

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica
Sede Interuniversitaria de Alajuela

**COMPORTAMIENTO ANTE EL FUEGO DE SISTEMAS DE ENTREPISOS
USADOS TÍPICAMENTE EN COSTA RICA A PARTIR DE SU
CARACTERIZACIÓN TERMO-MECÁNICA**

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Mecánica con Énfasis en Sistemas de Protección contra Incendios.

Autores:

Bryan Alpízar Chinchilla - A80234

Marlon Sánchez Marín - A85942

Yeltsin Ramos Brenes - A85179

Tribunal examinador

El presente Trabajo Final de Graduación fue aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como menester para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Mecánica con Énfasis en Sistemas de Protección Contra Incendios.

_____ Asesor Director

Ing. Luis Correal Gómez, MGP

Profesor Universidad de Costa Rica

_____ Asesor Interno 1

Ing. Esteban Ramos González

Director del LAPCI y profesor de la Universidad de Costa Rica.

_____ Asesora Interno 2

Ing. Hennis Cavallini, M.Sc.

Directora Ingeniería Mecánica SPCI de la Universidad de Costa Rica

_____ Asesor Externo

Arq. Hernán Hernández

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos

_____ Ponente

Marlon Sánchez Marín

_____ Ponente

Yeltsin Ramos Brenes

_____ Ponente

Bryan Alpízar Chinchilla

Dedicatoria

A mis padres por el apoyo incondicional en todo momento de mi formación académica, han sido un pilar en mi vida. Los profesores que durante el tiempo que he estado en la universidad se han interesado por mi aprendizaje. A los amigos y compañeros que de una u otra forma han estado presentes y han brindado su apoyo.

Yeltsin Ramos Brenes

Primeramente a Dios Padre Todopoderoso por darme el regalo de la vida y la posibilidad de estudiar en la Universidad de Costa Rica, a mis padres Carlos Luis Sánchez Carvajal y Vera Violeta Marín Jiménez por siempre estar incondicionalmente junto a mí, a mis hermanos por ser fieles amigos y consejeros. A todos los compañeros y amigos de la carrera de Ingeniería Mecánica y así también a todo aquel que directa o indirectamente hizo posible la culminación de esta etapa de mi vida. A todos los mencionados, mi más sincera gratitud.

Marlon Sánchez Marín

A mis padres, quienes han sido el motor de mi formación personal y profesional toda mi vida, a quienes debo eterno agradecimiento por su apoyo y su ayuda, ellos me han enseñado a ser la persona que soy. A todos mis profesores, quienes me dieron las armas para poder aprender tanto durante estos años, sin ellos no sería posible estar redactando estas palabras. A mis compañeros y colegas, junto a quienes viví tantos momentos inolvidables que me han marcado para siempre, de quienes obtuve mucho apoyo, y sin duda algunas lecciones valiosas en esta etapa de mi vida.

Bryan Alpízar Chinchilla

Agradecimientos

Queremos externar el agradecimiento al siguiente grupo de personas y empresas las cuales fueron piezas vitales en la conclusión de este trabajo de investigación:

Al Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos por tomarnos en cuenta en esta investigación, más en detalle al arquitecto Hernán Hernández, asesor externo de este trabajo final de graduación, por confiar en nosotros, al ingeniero Juvenal Loaiza por toda su ayuda para la compra de los distintos equipos utilizados en este trabajo.

A la compañía Productos de Concreto por su disposición, tiempo y por suministrarnos los materiales de los entrepisos aquí analizados, especialmente al Ingeniero Luis Jiménez por fiscalizar el proceso de la investigación, también al ingeniero Daniel Chaves por su disposición para coordinar con nosotros las entregas de los productos.

Al ingeniero Adolfo Elizondo y a la empresa Holcim por su colaboración en pro del avance de este trabajo con el préstamo de la cámara termográfica.

Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), especialmente a los ingenieros Einer Rodríguez y Humberto Tioli por su tiempo y por el préstamo de la máquina de falla de cilindros.

Al Centro de Investigaciones en Estructuras Microscópicas de la Universidad de Costa Rica (CIEMIC) y a las biólogas Paula Mesén y Maribelle Vargas por su ayuda en el análisis microscópico efectuado en este trabajo.

Un agradecimiento especial al geólogo Manuel Barrantes por su ayuda desinteresada en el análisis petrográfico de las secciones delgadas de las muestras de concreto que nos llevó a importantes descubrimientos del contenido mineral del concreto estudiado.

A nuestros asesores, el ingeniero Luis Correal por guiarnos de la mejor manera a lo largo de esta investigación, además de su asesoría en el uso del software COMSOL para generar la simulación del experimento bajo condiciones normativas; al ingeniero Esteban Ramos director del Laboratorio de Protección Contra Incendios de la Sede Interuniversitaria de Alajuela de la Universidad de Costa Rica (LAPCI) por su apoyo en la realización de todas las pruebas llevadas a cabo dentro y fuera del LAPCI, a la ingeniera Hennis Cavallini, directora de la carrera de Ingeniería Mecánica con énfasis en Protección contra Incendios de la Universidad de Costa Rica y experta en materiales, por sus aportes técnicos en el análisis de las muestras.

A la Universidad De Costa Rica, institución benemérita de la educación en nuestro país, que fuera nuestro hogar por largos años, donde aprendimos tanto, y de donde tenemos el honor emanar hoy como profesionales.

Los Autores

Índice general

Tribunal examinador.....	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice general.....	vi
Índice de imágenes	x
Índice de tablas	xvi
Índice de cuadros	xviii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1. Objetivos:	3
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos específicos	4
2. Justificación.....	5
3. Alcance y Limitaciones.....	6
II. MARCO TEÓRICO.....	10
4. Reseña de la institución beneficiada con el estudio:.....	10
4.1 Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA). 10	
5. Teoría del fuego	11
5.1 Ignición.....	13
5.2 Componentes del fuego	13
5.3 Límites de inflamabilidad.....	16
5.4 Técnicas fundamentales de extinción del fuego.....	18
5.5 Clasificación de los tipos de fuego y agentes extintores	19
5.6 Transferencia de calor.....	20
5.7 Fases de un incendio y su propagación	22
5.8 Clasificación de los riesgos:	25
5.9 Protección pasiva contra incendios	26
6. El concreto	28
6.1 Historia del concreto.....	28

6.2	Concreto.....	30
6.3	Colado de concreto	33
6.4	Resistencia del concreto	33
6.5	Efecto que produce el concreto a altas temperaturas	34
6.6	Examinación petrográfica.....	38
7	Entrepisos de concreto.....	40
7.1	Carga soportadas por los entrepisos.....	41
7.2	Elementos que conforman un típico sistema de entrepisos	41
7.3	Vigas de concreto pretensado.....	44
7.4	Sistema de entrepiso prefabricado de viguetas y bloques	54
7.5	Sistema de entrepiso de losa alveolar o multitubular	59
8	Tipos de construcciones.....	60
8.1	Tipo I (443 o 332)	60
8.2	Tipo II (222, 111 o 000)	60
8.3	Tipo III (211 o 200)	60
8.4	Tipo IV (2HH)	61
8.5	Tipo V (111 o 000).....	61
9	Instituciones relacionadas	62
9.1	Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica	62
9.2	Productos de Concreto S.A.....	62
9.3	Laboratorio de Protección Contra Incendios (LAPCI).....	64
9.4	Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME)	64
9.5	Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas (CIEMIC)	65
9.6	National Fire Protection Association (NFPA).....	66
9.7	American Society for Testing Materials (ASTM).....	67
10	Equipos de Laboratorio	67
10.1	IMO Dispositivo de propagación de llama	67
10.2	Horno de convección.....	68
10.3	Microscopio electrónico de barrido (MEB).....	70
10.4	Microscopio de luz polarizada.	74

10.5	Equipo de falla por compresión.....	76
10.6	Termómetro digital	77
10.7	Tape de fibra de cerámica.....	78
10.8	Careta esmeril.....	79
10.9	Guantes resistentes al calor	80
10.10	Termopares tipo K.....	80
10.11	Cámara termográfica.....	81
10.12	Pinza de extracción	82
10.13	Termómetro Infrarrojo	83
11	Definiciones.....	84
11.1	Agrietamiento	84
11.2	Analizador de tipo paramagnético	85
11.3	Astillamiento.....	85
11.4	AWG.....	86
11.5	Bastos de algodón.....	86
11.6	Claros.....	86
11.7	Condición de aceptación	86
11.8	Deflexión	87
11.9	Diseño estructural	87
11.10	Elementos constructivos	87
11.11	Elementos estructurales.....	87
11.12	Espécimen	88
11.13	Estándar.....	88
11.14	Evaluación de riesgo	88
11.15	Falla (mecánica).....	89
11.16	Fieltro	89
11.17	Humedad relativa	90
11.18	Ingeniería de protección contra incendios.....	90
11.19	Integridad estructural.....	91
11.20	Norma	91
11.21	Obra civil	91

11.22	Pirómetro.....	91
11.23	Resistencia contra el fuego	92
11.24	Riesgo de incendio (fire hazard).....	92
11.25	Sensor eléctrico.....	93
11.26	Soldadura por fusión	93
11.27	Temperatura promedio.....	93
11.28	Termómetro de placa	94
11.29	Termopar.....	94
11.30	Ventilación mecánica	94
12	Herramientas informáticas	95
12.1	Microsoft Excel.....	95
12.2	COMSOL Multiphysics.	96
12.2	SolidWorks.	96
III.	MARCO METODOLÓGICO.....	97
13	Tipo de investigación.....	98
13.1	Sistemas estudiados.	98
13.2	Población y muestra.....	100
13.3	Conducción de las prueba.....	102
IV.	RESULTADOS	116
14	Reporte de los resultados.	116
14.1	Experimento de panel radiante.	116
14.2	Experimento de horno de convección.	167
14.3	Observación microscópica.	188
V.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	205
15.1	Resultados del experimento de panel radiante.....	205
15.1.1	Estimación empírica del coeficiente de conducción de calor del concreto.	205
15.1.2	Observaciones y correlaciones de las condiciones de aceptación de la norma ASTM E119.....	209
15.1.3	Resultados de la simulación en COMSOL Multiphysics®.	212
15.1.4	Comentarios generales del análisis gráfico.....	213

15.2 Resultados del experimento con el horno de convección.....	215
15.2.1 Análisis del comportamiento de los cilindros de 700 kg/cm ²	215
15.2.2 Análisis del comportamiento de los cilindros de 420 kg/cm ²	217
15.2.3 Análisis estadístico de regresión lineal en el comportamiento de las curvas de pérdida de resistencia a la compresión.	219
15.3 Resultados de la observación microscópica.....	221
16 Recursos humanos y financieros para el proyecto.....	229
VI. CONCLUSIONES.....	230
VII. RECOMENDACIONES.....	235
VIII. CRONOGRAMA.....	237
Agosto 2014.....	237
Septiembre 2014.....	237
Octubre 2014.....	238
Noviembre 2014.....	239
Diciembre 2014.....	239
Enero 2015.....	239
Febrero 2015.....	239
Marzo 2015.....	239
Abril 2015.....	240
Mayo 2015 – Abril 2016.....	240
IX. ANEXOS.....	241
19.1 Modificación realizada al porta muestras para el experimento del panel radiante.....	241
19.2 Normativas y procedimientos.....	243
X. BIBLIOGRAFÍA.....	252

Índice de imágenes

Imagen 1 Triángulo del fuego.....	12
-----------------------------------	----

Imagen 2 Tetraedro del fuego.	13
Imagen 3 Límites de inflamabilidad.	16
Imagen 4. Desarrollo de un incendio.	23
Imagen 5. Desprendimiento explosivo de las capas superficiales del concreto al exponerse a aumentos de temperatura.	37
Imagen 6. Desprendimiento de esquinas.	38
Imagen 7. Daño de fuego a sección de concreto visto en microscopio.	40
Imagen 8 . Imagen de una viga de concreto simple sometida a una carga P.	45
Imagen 9 . Imagen de una viga de concreto reforzado sometida a una carga P. .	45
Imagen 10. Imagen de una viga de concreto pretensada sometida a una carga P.	46
Imagen 11. Fuerzas que actúan entre el concreto y las varillas de acero.	52
Imagen 12. Tensión sobre el concreto producido por la componente radial de la fuerza alrededor de la varilla de acero.	53
Imagen 13. Falla del concreto entre corrugaciones de las varillas de acero.	53
Imagen 14. Apuntalamiento del encofrado de una viga.	55
Imagen 15. Tipos de sistemas de entrepisos de viguetas y bloques disponibles en PC.	56
Imagen 16. Vista transversal de un sistema de entrepisos utilizando bloques de poliestireno.	57
Imagen 17. Perfil de una viga pretensada de 15 y 20 cm de peralte, comercializada por PC.	57
Imagen 18. Fotografía del montaje de un sistema de vigueta pretensado con bloque de poliestireno.	58
Imagen 19. Fotografía del montaje de un sistema de vigueta pretensado con bloques prefabricados.	58
Imagen 20. Imagen de una losa alveolar.	59
Imagen 21. IMO Dispositivo de Propagación de Llama.	68
Imagen 22. Horno de convección del LAPCI.	69
Imagen 23. Cámara de vacío.	71
Imagen 24. Tipos de muestras para microscopio electrónico de barrido.	71
Imagen 25. Columna del microscopio electrónico de barrido.	73
Imagen 26. Microscopio electrónico de barrido.	73
Imagen 27: Microscopio de luz polarizada. Izquierda microscopio de luz, derecha esquema de su funcionamiento.	76
Imagen 28. Equipo de falla por compresión Forney modelo: F-50C-DFM/I.	77
Imagen 29. Termómetro digital.	78
Imagen 30. Tape de fibra de cerámica.	79
Imagen 31. Careta de seguridad.	79
Imagen 32. Guantes resistentes al calor.	80

Imagen 33. Termopares tipo K. con protección cerámica	81
Imagen 34. Cámara termográfica.....	82
Imagen 35. Pinza de extracción.	83
Imagen 36. Termómetro Infrarrojo.....	84
Imagen 37. Esquema del sistema de bloques y viguetas con sobre losa chorreada en sitio.....	99
Imagen 38. Esquema del sistema de losa alveolar (Losa-lex) con sobre losa chorreada en sitio.....	100
Imagen 39. Cortes transversales de losas de concreto de distintos espesores ..	103
Imagen 40. Esquema del IMO (Aparato de panel radiante) usado durante el análisis de transferencia de calor de las losas de concreto	104
Imagen 41. Disposición del espécimen para el análisis de transferencia de calor, y medición de la temperatura de la superficie expuesta mediante un pirómetro....	105
Imagen 42. Colocación y protección de un termopar tipo K para la medición de la temperatura del acero estructural presente en los entrepisos estudiados	106
Imagen 43. Colocación de un termopar tipo K para la medición de la temperatura del aire dentro de las losas de entrepisos estudiados.....	107
Imagen 44. Monitoreo de la temperatura de la superficie no expuesta mediante un equipo termográfico.....	108
Imagen 45. Fotografía de una termografía obtenida en tiempo real durante las mediciones de la temperatura en la superficie no expuesta de las losas de concreto estudiadas.....	109
Imagen 46. Sierra de diamante de precisión.....	112
Imagen 47. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #1).....	147
Imagen 48. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #2).....	147
Imagen 49. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #1).....	148
Imagen 50. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #2).....	148
Imagen 51. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #1).....	149
Imagen 52. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #2).....	149
Imagen 53. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #1).....	150
Imagen 54. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #2).....	150

Imagen 55. Formación de astillas y grietas en losas sometidas a radiación durante 2 horas.	154
Imagen 56. Formación de astillas y grietas en losas sometidas a radiación durante 2 horas.	155
Imagen 57. Carbonización de los bastos de algodón colocados en la superficie no expuesta de las losas de 8 cm de espesor.	156
Imagen 58. Estructura de la malla de elementos finitos para el ensamble de Losa Lex de 8 cm.	157
Imagen 59. Estructura de la malla de elementos finitos para el ensamble de Losa Lex de 25 cm.	158
Imagen 60. Ensamble para su análisis en COMSOL Multiphysics.	159
Imagen 61. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 720s de iniciada la prueba.	161
Imagen 62. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 720s de iniciada la prueba.	161
Imagen 63. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 3600 s de iniciada la prueba.	162
Imagen 64. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 3600 s de iniciada la prueba.	162
Imagen 65. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 7200 s de iniciada la prueba.	163
Imagen 66. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 7200 s de iniciada la prueba.	163
Imagen 67. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 720 s de iniciada la prueba.	164
Imagen 68. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 7200 s de iniciada la prueba.	164
Imagen 69. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 3600 s de iniciada la prueba.	165
Imagen 70. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 3600 s de iniciada la prueba.	165
Imagen 71. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 7200 s de iniciada la prueba.	166
Imagen 72. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 7200 s de iniciada la prueba.	166
Imagen 73. Curvas de temperatura del horno, y superficies no expuestas de 8 cm y 25 cm de espesor.	167
Imagen 74: Temperatura vs tiempo para la resistencia de 700 kg/cm ²	172
Imagen 75: Montaje de los termopares para el trazo de las curvas de la imagen 74	173

Imagen 76: Montaje de los termopares para el trazo de la imagen 74.....	173
Imagen 77: Montaje de los termopares para el trazo de las curvas de la imagen 74	174
Imagen 78: Variación de la resistencia con respecto a la temperatura (resistencia 700 kg/cm ²).....	176
Imagen 79: Curva de pérdidas resistencia vs temperatura (700kg/cm ²).	177
Imagen 80: Temperatura vs tiempo para la resistencia de 420 kg/cm ²	182
Imagen 81: Curva de pérdidas resistencia vs temperatura (420kg/cm ²).	184
Imagen 82: Extracción de cilindros antes de ser fallados.....	184
Imagen 83: Extracción de cilindros antes de ser fallados.....	185
Imagen 84: Extracción de cilindros antes de ser fallados.....	185
Imagen 85: Extracción de cilindros antes de ser fallados.....	186
Imagen 86: Falla de cilindros.....	186
Imagen 87: Variación de la resistencia con respecto a la temperatura (resistencia 420 kg/cm ²)	187
Imagen 88: Muestra de control del concreto de 420 kg/cm ²	189
Imagen 89: Muestra a 200 °C del concreto de 420 kg/cm ²	190
Imagen 90: Muestra a 400°C del concreto de 420 kg/cm ²	190
Imagen 91: Muestra a 600°C del concreto de 420 kg/cm ²	191
Imagen 92: Muestra a 600°C del concreto de 420 kg/cm ²	191
Imagen 93: Muestra a 800°C del concreto de 420 kg/cm ²	192
Imagen 94: Muestra a 1000°C del concreto de 420 kg/cm ²	192
Imagen 95: Muestra a 1000°C del concreto de 420 kg/cm ²	193
Imagen 96: Muestra de control del concreto de 700 kg/cm ²	194
Imagen 97: Muestra a 200 °C del concreto de 700 kg/cm ²	194
Imagen 98: Muestra a 400 °C del concreto de 700 kg/cm ²	195
Imagen 99: Muestra a 600 °C del concreto de 700 kg/cm ²	195
Imagen 100: Muestra a 800 °C del concreto de 700 kg/cm ²	196
Imagen 101: Muestra a 1000 °C del concreto de 700 kg/cm ²	196
Imagen 102: Imagen del concreto calentado a 200 °C.....	197
Imagen 103: Desprendimiento en concreto calentado a 400 °C.	197
Imagen 104: Agrietamiento en concreto calentado a 400 °C.	198
Imagen 105: Desprendimiento en concreto calentado a 600 °C.	198
Imagen 106: Desprendimientos en concreto calentado a 600 °C.	199
Imagen 107: Desprendimiento en concreto calentado a 600 °C.	199
Imagen 108: Agrietamiento en concreto calentado a 600 °C.	200
Imagen 109: Desprendimiento en concreto calentado a 800 °C.	200
Imagen 110: Desprendimiento en concreto calentado a 800 °C.	201
Imagen 111: Fracturación y desprendimiento en concreto calentado a 800 °C. .	201
Imagen 112: Fracturación en concreto calentado a 800 °C.	202

Imagen 113: Fracturación en concreto calentado a 1000 °C.	202
Imagen 114: Fracturación en concreto calentado a 1000 °C.	203
Imagen 115: Fracturación en concreto calentado a 1000 °C.	203
Imagen 116: Fracturación y desprendimiento en concreto calentado a 1000 °C.	204
Imagen 117. Regresión lineal y coeficiente de determinación de los datos obtenidos en la estimación de la pérdida de resistencia de cilindros de 700 kg/cm ²	220
Imagen 118 Regresión lineal y coeficiente de determinación de los datos obtenidos en la estimación de la pérdida de resistencia de cilindros de 420 kg/cm ²	220
Imagen 119: Comportamiento del promedio del diámetro de fisuración en el concreto de 420 kg/cm ² para las distintas temperaturas sometidas.....	226
Imagen 120: Diámetro de huella en función la temperatura en el concreto de 420 kg/cm ²	228
Imagen 121: Diámetro de la huella en el concreto de 420 kg/cm ² para las temperaturas de 400, 600 y 800 °C.....	228
Imagen 122. Vista frontal y lateral de la estructura soportante de las losas durante las pruebas del panel radiante.	242
Imagen 123. Vista isométrica de la estructura soportante de las losas durante las pruebas del panel radiante.....	243

Índice de tablas

Tabla 1. Cambios mineralógicos y en resistencia del concreto según la temperatura alcanzada.....	35
Tabla 2. Distribución de los cilindros para prueba de falla a compresión.	102
Tabla 3. Distribución de los cortes de bloques de sistemas de entrepiso para prueba de resistencia al fuego.	102
Tabla 4. Secuencia de pulido.	114
Tabla 5. Simbología para la interpretación de las tablas 6 – 13.....	117
Tabla 6. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 8 cm de espesor (Corrida #1).	120
Tabla 7. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 8 cm de espesor (Corrida #2).	124
Tabla 8. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 15 cm de espesor (Corrida #1).	127
Tabla 9. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 15 cm de espesor (Corrida #2).	131
Tabla 10. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 20 cm de espesor (Corrida #1).	135
Tabla 11. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 20 cm de espesor (Corrida #2).	138
Tabla 12. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 25 cm de espesor (Corrida #1).	142
Tabla 13. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 25 cm de espesor (Corrida #2).	145
Tabla 14. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #1).	151
Tabla 15. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #2).	151
Tabla 16. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #1).	152
Tabla 17. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #2).	152
Tabla 18. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #1).	152
Tabla 19. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #2).	153
Tabla 20. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #1).	153

Tabla 21. Medición del K_{prom} y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #2).....	153
Tabla 22. Temperatura superficial, interna y del horno para la resistencia de 700kg/cm ²	171
Tabla 23: Resistencia del concreto a las temperaturas de interés de la superficie del cilindro y su porcentaje de pérdida (resistencia 700kg/cm ²).....	175
Tabla 24: Diferencia porcentual de las caídas de resistencia promedio (resistencia 700kg/cm ²).	176
Tabla 25: Promedio de la resistencia real (en frío) para la resistencia teórica de 700 kg/cm ²	177
Tabla 26: Temperatura superficial, interna y del horno para la resistencia de 420kg/cm ²	181
Tabla 27: Variación de la resistencia con respecto a la temperatura (resistencia 420 kg/cm ²)	183
Tabla 28: Diferencia porcentual de las caídas de resistencia promedio (resistencia 420kg/cm ²).	183
Tabla 29: Promedio de la resistencia real para la resistencia teórica de 420 kg/cm ²	187
Tabla 30: Tiempo de exposición en el horno para las muestras utilizadas en la observación microscópica.	188
Tabla 31 Variación del gradiente térmico con el grosor de las losas.....	215
Tabla 32. Definiciones de palabras usadas en el análisis microscópico	221
Tabla 33: Diámetro promedio de fisuración para las imágenes analizadas en el microscopio de barrido según la temperatura aplicada en el concreto de 420 kg/cm ²	226
Tabla 34: Promedio en las huellas en el concreto de 420 kg/cm ² debido a desprendimientos para cada temperatura sometida.	227
Tabla 35: Presupuesto preliminar del proyecto.	229
Tabla 36: Clasificación de los componentes de un entrepiso de viguetas y bloques.	230
Tabla 36: Clasificación de los componentes de un entrepiso de losas alveolares.	231
Tabla 37: Puntos de la curva tiempo -temperatura.....	245

Índice de cuadros

Cuadro 1. Características del concreto utilizado para entrepisos.....	43
Cuadro 2. Propiedades de alambres sin revestimiento relevados de esfuerzo (ASTM A421).....	49
Cuadro 3 . Propiedades del cable de siete alambres sin revestimiento (ASTNI A416).	50
Cuadro 4. Propiedades de las varillas de acero de aleación.....	51
Cuadro 5. Distancia de claros con y sin apuntalamiento de entrepisos con viguetas tipo 15 O, 15 A y 20 A.	55
Cuadro 6. : Resistencia al fuego (en horas) para construcciones tipo I a tipo V. ..	61

I. INTRODUCCIÓN

A pesar de que el *Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección contra Incendios*, del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, en su versión 2013, en su artículo 3.3.2.e, indica que los sistemas de entresijos deben proveer una resistencia contra el fuego de al menos 2 horas, y en caso que utilicen poliestireno expandido este debe ser removido, o en su defecto, protegido con un cielorraso que asegure las dos horas de protección contra el fuego, no existe regulación en cuanto a la clasificación de la resistencia contra el fuego que los sistemas de entresijos producidos y usados a nivel nacional poseen realmente.

Es aquí, donde el presente trabajo final de graduación encuentra su propósito principal, estudiando el comportamiento de sistemas de entresijos producidos y usados típicamente en Costa Rica, a partir de una caracterización termo-mecánica.

En general las construcciones deben asegurar desde su diseño, una serie de requisitos ante distintos entes regulatorios y normativos en nuestro país, para lograr adquirir los permisos necesarios para su edificación. Uno de los aspectos fundamentales que determina la condición de servicio de las estructuras, es la seguridad que la misma brinda a sus ocupantes.

En nuestro país, para la puesta en marcha de cualquier proyecto de construcción, se debe cumplir con una serie de requisitos por parte de los impulsores del proyecto, ante las instituciones responsables del visado de los planos y revisión de los requerimientos que la ley solicita, como lo son Acueductos y Alcantarillados (A y A), el Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, y el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU), para su posterior inspección por parte del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA), donde se revisan entre otros aspectos, exigencias técnicas básicas en cuanto a la capacidad de las estructuras y resistencia de los materiales.

El ente encargado de revisar los aspectos concernientes a seguridad humana, es el Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, ente que emite y revisa el Manual de Disposiciones Técnicas Generales sobre Seguridad Humana y Protección contra Incendios, el cual se basa en las normas de la NFPA (National Fire Protection Association), para regular las condiciones mínimas que cualquier estructura debe cumplir para que se considere segura y apta para que los ocupantes puedan desempeñar sus labores dentro de ella, o bien, en caso de una emergencia, la misma reúna las condiciones necesarias para garantizar una evacuación ordenada y segura del edificio.

Generalmente se piensa que estructuras de concreto, como son los sistemas de entresijos, por sí mismas, y la naturaleza de los materiales que las componen, pueden resistir el fuego naturalmente, y no se toman en cuenta aspectos como el posible aumento de la temperatura en la superficie no expuesta a la llama durante un incendio en el caso de los entresijos de concreto, o cómo la transferencia de calor de un recinto a otro a través de un sistema de piso o una pared que no sea resistente al fuego, puede promover el crecimiento y propagación de un incendio, incluso en un corto tiempo.

En tanto los entresijos no cuenten con una comprobación de la resistencia que exhiben contra el fuego en la práctica, estos constituyen un riesgo para la estructura y sus ocupantes, ya que podrían no cumplir con los requerimientos mínimos establecidos por las normas de la NFPA (Asociación Nacional de Protección Contra incendios de los Estados Unidos), y a la vez la normativa que emite la autoridad competente en el país - El Benemérito Cuerpo de Bomberos - concerniente a la protección mínima con la que un edificio debe contar para considerarse seguro para quienes lo habiten o permanezcan en él.

Es necesaria la revisión y verificación técnica del cumplimiento de una serie de requisitos mínimos que dichas estructuras deben poseer para considerarse como resistentes ante el fuego, y garantizar que las mismas mantendrán sus características de resistencia estructural, al menos por cierto periodo de tiempo,

para así permitir en el peor de los casos, el escape seguro de las personas del edificio cuando el incendio no pueda ser controlado a tiempo.

La importancia de esta investigación reside en el desconocimiento, sobre la protección real contra el fuego que ofrecen sistemas de entresijos comerciales de uso común a nivel nacional, y se busca generar mediante métodos científicos de prueba basados en normativas reconocidos a nivel internacional, una caracterización termo-mecánica de dichos sistemas, para poder comprobar, si los sistemas en estudio cumplen con la protección requerida por las regulaciones aplicables en Costa Rica.

El presente trabajo final de graduación, nace entonces de la necesidad planteada por la *Comisión de Seguridad de Vida y Protección Contra Incendio* del CFIA, de contar con modelos calculados o ensayados que puedan formar parte de un *Manual de Diseño Simplificado*, mediante el cual se pueda dar a conocer a los profesionales del medio, soluciones prácticas de diseño que cumplan con los requisitos de ley en nuestro país, en cuanto a la protección en horas de resistencia contra fuego, según sea la ocupación designada, que ofrecen los sistemas de entresijo comúnmente utilizados en Costa Rica.

De esta forma, se han diseñado una serie de experimentos, donde se utilizarán probetas o especímenes de prueba, facilitados por el fabricante nacional de estructuras de construcción a base de concreto, Productos de Concreto (PC), para someterlos a condiciones controladas de exposición a radiación y convección, y así estimar la resistencia que los sistemas de entresijo poseen ante el fuego, mediante el análisis de las condiciones sugeridas por la normativa indicada en las normas de la NFPA pertinentes a la seguridad humana y de las estructuras.

1. Objetivos:

1.1 Objetivo general

- Caracterizar la respuesta del concreto utilizado por un fabricante nacional, en dos sistemas típicos de entresijos elaborados en Costa Rica, ante

condiciones controladas de diferentes niveles de exposición al calor, para estimar su posible resistencia ante el fuego, observando las condiciones de aceptación sugeridas por la normativa ASTM E119 durante experimentos de laboratorio.

1.2 Objetivos específicos

- Definir los componentes estructurales y no estructurales que constituyen usualmente los sistemas de entresijos en estudio, a saber “Sistema de Viguetas y Bloques” y “Sistema de Losa Alveolar” (Losa-Lex), del fabricante nacional Productos de Concreto (PC).
- Realizar pruebas de exposición térmica a losas alveolares de concreto provistas por PC, mediante un aparato de panel radiante, para cuantificar las variaciones de temperatura en la superficie no expuesta al calor, así como la posible ignición de bastos de algodón en ella, y observar si se genera agrietamiento o astillamiento de la superficie del espécimen expuesta al calor durante la prueba.
- Ejecutar pruebas mecánicas destructivas, a cilindros de concreto de dos resistencias teóricas a la compresión distintas (420 kg/m^2 y 700 Kg/m^2), para conocer la variación de las mismas con la temperatura, luego de ser sometidos a un máximo de 1000°C a distintos intervalos de tiempo, en un horno de convección.
- Observar la superficie de las probetas calentadas a diferentes temperaturas con ayuda de un microscopio electrónico de barrido, y un microscopio de luz polarizada, para realizar una comparación entre las distintas probetas estudiadas.
- Comparar los resultados de las pruebas de laboratorio con un análisis por el método del elemento finito que muestre el comportamiento teórico ante el fuego de los sistemas de entresijos estudiados y calibrando el modelo para estudiar los posibles efectos en las variaciones de espesor y resistencia ante el fuego del concreto.

2. Justificación

A pesar de la existencia de aproximaciones teóricas del comportamiento ante el fuego que poseen los sistemas de entrepisos producidos en Costa Rica, una matriz basada en información de materiales usados en otro país, o el hecho de no considerar todos los factores que envuelve la aplicación de un modelo teórico generado en otra ubicación, a las condiciones de nuestro país, no satisface la necesidad de un acercamiento a la realidad experimentada por los ensambles de entrepisos instalados en Costa Rica.

