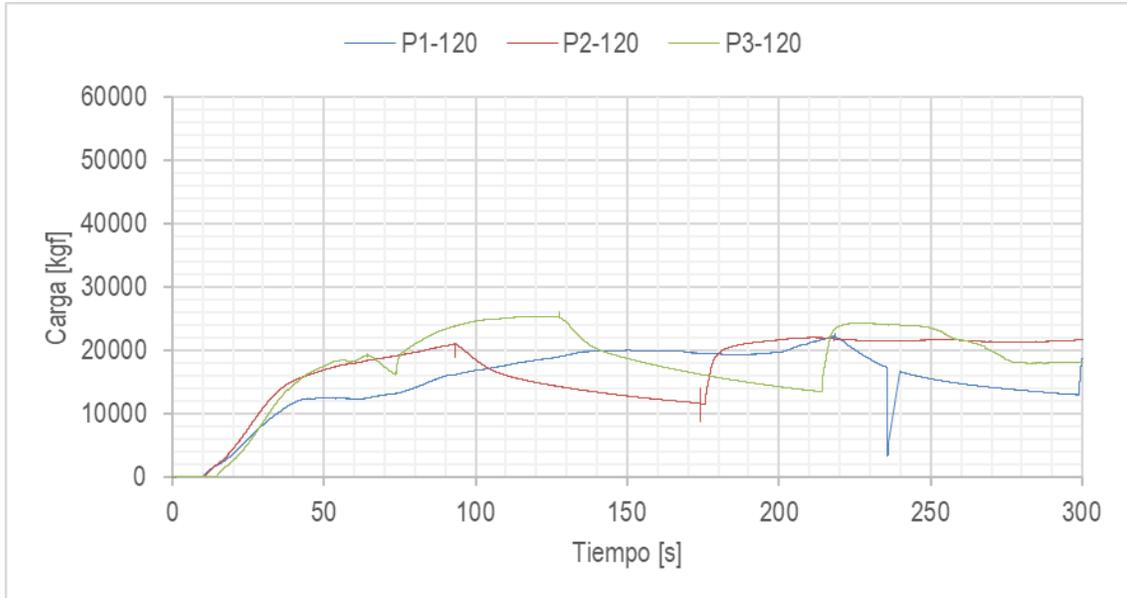


Figura 31. Ensayo de compresión para columnas con 120 minutos de exposición al fuego

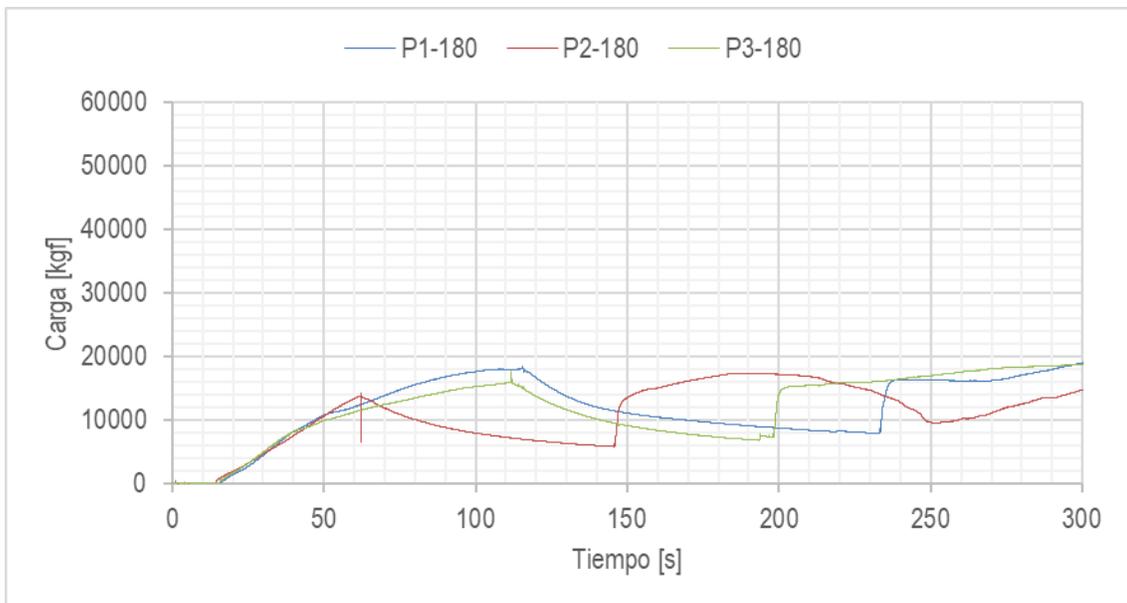


Figura 32. Ensayo de compresión para columnas con 180 minutos de exposición al fuego

A continuación, la Tabla 12 resume los resultados obtenidos de resistencia máxima a la compresión de cada probeta y el correspondiente promedio y desviación estándar de cada grupo. A simple vista se observa una disminución de la carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) a medida que aumenta el tiempo de exposición al fuego en las probetas.

Tabla 12. Resistencia máxima a la compresión para columnas

Probeta	$P_{m\acute{a}x}$ (kgf)	Promedio Grupo (kgf)	Desviación Estándar (kgf)
P1-000	54946		
P2-000	49314	50991	2807
P3-000	48714		
P1-030	38689		
P2-030	31157	36284	3628
P3-030	39007		
P1-060	34334		
P2-060	47351	42392	5748
P3-060	45492		
P1-090	31277		
P2-090	33254	32260	807
P3-090	32249		
P1-120	22592		
P2-120	22030	23593	1828
P3-120	26157		
P1-180	18979		
P2-180	17333	18337	719
P3-180	18701		

7.3.2. Modos de falla

Como se mencionó en el apartado 6.3 las columnas se diseñaron buscando que éstas tuviesen un comportamiento dúctil y que la resistencia del núcleo confinado sea igual a la resistencia de la sección completa sin confinar.