Se propone una investigación que incluya pruebas de laboratorio, ya que es la mejor forma de ofrecer resultados tangibles e interpretables por las autoridades encargadas de regular la seguridad de las construcciones a nivel nacional, de la situación real y actual del tema de la resistencia contra el fuego y estructural, que los materiales producidos y usados en nuestro país ofrecen verdaderamente, en los sistemas de entrepisos.

La mayor diferencia de una investigación de campo, al ser comparada con cualquier trabajo que se pudiera haber realizado hasta el momento en nuestro país, que haya sido basado en suposiciones de cualquier índole, sin realizar pruebas representativas de muestras tomadas de productos elaborados en Costa Rica, será siempre la representatividad y validez de los resultados obtenidos.

La inexistencia de estudios de materiales, y de su comportamiento ante el fuego al ser sometidos a pruebas realizadas bajo condiciones controladas, con la utilización del equipo adecuado, y las consideraciones normativas apropiadas para la puesta en práctica de los ensayos, es lo que moviliza a este grupo de investigación a desarrollar el presente trabajo, para poder ofrecerle así, tanto a las entidades encargadas de velar por la seguridad de las construcciones en nuestro país, como a los profesionales responsables del proceso de diseño y construcción, un panorama más claro de la resistencia contra el fuego de los sistemas de entrepisos comúnmente usados en edificaciones nacionales en la actualidad.

La participación de uno de fabricantes de sistemas de entresijos de concreto más importantes de nuestro país - Productos de Concreto - añade un valor comparativo al proyecto de investigación, de los resultados que se puedan obtener al realizar las pruebas en el laboratorio de las configuraciones comerciales ofrecidas por PC, con datos existentes de la resistencia de los mismos sistemas, obtenidos a partir de análisis teórico de las estructuras.

La cooperación de profesionales especializados en ingeniería estructural, ingeniería mecánica, y ciencias de los materiales, conforman un grupo integral de trabajo, que representa un valor agregado a la interpretación de los resultados que se pueda hacer una vez concluido el estudio.

El análisis microscópico que se hará de las estructuras una vez hayan sido sometidas al fuego, ofrecerá un panorama más claro del comportamiento de los concretos estudiados, en cuanto a la resistencia mecánica y la capacidad de soportar carga que puedan poseer una vez hayan sido probados en el laboratorio sometidos a calor o llama por un tiempo determinado.

3. Alcance y Limitaciones

El alcance del estudio se limita al análisis del comportamiento ante condiciones controladas de exposición a distintos niveles de intensidad de calor, del concreto usado en la construcción de dos de los sistemas más comunes de entresijos prefabricados, construidos a nivel nacional, a saber “Sistema de Viguetas y Sobrelosa” y “Sistema de Losa Alveolar”, en sus respectivas presentaciones comerciales, del fabricante nacional Productos de Concreto, y a la posterior comparación de la resistencia ante el fuego o el comportamiento ofrecido por un ensamble de Losa Lex, al variar entre dos espesores en una simulación por computadora.

Se realizaron pruebas de laboratorio, observando algunas de las condiciones de aceptación recomendadas en la NFPA 251 (Métodos Estándar de Pruebas de Resistencia al Fuego de Construcción de Edificios y Materiales), y ASTM E119

(Métodos Estándar de Prueba para las Pruebas de Resistencia al Fuego de Construcción de Edificios y Materiales).

La NFPA 220 (Norma en los Tipos de Construcción de Edificios) indica en la sección 5.1, que la clasificación de la resistencia contra el fuego de los elementos estructurales y montajes de construcción, debe realizarse de acuerdo a la sección 8.2 de la NFPA 5000 (Código de Seguridad y Construcción de Edificios) o la sección 8.2.3 de la NFPA 101 (Código de Seguridad Humana), en ambos casos se referencia a las publicaciones donde se enumeran los procedimientos estandarizados de los ensayos o pruebas que se deben llevar a cabo con el fin conocer la resistencia ante el fuego de los ensambles de entrepisos, y tal y como se indica en la sección 8.2.3 de la NFPA 101:

- *La resistencia al fuego de los elementos estructurales y montajes de construcción deben ser determinados de acuerdo con los procedimientos de prueba indicados en ASTM E 119 (Estándar para los métodos de pruebas contra fuego de materiales de construcción de edificios), o ANSI/UL 263 (Estándar para pruebas contra fuego de la construcción de edificios y materiales).*
- *Los materiales usados para la construcción de elementos y ensambles listados como resistentes al fuego debe estar limitados a los presentes en la NFPA 101.*
- *Ensamblados de piso y techo listados como resistentes al fuego deben estar clasificados como restringidos, o no restringidos, según ASTM E 119, u otro método de prueba aprobado.*
- *Métodos analíticos utilizados para determinar la clasificación de la resistencia contra el fuego como lo son ASCE / SFPE 29 (Métodos Estándar de Cálculo para Protección contra incendios Estructural) y ACI 216.1 / TMS 0216.1 (Requerimientos Normativos para Determinar la Resistencia contra el Fuego de Montajes de Construcción de Concreto y Mampostería) serán permitidos, como una alternativa, al igual que otros métodos analíticos aprobados, que*

sean basados en la exposición al fuego y condiciones de aceptación presentes en ASTM E119.

Algunas de las especificaciones mencionadas en la ASTM E 119 para llevar a cabo las pruebas de resistencia contra el fuego, son difíciles de cumplir en el campo; por ejemplo, el área mínima requerida de exposición al fuego de una probeta de cualquier ensamble, probada para conocer su resistencia al fuego, debe ser de al menos 16 m², con ninguna de sus medidas menores a 3,7m (ASTM, 2014), y un horno que cumpla este, y otros requerimientos que la misma norma indica, no existe en nuestro país.

Es por esto que, basándose en publicación ASTM E 2748 – 12a (Guía estándar para experimentos de resistencia al fuego) que indica la forma en la que deben ser realizadas, en caso de ser necesarias, algunas modificaciones a los experimentos, cuando no se puede cumplir con las condiciones sugeridas por la ASTM E 119 en su totalidad, se definirán los parámetros y diseño de las pruebas a realizar, sin dejar de lado las condiciones de aceptación que se consideren concluyentes para la apropiada estimación de la resistencia contra el fuego de los ensambles en estudio.

El análisis microscópico se limitó a la observación de las superficies de los especímenes de prueba, que han sido sometidos a diferentes condiciones de temperatura siendo 1000 °C la máxima temperatura aplicada, para su posterior comparación con una estructura microscópica superficial de una muestra de concreto que no ha sido calentada.

La simulación mediante una herramienta informática, pretende ofrecer de manera atractiva y de fácil comprensión para cualquier persona, incluso no relacionada con conceptos de transferencia de calor o de resistencia de materiales, una aproximación teórica del comportamiento de los sistemas de entresijos en estudio, ante una situación real de incendio, emulando las condiciones llevadas a cabo en la práctica de las pruebas de laboratorio.

La posterior publicación formal, distinta a la divulgación de esta tesis, de los resultados que arroje esta investigación, así como las repercusiones a raíz de este estudio que pudieran incluirse en otra publicación ajena a esta tesis, no forman parte del alcance de este proyecto, sin embargo se autoriza de forma explícita al *CFIA* (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos) y a *Productos de Concreto* para usar e interpretar por sí mismos, los resultados de esta investigación para futuras publicaciones oficiales.

II. MARCO TEÓRICO

4. Reseña de la institución beneficiada con el estudio:

4.1 Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA)

El diario la Gaceta en Octubre de 1890 informa de la creación de la Sociedad de Ingenieros Costarricenses, más tarde en 1903 se funda la Facultad Técnica de la República, con ese nombre fue conocida hasta 1912 cuando pasó a llamarse Facultad de Ingeniería de Costa Rica. Luego de 25 años bajo la administración del ex presidente Rafael Ángel Calderón Guardia con la creación de la Universidad de Costa Rica en 1941 se crea paralelamente ese mismo año el Colegio de Ingenieros.

En los años 50's la cantidad de profesionales graduados en las distintas ingenierías y en arquitectura obligó al Colegio de Ingenieros a ampliarse y acaparar más funciones, fue así cuando pasó a llamarse Colegio de Ingenieros y Arquitectos pero no fue del todo hasta la década de los años 70's que se convirtió definitivamente en el Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, conocido por sus siglas como CFIA.

El CFIA es un ente determinante en el avance, control y creación de la infraestructura nacional, avances tecnológicos y diseño ingenieril en general. El colegio ha creado y revisado códigos y normas aplicables en el país con el fin de establecer parámetros de diseño común entre los ingenieros y arquitectos. Estos códigos son de índole obligatoria y es por eso que todo miembro que se incorpore al CFIA debe ser juramentado con el fin de confirmar éticamente los valores que todo profesional en el campo de ingeniería y arquitectura deben cumplir.

El CFIA es conformado por 5 colegios: el Colegio de Ingenieros Civiles, el Colegio de Arquitectos, el Colegio de Topógrafos, el Colegio de Ingenieros Eléctricos, Mecánicos e Industriales y el Colegio de Ingenieros Tecnólogos

5. Teoría del fuego

Con el pasar de los siglos, generación tras generación, hemos aprendido la importancia del fuego en nuestra vida cotidiana, en el comercio y en la industria, llegando este a ser tan importante como el resto de los elementos de la naturaleza. El conocimiento y estudio del fuego ha avanzado poco a poco pero aún estamos lejos de tener control absoluto sobre él. Cuando se pierde el control del fuego ya sea voluntaria o involuntariamente este puede producir incendios y por consiguiente daños a la vida, a la propiedad y bienes.

Como parte del estudio del fuego y la manera de suprimirlo, es de suma importancia conocer la base teórica y científica en la que se encuentra. A lo largo de la historia el ser humano ha descubierto que algunos materiales arden más fácilmente que otros, que algunos son más peligrosos que otros; es por ello que conocer la química y la dinámica del fuego, es de vital importancia para el estudio de múltiples disciplinas tales como la ingeniería en protección contra incendios, la arquitectura, la ingeniería civil, la ingeniería química, la física, etc.

Científicamente el fuego se define como un proceso de combustión que se caracteriza por ser una reacción química de oxidación con la suficiente intensidad para emitir calor, luz y llama. Dicha reacción es autoalimentada y exotérmica producida por una sustancia combustible ya sea en estado sólido, líquido o gaseosa, esta sustancia interactúa con el oxígeno del aire y con ayuda de una fuente iniciadora de energía.

Como se menciona anteriormente el fuego emite luz y calor, y en muchos de los casos humo en forma de partículas de hollín, que se tratan de restos de los gases combustibles producidos por la reacción química que no lograron una combustión completa, el humo está conformado por gases irritantes y tóxicos, mayoritariamente monóxido y dióxido de carbono. (Furton & Almirall, 2004)

Lo anteriormente expuesto puede ser explicado de una manera más clara con el conocido triángulo del fuego, siendo cada uno de sus componentes

indispensables para el proceso del fuego, estos componentes son el *calor*, el *combustible* y el *oxígeno*.

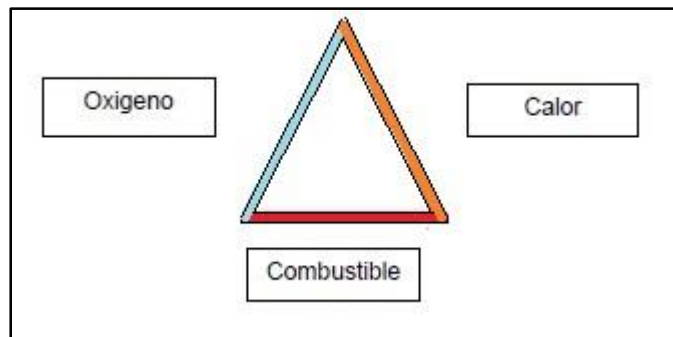


Imagen 1 Triángulo del fuego.

Fuente: Autores (2014).

También conocida como la trilogía del fuego cada uno de estos componentes son vitales para que exista el fuego, por lo tanto es competencia de los estudios de mitigación de incendios atacar el triángulo del fuego por alguno de sus tres elementos, para destruir el proceso de expansión de los incendios.

Debemos recordar que el fuego es un fenómeno químico y no físico, ya que en los fenómenos físicos la interacción de dos o más cuerpos no compromete la composición ni constitución de ninguno de ellos, caso contrario en la reacción química que si se cambia de manera irreversible la composición de los cuerpos.

Centrándose en el proceso de un incendio, un cuarto elemento aparece en el fenómeno del fuego convirtiendo el triángulo en el tetraedro del fuego, dicho componente se trata de la reacción en cadena, este proceso está ligado estrechamente con la relación entre el combustible y el oxígeno, ya que mientras el fuego sea alimentado por materiales combustibles y la presencia de aire (con un 21% aproximadamente de oxígeno en su composición volumétrica), éste seguirá creciendo y creciendo, acabando de forma natural, hasta que todos los materiales combustibles sean en su totalidad consumidos.

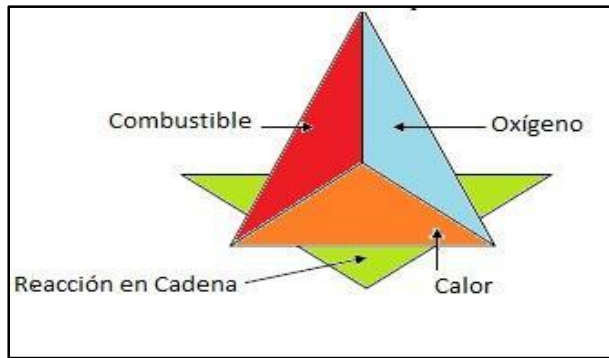


Imagen 2 Tetraedro del fuego.

Fuente: Autores (2014).

5.1 Ignición

Para que se produzca la ignición, una sustancia debe ser capaz de propagar la combustión auto sostenida, o en el caso de materiales explosivos, una ola de descomposición exotérmica. La ignición se define como el proceso por el que inicia esta propagación.

La ignición de sólidos se produce cuando la tasa de generación de calor en un volumen dado de material supera la tasa de disipación de calor, y ese proceso continúa; la velocidad de la reacción acelera y por ende la temperatura aumenta. El calor hace que los enlaces químicos se rompan y el material se descompone en sustancias volátiles.

Las Temperaturas de ignición pilotadas para sólidos están generalmente en el rango de 250 a 450 °C. En algún momento, la tasa de generación de calor es controlada por la tasa de sustancias volátiles, y se crea una llama más o menos estable. (Drysdale, 2011)

5.2 Componentes del fuego

Hasta el momento conocemos los cuatro componentes que interactúan entre sí en un incendio, adentrándonos en cada uno de ellos se procede a continuación definirlos individualmente.

5.2.1 Combustible

El combustible se trata de cualquier sólido, líquido o gas con la capacidad de poder ser oxidado, al combustible también se le conoce como el agente reductor dado la capacidad que tiene éste de reducir al agente oxidante el cual definiremos más adelante.

En su mayoría los combustibles porcentualmente poseen una gran cantidad de hidrógeno y carbono, siendo este último uno de los combustibles más abundantes de la tierra. Otros combustibles importantes son el monóxido de carbono, la gasolina y derivados de petróleo en general, el propano, la madera, textiles y metales como el magnesio, aluminio y sodio, hidrocarburos, entre otros.

5.2.2 Oxígeno

El aire que respiramos es una mezcla que está compuesta aproximadamente de un 21% de oxígeno, un 78% de nitrógeno y el 1% restante en porcentajes pequeños otros gases. La relación entre el oxígeno y el calor que se produce en un incendio es directamente proporcional, por lo tanto como parámetro de medición de la cantidad de calor liberado en un incendio podemos tomarlo como la cantidad de oxígeno con la que dicho fuego está siendo alimentado.

Mayoritariamente en un incendio el agente oxidante es el oxígeno presente en el aire, pero esto no es siempre así, en el caso de compuestos tales como el nitrato de sodio y el cloruro de potasio tienen la capacidad de generar su propio oxígeno durante la combustión, por lo tanto dichos fuegos pueden llevarse a cabo sin ambiente sustentado por el oxígeno del aire.

5.2.3 Calor

Una de las tantas fuentes de energía presentes en la Tierra es el calor, en el caso de una combustión el aumento de energía está ligado con la liberación de calor que es producida, molecularmente una sustancia tiene mucho más movimiento cuando está en presencia de una fuente de calor. Este movimiento molecular es medido usando las unidades de temperatura; en los incendios este movimiento

molecular se da en una manera violenta y agitada produciendo grandes aumentos de temperatura en tiempos muy pequeños.

Por lo tanto una combustión se seguirá alimentando de la liberación de calor y el movimiento molecular de las sustancias y/o cuerpos manifestados en altas temperaturas.

5.2.4 Reacción en cadena

Debe aclararse que los principios de la reacción en cadena aún continúan en investigación, ya que con la inserción de nuevos agentes extintores tales como el polvo químico seco y los gases halogenados, se creía que los tres elementos que sostenían el triángulo del fuego habían sido controlados, sin embargo se demostró más adelante que estos nuevos agentes escaseaban de propiedades de enfriamiento y disolución del oxígeno, por lo que se descubrió que un cuarto elemento estaba en escena en los incendios y se trataba de la reacción en cadena presente en los vapores calientes que produce la combustión con la capacidad de seguir alimentándose de combustible y produciendo más energía en forma de calor manteniéndose del oxígeno aun presente.

5.2.5 Flama

Una flama es una zona luminosa ardiente de gases suspendida independientemente de donde la combustión se lleve a cabo. El tipo de llama que es por lo general interesa es la llama de difusión. En una llama de difusión, los gases o vapores de combustible y el oxígeno se combinan en una zona de reacción debido a las diferencias en la concentración. Las sustancias se mueven, o se difunden, de las zonas de mayor concentración a áreas de menor concentración.

También existe la llama de pre mezcla, que se da cuando el comburente y el combustible se mezclan primeramente. Las llamas de pre mezcla alcanzan combustiones más completas, alcanzando así mayores temperaturas, esto se puede observar en las tonalidades azules características de este tipo de llama. (Drysdale, 2011)

5.3 Límites de inflamabilidad

Los límites de inflamabilidad son los extremos de los porcentajes en volumen máximos y mínimos en aire, de gas inflamable, entre los que un combustible puede arder o explotar en contacto con un punto de ignición.

Cuando la mezcla de aire y combustible, no se encuentra en el rango porcentual de los límites de inflamabilidad, y aun habiendo ignición, esta no arderá si la mezcla se considera pobre, en caso que no se alcance el límite bajo de inflamabilidad, o sobresaturada cuando se supera el límite alto de inflamabilidad. (Drysdale, 2011)

5.3.1 Presión de vapor.

La presión de vapor es la presión característica a una temperatura dada de un vapor en equilibrio con sus formas líquida o sólida. En este escenario de equilibrio, las fases reciben la denominación de líquido saturado y vapor saturado. A mayor presión de vapor, mayor evaporación y, por consiguiente mayor riesgo de inhalación. (Drysdale, 2011)

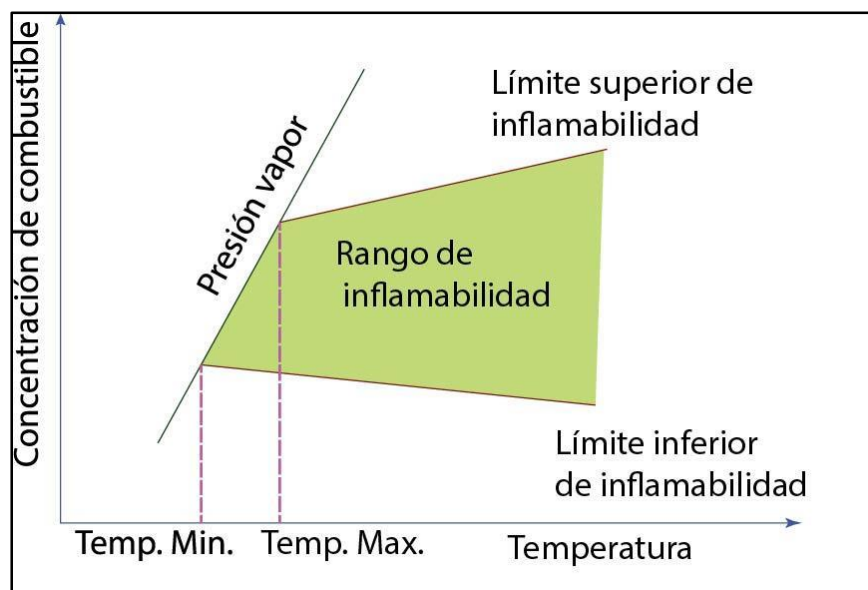


Imagen 3 Límites de inflamabilidad.

Fuente: Drysdale, (2011)

5.3.2 Punto de inflamabilidad (*Flashpoint*)

El punto de inflamabilidad es la temperatura mínima de un líquido a la que emite vapor suficiente para formar una mezcla inflamable con el aire, cerca de la superficie del líquido dentro del recipiente que se encuentre almacenado. Una mezcla inflamable es una mezcla entre el límite superior e inferior de inflamabilidad que es capaz de la propagación de la flama lejos de la fuente de ignición. (Drysdale, 2011)

5.3.3 Combustión súbita generalizada (*Flashover*)

El *flashover* o la combustión súbita generalizada, se define como el aumento inesperado y repentino de la velocidad con la que un incendio confinado en una habitación, se propaga debido a la precipitada combustión de los gases acumulados mayoritariamente en el techo del lugar donde se está dando el incendio, además todos los materiales combustibles dentro de este espacio entran en una inflamabilidad generalizada como ramificación de la fuerte radiación de calor expelida por los gases calientes. (Drysdale, 2011)

5.3.4 Explosión de humo (*Backdraft*)

El *backdraft* es una explosión violenta como consecuencia de una entrada de aire fresco a un recinto cerrado que se encuentra atacado por un incendio, en donde se han acumulado humos combustibles como consecuencia de una combustión con deficiencia de oxígeno.

Existe una gran diferencia entre el *flashover* y el *backdraft*, el primero se produce en recintos o habitaciones cerradas, con aberturas en las puertas y ventanas, por donde el aire pueda entrar alimentando con oxígeno la combustión, y alcanzado un punto elevado de temperatura, donde todos los objetos del cuarto se han degradado, emitiendo gases combustibles, es cuando se provoca la combustión súbita generalizada de todos los elementos del recinto.

Aunque el *backdraft* es también un fenómeno observado en un incendio de un recinto cerrado, en este caso existe una carencia de oxígeno, al haberse

alcanzado etapas avanzadas de un incendio, donde casi se ha agotado el agente oxidante a pesar de la existencia de material combustible que no ha sido consumido por completo, sumado a las altas temperaturas producto de los gases calientes que no han podido escapar del cuarto, es cuando una entrada súbita de aire, provocada por la apertura de una puerta o la caída de una pared, causa la realimentación del incendio con oxígeno fresco, generando una explosión de los gases calientes confinados en el cuarto. (Karlsson & Quintiere, 2013)

5.4 Técnicas fundamentales de extinción del fuego

Al conocer los elementos que conforman el tetraedro del fuego, podemos atacar un incendio de distintas formas, centrándonos en el control o eliminación de cualquiera de los componentes necesarios para la existencia del fuego. Es así como tenemos distintas técnicas de extinción del mismo:

5.4.1 Sofocación

Un incendio consume cantidades enormes de oxígeno para mantenerse en combustión, la sofocación es la eliminación del oxígeno fresco al incendio, obligando a que el fuego consuma rápidamente el oxígeno restante y por ende se rompa la reacción química y el fuego acabe.

5.4.2 Enfriamiento

Para enfriar un incendio, es necesario extraer calor del mismo, con el fin de detener la propagación de las flamas, un buen ejemplo de una técnica de supresión por enfriamiento es la aplicación de agua directamente a la base de las llamas. El calor latente de vaporización del agua es elevado, significa que se requerirá de mucha energía para transformar una masa de agua líquida en vapor, aprovechando el calor elevado de una reacción de combustión, se extrae toda esa energía del incendio al vaporizar el agua que se aplica para extinguirlo.

5.4.3 Inhibición

La inhibición es la ruptura de la reacción en cadena, esta técnica consiste en impedir que la transferencia del calor expanda el incendio en el mismo recinto o en

recintos colindantes. Esta técnica es similar a la de enfriamiento con la salvedad de que el agua si no es utilizada en proporciones suficientes no logra extraer el calor necesario del incendio y es fácilmente evaporada, es por ello que se usan los polvos químicos, que tiene la capacidad de enfriar rápidamente y por ende inhibir la reacción en cadena.

5.4.4 Dilución

La dilución es la eliminación del combustible de la zona del fuego, al quedarse sin combustible el incendio inmediatamente se extingue; por ejemplo en un incendio por una fuga de gas, si se corta el suministro de gas, el incendio se apagará por la falta de combustible que alimente la reacción.

5.5 Clasificación de los tipos de fuego y agentes extintores

Los tipos de fuego se clasifican según su composición, y el tipo de agente extintor necesario para apagarlo, debido a la naturaleza química de los ingredientes que alimentan una reacción de combustión (combustible), el agua no es un buen agente extintor en todos los casos, es así como se han clasificado los tipos de fuego según el combustible que los alimenta, y de esta forma se han desarrollado distintas formas de atacar los incendios:

5.5.1 Fuego clase A

Los fuegos clase A son todos aquellos que se generan a partir de sólidos combustibles como papel, telas, madera, carbón, cartón. Estos fuegos son combatidos principalmente con agua, polvo químico y dióxido de carbono, ya que el agua no generará una reacción peligrosa al entrar en contacto con este tipo de materiales.

5.5.2 Fuego clase B

Cuando hablamos de fuegos clase B nos referimos las reacciones de combustión que se producen en presencia de líquidos combustibles, tales como los solventes polares conocidos mejormente como alcoholes, y los no polares

(mayoritariamente hidrocarburos). La manera más eficaz de atacar y mitigar incendios clase B es con las distintos tipos de espuma.

5.5.3 Fuego clase C

En las ocasiones que hay presencia de un incendio que está siendo alimentado por aparatos eléctricos energizados, se puede decir que se está en frente de un fuego clase C, los agentes idóneos para la supresión de este tipo de incendios son los gases halogenados, y agentes limpios, donde los últimos representan un impacto ambiental menor, o inexistente.

5.5.4 Fuego clase D

En incendios con metales combustibles (sodio, circonio, magnesio, potasio, aluminio en polvo) la clasificación asignada es la D y la forma de extinción de estos fuegos varía según el tipo de metal combustible al que nos estemos enfrentando.

5.5.5 Fuego clase K

Previo a definir esta clase de fuego se debe tener en consideración que mundialmente esta clasificación no ha sido aún aceptada, pero la National Fire Protection Association (NFPA) la define como fuegos en cocinas, específicamente en equipos donde haya o estén mezclados aceites vegetales o animales y grasas. El agente extintor ideal para este fuego es la espuma AFFF la cual está compuesta por una solución acuosa espumógena, seguida del agua pulverizada, el polvo químico, los gases halogenados y el dióxido de carbono.

5.6 Transferencia de calor

Antes de iniciar a conceptuar el término de transferencia de calor es necesario determinar dos conceptos importantes que a menudo tienden a confundirse los cuales son el calor y la temperatura.

El calor se define como la energía cinética total de todos los átomos o moléculas de una sustancia; mientras que la temperatura la podemos citar como una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales

de una sustancia. El proceso de adicionar calor a un cuerpo produce que sus átomos o moléculas se exciten y comiencen a moverse cada vez más rápido elevando su temperatura, el proceso inverso de aumentar la temperatura llevara consigo un aumento en el calor. Una vez claro ambos conceptos podemos definir la transferencia de calor la cual será de mucha importancia y relevancia a lo largo de este trabajo final de graduación.

La transferencia de calor es el método en que la energía se trasiega entre dos cuerpos como consecuencia de una diferencia de temperatura entre ellos. A través del estudio de la transferencia de calor se puede explicar cómo la energía térmica es transferida por medio de distintos mecanismos, y se puede predecir la velocidad de dicha transferencia.

Los principios de la transferencia de calor se basan en la primera y segunda ley de la termodinámica, de donde se derivan ecuaciones utilizadas para dictaminar la rapidez de la transmisión de energía tomando en cuenta variables como coeficientes de transferencia de calor, dependientes de cada tipo de material, y que han sido estudiados y tabulados durante décadas. (Incropera P & De Witt P, 1999)

La transferencia de calor de un cuerpo a otro puede ser producida por tres mecanismos distintos, los cuales pueden regir como único en un caso determinado, o todos pueden estar presentes a la vez, dichos medios en los que se puede trasferir el calor son: la conducción, la convección y la radiación; a continuación la definición de cada uno de ellos:

5.6.1 Conducción

Podemos definir la conducción como mecanismo de transferencia de energía entre un cuerpo de una temperatura más alta a otro cuerpo con una temperatura más baja, cuando estos se encuentran en contacto directo, producto de la interacción molecular de ambos cuerpos.

En el caso de los líquidos y gases, la conducción se lleva a cabo mediante la difusión de las moléculas de los cuerpos cuando colisionan entre sí. En los sólidos

la conducción es llevada a cabo por la vibración molecular que ocurre entre los cuerpos debido al transporte de energía.

La forma en la que viaja el calor, es a través de las interacciones moleculares entre los cuerpos en contacto, donde el cuerpo a mayor temperatura, que será el que posea mayor cantidad de energía, intentará pasarle un poco de esta energía al cuerpo de menor temperatura, hasta establecer el equilibrio del sistema, cuando ambos alcancen estabilidad térmica y energética. (Incropera P & De Witt P, 1999)

5.6.2 Convección

La convección se define como la transferencia de calor que existe entre un cuerpo sólido y un fluido, gas o líquido, en movimiento uno alrededor del otro, o cuando se encuentran parcialmente en contacto. La convección se puede puntualizar también como los efectos combinados de la conducción entre las partículas del fluido que se encuentran en contacto con la superficie del sólido, y la rapidez con la que se transmite el calor es directamente proporcional a la rapidez de movilización de los fluidos alrededor del sólido. (Incropera P & De Witt P, 1999)

5.6.3 Radiación

El caso de la radiación se establece como la energía emanada por un cuerpo en forma de ondas electromagnéticas en base a las permutaciones de las alineaciones electrónicas de los átomos o moléculas. Un detalle importante que diferencia la radiación de los otros dos métodos de transferencia del calor, es que la radiación no necesita un medio para transferir energía, ya que las ondas electromagnéticas pueden viajar en el vacío sin sufrir aminoraciones. (Incropera P & De Witt P, 1999)

5.7 Fases de un incendio y su propagación

Un incendio se define como un fuego descontrolado, todo incendio que tiene la posibilidad de desarrollarse pasará por distintas etapas de evolución; la primera etapa es el fuego inicial hasta este punto con ayuda de un extintor portátil el fuego podría extinguirse y cortar todo su desarrollo, la siguiente etapa es la etapa del incendio en desarrollo donde abruptamente el incendio alcanza temperaturas muy

elevadas en el orden de los 400 °C, la siguiente etapa es la que anteriormente en este trabajo definimos el *flashover*, ósea todo el contenido del recinto entró en combustión, una vez pasada esta fase el incendio se encuentra totalmente desarrollado alcanzando en un escenario ideal los 900 °C, seguidamente empieza la etapa de decaimiento cuando el combustible se va acabando hasta llegar a la extinción. (Lentini, 2013)

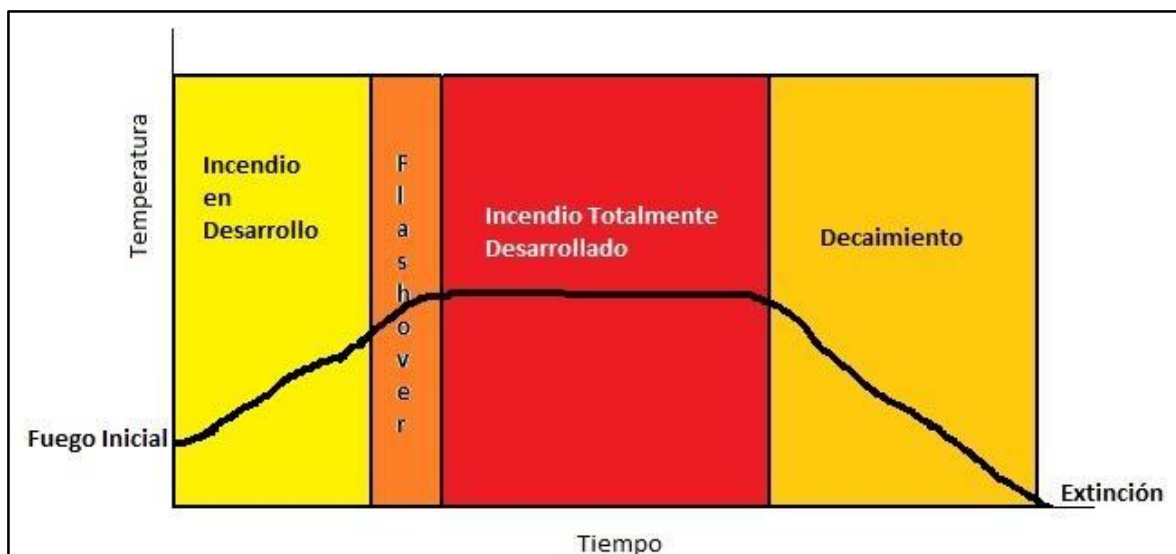


Imagen 4. Desarrollo de un incendio.