Los tipos de fallas representativos para cada grupo de columnas se encuentran en la Figura 33, de acuerdo al tiempo de exposición al fuego al que fueron sometidas. El grupo de probetas sin exponer presentó pérdidas de recubrimiento principalmente en los extremos, situación que se incrementó a medida que se avanzó en tiempo de quemado hasta llegar a una probeta prácticamente sin recubrimiento como el que se observa para el caso de 180 minutos.

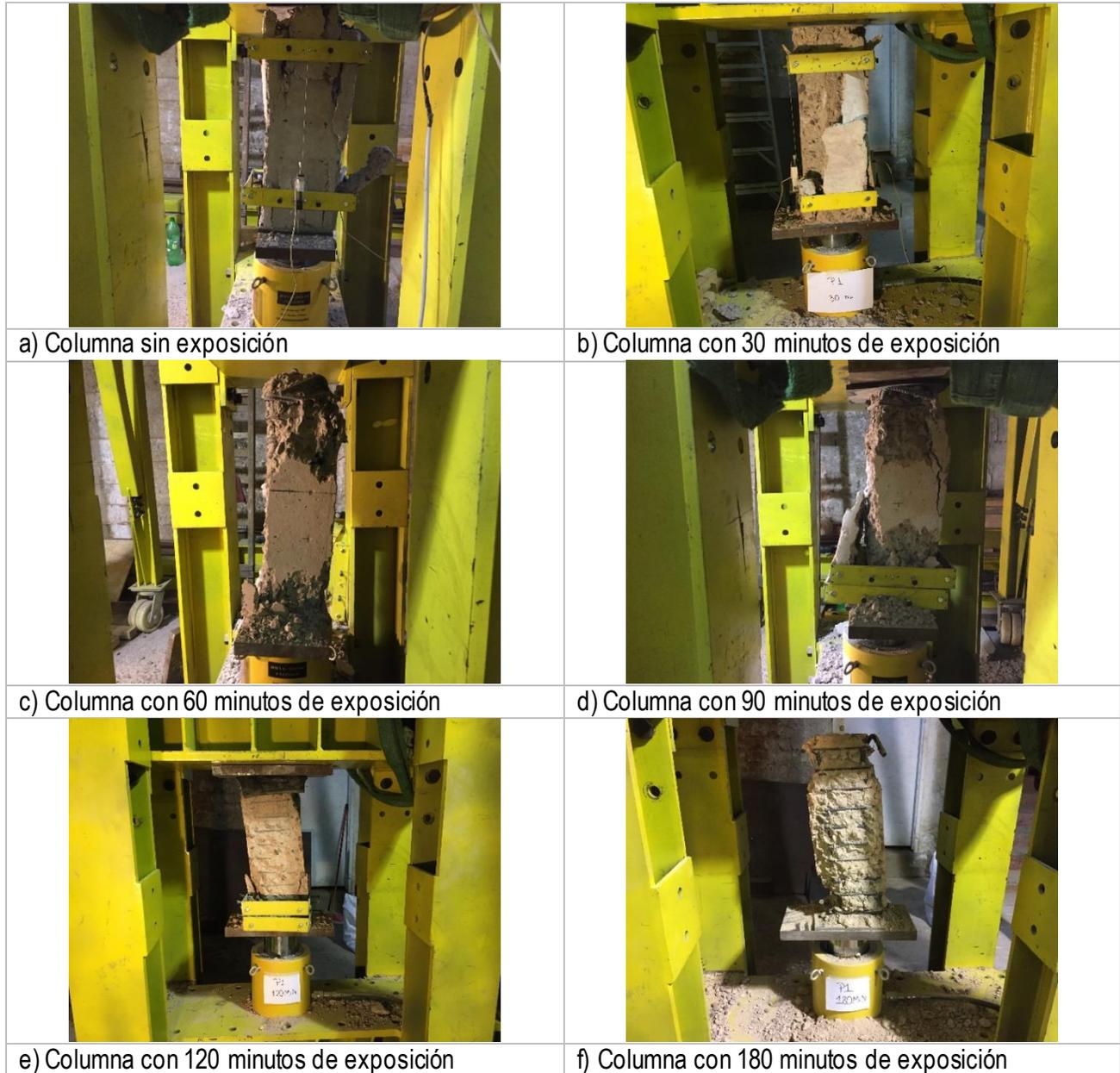


Figura 33. Modos de falla para columnas

7.3.3. Relación entre resistencia y tiempo de exposición a incendio

Al igual que ocurre con los elementos de viga ensayados, las columnas presentan una disminución en su resistencia máxima a la compresión a medida que se exponen a períodos de incendio mayores. Esto se puede observar claramente al graficar los resultados obtenidos para las probetas tal como se muestra en la Figura 34, donde la correlación que mejor se ajusta es el de tipo exponencial con un coeficiente R^2 mayor de 0.86 que puede considerarse aceptable.

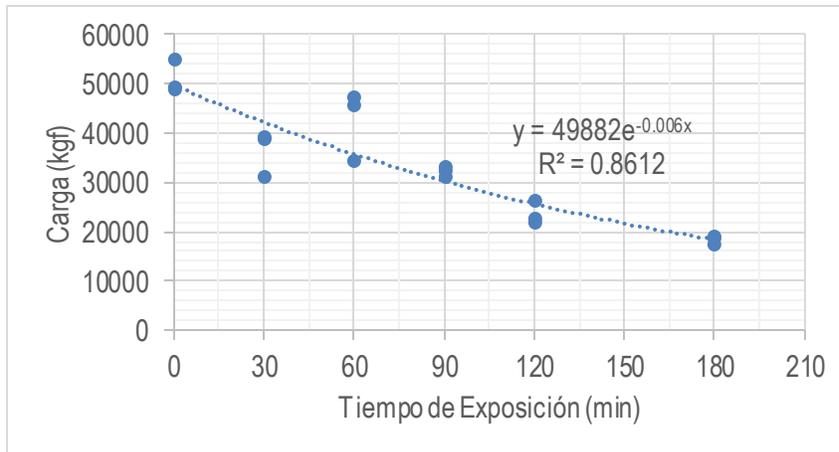


Figura 34. Resistencia a la compresión para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego

7.3.4. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición directa (VPOU-D)

La medición de la VPOU en columnas se realizó siguiendo el mismo procedimiento de las vigas de hormigón armado detallados en el apartado 7.2. En el caso de la medición directa, los resultados obtenidos se presentan en Tabla 13 para cada probeta y grupo.

Tabla 13. VPOU en columnas. Medición directa

Probeta	VPOU-D (m/s)	Promedio Grupo (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
P1-000	4043	4120	66
P2-000	4205		
P3-000	4112		
P1-030	2428	2248	163
P2-030	2033		
P3-030	2283		
P1-060	1649	1713	52
P2-060	1712		
P3-060	1776		
P1-090	1043	1264	295
P2-090	1681		
P3-090	1069		
P1-120	1018	1003	30
P2-120	1030		
P3-120	962		
P1-180	577	610	131
P2-180	468		
P3-180	785		

Estos resultados pueden apreciarse de mejor manera en la Figura 35 donde se observa claramente una disminución de tipo exponencial en la velocidad de propagación a medida que aumenta el tiempo de exposición al fuego. El coeficiente de correlación R^2 obtenido resulta mayor a 0.92 considerándose un ajuste más que aceptable.

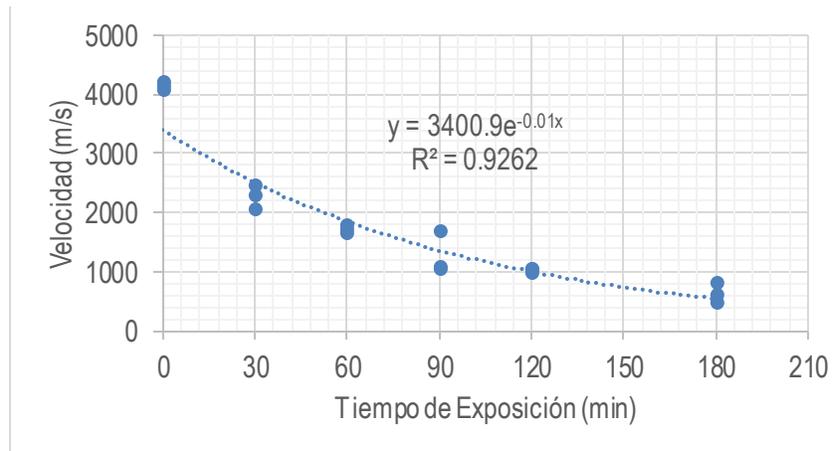


Figura 35. VPOU-D para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego

7.3.5. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición semidirecta (VPOU-S)

Similares resultados se obtuvieron para la medición semidirecta de la VPOU. El resumen se puede observar en la Tabla 14 para cada grupo de exposición al fuego y su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 14. VPOU en columnas. Medición semidirecta

Probeta	VPOU-S (m/s)	Promedio Grupo	Desviación Estándar
P1-000	4248		
P2-000	4291	4205	93
P3-000	4076		
P1-030	1589		
P2-030	2191	1916	249
P3-030	1967		
P1-060	1482		
P2-060	1091	1505	348
P3-060	1941		
P1-090	324		
P2-090	1075	597	339
P3-090	391		
P1-120	334		
P2-120	469	387	59
P3-120	358		
P1-180	151		
P2-180	375	286	97
P3-180	333		

Estos resultados gráficamente quedan representados en la Figura 36 donde se observa nuevamente un decaimiento exponencial en la velocidad medida, obteniéndose un coeficiente de correlación R^2 mayor a 0.84 considerado un buen ajuste a las mediciones registradas.