Fuente: Autores (2014).

Cuando un incendio está en su apogeo es importante para los bomberos conocer la forma en que se propague para extinguirlo. Las formas en las que se propaga las flamas en un incendio son: la propagación vertical y la propagación horizontal.

En la propagación vertical el calor sube hacia arriba buscando cualquier punto para seguir la propagación, los sistemas de entrepisos por lo general son los que más sufren, sin embargo otros elementos estructurales como ventanas, ductos de ventilación, puertas, escaleras, chimeneas, etc., son los que generalmente fallan, propiciando la propagación rápidamente, además las decoración tales como cortinas y telas son consumidas en forma vertical por las llamas.

El incendio puede también propagarse de forma horizontal, por ejemplo cuando pasa de puerta a puerta, esto debido a la falta de puertas con condiciones especiales, mejor conocidas como cortafuegos al igual que los muros retardantes de fuego que evitan de gran forma la expansión de las llamas. Sin embargo el fuego horizontal se alimenta de elementos como alfombras y muebles y otros materiales combustibles contenidos en un ambiente, entre cielos y ático

5.7.1 Humo

Es claro que el fuego es el peor enemigo de una edificación y de todos sus bienes, sin embargo son los gases arrastrados por el humo el mayor asesino de personas que quedan encerradas en un entorno atacado por las llamas, ya que este limita la visibilidad y causa la asfixia. El humo de un incendio es sumamente tóxico y nocivo ya que por lo general es alimentado de combustibles como plásticos, pinturas, aceites, aislantes, espumas, telas, etc.,

El humo en sí son partículas sólidas en suspensión con el aire resultante de la combustión incompleta de un combustible. El color negro y gris oscuro del humo se debe a que mayoritariamente los materiales están compuestos de carbono, uno de los elementos de la naturaleza de mayor abundancia y un claro índice de la falta de oxígeno en la combustión, mientras que los humos blancos indican que hay una combustión libre. (Lentini, 2013)

5.7.2 Productos de la combustión

Existen cuatro productos básicos de la combustión: llamas, calor, humo y gases de incendio. Cada uno de los cuatro presenta sus propios riesgos tanto a la estructura como las personas. Las llamas, que son la luz visible como ya se ha definido anteriormente, están normalmente presentes., son el producto más notable y atemorizante de la combustión, aunque es el que representa la menor amenaza.

Todos los incendios producen calor, pero la cantidad de calor producida varía en función de lo que este en combustión y las condiciones en las que se produce el incendio. En el área de mayor crecimiento del fuego y propagación, el calor es el problema más significativo. Si las temperaturas alcanzan un nivel alto, que es

común en los incendios estructurales, el calor puede ser suficiente para matar instantáneamente al dañar los pulmones de la víctima.

El humo puede oscurecer la visión y hacer escapar difícil para los individuos en la zona del incendio, además de dañar la estructura y bienes. Mientras que los gases del incendio que por lo general son indetectables por los sentidos humanos está presente en cantidades peligrosas, el gas que está mayoritariamente presente y el que mata a los ocupantes es el dióxido de carbono, dificultando la respiración y muchas ocasiones produciendo la muerte por asfixia.

5.8 Clasificación de los riesgos:

5.8.1 Riesgo ligero

Las ocupaciones con contenido de riesgo ligeros son aquellos lugares donde la cantidad total de materiales combustibles son fuegos clase A, esto incluyen muebles, decoraciones y equipo de oficina, entre otros. Este puede contener edificios o habitaciones ocupadas como oficinas, aulas, salones de reunión pública. Esta clasificación advierte que la mayoría de los elementos de contenido no son combustibles de modo que un incendio no es probable que se propague rápidamente. (National Fire Protection Association, NFPA 101, 2006)

5.8.2 Riesgo ordinario

Las ocupaciones con contenido de riesgo ordinario son lugares donde la cantidad total de materiales incluyen los que constituyen los fuegos clase A y clase B. Estas ocupaciones podrían consistir en oficinas con mucho equipo electrónico, tiendas mercantiles, industriales y almacenamiento, centros de operaciones de investigación, salas de exhibición de automóviles, estacionamientos, talleres, etc. (National Fire Protection Association, NFPA 101, 2006)

5.8.3 Riesgo extra

Ocupaciones con contenido de riesgo extra son lugares donde la cantidad total de materiales combustibles alimentaria mayormente fuegos de clase A y clase B. Estas ocupaciones podrían consistir en carpinterías, talleres de reparación de

vehículos, aeronaves, salas de exhibición de vehículos, centro de convenciones, fábricas de pinturas, refinerías que manejen líquidos inflamables, gasolineras, entre otros. (National Fire Protection Association, NFPA 101, 2006)

5.9 Protección pasiva contra incendios

La protección pasiva contra incendios radica en una serie de elementos y métodos constructivos (montajes), además de materiales diseñados para impedir la primicia de fuego y producción de humo, evitando la propagación del humo o fuego mediante la compartimentación con paredes, cielo rasos, entrepisos y techos con clasificación y características de resistencia al fuego y otros elementos de construcción para tal fin, además de facilitar la evacuación de personas mediante la señalización luminiscente, medios de egreso también compartimentados con componentes como puertas, cerrajería y otros accesorios listados como resistentes a el fuego.

Los materiales y productos que pueden ser parte de la protección pasiva deben someterse a rigurosas pruebas de aceptación establecidos primordialmente en la NFPA, mediante ensayos cuyos protocolos son propios o ASTM, ANSI, etc., los cuales son llevados a cabo por laboratorios certificados de renombre, por ejemplo Underwrites Laboratories (UL), donde dichos productos y su conjunto de montaje o ensamble son sometidos a escenarios de fuego real, en los que se estudian diferentes parámetros tales como resistencia, estabilidad, agrietamientos, esfuerzos y demás cuantificaciones mecánicas con el fin de listarlos como apropiados.

En el diseño y construcción de un edificio, los sectores más vulnerables o riesgosos a un incendio deben ser debidamente compartimentados de tal manera que en caso de estar sometida a fuego real, dicha compartimentación brinde tanta seguridad a los ocupantes como resistencia estructural al edificio.

La protección pasiva no tiene como fin extinguir un incendio, es más bien un escudo de protección mientras los ocupantes evacuan las edificaciones y los sistemas de protección activa entran en acción, por ejemplo los extintores portátiles

o los rociadores automáticos, en pocas palabras el fuego es encerrado en las paredes, techos y entrepisos. Es importante destacar que la protección pasiva busca reducir que se produzca un incendio, en caso de que haya fuego su función es retener el fuego y por supuesto el humo, sin una protección pasiva correctamente diseñada e instalada, el incendio en el peor de los casos no podrá ser controlado por los sistemas de supresión.

En el caso de no poseer o de que fallen los sistemas activos de protección contra incendios, la protección pasiva será capaz de contener por un tiempo determinado el conato inicial y seguidamente el incendio desarrollado mientras el cuerpo de bomberos más cercano se apersona al sitio a extinguir el fuego. Una vez extinguido el fuego el ingeniero estructural de la mano del ingeniero de protección contra incendios serán los que lideren la pesquisa para primero encontrar y determinar el origen del fuego y seguidamente comprobar la estabilidad mecánica y estructural del edificio para llegar así a la deliberación de si el recinto se puede volver a habitar, reparar o demoler.

Como parte de la protección pasiva, los sistemas de control y extracción de humos cumplen una función trascendental al trasegar los humos mediante los ductos hacia el exterior esto es de suma importancia ya que podría representar la vida o la muerte de una persona, los ductos de ventilación deben tener la capacidad de despejar los humos tóxicos y facilitar a las personas la capacidad de respirar mientras evacuan el edificio por sus propios medios o hasta que son evacuados por los cuerpos de rescate.

Un factor determinante en un incendio, y en la seguridad de los ocupantes del mismo, son las rutas de evacuación, que también son parte de la protección pasiva de un edificio, dichas rutas deben proveerse con iluminación de emergencia además de poseer rótulos luminiscentes, de los tamaños específicos según el capítulo 7 de la NFPA 101, todos ellos listados UL, para que puedan ser leídos con claridad y que sean lo suficientemente informativos para ayudar a los ocupantes de los edificios al escape rápido y oportuno de las instalaciones.

La protección pasiva debe concebirse desde el mismo inicio del proceso de diseño del edificio, es función y responsabilidad del ingeniero en protección contra incendios trabajar en conjunto al profesional responsable del diseño arquitectónico y con los otros profesionales en distintas áreas. Todo esto para integrar en la estructura los materiales llevará el edificio, la correcta cantidad de salidas con las distancias de recorrido según NFPA 101, protección de conductos de servicio, atrios y balcones, el uso además de sellos retardantes en los elementos como ductos que penetren compartimientos tales como paredes, entresijos y cielo rasos, el cálculo de capacidades dinámicas y estáticas según para las funciones que será destinado el edificio.

Un punto de suma relevancia es el adecuado diseño de la compartimentación que acompaña los medios de egreso, son las salidas compuestas por pasillos y escaleras, estos ofrecerán de una manera segura la salida de los ocupantes del edificio en caso de incendio. Para garantizar aún más la protección de los ocupantes a la salida del recinto, de ser necesario se pueden presurizar las escaleras, al inyectar aire dentro de la compartimentación de las mismas, con el fin de proteger la salida del posible ingreso de humo en el medio de egreso, al implementar este sistema, se debe contar con puertas de cierre automático, que al producirse el disparo del sistema de alarma, produzca que todas las puertas se cierren, y de esta manera la presurización sea posible.

Una vez incorporados todas las condiciones anteriores la protección pasiva no acaba, conviene que el ingeniero de protección contra incendios supervise la obra y verifique que todo haya sido instalado según el diseño y la normativa. Propuesta por el equipo multidisciplinario que participó en el proceso.

6. El concreto

6.1 Historia del concreto

«El concreto se usó por primera vez en Roma cerca de trescientos años antes de Cristo. En ese entonces su composición era de agregados unidos mediante un aglomerante hecho por una mezcla de cal y ceniza volcánica, la ventaja que tenía

este material con respecto a los morteros de cal usados siglos antes en la antigua Creta es que mantenía sus propiedades debajo del agua. El nuevo material permitió la construcción de obras grandes, entre ellas el Panteón de Agripa con una bóveda de 43.20 m. de diámetro. Debido a la caída del imperio romano el uso de este material en las construcciones dejó de usarse, resurgiendo su uso nuevamente hasta mediados del siglo XVIII.

»Se registra que el uso del concreto en tiempos modernos data en la época de 1760 en Inglaterra, cuando John Smeaton, mientras proyectaba la luz de un faro descubre que una mezcla de caliza alcalina con arcilla formaba un conglomerante hidráulico que era resistente al agua. Ya en 1824 Joseph Aspdin realizó mezclas de arcilla con calizas de diferentes canteras que al calentarlas en un horno se endurecían, este tipo de concreto obtenía una consistencia sólida similar a las piedras propias de la isla de Portland, ubicada al sur de Inglaterra, debido a lo anterior se le llamó cemento Portland. Posteriormente I.C. Johnson descubrió que si la mezcla con la que se hacía el cemento Portland se calentaba en exceso y se pulverizaba se obtenía un material con el que se podía hacer un cemento de mejor calidad, esa sustancia se le llamó clínker y es así como surge el cemento que se usa hoy en día.

»Durante la tercera década del siglo XIX se empezó a usar el concreto armado, una nueva técnica que incorporaba junto al concreto, elementos de acero para crear estructuras más macizas. Fue entre 1832 y 1835 que en Inglaterra y Francia se empezaron a levantar estructuras de este material en arcos y edificaciones. En 1848, Joseph Louis Lambot elaboró un bote de concreto reforzado, que fue presentado en la Exposición de París en 1854 con su posterior patente en 1855. Un piso de concreto reforzado con cuerdas de acero desechadas en las minas fue registrado en Inglaterra, en 1855. El siguiente año François Coignet patentó un sistema de refuerzo para pisos hecho de barras de acero embebidas en el concreto.

»Pese a los antecedentes previos, se considera al francés, Joseph Monier como el creador del concreto reforzado, él fabricó macetas de concreto utilizando

como refuerzo mallas de alambre en su interior, tal sistema fue registrado en 1867. En los siguientes años patentó la técnica en la construcción de tanques, puentes, tuberías, vigas, columnas y escaleras. La patente fue comprada por una firma alemana que luego publicaría un libro donde se hablaba de métodos constructivos extendiendo por Europa a Monier como el creador del concreto armado.

»Thaddeus Hyatt, abogado e ingeniero, realizó pruebas en Estados Unidos en vigas de concreto reforzado en la época de 1850, la investigación fue sobre la resistencia al fuego del concreto, concluyendo que los coeficientes de dilatación térmica del concreto y el acero eran muy similares, sentando las bases donde se desarrollaría el análisis y diseño de los elementos de concreto reforzado.» (Harmsen, 2005).

6.2 Concreto

Es básicamente la combinación de 3 componentes: cemento, áridos y agua, la mezcla resultante se endurece espontáneamente en contacto con el aire o por transformación química interna hasta lograr una consistencia sólida. Por su durabilidad, resistencia, impermeabilidad y capacidad de soportar grandes cantidades de cargas por compresión es empleado en la construcción de edificaciones, además de usarse para pegar o revestir superficies protegiéndolas incluso de la acción de sustancias químicas. (Cabañas, 2008).

Para la obtención de un buen concreto, además de utilizar materiales de buena calidad, con sus correctas proporciones. Se debe considerar factores como el proceso de mezclado, transporte, colocación o vaciado y curado.

6.2.1 Cemento

Es un material en forma de polvo, color grisáceo, obtenido de la pulverización del clínker, se obtiene por la calcinación de materiales calcáreos y arcillosos llevados hasta un punto de fusión incipiente. “La principal característica que tiene el cemento es que reacciona con el agua. Es por eso que se conoce como cemento hidráulico. Tal reacción modifica químicamente el cemento y lo convierte en una pasta semilíquida que se endurece al poco tiempo, esta característica es la que

emplea para cohesionar las partículas pétreas o los agregados (áridos) tanto los gruesos como los finos para la fabricación de concreto. Al estar en estado semilíquido tiene la capacidad de ser moldeable creando elementos estructurales con una resistencia adecuada para soportar cierta cantidad de peso o fuerza” (Manual Técnico PC, 2012).

A la pulverización del clínker se le adiciona yeso sin calcinar y otros materiales que no alteran nocivamente el comportamiento posterior del cemento. Se debe adicionar la proporción adecuada de yeso para que el cemento obtenga una resistencia óptima. Para estos fines se usa yeso natural (sulfato de calcio dihidratado), con una pureza de entre el 80% y 90%, y no yesos sintéticos. El yeso funciona como retardante del fraguado y regula la hidratación a través de una reacción con el aluminato tricálcico formando sulfoaluminatotricálcico, produciendo que la mezcla se vaya hidratando poco a poco. (Cabañas, 2008).

Su composición es la siguiente:

1. Silicato tricálcico, este componente le confiere su resistencia inicial, además influye en el calor de hidratación.
2. Silicato dicálcico, define la resistencia a largo plazo, no presenta tanta incidencia en el calor de hidratación.
3. Aluminato tricálcico, catalizador en la reacción de los silicatos, también provoca un fraguado violento. Para ralentizar ese proceso, se debe agregar yeso mientras se fabrica el cemento.
4. Aluminio-Ferrito Tetracálcico, influye en la velocidad de hidratación y en forma secundaria en el calor de hidratación.
5. Componentes menores: óxidos de magnesio, potasio, manganeso y titanio.

6.2.2 Agregados

«Son elementos inertes agregados durante la fabricación del concreto, pues no intervienen en las reacciones químicas que se dan entre el cemento y el agua. Estos agregados aportan una gran contribución a propiedades mecánicas como la resistencia y la compresión. Se emplean arenas y gravas que se obtienen de yacimientos naturales o rocas que se trituran por machacamiento.

»El agregado fino debe presentar ciertas características: durable, fuerte, duro, limpio y libre de materias impuras como polvo, limo, pizarra, álcalis y materias orgánicas. El agregado grueso se constituye de rocas graníticas, dioríticas y sieníticas, también puede usarse la piedra partida en chancadora o grava zarandeada del cauce de los ríos o yacimientos naturales. Tanto el agregado fino como el grueso no deben tener más de un 5% de arcillas y finos ni más de 1.5% de materias orgánicas, carbón, etc.

»Se conoce como, arena o agregado fino si es capaz de pasar por un tamiz de 5 mm de malla, así mismo la grava o agregado grueso es el material retenido por dicho tamiz. Agregado total en una mezcla es la cantidad adecuada de arena y grava que se adiciona para conseguir una específica resistencia de concreto.» (Manual de Construcción de Edificios, 2004)

6.2.2 Agua

«Es un ingrediente clave para el proceso de formación de concreto, se utiliza tanto en la elaboración de las mezclas como para el curado de estructuras recién construidas, debe ser limpia, libre de aceites, ácidos, álcalis, sales y materias orgánica. El agua potable es adecuada en la producción de concreto.

»En la producción de un concreto convencional el agua puede representar entre un 10 y un 25% del volumen del concreto recién mezclado.» (Manual de Construcción de Edificios, 2004).

El agua produce reacciones en la composición del cemento liberando calor, cuanto mayor sea el volumen del elemento de concreto, mayor será el calor

generado por él. Es por eso que en las obras donde se producen elementos de gran volumen la liberación de calor puede generar que el volumen aumente a tal magnitud que a la hora que se enfríe el elemento, el volumen de contracción sea tal que produzca fisuras llegando a comprometer la resistencia de dicho elemento. (Manual Técnico PC, 2012).

6.3 Colado de concreto

Consiste en la acción de verter el concreto en forma continua, mientras se encuentra en estado plástico en un molde, para formar un elemento estructural una vez que este ha sido solidificado. El encofrado es la estructura temporal que sirve para darle la forma requerida, además de servir de apoyo hasta que este haya sido endurecido. Comúnmente se encuentran encofrados metálicos y de madera.

El llenado de concreto debe detenerse solamente al llegar a una junta (se conoce junta cuando se va a unir una sección de concreto fresco con otra ya solidificado), para no reducir la resistencia del elemento debe de limpiarse y humedecerse la pieza endurecida de concreto, retirando el agua en exceso, antes de seguir con el llenado de concreto fresco. (Manual de Construcción de Edificios, 2004)

6.4 Resistencia del concreto

«Para las pruebas a la compresión del concreto simple se usan probetas cilíndricas con una relación de altura a diámetro de dos, curadas en laboratorio y probados a los 28 días.

»Un concreto colado en el sitio de una construcción raramente presentaría una resistencia similar a los de las probetas, debido a eso las pruebas se deben hacer por encima de la resistencia supuesta.

»Según la cantidad de agua, cemento que se tenga, el mezclado, adecuado vibrado y curado, la resistencia a la compresión axial puede llegar a más de 1000 Kg/cm², pero en condiciones normales usando agregados comunes la resistencia a la compresión puede llegar a 200 y 250 Kg/cm².» (Cabañas, 2008).

6.5 Efecto que produce el concreto a altas temperaturas

El efecto de una alta temperatura en el concreto abarca cambios en la pasta del cemento, agregados y en la interacción de estos dos componentes, lo cuales se traducen en cambios de características mecánicas y físicas. (Hager, 2013)

6.5.1 Efecto del calor en cemento y agregados

Pasta de cemento

Su calentamiento produce secado, el agua se evapora gradualmente desde el material, el orden en cómo se evapora el agua en el concreto depende de la energía que une el agua y el sólido. Primero se evapora el agua libre, seguido el agua capilar y por último el agua que une químicamente con los hidratos del cemento. Las propiedades mecánicas de la pasta de cemento están fuertemente influenciado por enlaces químicos y fuerzas de cohesión entre capas de silicato cálcico (CSH). Se supone que el cerca del 50% de la fuerza que proviene del cemento es debido a la cohesión del CSH; por lo cual la evaporación de agua entre el gel CSH afecta fuertemente las propiedades mecánicas. (Ingham, 2007).

Agregados

Los agregados ocupan el 70-80% del volumen del concreto por lo que influye en gran medida en su comportamiento térmico. Un agregado adecuado sería uno con un bajo coeficiente de deformaciones térmicas. El tipo de agregados gobierna los cambios físicos y químicos producidos durante el calentamiento, estos cambios se pueden observar en la tabla 1. (Ingham, 2007).

Interacción global entre la pasta de cemento y los agregados

Durante el calentamiento el agregado en el concreto aumenta de volumen y al mismo tiempo se da una contracción de la pasta de cemento que lo rodea. Como consecuencia la unión entre la pasta de cemento y el agregado él es punto más débil en el calentamiento de concreto. (Ingham, 2007).

Rango de Temperatura	Cambios causados por el calentamiento	
	Cambios mineralógicos	Cambios en la resistencia
70-80°C	Disociación de etringita, $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ provocando un agotamiento en la matriz del cemento.	Posible pérdida de resistencia menor (<10%)
105°C	Perdida del agua que une físicamente el agregado y cemento causando un aumento en la porosidad capilar y microfisuración.	
120-163°C	Descomposición de yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ provocando agotamiento en la matriz del concreto.	Significativa pérdida de resistencia comienza a los 300°C
250-350°C	Decoloración rosa/rojo del agregado causado por la oxidación de compuesto de hierro que comienza en torno a los 300°C. Perdida de agua que une la matriz de cemento y su asociada degradación empieza a ser más prominente.	
450-500°C	Deshidroxilación de portlandita, a través de la siguiente reacción: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ causando agotamiento en la matriz de cemento. Decoloración roja del agregado incrementando la tonalidad del color hasta los 600°C. Sílice en agregado se calcina a 250-450°C y (generalmente a mayores temperaturas) cambian su color a blanco/gris. Normalmente a nivel isotrópico la matriz de cemento muestra parches de color amarillo/amarillentos en cruce polarizado de luz, a menudo se completa la birrefringencia por los 500	
573°C	Transición del cuarzo de α a β , se da un instantáneo aumento en el volumen de cuarzo de aproximadamente 5% ocasionando un patrón de agrietamiento radial alrededor de los granos de cuarzo en el agregado.	Concreto no es útil estructuralmente después del calentamiento a temperaturas mayores de 550-600°C
600-800°C	Perdida de carbonatos, el cual va a depender del contenido de carbonatos en el hormigón, por ejemplo si el agregado utilizado es calcárea, se puede tener una considerable contracción a raíz de la liberación de CO_2 ; la contracción de volumen causara microfisuración grave en la matriz del cemento.	
800-1200°C	840°C descomposición de dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 930-960°C desintegración completa de los elementos calcáreos del agregado y la matriz de cemento debido tanto a la disociación y al extremo estrés térmico, causando una coloración gris blanquecina y grave microfisuración del hormigón. Las partículas de agregado de piedra caliza se hacen blancas. $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	
1200°C		
1300-1400°C		Concreto disuelto

Tabla 1. Cambios mineralógicos y en resistencia del concreto portland según la temperatura alcanzada.

Fuente: Assessment of fire-damaged concrete and masonry structures: The application of petrography, Proceedings of the 11th Euroseminar on Micro (2007)

«El color de hormigón puede cambiar como resultado del calentamiento, se puede comprobar luego de una inspección visual. En muchos casos la decoloración rosa-rojo se produce por encima de 300 ° C, esta caracterización es importante ya que coincide aproximadamente con el comienzo de la pérdida significativa de la fuerza debido al calentamiento.

»Cualquier hormigón descolorado rosa-rojo debe ser considerado como sospechoso y potencialmente debilitado.

»Además de conocer la temperatura máxima alcanzada, el color del concreto inducido por el calor depende de la mineralogía de agregado presente en el hormigón. Los cambios de color son más pronunciados para los áridos silíceos y en menor medida para la piedra caliza, granito y ceniza de combustible pulverizado en agregado liviano (que muestra muy poco cambio de color).» (Ingham, 2007).

6.5.2 Desprendimiento del hormigón en los incendios

«El desprendimiento implica la ruptura de las capas de hormigón de la superficie expuesta al elevado y rápido aumento de temperatura. El desprendimiento es complejo y hay muchos parámetros que influyen en el proceso. Se cree que el proceso principal implicado en el desprendimiento es la presión de vapor, producto del cambio de estado del agua contenido en el concreto al comienzo del proceso de calentamiento a través de los poros del hormigón.

»Debido a la poca capacidad volumétrica de los poros, la presión del vapor de agua se acumula en ellos, lo que eventualmente puede conducir al desprendimiento de las capas más superficiales del concreto. Si las tensiones de tracción de la presión de vapor dentro de los espacios de los poros superan la resistencia a la tracción de la matriz de concreto, se presentará un desprendimiento, cuya intensidad dependerá de la cantidad de humedad, la velocidad de calentamiento, la permeabilidad, porosidad y distribución de poros, así como las tensiones de tracción inherentes de la estructura.

Pueden ser reconocidos tres principales tipos de desprendimiento:

»El desprendimiento explosivo (ver imagen 5) ocurre durante la exposición temprana al fuego (normalmente dentro de los primeros 30 minutos) y continúa con una serie de roturas, eliminando cada capa de material a mayor profundidad.

»El desprendimiento de agregado, también se produce en las primeras etapas, consiste en la ampliación y la descomposición del agregado en la superficie de hormigón causando que piezas del agregado sean expulsadas de la superficie.



Imagen 5. Desprendimiento explosivo de las capas superficiales del concreto al exponerse a aumentos de temperatura.

Fuente: *Assessment, design and repair of fire-damaged concrete*. Concrete Society (2008).

»Finalmente, el desprendimiento de esquinas se genera en las etapas posteriores al fuego cuando las temperaturas son más bajas, son producidas principalmente en las vigas y columnas, y ocurren en planos de vulnerabilidad como en la interfaz entre el refuerzo y el hormigón debido a las grietas por tensión. En este tipo de desprendimiento que se produce en etapas avanzadas el hormigón ya está considerablemente debilitado y por tanto no hay implicaciones para el desempeño estructural.» Block, F; et al. (2008).



Imagen 6. Desprendimiento de esquinas.

Fuente: *Assessment, design and repair of fire-damaged concrete. Concrete Society (2008).*

6.6 Examinación petrográfica

«Es la técnica definitiva para determinar la profundidad del daño por fuego en el hormigón. Es llevado a cabo en un laboratorio por petrógrafos de concretos experimentados. Para realizar la prueba se usan microscopios según la ASTM C856.

Se esperaría que un examen petrográfico ofrezca la siguiente información:

Tipo, mineralogía y clasificación aproximada de los agregados gruesos y finos

- Tipo de Cemento
- Presencia de adiciones minerales y sustancias de relleno
- Contenido de cemento
- El agua: proporción
- Contenido de vacíos de aire, profundidad de carbonatación

- Presencia de defectos o deterioro
- Identificación de reacciones perjudiciales tales como la reacción álcali-sílice.

»Además de los cambios de coloración rosa/rojo en los agregados, la temperatura de calentamiento puede estimarse a través de los cambios en la matriz de concreto y pruebas de estrés físico como del agrietamiento y figuración. En situaciones favorables a 150°C se pueden trazar contornos térmicos a través de la profundidad de los miembros individuales del hormigón (aumento de la porosidad en la matriz del cemento), 300°C (coloración rojo del agregado), 500°C (matriz de concreto se convierte totalmente en isotrópica), 600°C (transición de α a β cuarzo), 800°C (calcinación de piedra caliza) y a 1200°C (primeros signos de fusión).

»La imagen 7 muestra un ejemplo de algunas de las características microscópicas que se pueden observar en el hormigón dañado por el fuego. Algunas de las partículas en el agregado han sido enrojecidas lo que indica que el hormigón ha alcanzado al menos los 300°C en ese punto. Las partículas de sílice se han calcinado (marrón moteado) por lo que se ha calentado entre 250-450°C. La matriz de cemento se ha seccionado en numerosas grietas (blanco) dentro de la matriz de cemento (oscuro), algunas de ellas inician a partir de granos de cuarzo (blanco) en la fracción de agregado fino. Este profundo agrietamiento y fisuración alrededor del cuarzo indica que se ha alcanzado entre 550-575°C. Se puede deducir que el área de la muestra en la imagen se ha calentado a aproximadamente 600°C.»
Block, F; et al. (2008)

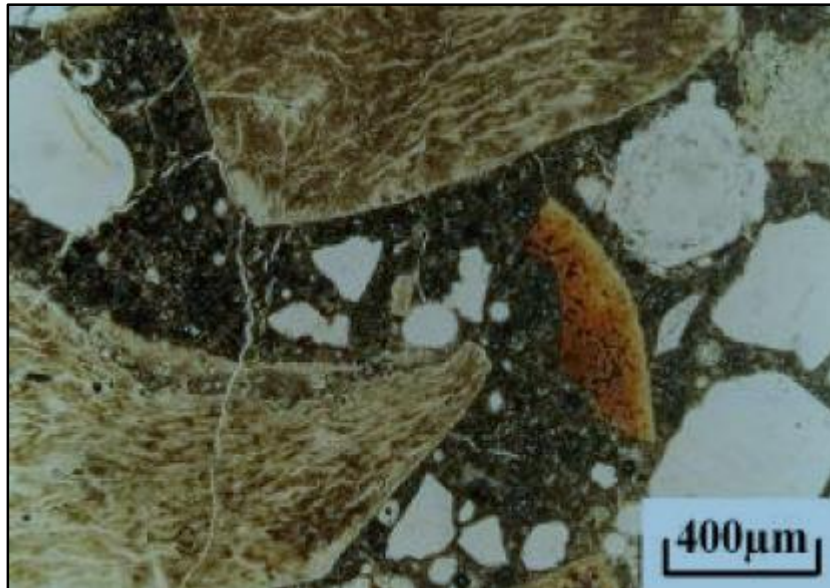


Imagen 7. Daño de fuego a sección de concreto visto en microscopio.

Fuente: *Assessment, design and repair of fire-damaged concrete* (2008)

7 Entrepisos de concreto

Los entrepisos son elementos constructivos a base de concreto cuyo fin es crear un plano horizontal firme y estable, con capacidad para soportar en forma segura los esfuerzos generados por la acción de las cargas que soporta, y que además define un límite vertical entre dos espacios.

Los entrepisos fueron creados como una necesidad por expandir edificaciones en forma vertical, inicialmente se colocaba una simple cobertura de paja sobre un arreglo de barras de madera para separar un nivel de otro. Conforme fueron avanzando las técnicas de construcción se crearon elementos prefabricados, minimizando los tiempos del proceso de construcción en el sitio, disminuyendo los pesos de las estructuras sin perjudicar su resistencia a las cargas. Es así como en la actualidad se usan sistemas eficientes de elementos prefabricados entre los cuales se pueden mencionar a las losas alveolares o los sistemas de viguetas y bloques pretensados con una gran capacidad de soportar cargas de tracción.

7.1 Carga soportadas por los entrepisos

«Las fuerzas que actúan en un entrepiso y las cuales se consideran en su diseño corresponden básicamente a cargas gravitacionales. (Acción de la gravedad sobre diferentes elementos producto de su composición, en otras palabras el peso de los elementos). Se identifican de esa forma dos tipos de cargas aplicadas sobre los distintos elementos estructurales que conforman un sistema de entrepiso durante el funcionamiento normal de las instalaciones: cargas muertas o permanentes y cargas vivas o temporales.

»Entre las cargas muertas está el peso de elementos fijos de la estructura así como el propio peso de la estructura, se relaciona con los materiales que componen los elementos.

»Las cargas vivas se refieren al peso de elementos no fijos en la estructura y su posición puede no ser fija, se relaciona con el uso durante operaciones normales de las instalaciones, comprende el peso del mobiliario, equipamiento personas, etc.» (Valverde, 2005).

7.2 Elementos que conforman un típico sistema de entrepisos

7.2.1 Vigas

«Las vigas son elementos estructurales horizontales o inclinados, su función es de soportar las cargas que ejercen las losas o elementos que se encuentren sobre ella, a su vez las vigas transmiten esa carga a las columnas presentes en la construcción.

»La principal deformación que sufre una viga es por flexión, dependiendo de la configuración de cargas a la que se encuentre una viga se puede encontrar vigas sujetas a flexión pura o una combinación entre cargas flectoras con cargas axiales, cortantes y de torsión. La diferencia que hay con las columnas y las vigas radica en que las columnas son diseñadas para soportar cargas axiales compresivas.

El esfuerzo es una magnitud física que relaciona la fuerza por unidad de área en secciones internas de un cuerpo. En una viga se puede identificar típicamente:

»Esfuerzo normal: Se da debido a la resultante de tensiones normales al área al cual se pretende conocer el esfuerzo normal. En una viga los esfuerzos normales axiales se deben a fuerzas axiales (actúan sobre su propio eje), las cuales pueden ser de tensión o compresión.

»Esfuerzo cortante: Es el resultado de tensiones cortantes o tangenciales al área que se pretende conocer el esfuerzo cortante, en este caso las fuerzas aplicadas a un elemento estructural tienen a producir un efecto de deslizamiento de una parte del mismo con respecto a otra. Sobre el área que sufre este efecto se produce un esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante se define entonces como la relación entre la fuerza y el área a través del cual se pretende dar el deslizamiento.» (William F. Riley, 1995).

Como se puede apreciar más adelante existe una técnica que refuerza las vigas aumentando su resistencia a la tracción por medio de barras de acero tensadas.

7.2.2 Losas

Una losa de entrepiso es un elemento rígido el cual sirve para separar un nivel de otro en una construcción que tiene más de un piso o nivel. Pueden estar constituidos en una sola pieza o componerse de una serie de bloques que van colocados sobre vigas que a su vez deben estar apoyadas sobre muros estructurales. (Construcción: Losas de entrepisos, 2009).

Actualmente en las construcciones se usan losas prefabricadas con agujereadas hechas de concreto o poliestireno expandido (poliblock) con el fin de aligerar el tiempo de construcción.

7.2.2.1 Clasificación de las losas o bloques según la dirección de carga

7.2.2.1.1 Bloque unidireccional

En estas la carga es transmitida en una dirección hacia los muros que soportan la estructura del entrepiso, generalmente las losas son rectangulares

donde un lado mide 1.5 veces más que el otro, es la forma más común que se usa en las construcciones. (Construcción: Losas de entrepisos, 2009)

7.2.2.1.2 Bloque bidireccional

La carga se transmite en 2 direcciones, debido a que se dispone de muros portantes en los cuatro lados de la losa, la dimensión de un lado de la losa es 1.5 veces o menor que el otro, se utilizan placas reforzadas. (Construcción: Losas de entrepisos, 2009)

7.2.3 Sobrelosa

Comúnmente las sobrelosas se construyen a base de concreto, su composición se basa en arena, piedra y cemento, en algunas configuraciones de entrepisos, se coloca además una malla electro soldada de acero con el fin de reducir el riesgo de fisuras en el concreto, en Costa Rica los fabricantes de losas prefabricadas recomiendan una sobrelosa de 5 cm de espesor. (Productos de Concreto, 2015)

Características Técnicas Claves		
Resistencia característica	80 kg/cm ²	
Resistencia a la tracción (adherencia)	3 kg/cm ²	
Tamaño máximo nominal	8 mm	
Retentividad	Grado 1(>70%)	
Características Técnicas Generales	Saco 25 kg	Saco 45 kg
Rendimiento	13 ± 0,5 lt/saco	23 ± 1 lt/saco
Dosis de agua (saco de 25 Kg)	3 ± 0,25 lt/saco	5 ± 0,5 lt/saco
Consistencia	Plástica	
Espesor de aplicación	20 - 50 mm	
Adición opcional	Fibra	
Suministro	Saco 25 kg y 45 kg • Silos en obra	

Cuadro 1. Características del concreto utilizado para entrepisos.

Fuente: Presec P-02 (2011).

7.2.4 Mallas electro soldadas

Las mallas electro soldadas son usadas en elementos como estructuras laminares, pavimentos y muros, donde se tiene un patrón regular de distribución del refuerzo, está conformada por alambres lisos o corrugados colocados en forma de mallas cuadradas o rectangulares y soldadas en los puntos de unión. Las especificaciones de los alambres lisos y corrugados se mencionan respectivamente en las normas ASTM A-496-02 y ASTM A-497/497 M-02. Para alambre liso se requiere que el esfuerzo de fluencia mínimo sea de 4550 Kg/cm² con un esfuerzo último de 5250 Kg/cm², con el alambre corrugado el esfuerzo de fluencia mínimo debe ser de 4900 Kg/cm² y el esfuerzo ultimo de 5600 Kg/cm². (Harmsen, 2005).

7.3 Vigas de concreto pretensado

Son elementos estructurales a los cuales se les ha generado fuerzas internas con el fin de balancear o equilibrar en forma parcial o total, las cargas a las que será sometida y poder de eso modo compensar sus efectos. Estas fuerzas se someten previo a la fabricación del elemento, donde los aceros son tensados entre dos apoyos rígidos para luego colar la pieza de concreto y una vez que este ha alcanzado una determinada resistencia se liberan los aceros tensados (tendones), los cuales transmiten su fuerza al concreto debido a la adherencia. (Cabañas, 2008)

7.3.1 Principio de funcionamiento en las vigas pretensadas

«El concreto tiene como característica ser resistente a la compresión pero en tensión su resistencia es mucho más baja. En una viga de concreto simple la cual soporta una carga, las fibras de la parte superior se verán sometidas a compresión y en las fibras de la parte inferior a tensión, si la carga llega a ser crítica producirá que la viga falle repentinamente a causa de la magnitud de la tensión de las fibras.

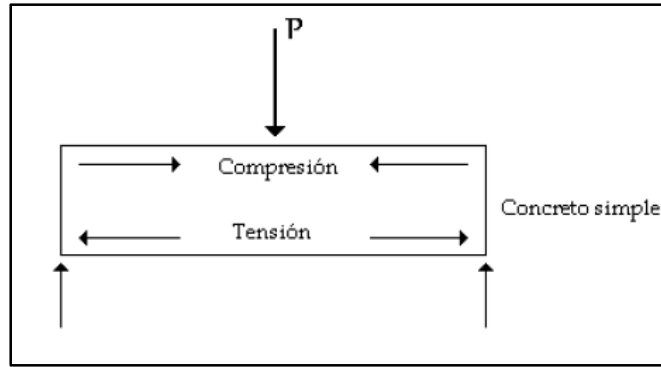


Imagen 8 . Imagen de una viga de concreto simple sometida a una carga P.

Fuente: *Tesis Profesional "Concreto Presforzado. (2008).*

»Se busca contrarrestar los esfuerzos de tensión sometidos en el concreto simple y para ello se refuerza la viga con varillas de acero la zona inferior donde ocurre la tensión.

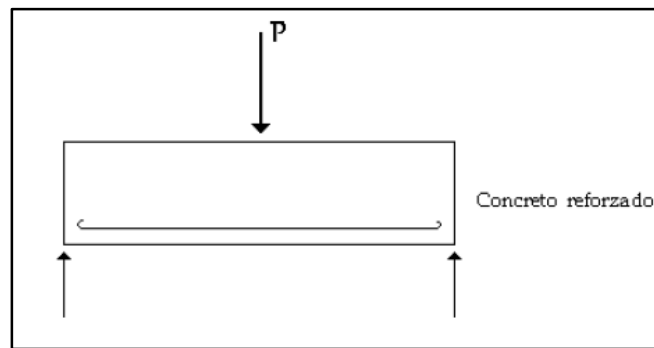


Imagen 9 . Imagen de una viga de concreto reforzado sometida a una carga P.

Fuente: *Tesis Profesional "Concreto Presforzado. (2008).*

»En el concreto pre-esforzado los esfuerzos de compresión a los que se induce la zona donde se desarrolla los esfuerzos de tenso bajo carga, resistirá o anulará esos esfuerzos de tensión. Siempre que los esfuerzos de tensión no excedan a los de pre-compresión, no se producirán agrietamientos en la parte inferior de la viga.» (Cabañas, 2008).

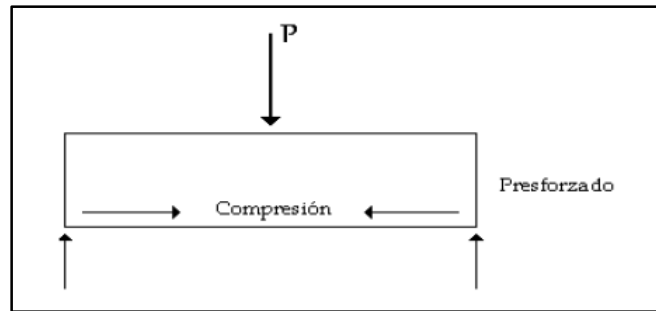


Imagen 10. Imagen de una viga de concreto pretensada sometida a una carga P.

Fuente: *Tesis Profesional "Concreto Presforzado. (2008).*

Según Cabañas, se ofrecen las siguientes ventajas y desventajas para la técnica de pretensado:

Ventajas:

- Tener una mejoría del comportamiento bajo la carga del servicio por el control del agrietamiento.
- Mejora el comportamiento antisísmico.
- Elementos más eficientes y esbeltos.
- Mayor control de calidad en elementos presforzados (producción en serie).
- Mantenimiento nulo.
- Mayor durabilidad.
- La sección entera del elemento trabaja integradamente a la compresión.
- Aligera la construcción.

Desventajas

- Se requiere un sistema de control muy estricto en la fabricación.
- Se debe revisar condiciones adicionales de esfuerzo en el diseño.
- El costo que representa los dispositivos de terminales de anclaje y de las placas que se requieren.
- Se requiere de transporte y montaje para elementos prefabricados. Lo que puede ser desfavorable según la distancia a la que se encuentre la obra de la planta.

- El diseño es más complejo y especializado (juntas, conexiones, etc).
- Planeación cuidadosa del proceso de montaje de la obra.
- Detalle de conexiones.

7.3.2 Hierro

«El hierro es un metal que suele encontrarse en la naturaleza combinado con otros elementos así como en estado puro (en meteoritos de hierro). Es uno de los elementos químicos de la tabla periódica de los elementos, encontrándose entre los metales de transición, tiene un número atómico de 26, un peso atómico de 55,845 y un peso específico de 7.8, y su símbolo es Fe. Se funde a 1220 grados centígrados (1593 grados en el caso del hierro forjado), y su punto de ebullición es de 2.862 grados centígrados.

»Es el cuarto elemento más abundante en el planeta y el segundo metal que más se encuentra en la superficie terrestre; es uno de los metales que el hombre ha utilizado desde hace milenios, descubriéndose su uso en diferentes épocas y lugares, siendo usado por primera vez (según hallazgos arqueológicos) en el próximo oriente y de extremo oriente, en épocas posteriores en Europa y África, y en fechas más recientes en América (a partir de la llegada de los europeos en el siglo XVI, tiempo en el que fue introducido su uso en América). Este metal sustituyó al cobre y al bronce en la fabricación de armas y diversas herramientas, denominándosele al periodo histórico en el cual surgió su uso, como edad del hierro.» (Características del hierro, 2016)

7.3.3 El acero de refuerzo

El acero es una combinación de hierro y carbono (entre un 0.05% hasta menos de un 2%). En ocasiones se le adicionan otros elementos tales como el Cromo o Níquel, dependiendo del tipo de aplicación. El hierro puro es básicamente el principal componente del acero (más de un 98%), se encuentra en la naturaleza en forma de óxido de hierro, pues su forma pura reacciona con mucha facilidad con el oxígeno del aire formando una sustancia pardo-rojiza y escamosa.

El acero se clasifica según el tipo de elementos de aleación los cuales producen efectos variados en el Acero.

- Aceros al carbono: Es el tipo de acero más abundante en la industria, ya que representa más del 90% de todos los aceros, está formado por diversas cantidades de carbonos y menos de 1.65% de manganeso, contiene además 0.60% de silicio y 0.60% de cobre. Con este tipo de acero se fabrican máquinas, carrocerías de automóvil y gran parte de estructuras de construcción de acero, cascos de buques, somieres y horquillas.
- Aceros aleados: Tienen en su composición la presencia de elementos como el vanadio, molibdeno y otros elementos. Con mayores cantidades de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono.
- Aceros estructurales: Estos aceros son usados para crear componentes de máquinas, como engranes, palancas, ejes. También se emplean en estructuras de edificios, puentes, barcos. La aleación que presenta ronda entre un 0.25% a un 6%.

Hay tres formas comunes en las que se emplea el acero como tendones en concreto pre-esforzado: alambres redondos estirados en frío, cable trenzado y varillas de un acero de aleación. (Zamudio, 2000).

7.3.3.1 Alambre redondo

«Los alambres redondos que se usan en el concreto pretensado se fabrican según los requisitos especificados en ASTM A421, “Alambres sin Revestimiento, Relevados de Esfuerzo, para Concreto Pretensado”.

»Su fabricación consiste en un proceso de laminado en caliente de lingotes de acero para obtener varillas redondas. Luego se pasa por una máquina que reduce su diámetro hasta un tamaño requerido estirando el elemento en el proceso. La operación se realiza en frío, produciendo grandes cambios en sus propiedades mecánicas incrementando así su resistencia. Por último los alambres se calientan en un proceso que se llama tratamiento térmico para liberar esfuerzo que pudieron adquirirse durante el proceso anterior.

»Los alambres redondos se consiguen en 4 diámetros diferentes y en dos tipos. El tipo BA es usado para las deformaciones de los extremos del alambres frío como medio de anclaje, y el tipo WA se usa en aplicaciones donde los extremos se anclan en cuñas donde no se encuentra involucrada ninguna deformación del entremos del alambre.» (Zamudio, 2000).

Diámetro nominal	Mínima resistencia de Tensión; Mínimo Ib/pulg. ² (N/mm ²)	Esfuerzo para Una Elongación de 1 % Lb/pulg. ² (N/mm ²)		
Pulg.mm	Tipo BAH	Tipo WA	Tipo BA	Tipo WA
0.192(4.88)	“	250,000(1725)	“	200,000(1380)
0.196(4.98)	240,000(1655)	250,000(1725)	192,000 (1325)	200,000(1380)
0.250(6.35)	240,000(1655)	240,000(1655)	192,000 (1325)	192,000(1325)
0.276(7.01)	“	235,000(1622)	“	188,000(1295)

Cuadro 2. Propiedades de alambres sin revestimiento relevados de esfuerzo (ASTM A421).

Fuente: Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado. (2000).

7.3.3.2 Cable trenzado

Es un cable comúnmente usado en proceso de pretensado. Este cable se fabrica de acuerdo a las especificaciones de ASTM A416, “Cable Trenzado, sin revestimiento, de Siete Alambres, Relevado de Esfuerzos, Para Concreto Presforzado”, su configuración consta de siete alambres torcidos, el paso de la espira del torcido es de 12 a 16 veces el diámetro nominal del cable. El alambre usado es el mismo tipo que se usa que los alambres individuales de presfuerzo. Con ciertas variaciones debido a la tendencia de los cables enrollados a enderezaren cuando están en tensión, debido a que el eje de los alambres difiere a la dirección que se aplica la carga. (Zamudio, 2000).

Diámetro Nominal Pulg.(mm)	Resistencia a la Ruptura Lb (kN)	Area Nominal del cable Pulg ² (mm ²)	Carga Mínima Para una Elongación de 1% Lb/(kN)
Grado 250			
0.250 (6.35)	9000 (40.0)	0.036 (23.22)	7650 (34.0)
0.313 (7.94)	14,500 (64.5)	0.058 (37.42)	12,300 (54.7)
0.375(9.53)	20.000(89.0)	0.080(51.61)	17,0(X) (75.6)
0.438(11.11)	27.000(120.1)	0.108(69.68)	23,000(102.3)
0.500(12.7)	36,000(160.1)	.144(92.9)	30,600(136.2)
.600(15.24)	54,000(240.2)	0.216(139.35)	45,900(204.2)
Grado 270			
0.375 (9.53)	23,000 (102.3)	0.085(54.84)	19,550 (87.0)
0.438(11.11)	31.000(137.9)	0.115(74.19)	26,350(117.2)
0.500(12.70)	41.300(183.7)	0.153(98.71)	35,100(156.1)
0.600 (15.24)	58,600 (260.7)	0.217 (140.00)	49,800(221.5)

Cuadro 3 . Propiedades del cable de siete alambres sin revestimiento (ASTNI A416).

Fuente: Diseño de estructuras de concreto presforzado. (2000).

7.3.3.3 Varillas de acero de aleación

Para las varillas de aleación de acero, la alta resistencia implicada se obtiene utilizando elementos como el manganeso, silicón y cromo en su fabricación. Se realiza además trabajo en frío para aumentar más su resistencia. Las varillas se fabrican de acuerdo a ASTM A722 “Varillas de Acero de Alta Resistencia, para Concreto Presforzado”. (Zamudio, 2000).

Diámetro Nominal Pulg (mm)	Área Nominal De la Varilla Pulg ² (mm ²)	Resistencia a la ruptura Lb(kN)	Minima carga para una elongación de 0.7% Lb(kN)
<i>Grado 145</i>			
1/2(12.70)	0.196(127)	28,000(125)	25,000(111)
5/8 (15.88)	0.307 (198)	45,000 (200)	40,000(178)
3/4(19.05)	0.442(285)	64,000(285)	58,000(258)
7/8(22.23)	0.601 (388)	87,000(387)	78,000(347)
1 (25.40)	0.785(507)	114,000(507)	102,000(454)
1 1/8 (28.58)	0.994(642)	144,000 (641)	129,000(574)
1 1/4 (31.75)	1.227(792)	178,000(792)	160,000(712)
1 3/8 (34.93)	1.485 (958)	215,000 (957)	193,000(859)
<i>Grado 160</i>			
1/2(12.70)	0.196(127)	31,000(138)	27,000(120)
5/8(15.88)	0.307(198)	49,000(218)	43,000(191)
3/4 (19.05)	0.442(285)	71,000 (316)	62,000 (276)
7/8 (22.23)	0.601(388)	96,000(427)	84,000(374)
1 (25.40)	0.785(507)	126,000(561)	110000(490)
1 1/8 (28.58)	0.994(642)	159,000 (708)	139,000 (619)
1 ¼ (31.75)	1.227(792)	196,000(872)	172,000(768)
1 3/8 (34.93)	1.485(958)	238,000(1059)	208,000(926)

Cuadro 4. Propiedades de las varillas de acero de aleación.

Fuente: Diseño de estructuras de concreto presforzado. (2000).

7.3.4 Mecanismo de adherencia entre el refuerzo y concreto

Según Harmsen (2005). La adherencia entre el acero y el concreto se basa en tres mecanismos:

1. Adherencia química, actúan cuando los esfuerzos sobre el concreto son pequeños, (entre 14 a 21 Kg/cm².) Una vez que se excede este esfuerzo entran a trabajar los demás mecanismos.
2. Fricción, es la fuerza de rozamiento que se da entre las superficies del acero y el concreto y se opone al movimiento entre ambos materiales.
3. Aplastamiento del concreto por las corrugaciones de las varillas, este mecanismo de adherencia es el más efectivo de los 3, ya que si la adherencia química se rompe cuando se usan varillas lisas, hay un desprendimiento casi inmediato del acero en el concreto.

A continuación se muestran las fuerzas que se ejercen en la varilla una vez que se ha desprendido la adhesión química, como se observa la reacción del concreto no es paralela a la varilla (ver imagen 11), sino que se forma un ángulo β sobre ésta, ese ángulo varía entre los 45° y 80° y debido a ello no se puede despreciar la componente radial de la fuerza. (Harmsen, 2005).

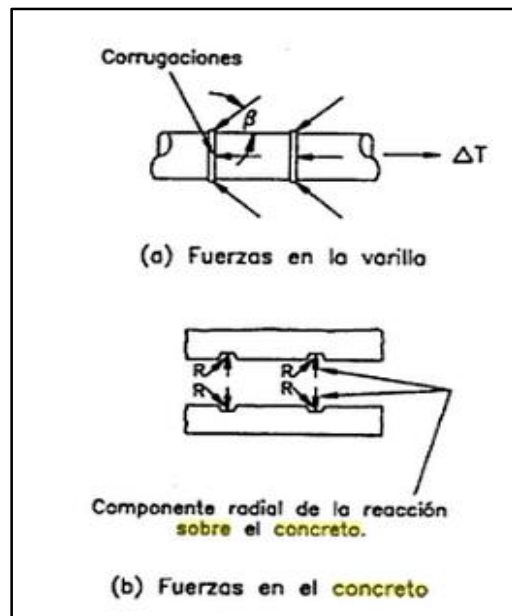


Imagen 11. Fuerzas que actúan entre el concreto y las varillas de acero.

Fuente: *Diseño de Estructuras de Concreto Armado* (2005).

El concreto sometido a ese esfuerzo radial presenta un estado similar al que presenta un recipiente de pared delgada que está sometido internamente a presión, la imagen 12 muestra el efecto de tal tensión producida por las varillas de acero.

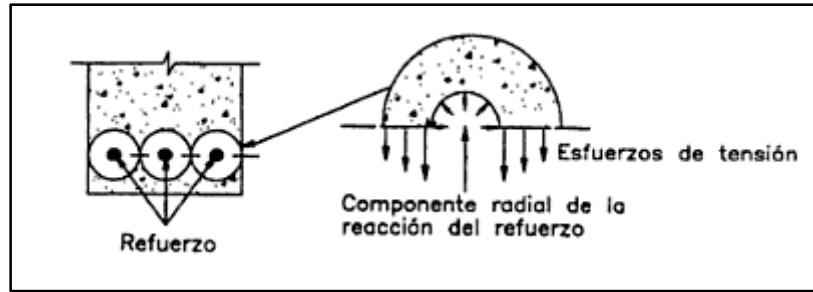


Imagen 12. Tensión sobre el concreto producido por la componente radial de la fuerza alrededor de la varilla de acero.

Fuente: *Diseño de Estructuras de Concreto Armado* (2005).

Debido a tales esfuerzos el concreto puede sufrir dos tipos de fallas. Uno se produce cuando los esfuerzos de tensión alrededor de la varilla son mayores a la resistencia límite a la tracción del concreto. La zona que presenta menor espesor ira agrietándose hasta el punto que se produzcan pérdidas de adherencia con la varilla. El otro tipo de falla que se presenta en el concreto es debido al aplastamiento o desprendimiento del concreto entre las corrugaciones del acero, véase imagen 13. (Harmsen, 2005).

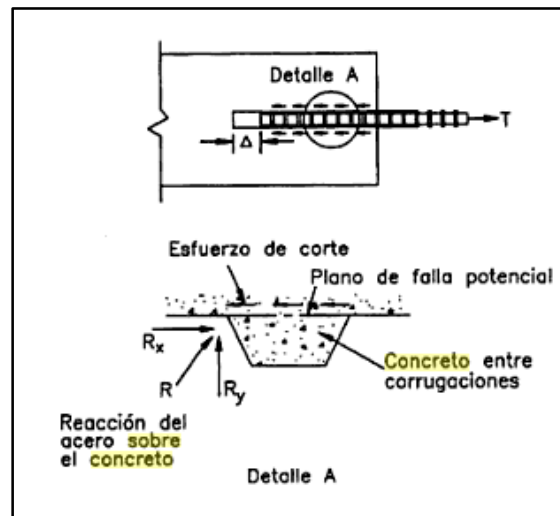


Imagen 13. Falla del concreto entre corrugaciones de las varillas de acero.

Fuente: *Diseño de Estructuras de Concreto Armado* (2005).

7.4 Sistema de entrepiso prefabricado de viguetas y bloques

Consiste una serie de viguetas prefabricadas colocadas en paralelo, las cuales están apoyadas sobre vigas de carga. Las vigas de cargas se localizan en las líneas o ejes de columnas, guardando las distancias entre ellas. Losas elaboradas con elementos de concreto prefabricado, en este caso bloques huecos se apoyan sobre las viguetas cubriendo las distancias entre ellas. Para luego colarse un recubrimiento de concreto preparado en el sitio. Dependiendo del tipo de entrepiso prefabricado, así serán las luces, las cargas y el proceso constructivo que se requiera. (Valverde, 2005).

Productos de Concreto tiene a su disposición una variedad de bloques que presentan diferentes distancias en la cobertura de claros, pudiendo satisfacer los requerimientos presentes en la construcción, el cuadro 5 presenta los claros que cubre las viguetas tipo 15 O, 15 A y 20 A, para sistemas con o sin apuntalamiento según la sobrecarga soportada por el sistema que contempla tanto la carga temporal como permanente adicional al peso propio de la estructura.

El apuntalamiento es un proceso donde se refuerza una estructura brindándole apoyo a través de elementos esbeltos, con el propósito de evitar el colapso durante la construcción. El apuntalamiento se utiliza para apoyar vigas y pisos en un edificio. La imagen 14 representa el apuntalamiento en el encofrado de una viga con vigas de madera.

Entrepisos de vigueta con sobrelosa de 5 cm y con resistencia de 210 kg/cm ²						
Tipo de vigueta	VIG 15 O		VIG 15 A		VIG 20 A	
Peso de las viguetas	49 kg/m ²		49 kg/m ²		58 kg/m ²	
Peso del concreto	126 kg/m ²		144 kg/m ²		135 kg/m ²	
Peso de los bloques	124 kg/m ²		137 kg/m ²		137 kg/m ²	
Fuerza de pretensión	7280 kgf	7280 kgf	7280 kgf	7280 kgf	7280 kgf	7280 kgf
Sobrecarga [™] CM _{adic} + CV (kg/m ²)	CLARO (m) sin apuntalamiento	CLARO (m) con apuntalamiento	CLARO (m) sin apuntalamiento	CLARO (m) con apuntalamiento	CLARO (m) sin apuntalamiento	CLARO (m) con apuntalamiento
200	5.18	6.00	4.98	6.50	6.36	7.50
250	5.07	6.00	4.98	6.50	6.36	7.50
300	4.95	5.83	4.98	6.50	6.34	7.50
350	4.83	5.60	4.92	6.29	6.20	7.28
400	4.73	5.39	4.84	6.07	6.07	7.02
450	4.63	5.21	4.77	5.88	5.94	6.79
500	4.54	5.04	4.70	5.70	5.82	6.59
550	4.45	4.89	4.64	5.53	5.71	6.40
600	4.37	4.76	4.58	5.38	5.60	6.22
650	4.29	4.63	4.52	5.24	5.50	6.06
700	4.22	4.51	4.46	5.11	5.41	5.91
750	4.15	4.40	4.41	4.99	5.32	5.67
800	4.08	4.30	4.35	4.88	5.23	5.42
850	4.02	4.21	4.30	4.78	5.15	5.19
900	3.96	4.12	4.25	4.68	4.98	4.98
950	3.90	4.03	4.20	4.59	4.79	4.79
1000	3.85	3.96	4.16	4.50	4.61	4.61

Cuadro 5. Distancia de claros con y sin apuntalamiento de entrepisos con viguetas tipo 15 O, 15 A y 20

A.

Fuente: Productos de Concreto (2014).

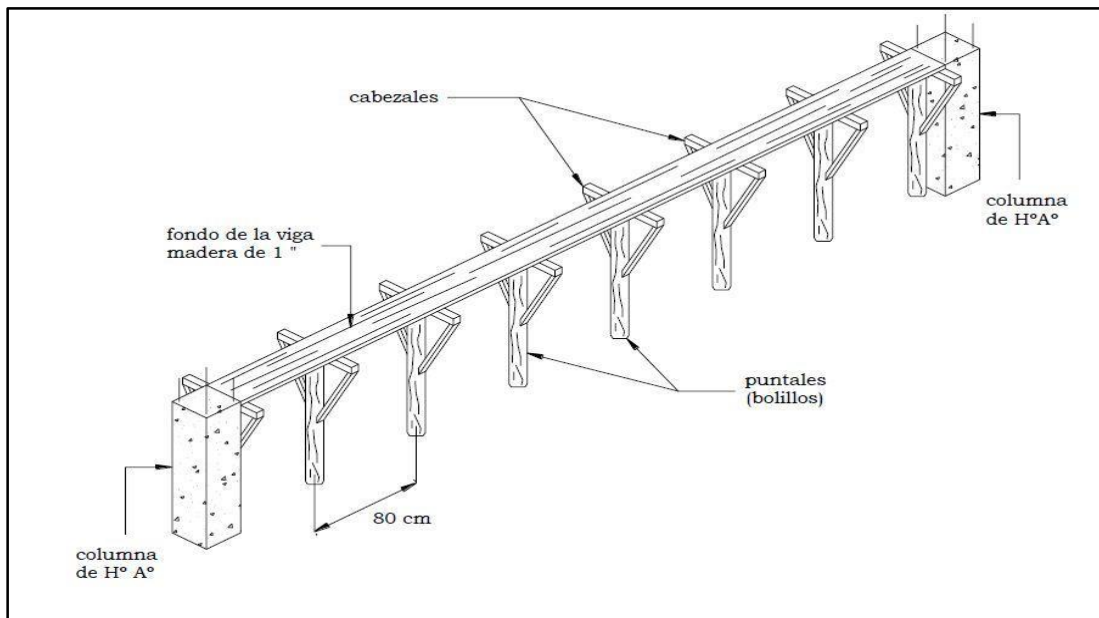


Imagen 14. Apuntalamiento del encofrado de una viga.

Fuente: Manual de construcción de edificios (2004).

En la imagen 15 se muestra una vista transversal de los diferentes tipos de sistemas de entrepisos con viguetas y bloques que trabaja PC, en ella se pueden apreciar las dimensiones en metros de los bloques, así como la colocación de la sobre losa y su espesor.

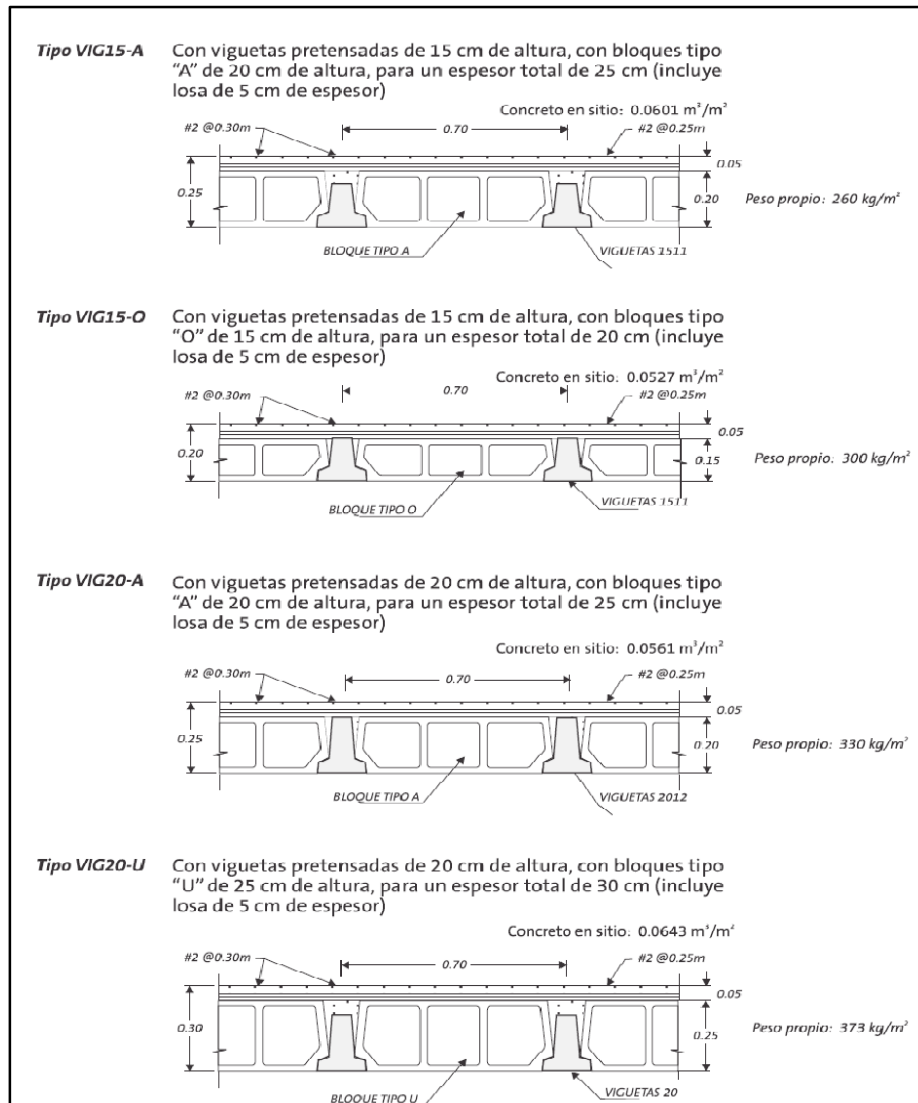


Imagen 15. Tipos de sistemas de entrepisos de viguetas y bloques disponibles en PC.