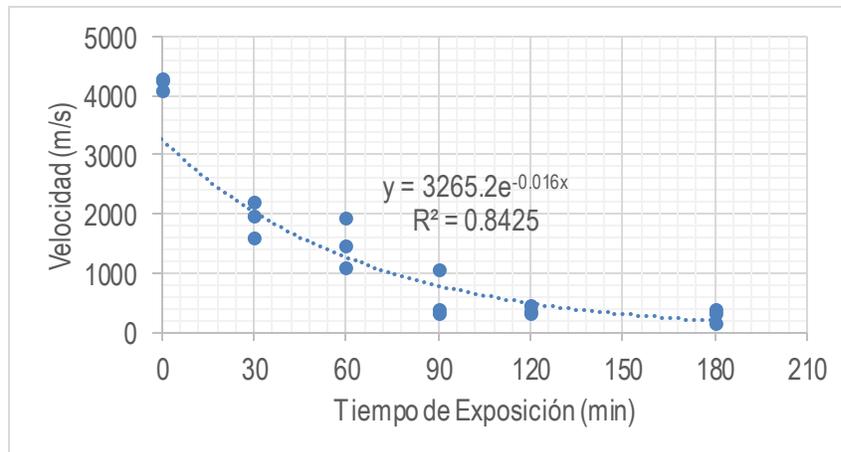


Figura 36. VPOU-S para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego

7.3.6. Velocidad de propagación de ondas de ultrasonido: medición indirecta (VPOU-I)

La medición indirecta de la VPOU entrega los resultados que se resumen en la Tabla 15, en la que se observan valores bastante menores en comparación con los dos métodos de medición precedentes. Se entrega además los respectivos promedios sub-grupales y desviaciones estándar según tiempo de exposición al fuego.

Tabla 15. VPOU en columnas. Medición indirecta

Probeta	VPOU-I (m/s)	Promedio Grupo (m/s)	Desviación Estándar (m/s)
P1-000	3221	3496	199
P2-000	3582		
P3-000	3686		
P1-030	1640	1266	303
P2-030	898		
P3-030	1261		
P1-060	524	733	312
P2-060	501		
P3-060	1175		
P1-090	215	210	115
P2-090	348		
P3-090	67		
P1-120	752	516	230
P2-120	204		
P3-120	591		
P1-180	76	62	10
P2-180	52		
P3-180	59		

La relación entre velocidad de propagación y tiempo de exposición al incendio sigue siendo de tendencia al decaimiento exponencial como se puede apreciar en la Figura 37 donde la correlación indica un factor R^2 superior a 0.78 que se considera aceptable.

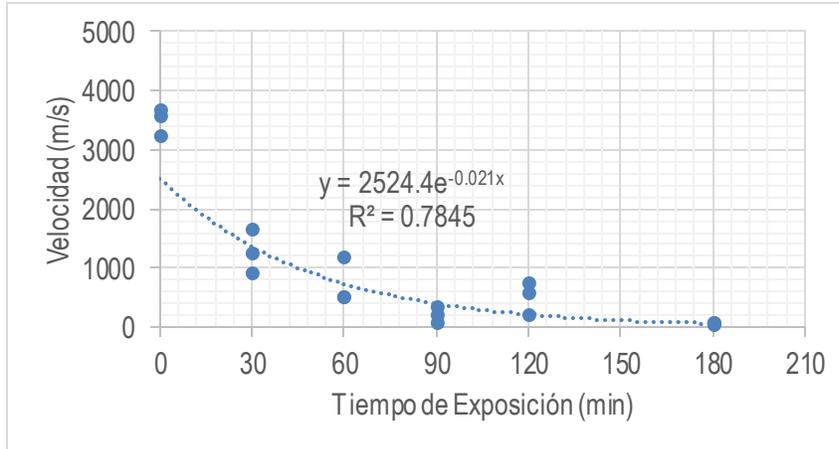


Figura 37. VPOU-I para columnas de acuerdo al tiempo de exposición al fuego

7.3.7. Relación entre VPOU y resistencia

Tomando la relación entre los resultados finales de los ensayos, luego de la exposición al fuego y los medidos inicialmente se puede relacionar el comportamiento de las columnas de acuerdo a la resistencia máxima en compresión, esto se presenta en Tabla 16 para cada medición de VPOU y la resistencia de cada probeta.

Tabla 16. Relación final/inicial para VPOU y resistencia a la compresión en columnas

Columna	Relación VPOU-D (V/V ₀)	Relación VPOU-S (V/V ₀)	Relación VPOU-I (V/V ₀)	Relación Resistencia (R/R ₀)
P1-000	1.00	1.00	1.00	1.00
P2-000	1.00	1.00	1.00	1.00
P3-000	1.00	1.00	1.00	1.00
P1-030	0.62	0.39	0.44	0.76
P2-030	0.53	0.53	0.23	0.61
P3-030	0.58	0.45	0.34	0.76
P1-060	0.44	0.38	0.20	0.67
P2-060	0.46	0.27	0.13	0.93
P3-060	0.46	0.51	0.39	0.89
P1-090	0.27	0.08	0.07	0.61
P2-090	0.41	0.27	0.09	0.65
P3-090	0.26	0.09	0.02	0.63
P1-120	0.28	0.09	0.25	0.44
P2-120	0.26	0.12	0.09	0.43
P3-120	0.25	0.09	0.16	0.51
P1-180	0.16	0.04	0.04	0.37
P2-180	0.13	0.10	0.02	0.34
P3-180	0.21	0.08	0.02	0.37

Si se grafican los valores representados en la tabla anterior se puede observar de forma más clara la relación que existe entre la resistencia a la compresión y la VPOU, como muestra la Figura 38 para el caso de la medición directa.