Fuentes: Productos de Concreto (2014).

Una vez colocadas las losas sobre las viguetas se debe colocar una sobrelosa estructural colada en el sitio, mortero, junto con una malla de acero electrosoldada, de tal forma que se garantice la acción de diafragma rígido del entrepiso y una mejor distribución de las cargas através de las viguetas. El mortero

colocado puede ser de 5 cm de ancho, aunque hay otros casos donde se puede colocar de 7.5 cm. (Manual Técnico PC, 2012)

Actualmente en el mercado costarricense se ofrecen losas de concreto y poliestireno, como es lógico los materiales de concreto y poliestireno presentan diferencias importantes en resistencia mecánica, resistencia térmica, densidad, etc. En cuanto a las dimensiones, se tiene que los bloques de concreto presentan un largo estándar de 20 cm de ancho o fondo con cavidades que lo hacen ser hueco, por otra parte los bloques de polietileno tienen 1.22 metros de largo y no presentan cavidades.

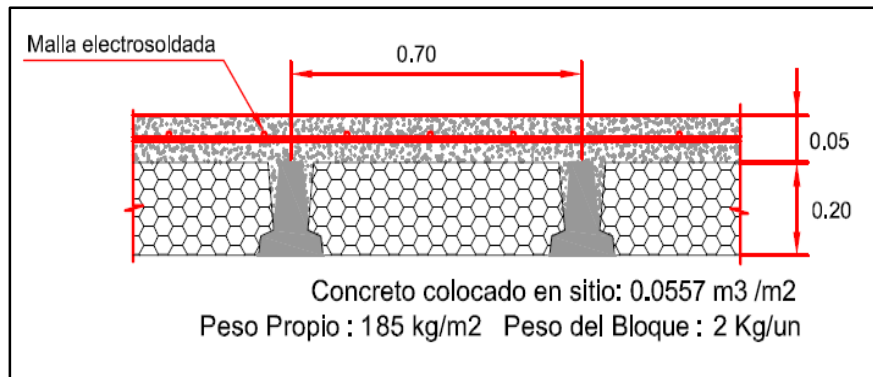


Imagen 16. Vista transversal de un sistema de entresijos utilizando bloques de poliestireno.

Fuente *Sistema de Entresijos Prefabricados a Base de Viguetas y Bloques* (2014).

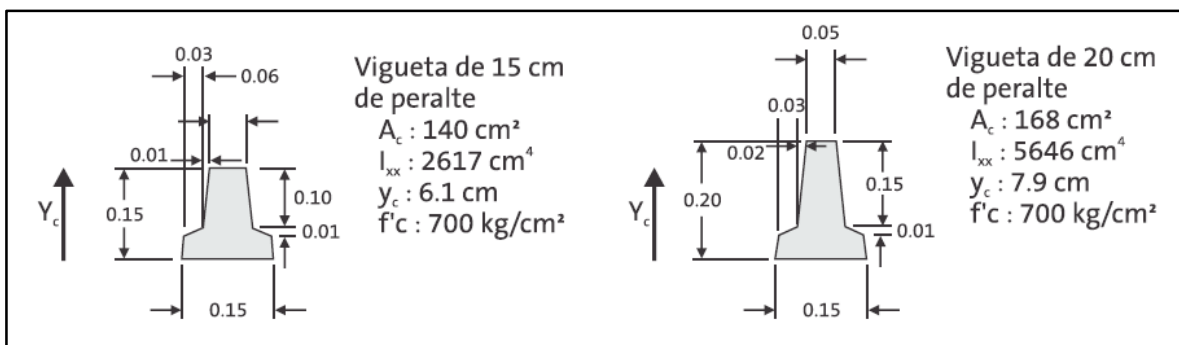


Imagen 17. Perfil de una viga pretensada de 15 y 20 cm de peralte, comercializada por PC.

Fuente: *Productos de Concreto* (2014).

Ventajas que ofrece el sistema de entre pisos de vigueta pretensada

- Mayor separación entre viguetas (70 cm).
- Disminución del peso propio del entrepiso.
- Facilidad de montaje.
- Reducción del consumo de concreto a colar en el sitio.
- Mejor precio por metro cuadrado.
- Bloques más livianos de dos o tres celdas.
- Evita gastos adicionales de cielos falsos.



Imagen 18. Fotografía del montaje de un sistema de vigueta pretensado con bloque de poliestireno.

Fuente: *Sistema de Entrepisos Prefabricados a Base de Viguetas y Bloques* (2014).



Imagen 19. Fotografía del montaje de un sistema de vigueta pretensado con bloques prefabricados.

Fuente: *Sistema de Entrepisos Prefabricados a Base de Viguetas y Bloques* (2014).

7.5 Sistema de entrepiso de losa alveolar o multitubular

Son losas de concreto alivianadas, con secciones huecas, para entre pisos que cubren grandes claros, (desde los 4 m a 15 m) y altas cargas de servicio. Este tipo de losa es versátil y económica, su uso se extiende a numerosos tipos de proyectos. Es una opción segura y avanzada para proyectos con altos requisitos arquitectónicos e ingenieriles. (Manual Técnico PC, 2012)



Imagen 20. Imagen de una losa alveolar.

Fuente: *Sistema de Entrepisos Prefabricados a Base de Viguetas y Bloques (2014)*.

Ventajas de los entrepisos losa alveolar según Productos de Concreto

- Permiten acabados planos por debajo optimizando el espacio.
- Mayor facilidad de instalación eléctrica y mecánica, debido a que se pueden usar los orificios de la losa alveolar como una ruta para colocar la tubería eléctrica y mecánica, siendo una forma económica de eliminar instalaciones en la superficie.
- En ocasiones se ha utilizado los orificios de las losas como ventilación y ductos para el aire acondicionado mejorando la apariencia y reduciendo costos de construcción.
- Confort debido a su aislamiento acústico y térmico.

- No requiere mantenimiento.

8 Tipos de construcciones

La resistencia al fuego y la combustibilidad que los elementos estructurales de las edificaciones poseen, son clasificadas por la NFPA 220 (Norma sobre tipos de construcción de edificios), esta norma hace una clasificación según los elementos estructurales que dichos edificios posean, paredes, columnas, entrepisos, techos, etc. Los tipos de construcciones son 5 y enumerados del 1 al 5 en números romanos

8.1 Tipo I (443 o 332)

El tipo de construcción tipo I es aquella en la que sus elementos estructurales tales como vigas, pisos, techos, paredes, columnas son de materiales no combustibles o de combustibilidad limitada. Dichos materiales tendrán una resistencia al fuego en horas no menor a lo que se puede ver en el cuadro 6. (NFPA 220, 2015)

8.2 Tipo II (222, 111 o 000)

El tipo de construcción Tipo II incluye todos los elementos estructurales Tipo I pero que no puede clasificarse como tal, dichos elementos tendrán una combustibilidad nula o limitada y su resistencia al fuego en hora según el cuadro 6. (NFPA 220, 2015)

8.3 Tipo III (211 o 200)

El tipo de construcción III es aquella en la que las paredes exteriores y elementos estructurales que son parte de las paredes exteriores son de materiales no combustibles o limitada combustibilidad y los miembros estructurales internos como los descritos en Tipo I y Tipo II son total o parcialmente de madera de dimensiones inferiores a las solicitadas para entrar en una clasificación tipo IV, la resistencia al fuego en horas se observa en el cuadro 6. (NFPA 220, 2015)

8.4 Tipo IV (2HH)

Las construcciones tipo IV son aquellas en las paredes exteriores e interiores y los elementos estructurales son de materiales combustibles o de combustión limitada. Los elementos estructurales internos incluyen los elementos descritos en Tipo I pero que son de madera maciza o madera laminada. Dichos elementos estructurales deberán tener una resistencia al fuego en horas no menor a lo establecido en el cuadro 6. (NFPA 220, 2015)

8.5 Tipo V (111 o 000)

Los tipo V son aquellas construcciones en que las todos los elementos descritos en Tipo IV son de madera o de otro material combustible. Dichos elementos estructurales tendrán resistencias al fuego como lo muestra el cuadro 6. (NFPA 220, 2015)

	Type I		Type II			Type III		Type IV	Type V	
	443	332	222	111	000	211	200	2HH	111	000
Exterior Bearing Walls										
Supporting more than one floor, columns, or other bearing walls	4	3	2	1	0 ¹	2	2	2	1	0 ¹
Supporting one floor only	4	3	2	1	0 ¹	2	2	2	1	0 ¹
Supporting a roof only	4	3	1	1	0 ¹	2	2	2	1	0 ¹
Interior Bearing Walls										
Supporting more than one floor, columns, or other bearing walls	4	3	2	1	0	1	0	2	1	0
Supporting one floor only	3	2	2	1	0	1	0	1	1	0
Supporting roofs only	3	2	1	1	0	1	0	1	1	0
Columns										
Supporting more than one floor, columns, or other bearing walls	4	3	2	1	0	1	0	H ²	1	0
Supporting one floor only	3	2	2	1	0	1	0	H ²	1	0
Supporting roofs only	3	2	1	1	0	1	0	H ²	1	0
Beams, Girders, Trusses, and Arches										
Supporting more than one floor, columns, or other bearing walls	4	3	2	1	0	1	0	H ²	1	0
Supporting one floor only	3	2	2	1	0	1	0	H ²	1	0
Supporting roofs only	3	2	1	1	0	1	0	H ²	1	0
Floor Construction	3	2	2	1	0	1	0	H ²	1	0
Roof Construction	2	1 ^{1/2}	1	1	0	1	0	H ²	1	0
Exterior Nonbearing Walls³	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹

Cuadro 6. : Resistencia al fuego (en horas) para construcciones tipo I a tipo V.

Fuente: NFPA 101 (2015).

9 Instituciones relacionadas

9.1 Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica

Los inicios del Benemérito Cuerpo de Bomberos están desde el año 1865 específicamente el 27 de julio se constituye el primer Reglamento Oficial del Cuerpo de Bomberos.

Más tarde en 1925 por medio del Decreto Ejecutivo No 4 el Cuerpo de Bomberos pasaría a ser una dependencia del Banco Nacional de Seguros el cual conocemos hoy como el Instituto Nacional De Seguros siendo este el encargado de su administración completa. Desde esa fecha el Banco Nacional de Seguros se encargó de dotar al cuerpo de equipos modernos, además se empezaron a construir las primeras Estaciones de Bomberos a lo largo y ancho del país. Es así que para 1965 con 100 años de fundación Costa Rica poseía un Cuerpo de Bomberos con un total de 20 estaciones; fue así que ese mismo año el Cuerpo de Bomberos recibió el Benemeritazgo. Actualmente el Cuerpo de Bomberos tiene en operación un total de 53 estaciones distribuidas estratégicamente en el territorio nacional.

Seguidamente el 7 de agosto de 2008 con la Ley No 8653 llamada Ley Reguladora del Mercado de Seguros se crea el Benemérito Cuerpo de Bomberos ahora como un órgano totalmente desconcentrado e independiente del Instituto Nacional de Seguros. La administración y representación del Cuerpo de Bomberos será llevada a cabo por el Director General del Cuerpo de Bomberos quien será encargado de las funciones gerenciales de dicho Cuerpo

Actualmente el Benemérito Cuerpo de Bomberos es el órgano encargado de supervisar, aprobar e inspeccionar todas las obras en el campo de protección contra incendios en todo el territorio nacional.

9.2 Productos de Concreto S.A.

La historia de Productos de Concreto ha sufrido muchos cambios a lo largo de los años, empezando en 1948 con el nombre de "Figuls y Araya" con ubicación en San Francisco Dos Ríos en la casa de habitación del ingeniero Trino Araya,

fabricando inicialmente tubos de concreto de 76mm a 200mm. Más tarde, en año de 1950 se incorpora el ingeniero Enrique Volio y se adquiere la fábrica de tubos Francisco Jiménez, con ello se amplió la oferta y la producción de nuevos diámetros.

Para el año de 1952 se funda la primera escritura social con el nombre de “Fábrica de Tubos de Concreto San Francisco Ltda”, ahora iniciando la producción de bloques de concreto y también postes para la industria eléctrica nacional con un largo de 9m.

Cuando corría el año de 1955 se modifica una vez más el nombre pasándose a llamar “Productos de Concreto Ltda”, ese mismo año un colector de aguas negras en San José represento uno de los mayores retos de ingeniería para la compañía. Ahora bien con el nuevo nombre, Productos de Concreto promueve una alianza con otras empresas relacionadas en el área, estas son: Productos Caribe Ltda, Ladrillera la Uruca y Fabrica Herrera, con ellos se formó la firma “Tubos Vibrapack Ltda”. Más tarde en 1957 esta nueva firma adquiere equipos y tecnología para suministrar tubería con la que se construyó el “Colector del Sur”.

Habiendo participado ya en varios proyectos y abonando la necesidad tecnológica de desarrollo que demandaba el país en esas fechas, en 1958 la empresa “Pretensora de Concreto y Fábrica de Mosaicos Gongrani Ltda” se abrazaron al grupo, extendiendo la oferta económica ya que se empezó a ofrecer concretos pretensados para infraestructura y el sistema reticular celular.

En los próximos años Productos de Concreto dejaría de ser una empresa de índole familiar para saltar a ser una empresa de “capital abierto”, con lo que se estableció un financiamiento con la “Corporación Financiera Internacional” (IFC) instaurada en Washington. El excelente desempeño de Productos de Concreto fue objeto de enaltecimiento de parte de IFC a nivel internacional lo que la llevo a darse la fama de una empresa seria y consolidada.

Varias décadas después, específicamente en 1998 se lleva a cabo una nueva fusión, esta vez con la Industria Nacional de Cemento y la Concretera Nacional y se establece la Corporación INCSA. Productos de Concreto y las compañías que lo

formaron lanzaron al mercado nacional una gran cantidad de productos que hoy aún se comercializan tales como: Tubos de diámetros mayores de 36 pulg. (900 mm), bloques de concreto, Mosaico de terrazo, bloques ornamentales, adoquines y baldosas, Concreto pretensado y pos tensado, trabelosas (losas alivianadas de concreto), doble-tees y canaletas, viguetas para entrepisos, postes para líneas eléctricas, vigas para puentes, pilotes, durmientes pretensados para vías férreas, bloques para entrepisos, casas prefabricadas, entrepisos de reticular celular, postes para cercas, tubos con empaques para cloacas y las vigas para puente.

En el año 2003 sufre un nuevo cambio, al fusionarse con Holcim Costa Rica y las operaciones son trasladadas a San Rafael de Alajuela, la fusión se mantuvo hasta 2012 cuando Productos de Concreto se independiza de Grupo Holcim, manteniéndose hasta la fecha como una empresa líder a nivel nacional y reconocida a nivel internacional por su excelencia y por la calidad de sus productos.

9.3 Laboratorio de Protección Contra Incendios (LAPCI)

Tras haberse inaugurado en 2007 la carrera de Ingeniería Mecánica con énfasis en Sistemas de Protección Contra Incendios en la Sede Interuniversitaria de Alajuela de la Universidad de Costa Rica nació la creciente necesidad de poseer un laboratorio con el objetivo de poder analizar el comportamiento del fuego de los materiales de construcción fue así como el 27 de enero de 2014 oficialmente se funda el Laboratorio de Protección Contra Incendios de la Universidad de Costa Rica situado en el Recinto de Alajuela.

En este laboratorio estudiantes y profesores de la carrera de Ingeniería Mecánica tienen la capacidad de analizar el comportamiento de los materiales frente al fuego con equipos especializados en mediciones de emisión y opacidad del humo en materiales constructivos, velocidad de propagación de llamas y las tasas de liberación de calor.

9.4 Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME)

Hace 60 años bajo decisión de la Universidad de Costa Rica en modo de apoyo a la Escuela de Ingeniería Civil se crea el Laboratorio Nacional de Materiales

y Modelos Estructurales (LANAMME), posteriormente en el año 2002 por medio de la ley 8114 el LANAMME fue elegido y nombrado como la entidad responsable de velar por la eficiente inversión de fondos monetarios públicos relacionados con temas de Infraestructura Vial.

El LANAMME cuenta con más de 100 ensayos certificados y acreditados en sus distintos laboratorios los cuales son Infraestructura Civil, Infraestructura Vial y Fuerza. En estos laboratorios se ofrecen servicios de pruebas y ensayos en materiales y modelos estructurales por ejemplo: obras civiles, diseño de materiales, calibración de equipos e instrumentos de fuerza.

Un punto trascendental en las labores que ejerce el LANAMME es brindar apoyo académico en actividades de docencia de la Universidad de Costa Rica. Parte de esa labor es facilitar a estudiantes de Ingeniería Civil y de otras ramas tales como la Ingeniería Mecánica el desarrollar sus proyectos de grado y posgrado

9.5 Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas (CIEMIC)

Como parte de su parte de su historia el CIEMIC tuvo origen en el año 1974 cuando se creó la Unidad de Microscopia Electrónica como demanda de la creciente necesidad en esa época de los profesionales e investigadores de la Universidad de Costa Rica de poseer Microscopios Electrónicos. En un inicio la Unidad de Microscopía Electrónica se encontraba bajo la tutela de la Escuela de Medicina, sin embargo la investigación nacional fue en aumento no solo en el campo médico y biológico si no en diferentes profesiones y campos por lo que en el año 2001 en la sede de la Ciudad de la Investigación de la Universidad de Costa Rica se establece el CIEMIC.

Entre sus equipos y funciones el CIEMIC cuenta con Microscopios de Barrido, los cuales son de gran utilidad para poder ver materiales a nivel micro para analizar sus estructuras y constituciones.

9.6 National Fire Protection Association (NFPA)

La NFPA es una organización sin fines de lucro fundada en los Estados Unidos de Norteamérica en el año de 1896 con la finalidad de establecer normas con requisitos mínimos para la prevención y protección contra incendios, además de la instalación de equipos contra incendios, capacitaciones, charlas y demás actividades competentes a la seguridad en los distintos posibles escenarios de incendios tanto para los cuerpos de bomberos, ingenieros y personales encargados de temas de seguridad en las compañías.

La NFPA llama a estas normas como los *National Fire Codes* los cuales recomiendan prácticas seguras para la prevención y mitigación del fuego en todos los distintos riesgos posibles tanto a nivel residencial, comercial e industrial; estas normas son desarrolladas por expertos en incendios en cada una de las materias que la NFPA toca en sus normas.

Actualmente la sede central de la NFPA está ubicada en el estado de *Massachusetts*, desde allí fiscaliza y controla el progreso, las revisiones y las correcciones de las más de 300 normas que se han publicado bajo su sello acorde al mandato de más de 6000 voluntarios que representan a los sectores interesados como cuerpos de bomberos, compañías de seguros, gobierno, industria, comercio y consumidores.

Muchos estados y gobiernos locales en Estados Unidos han adoptado parte o su totalidad las normativas NFPA en sus propias legislaciones dado que las normas son conocidas y aceptadas en gran parte del mundo. En el caso de Costa Rica en concordancia con lo establecido en el Decreto No 34768, Gaceta No 195 del 09 de octubre de 2008, El Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica adopta e incorpora al Manual de Disposiciones Técnicas Generales Sobre Seguridad Humana y Protección Contra Incendio, las normas NFPA destinadas a todas las aplicaciones en Costa Rica.

9.7 American Society for Testing Materials (ASTM)

Fundada en 1898 la ASTM es una organización de índole internacional encargada del desarrollo de normas con el fin de probar materiales sometidos a distintas pruebas para conocer sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, térmicas, etc. Estas normas son creadas por más de 30.000 voluntarios de todo el mundo, representando a 140 países. En su haber la ASTM posee más de 12.000 normas internacionales que comprenden materiales como plásticos, petróleo, construcción, energía, metales, medio ambiente, dispositivos, electrónica, servicios médicos y pinturas.

Las normas ASTM como se mencionó anteriormente son aceptadas y utilizadas alrededor del mundo desde la concepción, diseño y posteriormente fabricación de productos hasta la llegada de los consumidores, en síntesis las normas ASTM favorecen la calidad de muchos materiales y productos para que su desempeño en la industria cumpla con lo cometido.

Como parte de este trabajo de tesis se tomará como base la norma ASTM E119 la que fiscaliza el tipo de pruebas a la que debe someterse los materiales de construcción de edificios en un incendio.

10 Equipos de Laboratorio

10.1 IMO Dispositivo de propagación de llama

Este instrumento trabaja con un panel de calor radiante a gas con una llama piloto para encender una muestra de ensayo o de estudio.

Después de la ignición cualquier llama que se desarrolle en la muestra se observa y se hace un registro del frente de llama horizontalmente a lo largo de la longitud de la muestra en estudio. Los resultados de la propagación se expresan en términos de distancia contra tiempo, velocidad de propagación, el flujo de calor crítico de extinción y el calor medio de combustión continua.

El dispositivo consta esencialmente de tres componentes principales, un marco de soporte que sostiene el panel radiante, un marco de apoyo para la muestra

que se coloca frente al panel radiante según la configuración requerida de distancia y sostén de la muestra donde se coloca el espécimen que se someterá al análisis. El sistema de arranque del panel radiante es totalmente automático con bloqueo de arranque y chispa de seguridad.

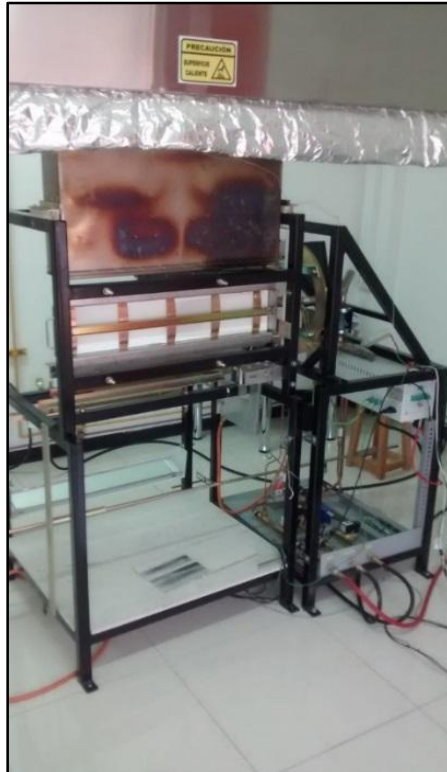


Imagen 21. IMO Dispositivo de Propagación de Llama.

Fuente: Autores (2014).

10.2 Horno de convección.

El horno pequeño de mesa es un dispositivo capaz de generar radiación para simular cargas de fuego a materiales, preferiblemente utilizado para realización de pruebas de auto ignición de materiales sólidos. Otras aplicaciones que tiene son para incinerar muestras orgánicas e inorgánicas, tratamientos térmicos de piezas de acero pequeñas, análisis gravimétrico y la determinación de sólidos volátiles.

El horno posee un control digital de temperatura, capaz de llevar el espécimen de prueba a 1200 °C para simular condiciones superiores a las que se

vería sometidas en un incendio real. Este control digital posee una pantalla donde se registra la temperatura actual a la que se esté llevando a cabo la prueba.

Las resistencias encargadas de la radiación de calor están ubicadas a ambos lados de las paredes del horno, así como arriba en la pared superior, esto con el fin de garantizar una emanación de calor y absorción por parte del sólido en prueba más eficiente.

El horno en su interior además de las resistencias que son las encargadas de irradiar la energía, posee un recubrimiento de cerámica, material usado típicamente en la fabricación de hornos dada su capacidad de absorber el calor y mantenerlo atrapado en el horno confinado, disminuyendo en gran medida las pérdidas hacia las paredes exteriores.

Este horno posee además una puerta hermética que reduce al mínimo el escape de energía, además su forma desplegable de abrir sirve de plataforma para que las muestras sean colocadas mientras se insertan o se extraen, es importante recordar que en el uso de este equipo es indispensable el uso de guantes de alta resistencia a temperaturas, así como pinzas para tomar las muestras calientes y sacarlas del horno para sus posteriores análisis.



Imagen 22. Horno de convección del LAPCI.

Fuente: Autores (2014).

10.3 Microscopio electrónico de barrido (MEB)

El microscopio electrónico de barrido funciona mediante un campo magnético el cual permite enfocar con rayos catódicos (electrones) la muestra y obtener una imagen tridimensional, con esto se pueden caracterizar todo tipo de materiales tanto orgánicos como inorgánicos, proporcionando aumentos de hasta 200.000 diámetros (De Loranzo, Morales, & Yañez, 2014)

Los componentes principales de un MEB son:

- El sistema electrónico (columna: lentes electromagnéticos)
- El sistema de vacío
- El sistema de enfriamiento

El sistema electrónico consta de lentes electromagnéticos que son un sistema embobinado, los cuales forman un campo magnético, en palabras simples funcionan como un lente óptico. Cabe destacar que el MEB debe trabajar en alto vacío, alcanzando los niveles de 1×10^{-6} Torr.

La columna del microscopio está constituida por un cañón electrónico el cual posee un filamento de tungsteno, un lente condensador el cual es el encargado de ajustar el brillo, el lente objetivo cuya función es la de enfocar y amplificar, el sintonizador que detecta los electrones secundarios los cuales son los que emite la muestra en un punto y el fotomultiplicador que es el que transporta la imagen al monitor.

El sistema de vacío está conformado por bombas de rotación y bomba de difusión. Las bombas de rotación generan bajo vacío aproximadamente 1×10^{-2} Torr, el medidor de dicha presión tiene el nombre de pirano, por su parte la bomba de difusión es la que genera el alto vacío de 1×10^{-6} Torr de los cuales ya se habló anteriormente, el medidor del alto vacío lleva como nombre penning. Cabe destacar que el microscopio tarda alrededor de 20 minutos en alcanzar el alto vacío dentro de la cámara donde se encuentra la muestra o espécimen.

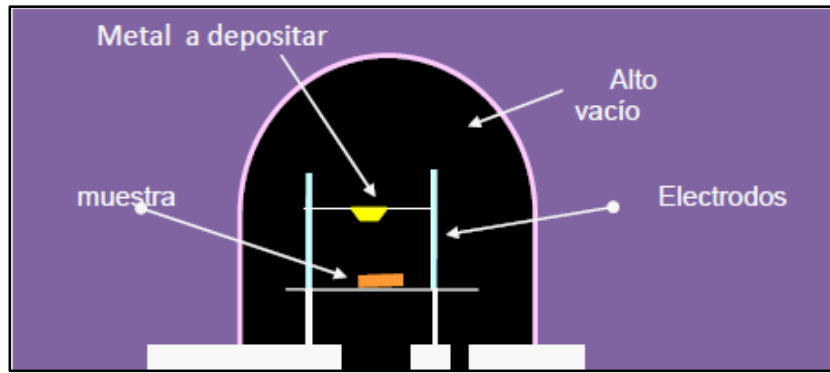


Imagen 23. Cámara de vacío.

Fuente: Principios y Práctica de la Microscopia Electrónica (1990).

El sistema de enfriamiento estrictamente se trata de un serpentín que recorre los lentes electromagnéticos el cual es enfriado por agua de 15 °C a 25 °C con un caudal de 4 a 5 L/min y cuya presión oscila entre los 0,5 a 2 kg/cm². Este sistema es de suma importancia dado que los microscopios utilizan grandes cantidades de corriente eléctrica generando calentamientos en los lentes, por lo que es preciso mantener el sistema enfriado. (De Loranzo, Morales, & Yañez, 2014)

La siguiente figura ilustra en forma esquematizada como se dividen las muestras, si debe estar seca o hidratada y como se debe montar en el porta muestras.

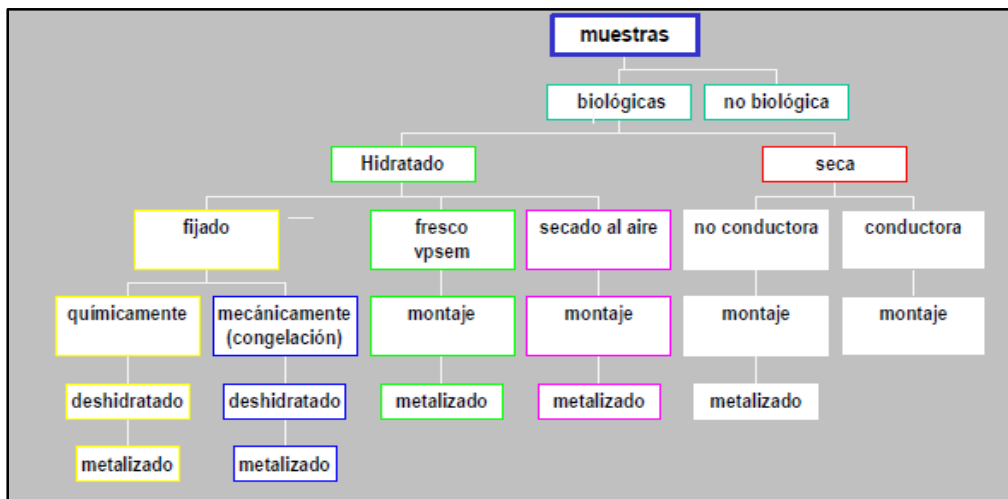


Imagen 24. Tipos de muestras para microscopio electrónico de barrido.

Fuente: Principios y Práctica de la Microscopia Electrónica, (1990).

Dado que en esta investigación el análisis microscópico se centrará en el concreto, la muestra se divide como no Biológica, la cual debe estar totalmente seca. Debido a las características físico-químicas del concreto, se sabe que no es conductor de la electricidad, por lo que finalmente basta con montarse sobre el porta muestras. Luego se toma un fragmento de la muestra que sea representativa con lo que se pretende observar, de ser preciso se puede lavar la muestra, dicho lavado puede ser: lavado simple, un aparato limpiador de ultrasonido, pulido o lavado con solventes. Puede secarse al aire, o en una máquina de acondicionamiento a 25 °C

Analizando ahora como es que se forma la imagen debemos centrarnos en el cañón electrónico que está compuesto por un filamento de tungsteno y el cilindro de Wehnelt. El cilindro de Wehnelt está encargado de concentrar los electrones para que salgan hacia el ánodo, para que luego de allí sean acelerados directamente a la muestra, es preciso destacar que esta sección es importante que sea limpiada periódicamente dado que el filamento está destinado a estar sometido a gran contaminación. Ahora bien los electrones son formados por emisión termoiónica es decir calentar el filamento a una determinada temperatura para así producir la emisión de electrones. Una vez que se obtiene el haz de electrones por medio de un voltaje de aceleración determinado por el operador, este haz de electrones se ve acelerado y se hace chocar directamente sobre la muestra para lograr la emisión. Una vez que el haz llegó a la muestra en esta se provocan una sucesión de fenómenos, principalmente la formación de la imagen en el monitor la cual está compuesta de tonos de color gris, es decir de los extremos del blanco al negro, la gama de los grises es dependiente de la suma de electrones que emita la muestra.

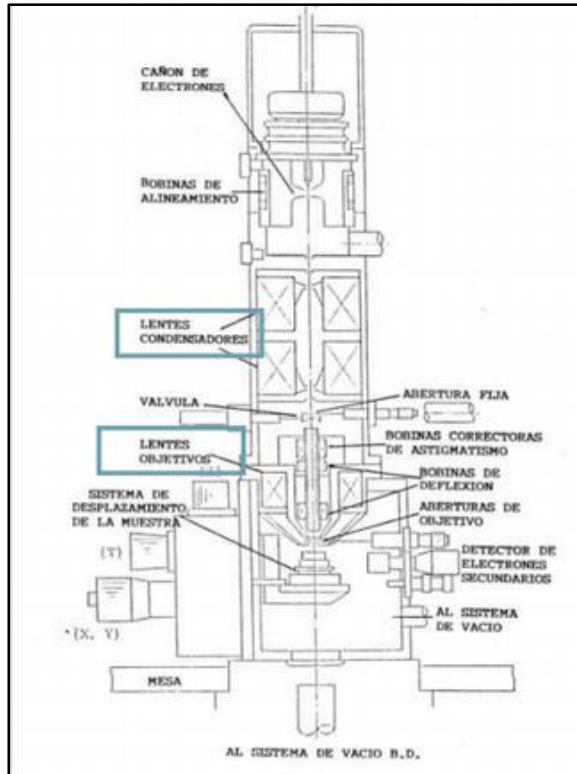


Imagen 25. Columna del microscopio electrónico de barrido.

Fuente: Principios y Práctica de la Microscopia Electrónica (1990).



Imagen 26. Microscopio electrónico de barrido.

Fuente: Autores (2014).

10.4 Microscopio de luz polarizada.

El microscopio petrográfico (o polarizador) es una de las técnicas más utilizadas en los trabajos geológicos. Sirve para la determinación de las propiedades ópticas, identificación de los minerales, estudio de texturas y relaciones entre los minerales y clasificación de rocas.

Es un microscopio compuesto basado en la combinación de dos sistemas de lentes convergentes (ocular y objetivo). El objetivo forma una imagen real del objeto estudiado situada a menor distancia del ocular que la distancia focal de éste, de manera que el ocular forma una imagen virtual, aún más aumentada, en una posición por debajo de la platina del microscopio.

Se diferencia de los microscopios biológicos en que dispone de un sistema de polarización de luz, la platina portamuestras es giratoria y en que se utilizan accesorios específicos como los compensadores (λ y cuña de cuarzo) y la lente de Bertrand.

El microscopio está dotado de dos filtros polarizadores (o nícoles). El primero, o polarizador, está colocado por debajo de la muestra en el sistema de iluminación y el segundo, o analizador, entre la muestra y el ocular.

10.4.1 Sistema de iluminación

Es un conjunto de dispositivos cuya función es dirigir la luz hacia la muestra en las mejores condiciones de trabajo posibles. Está situado en la parte inferior del estativo. El sistema es móvil, de forma que se puede acercar o alejar de la platina, para un mejor control de la iluminación. El sistema de iluminación está compuesto por:

- Lámpara. En los microscopios modernos se emplean lámparas halógenas, generalmente situadas en la parte posterior trasera del estativo.
- Diafragma de campo. Es un diafragma que está colocado en la base del estativo. Permite controlar la cantidad de luz que llega al sistema de condensadores.

- Filtro azul. El filtro de vidrio de color azul corrige la dominante amarilla de la luz de la lámpara.
- Polarizador. Es un filtro polarizador que en la mayor parte de los modelos está colocado de forma que la dirección privilegiada de vibración de luz, está orientada E-O (izquierda-derecha). Está siempre interpuesto en el camino de la luz y puede girarse para ajustarlo en su posición correcta.
- Diafragma. Sirve para controlar la cantidad de luz variando el diámetro del haz, de forma que al cerrarlo se da un mayor contraste a la imagen de la muestra.
- Lentes condensadoras inferiores fijas (inferiores). Están colocadas sobre del polarizador y su función es concentrar la luz de la lámpara sobre la muestra.
- Lentes condensadoras superiores. Está situado en la parte superior del sistema de iluminación. Se trata de un condensador muy potente que puede quitarse o colocarse a voluntad. Con esta lente insertada, la luz forma un haz de cónico (luz convergente o conosópica) que se utiliza en los casos donde se necesita un refuerzo de la iluminación (con objetivos de mucho aumento) o bien para determinar los signos ópticos. (Gil, 2009)

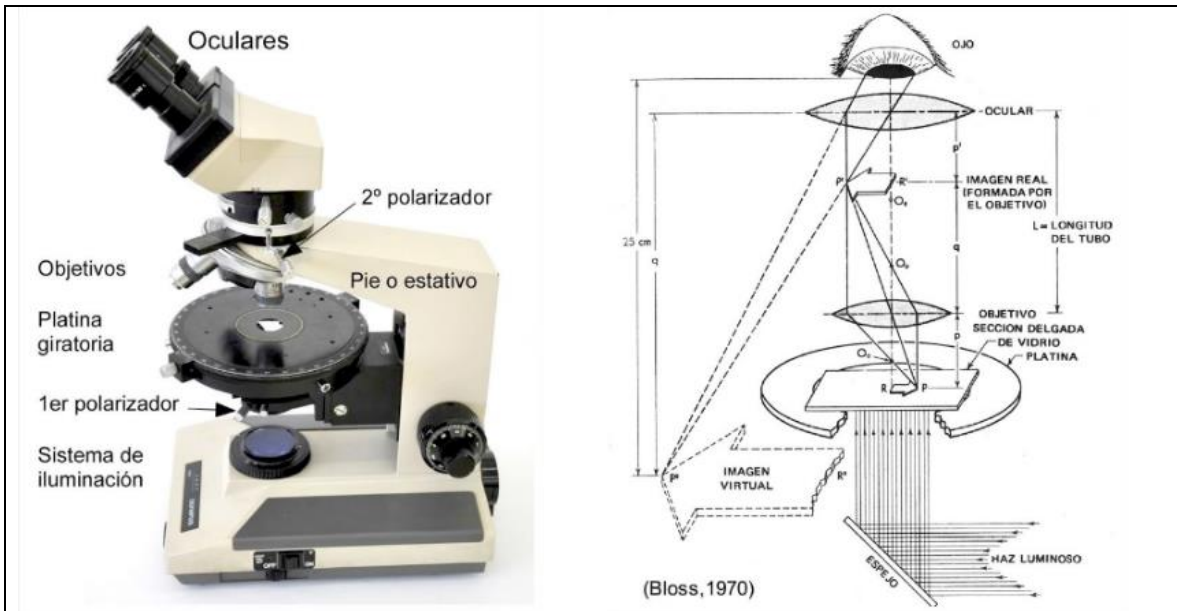


Imagen 27: Microscopio de luz polarizada. Izquierda microscopio de luz, derecha esquema de su funcionamiento.

Fuente: Gil, P (2009).

10.5 Equipo de falla por compresión.

Esta máquina está diseñada para realizar pruebas destructivas a muestras de materiales cuyos límites de esfuerzo por compresión deseen conocerse. El mecanismo es muy simple, y consta de una cámara que contiene un pistón que se mueve en dirección vertical u horizontal, según sea el diseño de la máquina, movido por presión hidráulica de aceite generalmente, para presionar la muestra contra una superficie plana y estática incluida en la misma cámara que el pistón.

El realizarse la compresión del material, a lo largo de su estructura se producirán esfuerzos aplastantes de la sección transversal del material hasta que este llegue a fallar, y de esta forma, al conocer la fuerza aplicada, se podrá determinar la resistencia que dicho material tiene a la compresión.

Las máquinas de falla por compresión para probar estructuras o especímenes hechos de concreto requieren un diseño especial, dada la naturaleza de falla del concreto, que tenderá a explotar violentamente, y al ser un material frágil, dicha falla se producirá manera repentina alcanzado su límite de resistencia;

es por esto que la cámara que contiene el pistón y la probeta deben estar fabricados de tal forma que soporten el impacto de concreto impactando contra las paredes en cada ensayo.



Imagen 28. Equipo de falla por compresión Forney modelo: F-50C-DFM/I.

Fuente: Autores (2014).

10.6 Termómetro digital

El termómetro digital de la marca Fluke que se posee es un termómetro que trabaja con termopares tipo K, con la capacidad de medir hasta una temperatura máxima de 1300 °C el cual es idóneo para las aplicaciones de esta investigación, este mismo puede medir de manera simultánea dos puntos, dado que tiene dos espacios para insertar los termopares, T_1 y T_2 , además de la diferencia de estos $T_1 - T_2$ para cuantificar las variaciones entre dos puntos de medición. Este termómetro tiene entre sus características el plus de censar las temperaturas tanto en grados Celsius como en Fahrenheit para ahorrar tiempo en la conversión, es de fácil

manipulación y transporte, además de que es muy sensible a las pequeñas variaciones de temperatura, posee un estuche de goma el cual lo protege de caídas.



Imagen 29. Termómetro digital.

Fuente: Autores (2014).

10.7 Tape de fibra de cerámica

El tape de fibra cerámica lleva su nombre dado que su tela está compuesta por partículas de fibra de cerámica trenzada lo que le brinda una resistencia térmica de hasta 1260 °C, dicho tape tiene una densidad de 500 kg/cm³ con dimensiones de 3 mm de grosor, 70 mm de ancho y 30 metros de largo. Este material es utilizado para forrar superficies calientes de las cuales se evita que el calor las dañe, es por ello que se utilizarán en esta investigación como una protección adicional a los termopares tipo K.



Imagen 30. Tape de fibra de cerámica.

Fuente Autores (2015).

10.8 Careta esmeril

La careta esmeril tiene consigo un visor desplegable de 20,32 x 40,64 x 0,10 cm con cinco puntos de sujeción y banda de sudor de algodón, cuya función es brindar una protección facial contra la radiación en el uso de los equipos del IMO Dispositivo de propagación de llama y el impacto de partículas de concreto en el equipo de fallas por compresión.



Imagen 31. Careta de seguridad.

Fuente Autores (2015).

10.9 Guantes resistentes al calor

Los guantes para temperatura estilo Hot Mill los cuales están fabricados con lona afelpada con doble forro interno, resistente a temperaturas no mayores de 204 °C por un tiempo límite de 40 segundos, resistente a la abrasión y con costuras internas y externas reforzadas, se usaran para brindar una protección a las manos cuando se manipulen todos los dispositivos que conlleven una fuente de calor, los cuales son el caso del IMO Dispositivo de propagación de llama y el Horno de convección.



Imagen 32. Guantes resistentes al calor.

Fuente Autores (2015).

10.10 Termopares tipo K

Los termopares son sensores de temperaturas que se utilizan mayoritariamente en la industria, están elaboradas por dos alambres de distintos materiales unidos en un extremo. Funciona al aplicar temperatura en un extremo del metal generando un voltaje muy pequeño el cual va aumentando con la temperatura, es por ello que el termómetro puede percibir la temperatura que censa el termopar dado al cambio de voltaje que se genera.

Los termopares que se utilizarán en los distintos experimentos son de tipo K, ideales para mediciones en hornos y fundiciones, dado que puede computar

mediciones de hasta 1300 °C, fabricadas con una aleación de cromo y níquel y con una protección cerámica a lo largo de la misma que cumple la función de proteger la termopar y aislarla del calor para no comprometer la medición que si hace la punta expuesta.

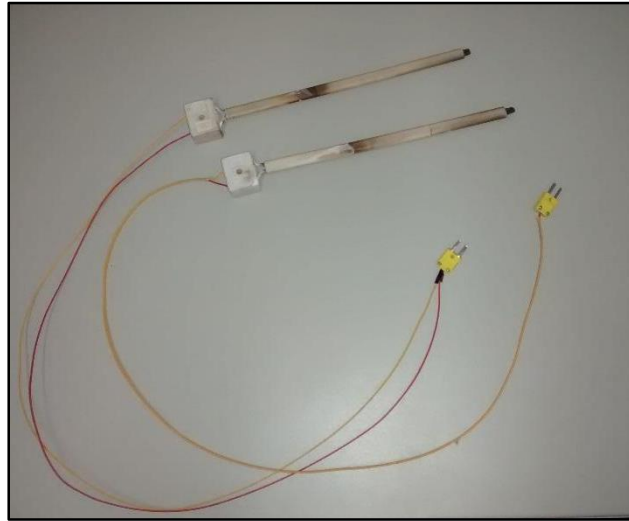


Imagen 33. Termopares tipo K. con protección cerámica

Fuente Autores (2015).

10.11 Cámara termográfica

La cámara termográfica de marca Flir Systems modelo ThermaCAM P45 es un aparato de medición de temperatura con una sensibilidad térmica de 0,08 °C esto le permite censar las pequeñas diferencias de temperatura de las superficies, con un total de 76 000 pixeles para proporcionar en tiempo real y con alta resolución 16 bits de imágenes térmicas nítidas, la velocidad de video es 60 Hz esto influye positivamente en su capacidad para detectar la temperatura de cuerpos que incluso estén en movimiento, gracias a su fácil uso o también en situaciones en que se necesite una medición fija posee un trípode para colocar la cámara en la posición específica requerida. Posee la capacidad de almacenar imágenes en formato JPEG mediante su tarjeta de memoria extraíble.



Imagen 34. Cámara termográfica.

Fuente Autores (2015).

10.12 Pinza de extracción

Fabricada de acero, cumple la finalidad de medio para la extracción de cilindros de concreto de 10 cm de radio dentro del horno de convección. Ofrece la posibilidad de mantener las manos alejadas a una distancia de 1.5 metros de la fuente de calor, se recomienda que su uso se dé con guantes resistente al calor para evitar la conducción de calor a lo largo de las varillas de la pinza, además del uso de la careta esmeril para disminuir la radiación recibida al abrir el horno.



Imagen 35. Pinza de extracción.

Fuente Autores (2015).

10.13 Termómetro Infrarrojo

El termómetro infrarrojo modelo 42560 de la marca Extech posee la capacidad de realizar mediciones i lecturas de temperatura sin contacto (infrarrojo) de superficies hasta como máximo de 1050°C (1922°F). El puntero láser que este termómetro posee integrado aumenta la precisión al objetivo, la entrada del termopar tipo K permite efectuar medidas de contacto hasta 1370°C (2498°F). La emisividad ajustable permite que el termómetro infrarrojo mida la temperatura tácticamente de cualquier superficie a la cual sea dirigida.

Este modelo es además un digitador de datos que mediante una señal inalámbrica se comunica con el registrador de datos USB desplegando en tiempo real los datos de temperatura en el ordenador.



Imagen 36. Termómetro Infrarrojo.

Fuente Autores (2015).

11 Definiciones

11.1 Agrietamiento

Fisuración o fracturamiento es la producción de grietas o fallas mecánicas locales en un material debido a la fragilidad del mismo, y a la aplicación de cargas puntuales o distribuidas en una zona del material, ya sea por fuerzas físicas exteriores, o por deformaciones fluctuantes debidas a la dilatación térmica que todos los materiales sufren normalmente.

Cuando un punto es sometido a una flexión que supere su límite plástico, se generará así una falla, que se extenderá más allá del punto donde se originó, creando un surco o grieta de material que no podrá volver a unirse sin agregar más masa que la que ya existe en el material.

A nivel microscópico lo que ocurre es una ruptura de los enlaces que sujetan las fibras o granos del material, haciendo que estas se separen permanentemente y que se vuelvan más frágiles los enlaces cercanos, haciendo susceptible la zona de agrietamiento a la formación de más grietas, si se continúa aplicando la carga que genere torsión o flexión.

Materiales como el concreto son frágiles a ciertas condiciones de carga, razón por la cual se agregan elementos de refuerzo como vigas de acero, que ayudan al concreto a mantener su forma original sin deformarse, y de esa forma evitar al máximo el agrietamiento, ya que una vez alcanzada esta condición, la fragilidad del concreto aumenta junto con la predisposición a la formación de más grietas. Harmsen (2005) encontró que la resistencia del mismo al torque crítico disminuye hasta un 60% de su valor original con el agrietamiento.

11.2 Analizador de tipo paramagnético

El paramagnetismo es una propiedad de algunos materiales de magnetizarse, o alinear sus momentos magnéticos ante la presencia de un campo magnético externo; el oxígeno cumple esta propiedad, de esta forma una bola suspendida en un campo magnético, variará de posición al pasar el gas a analizar por ella, ya que el oxígeno absorberá parte de la energía magnética presente en el campo. Este principio es aprovechado en la elaboración de instrumentos capaces de medir la concentración específica de oxígeno en un lugar, según explica (Creus, 2011).

11.3 Astillamiento

Dícese de la formación de astillas, o el desprendimiento de las mismas, o según lo define el diccionario: “Acción y efecto de astillar” (Diccionario de la lengua española, 2012); en el campo de la ciencia de los materiales el astillamiento de materiales frágiles, es un fenómeno similar al agrietamiento, y se puede definir como la falla local provocada por la creación de grietas cercanas, aislando una porción de material en forma de astilla. Como cualquier fenómeno de falla en un material, el astillamiento reduce las capacidades mecánicas del mismo, volviéndolo aún más frágil, y el fenómeno se esparce con más facilidad al continuar aplicando carga en una zona donde ya se ha iniciado el fenómeno.

11.4 AWG

Es una escala de medida para conductores eléctricos, desarrollada por J.R Brown, conocida por sus siglas en inglés, American Wire Gauge, también llamada Brown & Sharpe gauge.

Fink, Wayne, Carrol & Casas (1984) la definían como la medida de calibre de cables conductores más usada a nivel internacional, y se basa en una designación numérica para cada calibre de cable, basado en un algoritmo de una función matemática que traduce el número de la escala, en una medida nominal.

Un cable denominado 14 AWG tendrá una medida nominal de 1.628 mm de diámetro, mientras que un 10 AWG medirá 2.588 mm de diámetro. Conforme aumenta el número de la escala, disminuye el diámetro nominal del cable.

11.5 Bastos de algodón

El término se refiere a sobras en bruto de algodón, sin moldear ni pulir de ninguna manera, son sobros desordenados de material clasificado como tipo A por sus altos niveles de combustibilidad.

11.6 Claros

Son las distancias entre ejes de apoyo en los elementos constructivos; en un sistema de entre pisos corresponde a la separación máxima entre los muros portantes, es decir los muros que soportan la estructura. Además de los muros se puede colocar elementos estructurales que funcionen de apoyo como vigas o trabes que bien pueden ser de concreto armado o metálicos.

11.7 Condición de aceptación

En un proceso de prueba normativo. Así como en un proceso industrial, ya sea la creación de un producto o la verificación de la calidad de algún bien o servicio, se siguen una serie de criterios de aceptación, que implican algunas características mínimas que se deben cumplir para la clasificación del producto o servicio siguiéndose de un estándar.

Por ejemplo, la NFPA 251 propone una serie de criterios de aceptación para determinar la clasificación de resistencia contra el fuego de un elemento constructivo dado, en caso de incumplir con uno solo de estos criterios, el producto fallará en obtener la clasificación de resistente contra el fuego, aun cuando haya cumplido la mayoría de los criterios de aceptación. En otras palabras, constituyen las condiciones o características mínimas que se deben seguir para la clasificación de un producto.

11.8 Deflexión

Este término, en las ciencias de los materiales, se refiere a las deformaciones que pueden sufrir los elementos constructivos por ejemplo, ante la presencia de una carga puntual. Imaginemos una placa de metal delgada y larga, posicionada horizontalmente, que se soporta en sus dos extremos, si colocamos una piedra lo suficientemente pesada, la placa se pandeará formando un arco, a eso nos referimos con una deflexión.

11.9 Diseño estructural

El diseño estructural va de la mano con el diseño arquitectónico, y comprende el análisis de estructuras para la determinación de sus capacidades de soportar cargas, y su respuesta ante deflexiones o deformaciones a raíz de la aplicación de las mismas. Incluye además el conocimiento previo de las características físicas o bondades mecánicas de los materiales, para la posterior aplicación de dichos conocimientos en el diseño apropiado de una estructura.

11.10 Elementos constructivos

Partes que conforman un ensamble o conjunto de montaje, que son utilizadas en construcción de edificios y obras de la misma naturaleza.

11.11 Elementos estructurales

Son cada una de las distintas piezas, relacionadas o unidas, en que puede ser dividida una edificación a efectos de su diseño, indicaría (Popov, 1990). El

diseño y comprobación de estos elementos se hace de acuerdo con los principios de la ingeniería estructural y la resistencia de materiales.

11.12 Espécimen

Espécimen de prueba, o probeta. El término se refiere a una representación, a escala real o de reducción, de un elemento que puede ser, constructivo, o parte de una máquina, cuyas características se desean conocer, y que se someterá a pruebas de distinta índole, para obtener información de su resistencia mecánica, capacidad de deformación, límite de elasticidad, resistencia térmica, inflamabilidad, entre otros.

Un ejemplo son las probetas, o especímenes de prueba de algunos polímeros, o plásticos, que se generan con las mismas características que una pieza comercial se elabora, para poder de esta forma probar sus cualidades mecánicas, antes de garantizar que el material cumplirá con las tareas para las que fue diseñado.

Existen pruebas destructivas, donde el fin es fallar la pieza, o llevarla a sus límites de resistencia por ejemplo, para conocer cuál será la carga máxima que soporta, antes de romperse o deformarse de manera irreversible; así como en ensayos no destructivos, donde se pretende someter los especímenes de prueba a cierta carga, y determinar cuál es la deformación obtenida en una prueba en específico, o si existen o no deformaciones permanentes luego de sobrepasar el límite elástico de un material.

11.13 Estándar

Protocolo aceptado en consenso por una entidad reconocida para la tarea, aplicado a un proceso o producto en concreto, con el que se busca conseguir uniformidad en los resultados.

11.14 Evaluación de riesgo

Es el estudio de las condiciones que aportan un grado de peligro en un lugar, basándose en algún método aprobado o reconocido, para asignar un nivel de riesgo

en una ocupación o espacio físico, con el fin de prever una eventualidad o un accidente, y poder evitarlo, o aminorar las consecuencias de este.

11.15 Falla (mecánica)

No se debe confundir con el término utilizado para denotar cuando algún componente mecánico de una maquina deja de funcionar, o hace que la maquina en si no cumpla sus funciones apropiadamente, pero se puede usar esa definición para detallar una falla en un material, la cual se produce cuando se ha superado el límite elástico del mismo, pasando a crear una deformación plástica.

Todos los materiales tienen cierta capacidad de deformarse elásticamente, es decir, sufrir una deformación reversible ante la presencia de una fuerza, que al ser retirada, hará que el material logre reacomodarse para retomar su forma inicial; en algunos materiales esta capacidad es mayor, sin embargo todos poseen un límite elástico, el cual es el punto donde al aplicar una fuerza mayor, la deformación será plástica o permanente, y el material no podrá reacomodarse, adoptando así una nueva forma.

Se les conoce como materiales dúctiles, o que pueden fluir con más facilidad, a los materiales con capacidades altas de sufrir deformaciones, elásticas y plásticas, sin que se produzca en ellos una falla, o ruptura del enlace molecular que mantiene unido al material; en el caso de los materiales frágiles o quebradizos, la capacidad de sufrir alguna deformación sin fallar es muy baja, o nula.

11.16 Fieltro

Es un textil no tejido, elaborado de fibras de lana, o pelo de animales, asemejando una tela, que se puede encontrar en láminas de distintos grosores, tamaños, y colores, cuando ha sido teñido; el fieltro es usado generalmente en la confección de manualidades, sin embargo puede proveer una protección para elementos eléctricos o de medición térmica, no obstante es combustible, por lo que este aspecto debe ser considerado dependiendo la aplicación.

11.17 Humedad relativa

El término se refiere a la razón entre la presión parcial de vapor de agua, y la presión de vapor saturado a una temperatura dada, o lo que es lo mismo, es la cantidad de vapor de agua que contiene una masa de aire respecto a la máxima cantidad que esa misma masa puede contener, sin que se produzca una condensación o precipitación de ese vapor de agua.

Según (Giancoli & Victor, 2006) para la comodidad o el confort humano la humedad relativa debe rondar entre el 40% y el 50%. La humedad relativa alta, particularmente en un día caluroso, reduce la capacidad de la piel de evaporar la humedad presente en ella, el cual es el mecanismo principal del cuerpo para regular su temperatura, por otro lado, una humedad relativa baja, promueve la resequedad de la piel y de las mucosas provocando así efectos negativos sobre la salud.

11.18 Ingeniería de protección contra incendios

A raíz de los incendios que se han desarrollado a lo largo de la historia en todo el mundo, acabando con la vida de miles de personas y destruyendo incluso ciudades enteras, el hombre se ha preocupado cada vez más por entender cómo se desarrollan estos fenómenos, como prevenirlos, y en caso de encontrarse ante una emergencia, como detenerlos.

La ingeniería en protección contra incendios, nace como una rama interdisciplinaria de campos específicos de la ingeniería, donde se aplican conocimientos y prácticas de las ingenierías mecánica, química, y civil, concentrándose en el estudio de la química y la dinámica del fuego, que nos ayudan a conocer y predecir cómo será el posible comportamiento de un incendio, así como la manera en la que podemos detenerlo al conocer las condiciones químicas requeridas para la formación de una combustión.

Los estudios en ciencias de los materiales permiten prevenir fallas en las construcciones haciéndolas resistentes contra el fuego, al conocer las estructuras microscópicas y el comportamiento de los materiales usados en las edificaciones, y determinando su inflamabilidad o capacidad de provocar o alimentar un incendio.

Los principios de la hidráulica rigen la utilización de fluidos como el agua o agentes limpios gaseosos en sistemas fijos de supresión, asegurando la extinción del fuego sin que esto represente un peligro para la vida, y en la medida de lo posible asegurando la continuidad de nuestro negocio o edificación.

11.19 Integridad estructural

La capacidad que posee algún elemento constructivo, o un ensamble, de conservar sus condiciones de resistencia mecánica, térmica, y en general, de permanecer dentro de los parámetros estructurales para los que fue diseñado.

11.20 Norma

Se define como una serie de lineamientos o requisitos, que han sido aceptados como modelos para la aplicación en los pasos que conforman el desarrollo de algún proceso, o en la creación de un producto, con la finalidad de obtener resultados similares en condiciones reguladas de calidad, y aceptados o revisados por entidades reconocidas a nivel mundial, formadas por profesionales con experiencia en el campo de aplicación de la misma.

11.21 Obra civil

Se trata de cualquier construcción que se base en los principios de la ingeniería civil, como lo son la ciencia de materiales, hidráulica, mecánica, y principios físicos, para la elaboración de edificaciones o instalaciones mediante un diseño que es implementado utilizando elementos constructivos y estructurales para su fabricación, y en ocasiones incorporando partes o piezas móviles, mecánicas, y eléctricas.

11.22 Pirómetro

Es un instrumento de medición de temperatura, capaz de realizar mediciones sin la necesidad de que exista contacto directo entre el aparato de medición y el objeto cuya temperatura se desea conocer.

Inicialmente los pirómetros más antiguos utilizaban un filamento de un metal, que al calentarse cambiaba de color emitiendo radiación, (Creus, 2011) explica que al comparar el color del filamento con el color del objeto del cual se deseaba conocer su temperatura, por medio de una mirilla, el filamento calentado parecía desaparecer al fusionarse con el cuerpo a alta temperatura, al menos en apariencia por el color, indicando que ambos estaban a las misma temperatura, y por medio de una graduación en el control de medición del filamento del pirómetro, se podía conocer con exactitud relativa la temperatura de un cuerpo incandescente.

En la actualidad los pirómetros modernos trabajan con sensores electrónicos que interpretan la radiación infrarroja (cuerpos fríos) o ultravioleta (cuerpos calientes) que emite cualquier objeto que se encuentre por encima de los 0 grados Kelvin, y de esta forma en formato digital, y con asombrosa exactitud, podemos conocer la temperatura dentro de hornos en funcionamiento, o la de metales al ser fundidos.

11.23 Resistencia contra el fuego

Es la capacidad de un material o ensamble compuesto por más de un elemento, de mantener sus características de integridad mecánica y de transferencia de calor limitada, ante la presencia de fuego, o la exposición al calor o llama. Internacionalmente se dan clasificaciones de resistencia contra el fuego, por ejemplo, las construcciones son clasificadas por la NFPA como resistentes contra el fuego en la cantidad de tiempo en horas, en las que éstas son capaces de mantener tanto su integridad estructural y de transmitir las cargas para las que fueron diseñadas, como para cumplir con condiciones de aceptación en pruebas normalizadas de exposición a condiciones simuladas de un incendio que han sido realizadas previamente.

11.24 Riesgo de incendio (fire hazard)

La definición formal establecida por la NFPA para el riesgo de un incendio la encontramos en el Código de Seguridad Humana: “Cualquier situación, proceso, material o condición que, puede provocar un incendio, o una explosión, o que puede

proveer una fuente de combustible para aumentar la propagación o intensidad de un incendio o explosión, los cuales representan una amenaza para la vida o la propiedad” (National Fire Protection Association, NFPA 101, 2006)

11.25 Sensor eléctrico

Es un dispositivo capaz de traducir alguna variable que se desee medir, como una condición física o química específica, en una variable eléctrica, que pueda ser interpretada por un circuito eléctrico para entregar una medición entendible para las personas por medio de alguna escala física conocida. Algunos ejemplos de sensores eléctricos pueden ser termómetros usados para medir temperatura, o higrómetros que permiten una medida digital de la humedad relativa del aire en un momento determinado.

11.26 Soldadura por fusión

Los procesos de soldadura se pueden dividir en dos categorías principales, soldadura por fusión, y soldadura de estado sólido, (Groover & De la Peña Gómez, 1997) mencionan que en el primer caso, su nombre se deriva del hecho que las dos superficies de los metales que se van a unir, logran mantenerse juntas al derretirse y fusionarse, con la presencia o no de material de aporte a la junta.

En el caso de la soldadura de estado sólido, se utiliza calor, presión, o ambas, para realizar la unión de dos metales, pero estos no se fusionan entre sí, ni se agrega un material de aporte. En la categoría de soldadura por fusión se encuentran la soldadura con arco eléctrico, soldadura por resistencia, y la soldadura con oxígeno y gas combustible; la soldadura por fusión constituye la categoría más importante en los procesos de soldadura en general.

11.27 Temperatura promedio

El promedio de una serie de datos se obtiene al sumar todas las entradas, o valores numéricos de las cifras que se desean promediar, y dividirlos entre el número de entradas o de datos disponibles para realizar el promedio, de esta forma, para obtener una temperatura promedio se requiere tener más de una medición de

la temperatura que se desea promediar en un lugar en específico, para poder obtener su valor promedio, y no se requiere más que realizar cierto número de mediciones para mejorar la precisión del promedio que se obtendrá.

11.28 Termómetro de placa

Termómetro de placa es un término utilizado para denominar a un aparato de medición de temperatura que emplea láminas o placas bimetálicas para su funcionamiento.

También llamado por (Creus, 2011) termómetro bimetálico; su funcionamiento se basa en el principio de la dilatación térmica que sufren los materiales, y se confecciona uniendo firmemente dos láminas de metales distintos que pueden ser rectas o curvas, e incluso formar hélices.

Al termómetro se le une una escala que puede traducir la deflexión o deformación térmica que sufre el conjunto, en una medición de temperatura en grados Celsius o Fahrenheit según sea la aplicación; el rango de temperaturas en los que trabajan los termómetros de placa varía entre los -200 °C hasta los 500 °C.

11.29 Termopar

Es un elemento sensor de temperatura de amplio uso en ingeniería, en todas sus ramas, existen distintos tipos de termopares como lo son Tipo K, Tipo E, Tipo J, entre otros. Sus construcciones varían con los materiales que son utilizados en su elaboración, donde dos metales unidos son sometidos a una diferencia de potencial que es función de la temperatura que se desea medir; las distintas configuraciones de materiales producen mejores desempeños a diferentes condiciones de uso, y ofrecen mejor comportamiento en ciertos rangos de temperatura, con distintas medidas de incertidumbre y precisión según sea la aplicación deseada.