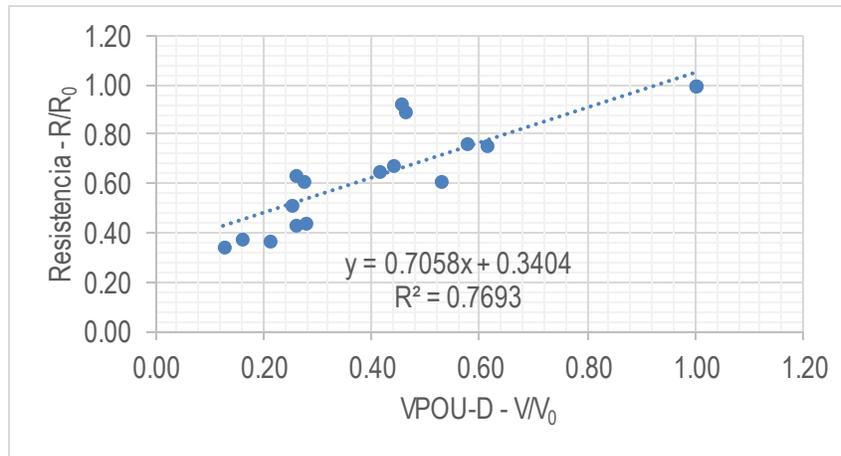


Figura 38. Relación resistencia respecto a la VPOU-D para columnas

Similar resultado se obtiene de la medición semidirecta e indirecta de la VPOU que se muestra en las Figura 39 y Figura 40 respectivamente.

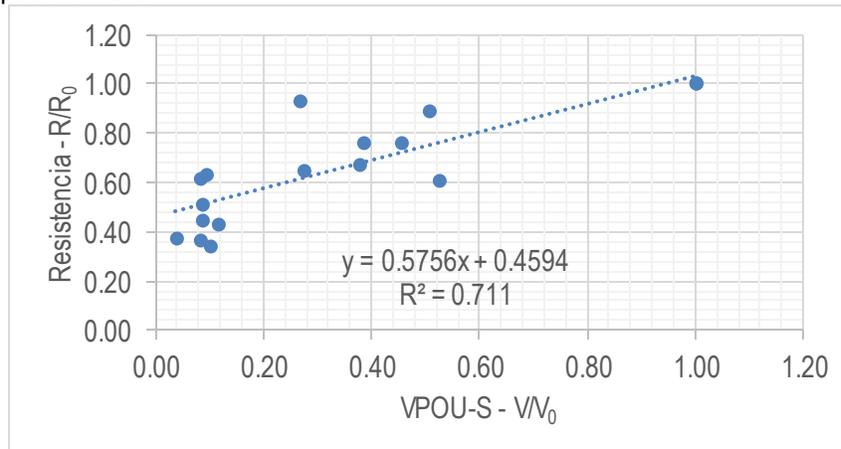


Figura 39. Relación resistencia respecto a la VPOU-S para columnas

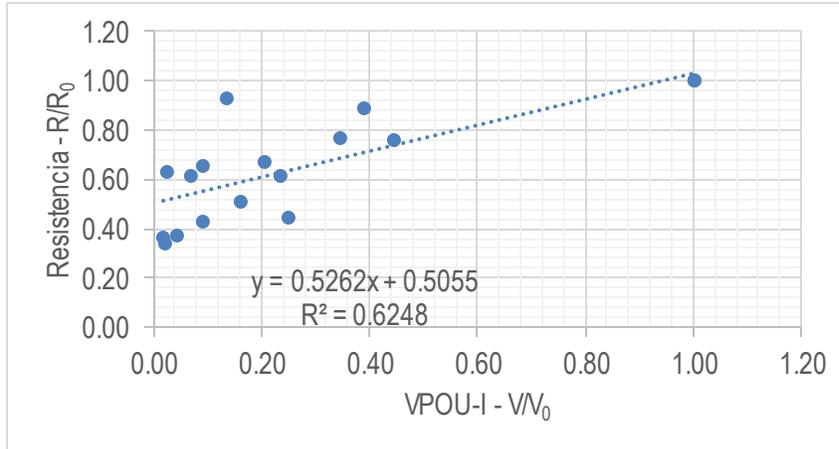


Figura 40. Relación resistencia respecto a la relación VPOU-I para columnas

7.3.8. Índice esclerométrico

La realización del ensayo de medición del índice esclerométrico en columnas siguió exactamente el mismo procedimiento y normativa descritas en el apartado 6.6 y que se aplicó en las vigas de hormigón armado. La Tabla 17 resume los resultados obtenidos para cada probeta y grupo según el tiempo de exposición al fuego.

Tabla 17. Resultados ensayo Martillo Schmidt para columnas

Probeta	Índice Esclerométrico	Promedio	Desviación Estándar
P1-000	30.40		
P2-000	32.00	30.50	1.19
P3-000	29.10		
P1-030	25.40		
P2-030	25.00	25.07	0.25
P3-030	24.80		
P1-060	20.10		
P2-060	22.80	21.27	1.13
P3-060	20.90		
P1-090	19.80		
P2-090	18.80	19.23	0.42
P3-090	19.10		
P1-120	15.90		
P2-120	17.80	16.97	0.79
P3-120	17.20		
P1-180	14.50		
P2-180	13.60	14.23	0.45
P3-180	14.60		

7.3.9. Relación entre índice esclerométrico y tiempo de exposición a incendio

La Figura 41 grafica el comportamiento del índice esclerométrico de acuerdo al tiempo de exposición al fuego en las columnas de hormigón armado. Se observa también un decaimiento de tipo exponencial con un coeficiente de correlación R^2 mayor a 0.95 considerado un ajuste más que aceptable.