11.30 Ventilación mecánica

Este término es usado en medicina cuando se necesita de una máquina para ayudar a una persona a cumplir las funciones de ventilación pulmonar cuando ésta

es incapaz de hacerlo por sí misma, sin embargo, en un sentido más estricto podríamos señalar que es cualquier medio que utilice una máquina para crear un flujo de aire forzado, según sea deseado.

En la ingeniería de protección contra incendios, la ventilación mecánica cumple una función importante en el manejo de humos que imposibilitan la visión de las personas en un incendio, o que pueden ser tóxicos o dañinos para la salud.

Es imprescindible en un incendio evitar que el humo producto de la combustión fluya dentro de otros aposentos del edificio a través de ductos de aire acondicionado o ventilación, llevando de esta forma gases tóxicos a zonas que podrían representar un riesgo, es por esto que se usan sellos o compuertas de control de humos, en conjunto con sistemas de ventilación mecánica, para evitar este fenómeno.

12 Herramientas informáticas

12.1 Microsoft Excel

Microsoft Excel programa que ha sido desarrollado por Microsoft compañía fundada por el emblemático Bill Gates, y está disponible como parte del paquete de programas de uso de oficina llamado Microsoft Office.

Microsoft Excel permite el uso de hojas de cálculo que exhiben una interfaz sencilla y fácil de comprender y utilizar, que pone a la disposición del usuario una infinidad de fórmulas matemáticas para programar hojas que realicen cálculos, tablas y gráficos mediante una serie de datos que el usuario inserta en sus filas y columnas.

Las aplicaciones de Microsoft Excel alcanzan áreas tan diversas como la educación, las finanzas, las ingenierías, la producción, la administración, entre muchas otras. Cualquier persona que trabaja en áreas donde se necesite procesar datos numéricos estará de una u otra forma en contacto con esta herramienta.

12.2 COMSOL Multiphysics.

COMSOL es un software de modelización para la simulación de cualquier fenómeno físico que se describa mediante ecuaciones en derivadas parciales. Es un programa equipado con la última tecnología y algoritmos matemáticos de solución para resolver problemas complejos de forma rápida y precisa, además su intuitiva estructura está perfilada para abastecer pericia de uso y flexibilidad.

Con COMSOL se puede modelar prácticamente cualquier fenómeno térmico, físico, matemático, estructural, es decir cualquier problema ingenieril actual ya que mediante las funcionalidades de modelado basado en ecuaciones es posible modificar plantillas para conseguir aplicaciones determinadas.

12.2 SolidWorks.

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp, para el sistema operativo Microsoft Windows. Fue lanzado al mercado con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible y fácil en el entorno de diseño mecánico hoy en día.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD.

III. MARCO METODOLÓGICO

El rendimiento bajo condiciones de exposición al fuego de los muros, columnas, pisos, y otros miembros estructurales de toda construcción, es una condición de gran importancia en el proceso de diseñar, construir y mantener una edificación para que sea segura, y que ésta no represente una amenaza para estructuras vecinas, ni para las personas que habitan en ella.

El reconocimiento de esto se ha registrado en el desarrollo de los códigos de muchas autoridades con el fin de regular y estandarizar los procesos de confección, prueba, e instalación de elementos constructivos y estructurales en las edificaciones; es importante promover la uniformidad en los requisitos de las diversas autoridades de todo el país.

Para esto es necesario que las propiedades de resistencia al fuego de los materiales y sus montajes sean medidas, constatadas y especificadas según una norma o estándar común, expresados en términos que sean aplicables por igual a una amplia variedad de materiales, situaciones, y condiciones de exposición.

Tal norma se encuentra en la publicación ASTM E 119, la cual es aceptada y sugerida por la NFPA para las pruebas de clasificación en términos de la resistencia contra el fuego que los materiales de construcción utilizados en edificaciones ofrecen, y de donde se estudiaron las condiciones de aceptación para el diseño de las pruebas de este estudio.

Dichos métodos establecen un estándar al exponer los materiales en observación a condiciones de fuego de extensión y gravedad controlada. El rendimiento se define como el período de resistencia a la exposición estándar transcurrida antes de que el primer punto crítico en el comportamiento es observado, o cuando se ha logrado visualizar una falla que pudiera indicar que la resistencia del material ha disminuido (ASTM, 2014).

13 Tipo de investigación.

Se desarrolló una investigación descriptiva, al estudiar el comportamiento que los sistemas de entresijos seleccionados para las pruebas presentaron ante condiciones controladas de exposición a situaciones representativas de la simulación de un incendio; llevando a cabo la observación de fenómenos que nos pudieran llevar a considerar que el rendimiento o resistencia de los materiales que componen los ensambles estudiados, podrían comprometer la seguridad de las estructuras o de sus ocupantes.

A veces aunque la orientación inicial de una investigación pueda ser definida, ésta podría cambiar al ir ahondando en los temas de interés del trabajo, y al final se puede obtener el mismo tipo de investigación, con algunas variaciones en su enfoque (Gómez M, 2006).

Es así como el fin de esta investigación, más que determinar la clasificación de la resistencia contra fuego como tal de los sistemas de entresijos estudiados, es describir el comportamiento de los mismos bajo condiciones semejantes a las que se pudieran presentar en un incendio real, y determinar el nivel de protección y rendimiento que ofrecen, emitiendo criterios técnicos basados en un análisis integral, estudiando los resultados desde distintos puntos de vista involucrando áreas de la ciencia tales como ingeniería estructural, ingeniería mecánica, y ciencias de los materiales.

13.1 Sistemas estudiados.

Respondiendo al primer objetivo específico, a partir de conversaciones con los encargados de la preparación de las muestras para el estudio, por parte de los personeros de PC, y la revisión oportuna de las fichas técnicas de los sistemas de entresijos ofrecidas oficialmente por la constructora, se obtuvo la información pertinente a la configuración y la composición de los sistemas a estudiar, esto para su apropiado análisis.

Toda la información técnica disponible de la composición de las probetas así como de los componentes que integran los sistemas de entrepisos de viguetas y losas, y losa alveolar, fue anotada y se ofrece en las secciones correspondientes.

13.1.1 Sistema de viguetas y bloques

Un esquema de este tipo de sistema de entrepisos se muestra a continuación en una vista de corte transversal del aspecto del ensamble como tal:

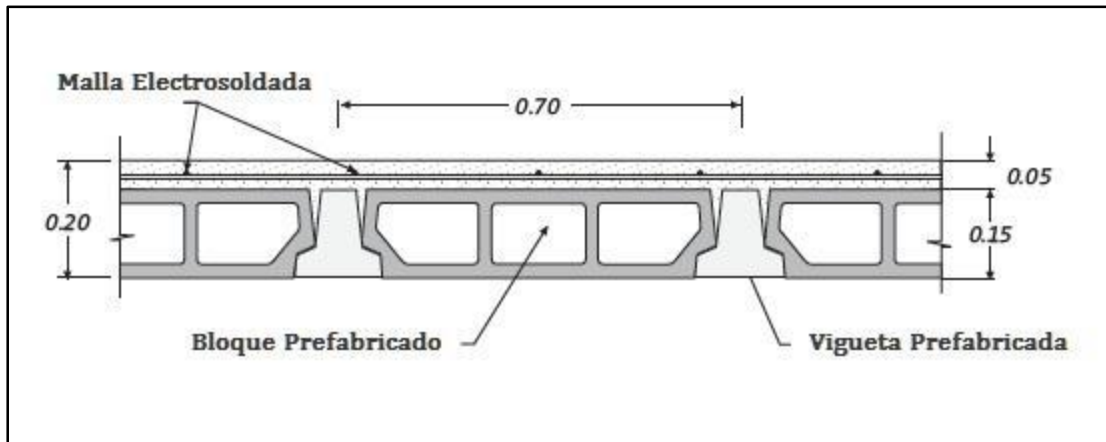


Imagen 37. Esquema del sistema de bloques y viguetas con sobre losa chorreada en sitio.

Fuente: Catálogo comercial de Productos de Concreto (2012)

Los componentes presentes en este sistema son las viguetas prefabricadas, los bloques prefabricados, la malla electro soldada, y finalmente la sobre losa, que es construida en el sitio. El sistema se ofrece comercialmente en nuestro país por PC en presentaciones de 20 cm y 25 cm de espesor promedio total, incluyendo la sobre losa.

13.1.2 Sistema de losa alveolar.

A continuación se muestra un esquema de este tipo de sistema de entrepisos en una vista de corte transversal del aspecto del ensamble como tal:

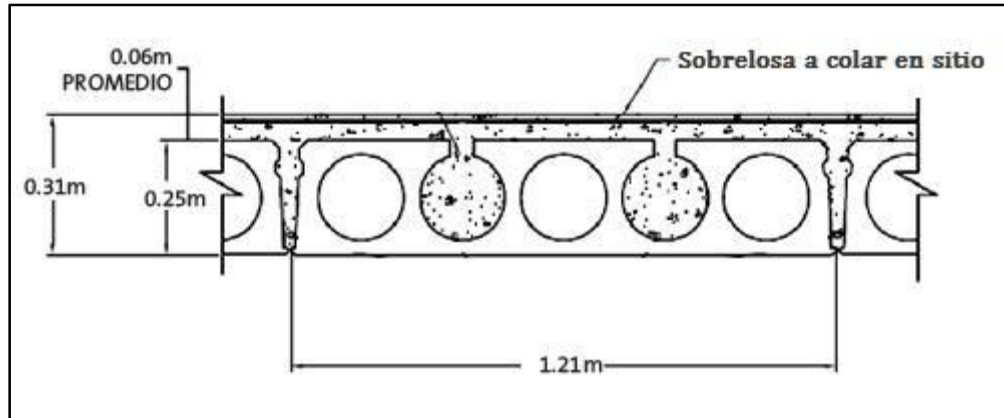


Imagen 38. Esquema del sistema de losa alveolar (Losa-lex) con sobre losa chorreada en sitio.

Fuente: Catálogo comercial de Productos de Concreto (2012)

En este caso el sistema está solamente compuesto por las losas, y la sobre losa que es elaborada o chorreada en el sitio, con un espesor aproximado de 6 cm, siendo así sus presentaciones comerciales entre los 14 cm y los 31 cm de espesor promedio total.

13.2 Población y muestra.

La población meta de la investigación, como ya se mencionó, consta de dos sistemas de entrepisos a base de concreto, fabricados y utilizados frecuentemente en Costa Rica, a saber, “Sistema de Viguetas y Bloques” y “Sistema de Losa Alveolar” (Losa-lex), del fabricante nacional Productos de Concreto.

La muestra definida para el estudio, consta de probetas o especímenes, elaborados utilizando la mezcla de agregados y otros componentes que conforman el concreto que se utiliza en la fabricación comercial de los sistemas definidos en el alcance de esta investigación; las limitaciones de las dimensiones de los especímenes a probar, están dadas por la capacidad de los equipos de laboratorio con que se cuenta (horno de convección y aparato de panel radiante).

Para el cumplimiento del segundo, tercer y cuarto objetivo específico, se llevaron a cabo dos pruebas de resistencia de los materiales, al ser las muestras estudiadas sometidas a cargas de calor, y posteriormente fallados por compresión para probar su resistencia, en el caso de los cilindros, o examinados para determinar su integridad, en el caso de las losas, según se anota a continuación:

Se probaron un total de 28 probetas cilíndricas, distribuidas de la siguiente forma, 20 Cilindros de 10 cm de diámetro, por 20 cm de altura, de dos resistencias teóricas de concreto (700kg/cm^2 y 420 kg/cm^2), donde 10 (de cada resistencia) de ellos fueron sometidos a calor en un horno de convección durante periodos de tiempo específicos individualmente, y luego fueron fallados por compresión mecánica en una máquina diseñada con ese propósito, para verificar su resistencia luego de ser “quemados”.

Los restantes 8 cilindros (4 de cada resistencia) fueron fallados por compresión en frío para obtener un parámetro de resistencia promedio real, a esto se le suman 2 cilindros (por cada resistencia) que se quedó para realizar las posteriores observaciones de microscopia y petrografía y 1 (por cada resistencia) que se utilizó con ayuda de los termopares para trazar la curva de temperatura contra tiempo.

Para el experimento del panel radiante: 8 Losas elaboradas con el concreto con que se confeccionan comercialmente las losas alveolares, en este caso analizando solamente una resistencia (420 kg/cm^2) y cuatro espesores diferentes (8cm, 15 cm, 20 cm, y 25 cm) que fueron sometidos, todos en este caso, a una prueba de radiación máxima puntual de 50 kW/m^2 , durante periodos de dos horas por prueba individual, con la ayuda de un equipo de panel radiante y un porta muestras especialmente diseñado con ese propósito.

La distribución de las probetas, y su finalidad dentro del estudio se resumen en las siguientes tablas:

Resistencia del concreto (kg/cm ²)	Cantidad de cilindros a fallar a 1000°C	Cantidad de cilindros a fallar a 800°C	Cantidad de cilindros a fallar a 600°C	Cantidad de cilindros a fallar a 400°C	Cantidad de cilindros a fallar a 200°C	Total de cilindros
420	2	2	2	2	2	10
700	2	2	2	2	2	10
						20

Tabla 2. Distribución de los cilindros para prueba de falla a compresión.

Fuente: Autores (2015)

Resistencia del concreto (kg/cm ²)	Cantidad de bloques 8cm espesor	Cantidad de bloques 15cm espesor	Cantidad de bloques 20cm espesor	Cantidad de bloques 25cm espesor	Total de especímenes
420	2	2	2	2	8

Tabla 3. Distribución de los cortes de bloques de sistemas de entrepiso para prueba de resistencia al fuego.

Fuente: Autores (2015).

13.3 Conducción de las prueba.

13.3.1 Experimento de panel radiante.

El objetivo de este experimento fue medir la transferencia de calor en cortes de losas de concreto de entrepisos, sometidos a una carga de calor constante y conocida durante 2 horas por prueba individual, estudiando el efecto del aumento del espesor de las losas en la transferencia de calor en las mismas, a partir de la medición de la temperatura registrada en la superficie expuesta directamente a la fuente de calor, en el acero estructural presente en las losas, dentro de los espacios

de aire en los boquetes de las mismas, y en la superficie no expuesta al calor, los cortes de las losas estudiadas y sus espesores se pueden observar en la imagen 39.

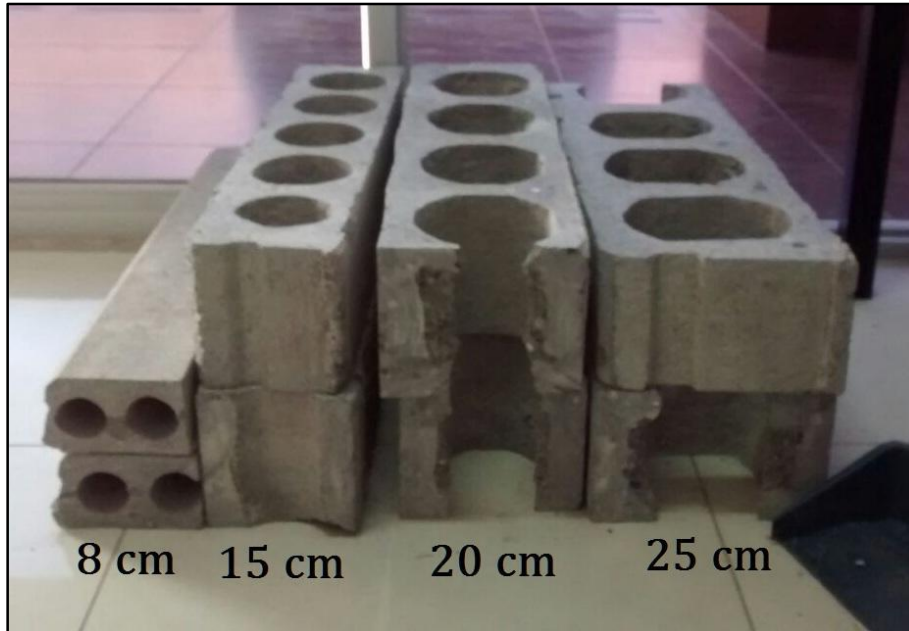


Imagen 39. Cortes transversales de losas de concreto de distintos espesores

Fuente: Autores (2015).

Para la puesta en marcha de este experimento, se utilizó un aparato de panel radiante, conocido como IMO (ver imagen 40), el cual es usado para hacer pruebas de propagación de llama bajo el estándar ASTM E1321, el mismo ofrece una radiación puntual máxima de 50 kW/m^2 , y fue acondicionado mediante una modificación hecha al porta muestras donde se colocaron las losas de concreto estudiadas. El espécimen en estudio se dispone horizontalmente tal y como se observa en las Figuras 39 y 40, de forma que en una muestra combustible, la propagación de la llama pueda ser medida a lo largo de ésta.

Dadas las condiciones del IMO, el cual no está diseñado para el análisis de muestras de los espesores de interés para esta prueba, fue necesario construir una estructura que soportara y facilitara la manipulación de las losas de concreto. El detalle del diseño de la modificación hecha al porta muestras y su estructura correspondiente está disponible en el anexo 19.1.

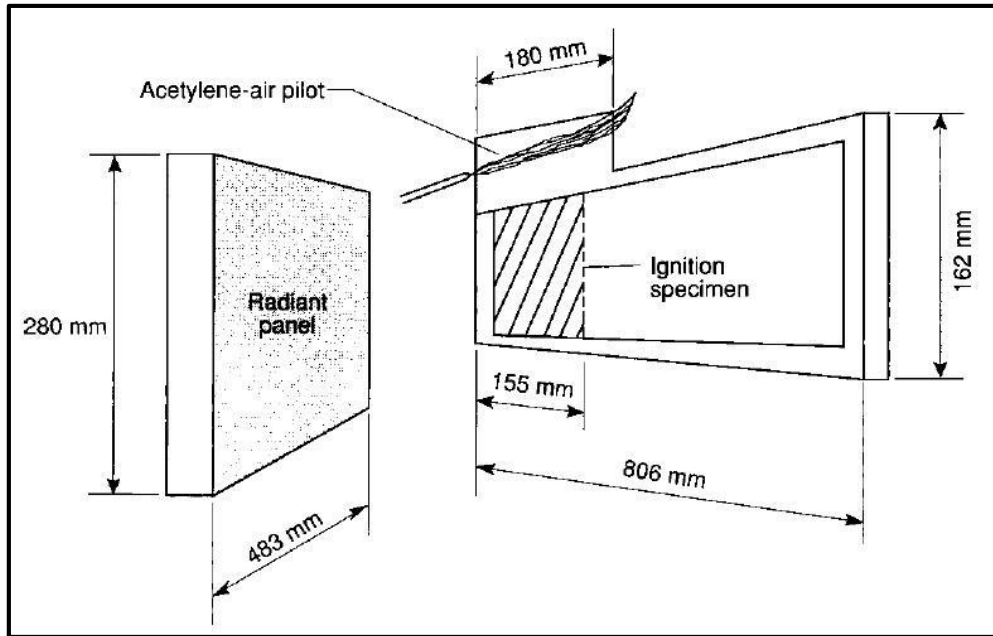


Imagen 40. Esquema del IMO (Aparato de panel radiante) usado durante el análisis de transferencia de calor de las losas de concreto

Fuente: ASTM E 1321 (2013).

Tal y como se observa en la imagen 40, el IMO consta de un panel de unos 1344 cm^2 (a la izquierda en la imagen) alimentado por una mezcla de propano y aire, que irradia calor de manera constante, con un ángulo de inclinación respecto al espécimen en estudio (a la derecha en la imagen), de tal forma que la radiación disminuye conforme se avanza en la distribución horizontal de la muestra, alejándose de la zona de radiación máxima (marcada con líneas, a la derecha en la imagen 40).

En el caso del experimento de resistencia contra el fuego, el panel radiante se usa como fuente puntual de calor, que representa la condición de un mueble que está siendo quemado, o una llama proveniente de la combustión de cualquier material que pueda arder y liberar calor durante un incendio, con la particularidad de que en laboratorio el flujo de calor es constante y conocido durante todo el ensayo.

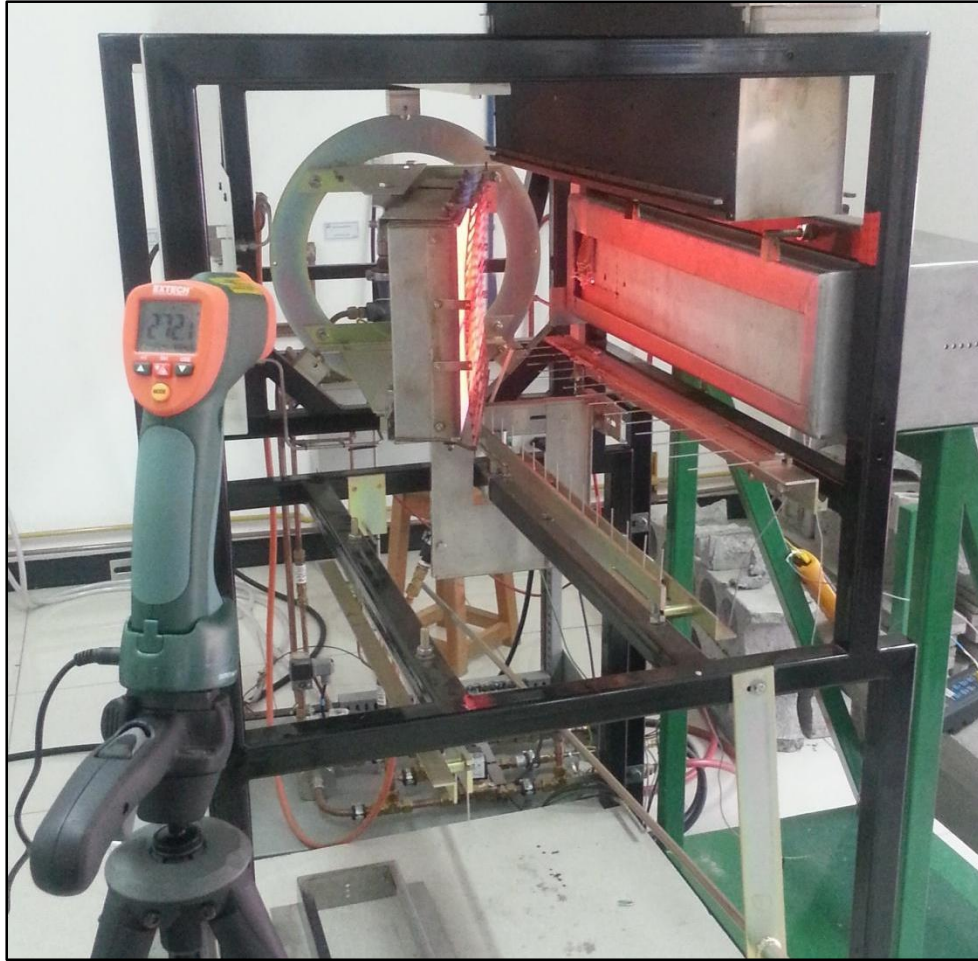


Imagen 41. Disposición del espécimen para el análisis de transferencia de calor, y medición de la temperatura de la superficie expuesta mediante un pirómetro.

Fuente: Autores (2015).

Para el experimento se colocaron las losas en la posición mostrada en la imagen 41, siendo la superficie expuesta directamente al calor, la parte de abajo del entrepiso, simulando la condición de un incendio desde un piso inferior, y analizando así, el porcentaje de calor que se podría transferir durante un incendio al piso superior.

Al inicio de la prueba se requiere un precalentamiento del equipo, el cual eleva la temperatura inicial superficial de la losa en su lado expuesto a la radiación directa hasta una temperatura alrededor de los 200 °C en promedio, medida

puntualmente por medio de un termómetro laser o pirómetro, dicha temperatura se registró durante la duración total de cada experimento.

Se monitoreó y se registró la temperatura del acero estructural presente en las losas mediante un termopar tipo K, recubierto con una cinta de fibras cerámicas (ver imagen 42), para evitar que el aislamiento original del mismo, se degradara con las altas temperaturas alcanzadas durante los experimentos (se registraron temperaturas de hasta 500 °C en la superficie expuesta en el punto más crítico) y evitar así que se vieran afectadas las mediciones registradas.

La constatación de la temperatura del acero se logró mediante la perforación de un agujero lo suficientemente ancho para que la punta del termopar ingresara hasta la profundidad suficiente para estar en contacto con el torón de acero más cercana a la zona de radiación máxima.



Imagen 42. Colocación y protección de un termopar tipo K para la medición de la temperatura del acero estructural presente en los entresijos estudiados

Fuente: Autores (2015).

Luego, la transferencia de calor en los boquetes existentes en las losas fue analizada mediante la inserción de un termopar tipo K blindado en porcelana, perforando un agujero en la dirección que se aprecia en la imagen 43, a

la izquierda, el cual fue insertado hasta el centro de uno de los boquetes o agujeros que constituyen las losas estudiadas (a la derecha en la imagen), en cada caso, se eligió el boquete más cercano a la zona donde la radiación es máxima.



Imagen 43. Colocación de un termopar tipo K para la medición de la temperatura del aire dentro de las losas de entresijos estudiados

Fuente: Autores (2015).

Finalmente la temperatura de la superficie no expuesta directamente al calor, se midió con el uso de una cámara termográfica, monitoreando dos puntos simultáneamente durante toda la prueba, ambos alineados con el punto donde se estima que la radiación fuese máxima en cada corrida, de manera que de estas dos mediciones se obtuvo un promedio, el cual fue graficado junto con el resto de mediciones.

Adicionalmente se colocaron bastos de algodón en la superficie no expuesta, según se muestra en la imagen 44 para determinar si la transferencia de calor a través de la losa, era suficiente como para generar la combustión de los mismos, sin embargo en ninguna prueba se registró la ignición de estos.



Imagen 44. Monitoreo de la temperatura de la superficie no expuesta mediante un equipo termográfico

Fuente: Autores (2015)

El equipo termográfico fue de gran ayuda en la medición de las temperaturas de la superficie no expuesta, y las observaciones puntuales se obtuvieron a partir de termografías en tiempo real, como se puede observar en la imagen 44.



Imagen 45. Fotografía de una termografía obtenida en tiempo real durante las mediciones de la temperatura en la superficie no expuesta de las losas de concreto estudiadas.

Fuente: Autores (2015)

Finalmente, luego de cada prueba individual, se observó tanto la superficie expuesta directamente a la fuente de calor, como la no expuesta, para detectar agrietamiento o formación de astillas, cambios de coloración, o cualquier indicio que pudieran sugerir la pérdida de resistencia del concreto; cada resultado de la inspección fue documentado y se puede observar en las secciones 14.1 y 15.1.2.

13.3.2 Prueba de resistencia a la compresión de concreto expuesto a altas temperaturas

Para el caso de los cilindros se tomaron dos muestras: 1 de 420 kg/cm² y 1 de 700 kg/cm² que con ayuda del termómetro digital y los termopares tipo K protegidas con el Tape de cerámica dentro del horno se realizó tres mediciones, la temperatura interna del cilindro, la temperatura superficial del cilindro y la temperatura del horno la cual es censada por el mismo horno, esto con el fin de trazar una curva de temperatura con respecto al tiempo.

Con este experimento se pudo estimar con exactitud el tiempo en el que se alcanzan las temperaturas de interés, conociendo ya el tiempo específico en el que los cilindros consiguen las diferentes temperaturas, simplemente bastó con

introducir los cilindros en el horno y hacer la extracción al tiempo específico que indicará el proceso anterior, se mantuvieron 2 cilindros, sometidos a una temperatura máxima de 1000 °C , 2 cilindros a 800 °C, 2 cilindros a 600 °C, 2 cilindros a 400°C y 2 cilindros a 200 °C, esto para cada una de las resistencias , estos 20 cilindros fueron fallados inmediatamente después de que fuesen sometidos al tiempo y temperaturas de interés que en este caso será la que indique la superficie externa del cilindro.

La extracción se realizó con unas pinzas fabricadas para dicha finalidad, además la protección facial fue con una careta esmeril para evitar la radiación y guantes de calor para proteger las manos de la transferencia de calor a lo largo de las pinzas, posteriormente el porcentaje de pérdida de resistencia fue comparada contra el promedio de resistencia real vista en la falla de los 4 cilindros de control (por resistencia) o sea los que no fueron sometidos al horno, obteniendo lo anterior se pudo realizar gráficos que indiquen la caída de resistencia con respecto a la temperatura, lo que es mejor conocido como una caracterización termo-mecánica.

El reporte final de resultados, así como las recomendaciones emitidas por el equipo de investigación y los asesores técnicos, será discutido con la *Comisión de Seguridad de Vida y Protección Contra Incendio del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica*, para su análisis y posible incorporación en el *Manual de Diseño Simplificado* que el CFIA pudiera publicar, dando por cumplido el sétimo objetivo específico.

Cabe destacar que para este experimento el tiempo de curado de los cilindros fue de una semana antes de su falla. Por cuestiones de disposición del equipo en LANAMME no se pudo dejar curar un mes completo, sin embargo los resultados que se verán más adelante se podrán traslapar a distintas resistencias independientemente de su tiempo de curado.

13.3.3 Examinación petrográfica.

(Block et al, 2008) Como se mencionó previamente el calentamiento en el concreto produce una serie progresiva de cambios a nivel del cemento y minerales

que pueden ser investigado por un examen petrográfico para determinar las temperaturas máximas alcanzadas y deducir el nivel que al que se ha dañado el hormigón.

El análisis petrográfico consistió en analizar el concreto sometido a distintas cargas de calor durante dos horas utilizando un microscopio de luz polarizada, el microscopio utilizado fue el Nikon, modelo eclipse LV100POL, las cargas de exposición fueron de 200, 400, 600, 800, 1000 °C, debido a que el concreto en sí, muestra una elevada heterogeneidad en la composición mineralógica, las muestras analizadas han sido de un mismo cilindro, con el fin de procurar tener una mayor uniformidad en la composición de los minerales en los agregados utilizados en la fabricación del concreto.

Para sacar las muestras que se emplearon en el análisis petrográfico se usaron cilindros con una altura de 1,5 cm obtenidas al seccionar un cilindro de los brindados por PC para cada una de las resistencias de concreto de 420 y 700 kg/cm², de cada cilindro se usaron 6 piezas, 5 fueron calentadas en el horno de convección a las temperaturas antes mencionadas y una que no fue expuesta al calor del horno servirá como referencia.

Posterior al proceso de calentamiento de las piezas y para poder analizar el concreto con el microscopio de luz, se necesitó preparar cada una de las 12 piezas en secciones delgadas, tal proceso se describe a continuación:

Para la preparación de la muestra de sección delgada se seguirán los lineamientos descritos por la ASTM STP 1215 “Petrography of Cementitious Materials”, donde se menciona una secuencia de acciones los cuales consisten en lo siguiente:

- 1- Seccionamiento: la deformación del material se puede ver minimizado con el uso de sierras de diamante de precisión y cuchillas especialmente diseñadas, la sierra realiza el corte en un tiempo muy reducido.

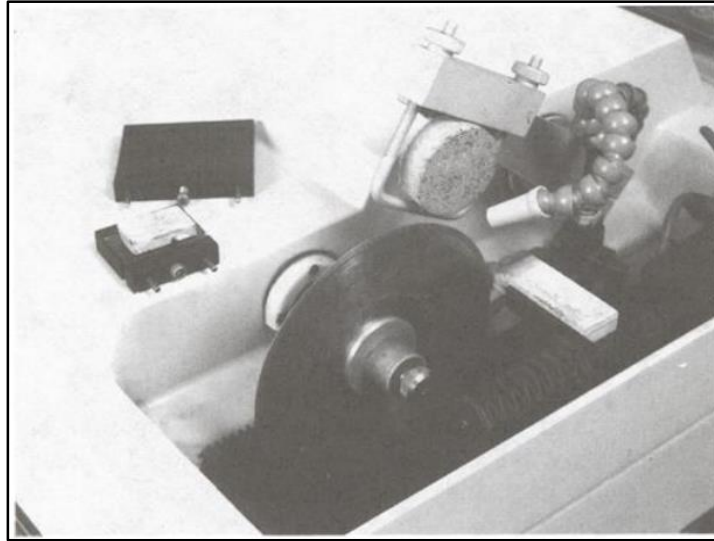


Imagen 46. Sierra de diamante de precisión.