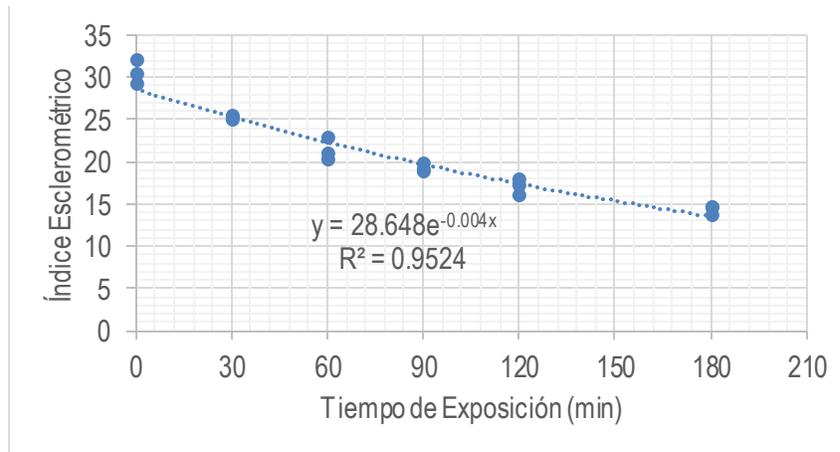


Figura 41. Relación de índice esclerométrico respecto al tiempo de exposición al fuego en columnas

7.3.10. Relación entre índice esclerométrico y resistencia

Tomando nuevamente la razón entre los valores medidos luego de cada ensayo y los medidos inicialmente, se puede obtener una relación que representa el comportamiento de las columnas en cuanto a su resistencia a la compresión según el índice esclerométrico medido. El resultado de este procedimiento se presenta en la Tabla 18 para cada elemento de columna de hormigón armado.

Tabla 18. Relación final/inicial para índice esclerométrico y resistencia a la compresión en columnas

Columna	Relación Índice Esclerométrico (IE/IE ₀)	Relación Resistencia (R/R ₀)
P1-000	1.00	1.00
P2-000	1.00	1.00
P3-000	1.00	1.00
P1-030	0.84	0.76
P2-030	0.81	0.61
P3-030	0.87	0.76
P1-060	0.76	0.67
P2-060	0.83	0.93
P3-060	0.74	0.89
P1-090	0.72	0.61
P2-090	0.75	0.65
P3-090	0.63	0.63
P1-120	0.63	0.44
P2-120	0.67	0.43
P3-120	0.60	0.51
P1-180	0.51	0.37
P2-180	0.50	0.34
P3-180	0.55	0.37

La Figura 42 muestra que las columnas se comportan de forma bastante similar a las vigas de hormigón armado cuando se relaciona índice esclerométrico y resistencia. El ajuste obtenido es de tipo lineal con un coeficiente de correlación R^2 mayor a 0.76 que se considera aceptable.

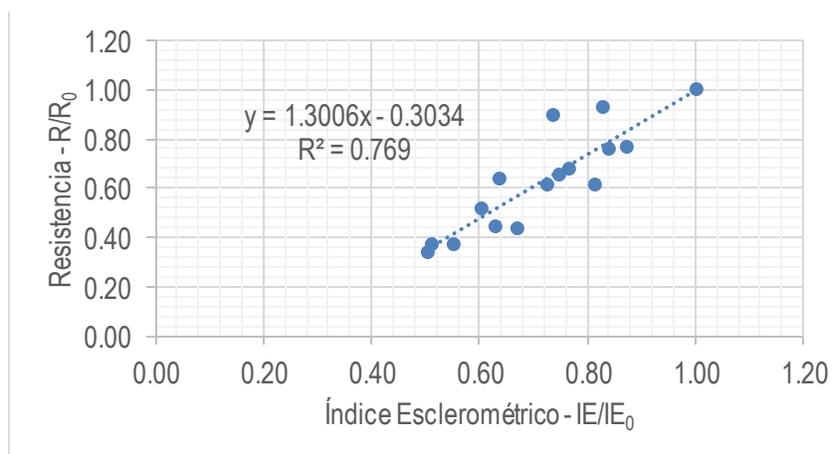


Figura 42. Relación resistencia respecto al índice esclerométrico para columnas

8. Propuesta de metodología para la estimación de la resistencia residual de elementos esbeltos de H.A.

8.1. Metodología propuesta

Con los resultados hasta aquí presentados, y con la finalidad de estimar de forma rápida la resistencia residual post-incendio de elementos esbeltos de hormigón armado, se presenta la siguiente metodología consistente en la aplicación de ensayos de carácter no destructivos en zonas acotadas del o los inmuebles afectados por un incendio. Para ello se recurre a la medición de parámetros superficiales como son el índice esclerométrico y la VPOU en un sector no dañado por el fuego, y en una segunda zona de interés, sí afectada por el siniestro. Tal como se señala en el apartado 6.6, la primera medición se utiliza para caracterizar la resistencia original de la estructura, de modo que sirva de patrón de comparación con la segunda, y estimar así la degradación de la resistencia de los elementos de hormigón armado durante o después de un incendio. Esto facultará al personal de Bomberos para tomar decisiones en sus procedimientos sobre la base de información cuantitativa que le permita actuar de forma relativamente rápida y que no represente riesgo significativo a la seguridad de sus integrantes o de terceros.

Una vez obtenidos los datos, tanto el parámetro original (I_0) como el del o los elementos afectados (I_f), se calcula la razón entre ambos (RI) obteniendo un valor que varía entre 0 y 1 tal como se indica en los apartados 7.2 y 7.3 para flexión en vigas y compresión en columnas respectivamente. En función de lo estudiado en los apartados indicados, y considerando como rangos de seguridad aceptables propuestos en la Tabla 19, es posible calcular los valores límite para RI asociados a los límites de seguridad propuestos.

Tabla 19. Rangos propuestos de razón de resistencia y su re

Pérdida de resistencia	Rango para R/R_0	Nivel de seguridad al colapso total o parcial
$\leq 20\%$	[1.00 – 0.80]	Riesgo de colapso bajo. Aceptablemente seguro
$>20\%$ y $\leq 40\%$]0.80 – 0.60]	Riesgo de colapso medio. Precaución
$>40\%$]0.60 – 0.00]	Riesgo de colapso alto. Peligro, no entrar

La Figura 43 muestra un esquema del procedimiento a realizar para la obtención de valor y por consiguiente la estimación de la resistencia residual.

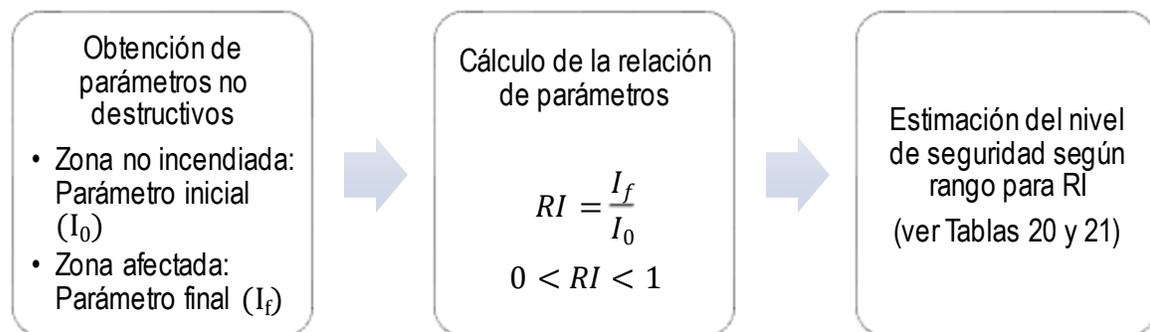


Figura 43. Esquema de metodología de evaluación de la RRPI propuesta

El último procedimiento que refiere el esquema de la Figura 43, utiliza la Tablas 20 y 21 obtenidas de los análisis realizados en los apartados 7.2 y 7.3 y de la recomendación indicada en la Tabla 19. De esta forma se determina que cualquier sea el método no destructivo de medición de parámetros utilizado, y que conlleve a una razón final

El presente informe o certificado consiste en el resultado de un programa de investigación, ensayos, calibración y/o inspección técnica específica, acotados únicamente a: un sistema estructural; partes y piezas; instrumentos o dispositivos específicos, lo que no faculta al solicitante a afirmar que productos o partidas de productos diferentes de los sometidos a estudio, han sido certificados por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Tampoco faculta al solicitante a reproducir en forma alguna el nombre o logo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, salvo que exista una autorización previa, explícita, por escrito y vigente.

versus inicial del parámetro medido, en los rangos establecidos según el tipo de elemento vigas (Tabla 20) o columnas (Tabla 21), permitirá definir el nivel de riesgo al que potencialmente está expuesto el personal de bomberos. Cabe señalar, que el criterio propuesto en la Tabla 19 involucra factores de seguridad implícitos del orden de 1.2 (considerando la sobre-resistencia Ω_0 del orden de 2).

Tabla 20. Rangos de seguridad recomendados según razón de resultados de mediciones con métodos no destructivos. Vigas de H.A.

Parámetro	Índice Esclerométrico			VPOU-D			VPOU-S			VPOU-I			Resistencia			Condición
Razón	IE/IE ₀			V/V ₀			V/V ₀			V/V ₀			R/R ₀			
Rango	0.00	a	0.79	0.00	a	0.55	0.00	a	0.37	0.00	a	0.14	0.00	a	0.60	Riesgo de colapso alto. Peligro, no entrar
	0.79	a	0.92	0.55	a	0.75	0.37	a	0.57	0.14	a	0.36	0.60	a	0.80	Riesgo de colapso medio. Precaución
	0.92	a	1.00	0.75	a	1.00	0.57	a	1.00	0.36	a	1.00	0.80	a	1.00	Riesgo de colapso bajo. Aceptablemente seguro

Tabla 21. Rangos de seguridad recomendados según razón de resultados de mediciones con métodos no destructivos. Columnas de H.A.

Parámetro	Índice Esclerométrico			VPOU-D			VPOU-S			VPOU-I			Resistencia			Condición
Razón	IE/IE ₀			V/V ₀			V/V ₀			V/V ₀			R/R ₀			
Rango	0.00	a	0.69	0.00	a	0.37	0.00	a	0.24	0.00	a	0.18	0.00	a	0.60	Riesgo de colapso alto. Peligro, no entrar
	0.69	a	0.85	0.37	a	0.65	0.24	a	0.59	0.18	a	0.56	0.60	a	0.80	Riesgo de colapso medio. Precaución
	0.85	a	1.00	0.65	a	1.00	0.59	a	1.00	0.56	a	1.00	0.80	a	1.00	Riesgo de colapso bajo. Aceptablemente seguro

8.2. Alcances y limitaciones

El método de evaluación hasta aquí presentado se basa en la realización de ensayos en elementos de hormigón armado de dimensiones restringidas particularmente por la implementación del ensayo de incendio, que no necesariamente se encontrarán en estructuras reales. No se ha considerado factores de masividad de los elementos, ya que, para las geometrías analizadas, este factor es particularmente bajo y por tanto el resultado presentado en este informe resulta ser conservado, por lo que se considera que ha sido posible caracterizar el comportamiento estructural de los elementos de hormigón armado, en términos de resistencia, según distintos niveles de exposición al fuego.