Fuente ASTM STP 1215 (1994)

- 2- Impregnación y encapsulado: Se usa epoxy para rellenar poros y grietas. Muchas resinas de colada se pueden utilizar para la impregnación pero epoxicos son ideales para este propósito, debido a que se unen bien y no se ven afectados por la mayoría de disolventes y reactivos que se usan usualmente en la preparación de muestras. Los epoxis que se vayan a utilizar deben tener baja viscosidad, se puede usar un rango de 100 hasta los 300 centi-poise para una fácil penetración en el material.

Según la ASTM C 1723, "*Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy*", la impregnación de materiales epóxicos en el concreto implica la evacuación de aire y otros gases mientras se da el llenado de grietas y poros, todo mientras el espécimen está bajo un vacío.

(Stutzman, 2001) El uso de material epoxico (epoxy) en la preparación de la muestra además de ser útil para rellenar huecos, apoyar la microestructura contra agrietamiento, contracción y mejorar contraste entre los poros.

3- Lijado y pulido

A- El lijado y pulido pueden lograrse a mano o con un disco giratorio o con un dispositivo de pulido semiautomática, utilizar papeles abrasivos o discos de diamante son fáciles de usar y las muestras se pueden limpiar fácilmente minimizando la contaminación cruzada, para eliminar la hidratación (si es de preocupación) se puede usar durante el lijado una mezcla 50:50 de glicol de propileno y alcohol o un lubricante a base de aceite.

Lija de carburo de silicio de 320 400 y 600 de arena (Clinker) a mano.

B- Pulido:

El propósito del pulido es eliminar deformaciones inducidas el proceso de lijado y se lleva a cabo por abrasión de la superficie con abrasivos libres disminuyendo su tamaño progresivamente a tamaños sud micra. Debido a que este es el último paso en la secuencia de la preparación y cualquier deformación que quede aparece en la observación del microscopio.

El tiempo de pulido varía según el tamaño del abrasivo, la fuerza aplicada, el tiempo y velocidad de la rueda.

Una pauta general que se puede hacer es una observación de la superficie bajo un microscopio al final de cada paso, para evaluar picaduras y arañazos. La muestra se debe limpiar a fondo, cuando se ha mejorado la superficie pasar a la siguiente etapa de pulido. El tamaño de las partículas que se usan en este proceso van de 9 micras a 0.25 micras en una rueda giratoria de sierra de diamante.

Es recomendable usar una capa fina de carbono para disipar el exceso de carga.

La siguiente tabla muestra en síntesis la secuencia de pulido:

Etapa	Pulido de superficie	Tamaño de abrasivo	Lubricante
Pulido áspero	Paño duro o seda	Diamante de 6 micras	A* o B**
Lavado del espécimen a fondo, con alcohol			
Pulido fino	Paño suave	Alumina de 0.05 Micras	A*
Lavado del espécimen a fondo; lavado con alcohol y luego secado			

*A= 50:50 Etileno Glycol y alcohol

**B=lubricante a base de aceite

Tabla 4. Secuencia de pulido.

Fuente: ASTM STP 1215 (1994).

Al finalizar la preparación se obtiene una muestra con una sierra de precisión que tendrá un espesor entre los 10 y 30 micras el cual es sujetado con pegamento en un porta objetos para iniciar la observación microscópica de petrografía donde se utiliza un microscopio óptico de luz transmitida. Se evalúan aspectos como la coloración de los agregados, tamaño, forma y nivel de fisuración, coloración de la pasta de cemento, indicio de fusión de los agregados, nivel de porosidad, reacciones químicas en los agregados.

13.3.4 Examinación mediante microscopía de barrido

Las observaciones en este apartado se llevaron a cabo mediante un microscopio electrónico barrido, se examinaron cambios sufridos en el concreto a diferentes temperaturas: 200, 400, 600, 800 y 1000 °C, (para las dos resistencias de concreto de interés 700 kg/cm² y 420 kg/cm²).

La obtención de las piezas que se calentaron es similar a como se hizo en el análisis petrográfico: se tomaron 6 piezas de cada cilindro con diferente resistencia formado cilindros más pequeños de 2 cm de altura, cada una de estas piezas fue

sometida a un proceso de pulido en una de sus caras donde se usaron discos de diamante de distintos calibres siendo el de 300 micras el último aplicado para obtener una superficie uniforme y brillante con el fin de facilitar la observación con el microscopio.

Después de la etapa de pulido las piezas fueron sometidas a las diferentes cargas térmicas usando el horno de convección, dentro del horno se colocó un termopar que estuvo en contacto con la muestra para conocer la temperatura superficial de la misma, el horno fue calentando la muestra desde la temperatura ambiente hasta el punto donde el termopar en la muestra indicó que se ha alcanzado la temperatura buscada.

Luego de pasar por el horno las piezas fueron introducidas dentro de la cámara de vacío del microscopio de barrido, se analizó únicamente la cara pulida, se tomaron micrografías observando distintos puntos de interés y con la ayuda especializada de personeros del CIEMIC se interpretó los cambios observados en los componentes del concreto.

13.3.5 Simulación con COMSOL.

Luego, por medio de una simulación comparativa, mediante el uso de la herramienta informática COMSOL de simulación, se mostró el comportamiento resistivo y de transferencia de calor, para los ensambles de Losalex de 8cm y 25cm de espesor, para ellos se recopilaron datos térmicos y mecánicos de las configuraciones de entresijos en estudio, parámetros importantes y de interés del software para la simulación, cubriendo de esta manera, el sexto objetivo específico del presente trabajo de investigación.

Finalmente, una vez que se tengan los resultados del estudio, el equipo de investigación se reunirá con los personeros de PC nuevamente, para ofrecerles la información obtenida a raíz de las pruebas realizadas, y conversar sobre las posibles modificaciones de la composición de los agregados, o de la configuración geométrica de los sistemas de entresijos analizados, con el fin de mejorar sus

resistencia en caso que sea necesario, y los costos que esto representaría, para abarcar así, nuestro octavo y último objetivo específico.

IV. RESULTADOS

14 Reporte de los resultados.

A continuación se ofrecen los resultados obtenidos durante las pruebas realizadas en el laboratorio, descritas en las secciones anteriores, analizando las losas y los cilindros de concreto preparados previamente para cada prueba.

Se estudiaron distintas condiciones y escenarios en cada experimento individual, y las mediciones registradas, así como cualquier elemento gráfico extraído a raíz de éstas, se muestran en los siguientes apartados.

14.1 Experimento de panel radiante.

Los resultados mostrados a continuación, constituyen la respuesta del concreto utilizado por un fabricante en Costa Rica, en la construcción de losas de núcleo hueco, ante la exposición de distintos espesores de losa a una fuente controlada de calor.

14.1.1 Distribución de la temperatura en las superficies de las losas de concreto, y estimación del coeficiente de transferencia de calor por conducción.

A continuación se presentan los resultados de mediciones puntuales de temperaturas representativas, distribuidas de la misma forma en los distintos especímenes, analizados por prueba individual, obtenidas a raíz de la exposición de losas de concreto de núcleo hueco de espesores variables, a una fuente puntual de calor, conocida y constante, durante 120 minutos en cada corrida.

En la tabla 5 se muestra la indicación del significado de los encabezados de cada columna de datos presentes entre las tablas 6 y 13, y más adelante en esta sección se detalla el significado físico de cada variable.

Superficie expuesta	Acero	Boquete	Superficie no expuesta			Diferencia entre Tse y Tsne	Conductividad térmica	Tcrítica
T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)

Tabla 5. Simbología para la interpretación de las tablas 6 – 13.

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
0	290	108	30,3	29,6	29,2	29,4	260,6	1,46	1,40
1	291,8	121,2	32,7	30,9	30,7	30,8	261	1,36	2,80
2	310,6	149,5	36,1	31,5	31,1	31,3	279,3	1,27	3,30
3	317,5	160,5	40,1	32,1	31,9	32	285,5	1,25	4,00
4	323,6	169,3	45,1	32,6	32,4	32,5	291,1	1,22	4,50
5	328,8	178,7	50,5	33,9	33,3	33,6	295,2	1,20	5,60
6	333,3	187,4	55,2	34,4	34,1	34,25	299,05	1,19	6,25
7	338,1	195,4	59,3	35,5	35,2	35,35	302,75	1,17	7,35
8	342,5	202,3	63	36,9	36,3	36,6	305,9	1,16	8,60
9	346,2	208,1	66,5	39,2	38,6	38,9	307,3	1,16	10,90
10	350,5	213,8	70,1	41,5	40,5	41	309,5	1,15	13,00
11	352,1	219,6	73,6	43,7	42,6	43,15	308,95	1,15	15,15
12	355,5	224,8	76,9	46,1	44,7	45,4	310,1	1,15	17,40
13	359,5	229,9	81,3	49,2	46,8	48	311,5	1,14	20,00
14	362,3	234,6	84,8	51,1	48,6	49,85	312,45	1,14	21,85
15	365,5	239,1	88,1	53,7	50,6	52,15	313,35	1,13	24,15
16	369,1	243,1	91,4	56,1	53,8	54,95	314,15	1,13	26,95
17	371,2	248,2	94,9	58,2	55,5	56,85	314,35	1,13	28,85
18	373,6	252,3	98,1	59,8	57	58,4	315,2	1,13	30,40
19	376,2	256,3	101,1	61,9	58,3	60,1	316,1	1,12	32,10
20	377,5	260,2	104,2	63,2	60,5	61,85	315,65	1,13	33,85
21	381,4	263,6	107,3	64,7	62,3	63,5	317,9	1,12	35,50
22	382,7	267,1	110,4	66,1	64,4	65,25	317,45	1,12	37,25

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
23	384,2	270,9	113,7	68,2	65,5	66,85	317,35	1,12	38,85
24	386,3	274,1	117,3	69,4	67,2	68,3	318	1,12	40,30
25	387,3	277,3	120,9	71,2	68,2	69,7	317,6	1,12	41,70
26	391,1	280,7	124,2	72,5	69,2	70,85	320,25	1,11	42,85
27	392,1	283,9	127,3	74,4	70,5	72,45	319,65	1,11	44,45
28	392,6	287,3	130,7	76	72,4	74,2	318,4	1,12	46,20
29	395,1	290,2	133,6	77,6	74,1	75,85	319,25	1,11	47,85
30	396,1	293,2	136,8	79,2	75,7	77,45	318,65	1,12	49,45
31	397,1	295,9	139,5	80,6	77,4	79	318,1	1,12	51,00
32	398,5	298,8	142,7	82,2	79	80,6	317,9	1,12	52,60
33	399,6	301,7	146,2	84,4	80,6	82,5	317,1	1,12	54,50
34	400,6	304,3	148,2	85,5	81,9	83,7	316,9	1,12	55,70
35	403,3	306,6	150,8	87,4	83,5	85,45	317,85	1,12	57,45
36	404,5	308,8	153,4	89,8	86	87,9	316,6	1,12	59,90
37	406,6	310,9	310,9	91,2	87,7	89,45	317,15	1,12	61,45
38	406,1	313,2	158,2	93,1	89,8	91,45	314,65	1,13	63,45
39	406,2	315,6	160,5	95	90,8	92,9	313,3	1,13	64,90
40	408,6	317,9	162,9	96	91,7	93,85	314,75	1,13	65,85
41	409,1	319,9	164,9	96,6	93,7	95,15	313,95	1,13	67,15
42	409,7	322,4	167,1	97,1	95,1	96,1	313,6	1,13	68,10
43	410,3	323,8	169,2	101	95,5	98,25	312,05	1,14	70,25
44	411,5	325,4	171,2	101	96,7	98,85	312,65	1,14	70,85
45	413,5	326,8	173,3	102	97,5	99,75	313,75	1,13	71,75
46	414,2	328,2	175,3	103	98,4	100,7	313,5	1,13	72,70
47	414,3	329,9	177,2	104	99,6	101,8	312,5	1,14	73,80
48	414,6	331,5	178,6	105	100	102,5	312,1	1,14	74,50
49	415,8	333,1	180,8	107	102	104,5	311,3	1,14	76,50
50	416,6	334,7	182,5	108	103	105,5	311,1	1,14	77,50
51	417	336,1	184,3	109	104	106,5	310,5	1,15	78,50
52	417,5	337,8	185,9	110	106	108	309,5	1,15	80,00
53	416,1	339,3	187,5	111	107	109	307,1	1,16	81,00
54	419,3	340,6	189,1	113	108	110,5	308,8	1,15	82,50
55	419,1	341,6	190,7	114	109	111,5	307,6	1,16	83,50
56	420,1	342,8	192,1	114	110	112	308,1	1,15	84,00
57	420,1	344,2	193,6	115	111	113	307,1	1,16	85,00
58	421,2	345,1	195,1	116	112	114	307,2	1,16	86,00
59	420,5	346,2	196,4	117	112	114,5	306	1,16	86,50
60	421,5	347,3	197,8	118	113	115,5	306	1,16	87,50
61	426,6	348,5	199,3	119	114	116,5	310,1	1,15	88,50
62	426,5	349,4	200,4	120	115	117,5	309	1,15	89,50

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
63	427,1	350,2	201,5	121	116	118,5	308,6	1,15	90,50
64	427,6	351,1	202,7	122	117	119,5	308,1	1,15	91,50
65	427,7	352,2	204	123	118	120,5	307,2	1,16	92,50
66	428	353,5	205,2	124	119	121,5	306,5	1,16	93,50
67	429,6	354	206,3	124	119	121,5	308,1	1,15	93,50
68	428,1	354,8	207,4	125	120	122,5	305,6	1,16	94,50
69	430,1	355,9	208,7	126	122	124	306,1	1,16	96,00
70	431	356,5	209,6	127	122	124,5	306,5	1,16	96,50
71	430,6	357,3	210,6	127	123	125	305,6	1,16	97,00
72	431,2	358,1	211,7	129	124	126,5	304,7	1,17	98,50
73	430,1	358,8	212,8	130	125	127,5	302,6	1,18	99,50
74	430,3	359,5	213,6	131	126	128,5	301,8	1,18	100,50
75	431,5	360,1	214,6	132	127	129,5	302	1,18	101,50
76	432,2	360,8	215,4	133	128	130,5	301,7	1,18	102,50
77	431,5	361,5	216,3	134	129	131,5	300	1,19	103,50
78	432,1	361,8	217	135	130	132,5	299,6	1,19	104,50
79	432,2	362,3	217,8	135	131	133	299,2	1,19	105,00
80	432,1	363	218,8	137	132	134,5	297,6	1,19	106,50
81	433,1	363,3	219,8	138	133	135,5	297,6	1,19	107,50
82	433,2	363,7	220,6	139	134	136,5	296,7	1,20	108,50
83	433,5	364	221,5	140	135	137,5	296	1,20	109,50
84	434,3	364,5	222,5	141	136	138,5	295,8	1,20	110,50
85	433,8	364,9	223	142	137	139,5	294,3	1,21	111,50
86	434,3	365,3	223,9	143	138	140,5	293,8	1,21	112,50
87	433	365,8	224,7	144	139	141,5	291,5	1,22	113,50
88	434,5	366,3	225,6	145	140	142,5	292	1,22	114,5
89	434,5	366,8	226,3	146	141	143,5	291	1,22	115,5
90	435,5	367,3	227	147	142	144,5	291	1,22	116,5
91	434,6	367,8	227,6	149	143	146	288,6	1,23	118,0
92	434,5	368,8	228,3	150	144	147	287,5	1,24	119,0
93	433,1	369,3	229,1	151	145	148	285,1	1,25	120,0
94	434,6	369,4	229,8	152	146	149	285,6	1,24	121,0
95	435,1	369,5	230,5	152	147	149,5	285,6	1,24	121,5
96	435,6	369,7	231,1	154	148	151	284,6	1,25	123,0
97	434,6	370,1	231,8	155	149	152	282,6	1,26	124,0
98	434,2	370,5	232,5	156	150	153	281,2	1,26	125,0
99	435,1	371,3	233,2	156	151	153,5	281,6	1,26	125,5
100	435,1	371,6	233,9	157	152	154,5	280,6	1,27	126,5
101	436,2	371,8	234,6	158	153	155,5	280,7	1,27	127,5
102	436,4	372,1	235,2	161	155	158	278,4	1,28	130,0

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
103	437,1	372,5	235,9	161	156	158,5	278,6	1,28	130,5
104	437,7	372,7	236,5	162	157	159,5	278,2	1,28	131,5
105	438,2	373	237	163	158	160,5	277,7	1,28	132,5
106	438,2	373,5	237,7	164	158	161	277,2	1,28	133,0
107	437,8	373,7	238,3	165	159	162	275,8	1,29	134,0
108	438,1	374,1	238,9	166	160	163	275,1	1,29	135,0
109	438,3	374,6	239,5	167	161	164	274,3	1,30	136,0
110	438,6	374,7	240,2	167	161	164	274,6	1,29	136,0
111	438,6	375	240,8	168	162	165	273,6	1,30	137,0
112	439,2	375,3	241,4	169	163	166	273,2	1,30	138,0
113	437,7	375,8	241,9	169	164	166,5	271,2	1,31	138,5
114	439	377	242,5	170	165	167,5	271,5	1,31	139,5
115	438,6	376,3	243	170	166	168	270,6	1,31	140,0
116	438,2	376,9	243,6	171	166	168,5	269,7	1,32	140,5
117	439,6	377	244	172	167	169,5	270,1	1,32	141,5
118	439,3	377,4	244,5	173	168	170,5	268,8	1,32	142,5
119	438,6	378,1	245,1	174	168	171	267,6	1,33	143,0
120	438,6	378	245,5	174	169	171,5	267,1	1,33	143,5

Tabla 6. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 8 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015)

En este experimento los resultados obtenidos, en términos del comportamiento de las curvas (ver imagen 47), son los esperados, dado que las tendencias observadas en las distintas variables se mantienen durante la totalidad del experimento.

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
0	188,8	64,8	30,7	33,4	33,6	33,5	155,3	2,45	5,5
1	217,7	101,8	31,9	34,1	34	34,05	183,65	2,07	6,1
2	239,5	131,6	34,1	34,9	34,2	34,55	204,95	1,86	6,6
3	259	154,6	38,8	34,6	34,3	34,45	224,55	1,70	6,5
4	274,5	170,3	42,8	35,5	34,9	35,2	239,3	1,59	7,2
5	290,8	183,8	48,9	37,1	35,2	36,15	254,65	1,50	8,2
6	305,4	194,1	55,7	38,9	35,3	37,1	268,3	1,42	9,1
7	318,4	202,5	60,4	41,2	36,2	38,7	279,7	1,36	10,7
8	328,4	208,4	62,2	42,5	36,8	39,65	288,75	1,32	11,7
9	337,2	214,3	64,5	44,1	38,9	41,5	295,7	1,29	13,5
10	346,6	219,1	66,2	45,8	39,2	42,5	304,1	1,25	14,5
11	355,6	223,9	69,5	47,6	40,8	44,2	311,4	1,22	16,2
12	363,4	228,9	74,2	49,1	42,6	45,85	317,55	1,20	17,9
13	371,2	233,9	78,6	50,9	43,8	47,35	323,85	1,18	19,4
14	378,5	238,3	82,1	52,1	45,2	48,65	329,85	1,15	20,7
15	386,1	242,8	85,9	53,8	47,1	50,45	335,65	1,13	22,5
16	392,3	246,3	88,9	55,1	48,6	51,85	340,45	1,12	23,9
17	397,6	250	92,4	56,3	50,6	53,45	344,15	1,11	25,5
18	403,7	253,8	95,8	57,6	52,2	54,9	348,8	1,09	26,9
19	407,2	257	99,1	58,2	54,1	56,15	351,05	1,09	28,2
20	413,7	260,1	102,1	60,2	55,8	58	355,7	1,07	30,0
21	417,1	263,2	105,2	61,4	57,1	59,25	357,85	1,06	31,3
22	420,3	266,5	108,5	62,6	58,8	60,7	359,6	1,06	32,7
23	425,5	269,3	111,6	64,1	60,4	62,25	363,25	1,05	34,3
24	427,1	272,3	114,7	65,7	62,1	63,9	363,2	1,05	35,9
25	430,5	274,8	117,9	67	63,6	65,3	365,2	1,04	37,3
26	432,1	277,4	120,8	68,6	65,2	66,9	365,2	1,04	38,9
27	433,6	279,9	124,3	70,3	66,6	68,45	365,15	1,04	40,5
28	436,5	282,6	127,9	72,1	68,6	70,35	366,15	1,04	42,4
29	439,1	285,1	131,6	73,8	70,3	72,05	367,05	1,04	44,1
30	442,1	287,8	135,2	75,6	72	73,8	368,3	1,03	45,8
31	443,3	290,2	138,6	77,3	73,9	75,6	367,7	1,04	47,6
32	444,8	292,5	141,1	78,2	75,1	76,65	368,15	1,03	48,7
33	447,1	294,8	143,6	80,6	77,2	78,9	368,2	1,03	50,9

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
34	450,1	297	146,2	82,1	79	80,55	369,55	1,03	52,6
35	452,2	299,5	149	83,9	80,4	82,15	370,05	1,03	54,2
36	453,5	301,5	151,4	85,2	82,1	83,65	369,85	1,03	55,7
37	455,1	303,8	153,3	87,1	83,5	85,3	369,8	1,03	57,3
38	456,1	305,8	155,4	88,7	85,1	86,9	369,2	1,03	58,9
39	456,7	307,5	157,5	90,4	86,7	88,55	368,15	1,03	60,6
40	457,1	309,7	160,2	92	88,5	90,25	366,85	1,04	62,3
41	459,1	311,2	162,4	93,8	90	91,9	367,2	1,04	63,9
42	460,5	312,9	164,4	95,1	91,4	93,25	367,25	1,04	65,3
43	462,2	314,8	166,5	96,6	92,8	94,7	367,5	1,04	66,7
44	463,7	316,8	168,5	97,9	94,6	96,25	367,45	1,04	68,3
45	464,1	318,3	170,2	99,7	95,9	97,8	366,3	1,04	69,8
46	465,3	320	172,2	101	97,5	99,25	366,05	1,04	71,3
47	466,2	321,5	173,9	103	99,2	101,1	365,1	1,04	73,1
48	467,1	323	176	104	101	102,5	364,6	1,04	74,5
49	469,1	324,2	177,5	105	102	103,5	365,6	1,04	75,5
50	469,1	325,7	179,2	107	103	105	364,1	1,05	77,0
51	469,3	327,1	181	108	104	106	363,3	1,05	78,0
52	470,1	328,3	182,8	109	106	107,5	362,6	1,05	79,5
53	470,1	329,5	184,3	110	106	108	362,1	1,05	80,0
54	472,1	330,8	185,9	111	108	109,5	362,6	1,05	81,5
55	473,2	332,1	187,6	112	109	110,5	362,7	1,05	82,5
56	474	333,1	188,9	113	110	111,5	362,5	1,05	83,5
57	473,1	334,1	190,4	114	111	112,5	360,6	1,06	84,5
58	475,1	335	191,9	115	112	113,5	361,6	1,05	85,5
59	476,1	336,2	193,3	116	112	114	362,1	1,05	86,0
60	476,2	337,2	194,8	116	113	114,5	361,7	1,05	86,5
61	477,8	338,2	196,3	118	114	116	361,8	1,05	88,0
62	477,1	339	197,4	118	114	116	361,1	1,05	88,0
63	478,1	340,1	198,8	119	115	117	361,1	1,05	89,0
64	477,8	341,3	199,9	120	116	118	359,8	1,06	90,0
65	477,1	342	200,9	121	117	119	358,1	1,06	91,0
66	477,1	343	202,3	122	118	120	357,1	1,07	92,0
67	477,2	343,7	203,6	122	118	120	357,2	1,07	92,0
68	479,3	344,2	204,9	123	118	120,5	358,8	1,06	92,5
69	480,2	344,9	206	124	119	121,5	358,7	1,06	93,5
70	482,2	345,7	207,1	125	120	122,5	359,7	1,06	94,5
71	481,5	346,5	208,2	125	120	122,5	359	1,06	94,5
72	482	346,9	209,2	126	121	123,5	358,5	1,06	95,5
73	480,2	347,7	210,3	127	122	124,5	355,7	1,07	96,5

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
74	481,8	348,3	211,3	128	123	125,5	356,3	1,07	97,5
75	482,3	349	212,3	128	123	125,5	356,8	1,07	97,5
76	482,7	349,4	213,3	129	124	126,5	356,2	1,07	98,5
77	482,7	350	214,2	130	125	127,5	355,2	1,07	99,5
78	483,2	350,5	215,2	131	125	128	355,2	1,07	100,0
79	485,1	351	216,1	131	126	128,5	356,6	1,07	100,5
80	484,3	351,8	217,1	132	127	129,5	354,8	1,07	101,5
81	485,1	352,2	217,8	133	128	130,5	354,6	1,07	102,5
82	485,2	352,8	218,8	134	128	131	354,2	1,08	103,0
83	485,1	353,3	219,6	135	129	132	353,1	1,08	104,0
84	485,2	353,6	220,4	136	130	133	352,2	1,08	105,0
85	485,1	354	221,2	137	131	134	351,1	1,09	106,0
86	485,1	354,5	222	137	132	134,5	350,6	1,09	106,5
87	486,1	355	222,9	138	132	135	351,1	1,09	107,0
88	486,5	355,3	223,6	139	134	136,5	350	1,09	108,5
89	485,7	355,6	224,4	140	134	137	348,7	1,09	109,0
90	486,4	356,1	225,1	140	135	137,5	348,9	1,09	109,5
91	486,5	356,5	226	141	136	138,5	348	1,09	110,5
92	488,2	356,8	226,7	142	137	139,5	348,7	1,09	111,5
93	486,6	357,3	227,3	143	138	140,5	346,1	1,10	112,5
94	486,5	357,8	228	144	139	141,5	345	1,10	113,5
95	487,2	358,3	228,9	145	140	142,5	344,7	1,11	114,5
96	486,8	358,4	229,4	146	141	143,5	343,3	1,11	115,5
97	488,1	358,8	230,1	147	140	143,5	344,6	1,11	115,5
98	487,1	359,1	230,7	148	142	145	342,1	1,11	117,0
99	488,2	359,3	231,3	149	143	146	342,2	1,11	118,0
100	486,7	359,7	231,9	149	144	146,5	340,2	1,12	118,5
101	487,1	359,9	232,6	151	145	148	339,1	1,12	120,0
102	488,5	359,9	233,2	151	146	148,5	340	1,12	120,5
103	487,5	360,3	233,8	153	146	149,5	338	1,13	121,5
104	486,7	360,5	234,4	154	147	150,5	336,2	1,13	122,5
105	488	360,8	235	155	149	152	336	1,13	124,0
106	487,7	360,9	235,6	156	149	152,5	335,2	1,14	124,5
107	487,5	360,9	236,2	157	150	153,5	334	1,14	125,5
108	488,3	361	236,7	158	150	154	334,3	1,14	126,0
109	488,2	361,2	237,4	158	151	154,5	333,7	1,14	126,5
110	489,1	361,5	238	159	152	155,5	333,6	1,14	127,5
111	490,2	361,7	238,6	160	153	156,5	333,7	1,14	128,5
112	489,5	361,9	239,1	161	153	157	332,5	1,15	129,0
113	489,3	362,3	239,7	161	154	157,5	331,8	1,15	129,5

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 8 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
114	488,2	362,5	240,2	162	154	158	330,2	1,15	130,0
115	489,1	362,8	240,7	163	155	159	330,1	1,15	131,0
116	489,2	363	241,1	163	155	159	330,2	1,15	131,0
117	489,2	363,1	241,6	164	155	159,5	329,7	1,16	131,5
118	490,5	363,4	242,2	165	157	161	329,5	1,16	133,0
119	491,1	363,5	242,8	166	157	161,5	329,6	1,16	133,5
120	492,3	363,5	243,3	166	157	161,5	330,8	1,15	133,5

Tabla 7. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 8 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

Al igual que en la primer corrida para el espesor de 8cm, los resultados obtenidos en esta prueba son favorables, y al comparar las gráficas de ambos experimentos (ver imágenes 47 y 48), se puede observar que presentan similitudes importantes, lo que nos lleva a pensar en la validez de los datos obtenidos.

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
0	182	138	45	30	29	29,5	152,5	3,99	4,50
1	208	212	25	30,6	30,2	30,4	177,6	3,43	5,40
2	245	254	47,1	30,2	31,5	30,9	214,2	2,84	5,85
3	257,6	291	48,9	31,5	31,6	31,6	226,1	2,69	6,55
4	267,1	313,5	51	32,4	31,7	32,1	235,1	2,59	7,05
5	275,3	326,5	53,2	32,9	32,1	32,5	242,8	2,51	7,50
6	283,2	336,5	56	33,5	32,8	33,2	250,1	2,43	8,15
7	289,2	344,5	58,9	34	33,7	33,9	255,4	2,38	8,85
8	294,4	350,4	62,3	34,1	33,9	34,0	260,4	2,34	9,00
9	297,2	353,9	65,1	35	34,4	34,7	262,5	2,32	9,70
10	308	355,9	69	35,5	35	35,3	272,8	2,23	10,25
11	315,3	358	71,5	36,6	35,9	36,3	279,1	2,18	11,25
12	318,6	361,7	75,1	37,6	36,5	37,1	281,6	2,16	12,05
13	322,8	359,1	78,3	38,6	37,3	38,0	284,9	2,14	12,95
14	325,2	363,1	81,6	39	38,5	38,8	286,5	2,13	13,75
15	327,1	366,2	84,8	40,2	39	39,6	287,5	2,12	14,60
16	330,6	365,2	88,3	41,6	40,3	41,0	289,7	2,10	15,95

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K W/m°C)	ΔTa (°C)
17	333,5	362,5	91,2	42,3	41,1	41,7	291,8	2,09	16,70
18	337,5	360,9	94,6	43,3	40,8	42,1	295,5	2,06	17,05
19	338,2	360,1	97,6	44,5	41,5	43,0	295,2	2,06	18,00
20	342,1	359,3	100,6	45,6	43	44,3	297,8	2,04	19,30
21	344,5	358,9	103,2	46,8	43,8	45,3	299,2	2,03	20,30
22	346,2	358,3	105,9	47,8	44,8	46,3	299,9	2,03	21,30
23	347,6	358,5	108,5	49	46	47,5	300,1	2,03	22,50
24	348,1	361	111,2	49,5	46,5	48,0	300,1	2,03	23,00
25	349,5	361,7	113,8	50,9	47,2	49,1	300,5	2,03	24,05
26	350,8	363,5	116,4	51,2	48,2	49,7	301,1	2,02	24,70
27	351,5	364,3	118,7	53	49,3	51,2	300,4	2,03	26,15
28	352,5	364	121,2	54,5	50,8	52,7	299,9	2,03	27,65
29	354,5	362,2	123,5	50,4	49,2	49,8	304,7	2,00	24,80
30	356,1	362,3	125,5	56,8	54,4	55,6	300,5	2,03	30,60
31	356,5	364,4	126,5	57,8	55,2	56,5	300,0	2,03	31,50
32	356,6	365,6	129,4	59,3	56,4	57,9	298,8	2,04	32,85
33	358	366,1	131,9	60,2	57,1	58,7	299,4	2,03	33,65
34	359,5	365,4	134,3	61,3	58,4	59,9	299,7	2,03	34,85
35	360,7	363,8	136,6	62,6	59,6	61,1	299,6	2,03	36,10
36	362,1	364	138,6	62,5	51,4	57,0	305,2	1,99	31,95
37	362,3	365,9	140,7	62,1	61,6	61,9	300,5	2,03	36,85
38	364,2	364,6	142,5	63,2	62,5	62,9	301,4	2,02	37,85
39	364,5	364,1	144,3	64,6	63,8	64,2	300,3	2,03	39,20
40	365,8	363,5	145,8	65,5	64,7	65,1	300,7	2,02	40,10
41	366,1	365,5	147,3	66,6	65,8	66,2	299,9	2,03	41,20
42	368	364,3	148,8	66,4	66	66,2	301,8	2,02	41,20
43	369,1	361,8	150,2	67,5	67,2	67,4	301,8	2,02	42,35
44	369,8	366	151,8	68,6	68,4	68,5	301,3	2,02	43,50
45	370,1	363,4	153,1	68,5	70	69,3	300,9	2,02