Además, para la aplicación de esta metodología, es imprescindible que la estructura cuente con sectores no afectados por el incendio, de modo que se pueda llevar a cabo el cálculo de la relación de resistencia que finalmente indica el grado en que el fuego ha afectado la resistencia de los elementos de hormigón armado.

Finalmente es importante señalar, que el resultado de la aplicación de la metodología aquí propuesta, solo puede evaluar un elemento individual de la estructura, por lo que debe ser aplicado a varios o todos los elementos en cuestionamiento durante una acción de bomberos. Naturalmente el resultado de la aplicación de esta metodología es de exclusiva responsabilidad de quien lo aplique, ya que debe ser capaz de mediante un buen criterio, estimar y evaluar los posibles mecanismos de colapso de una estructura siniestrada.

9. Conclusiones generales y recomendaciones para trabajo futuro

En el presente informe se entregó una metodología para la determinación de la RRPI en elementos de H.A. que busca dotar a Bomberos de cierta certeza en cuanto a la seguridad en estructuras que son afectadas por incendios.

La principal característica de metodología es que no requiere conocer los tiempos ni las temperaturas de los que fue objeto la estructura, datos que son extremadamente difíciles de obtener. Sólo se requiere conocer parámetros superficiales en una zona no afectada por el fuego para posteriormente determinar el grado de afectación en las áreas incendiadas.

10. Agradecimientos

Los investigadores que participaron del proyecto de investigación aplicada “metodología de evaluación de resistencia post-incendio de elementos de hormigón armado” cuyo reporte final se encuentra en el presente documento, se encuentran profundamente agradecidos con Bomberos de Chile por aportar conocimientos, equipamiento y financiamiento para el desarrollo de la investigación indicada. Del mismo modo, el equipo de investigadores expresa su agradecimiento a las Escuelas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso por poner a disposición del proyecto a académicos, ingenieros, investigadores, personal técnico, herramientas, equipamiento, maquinaria, instrumentación, insumos y espacios físicos para el desarrollo de cada una de las etapas del proyecto.

11. Bibliografía

- ACI - American Concrete Institute. (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Michigan.
- Aguado, A., & Aguiló, L. (2006). *Anales de Construcciones y Materiales Avanzados. Volumen 5 Curso 2005-2006*. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Alcaíno, P. (2017). *Informe 2017-PUCV-LEIC-IE-1001 Informe de avance de proyecto metodología de evaluación de resistencia post-incendio de elementos de hormigón armado*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Civil, Valparaíso.
- Alonso, M. C., & Flor Laguna, V. (Enero-Abril de 2013). Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio. *Revista ALCONPAT*, 3(1), 1-16.
- Alvarado, G. (2016). *Estudio del comportamiento del concreto estructural expuesto al fuego*. Ambato, Ecuador. Tesis de pregrado Ingeniería Civil. Universidad Técnica del Ambato.
- Colombo, M., & Felicetti, R. (2007). New NDT Techniques for the Assessment of Fire-damaged Concrete Structures. *Fire Safety Journal* 42, 461-472.
- Felicetti, R. (2004). Digital Camera Colorimetry for the Assessment of Fire Damaged Concrete. *Workshop Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?* Milan.
- Fletcher, I. A., Welch, S., Torero, J. L., Carvel, R. O., & Usmani, A. (Enero de 2007). Behaviour of concrete structures in fire. *Thermal Science*, 11(2), 37-52. doi:10.2298/TSCI0702037F
- Flores, Y. X. (2012). *Estudio del comportamiento de estructuras durante incendio usando como ejemplo el Edificio Emilio Pugín UACH Valdivia*. Valdivia, Valdivia, Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile.
- INN - Instituto Nacional de Normalización. (1974). Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento de cono de Abrams. NCh1019.EOf74. Santiago, Chile.
- INN - Instituto Nacional de Normalización. (1975). Hormigón – Confección y curado de probetas para ensayos de compresión y tracción. NCh1017.Of75. Santiago, Chile.



- INN - Instituto Nacional de Normalización. (1977). *Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. NCh1037.Of77. Santiago, Chile.
- INN - Instituto Nacional de Normalización. (1977). *Hormigón – Ensayo de tracción por flexión*. NCh1038.Of77. Santiago, Chile.
- INN - Instituto Nacional de Normalización. (1979). *Hormigón – Determinación del índice esclerométrico*. NCh1565.Of79. Santiago, Chile.
- INN - Instituto Nacional de Normalización. (1997). *Prevención de incendio en edificios - Ensayo de resistencia al fuego - Parte 1: Elementos de construcción en general*. NCh935/1.Of97. Santiago, Chile.
- INN - Instituto Nacional de Normalización. (2007). *Hormigón - Requisitos de diseño y cálculo*. NCh430.Of2007. Santiago, Chile.
- Plataforma Tecnológica Española del Hormigón. (Julio de 2008). *Seguridad frente al fuego utilizando hormigón. Resistencia al Fuego*, 28-56.
- Sailer, M. (2007). *Descripción y análisis de incendios importantes para proponer criterios de diseño*. Santiago, Chile: Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Señas, L., Maiza, P., Priano, C., Marfil, S., & Valea, J. (2010). *Evaluación de elementos estructurales de hormigón expuestos a un incendio*. VI Congreso internacional sobre patología y recuperación de estructuras. Córdoba, Argentina.
- Stawiski, B. (2006). *Attempt to Estimate Fire Damage to Concrete Building Structure*. En *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 4, VI (págs. 23-29). Wroclaw.

PAR/JAF/MCB
CC. ALA

Pablo Alcaíno Reyes
Profesor Auxiliar
ASISTENCIA TÉCNICA - ÁREA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL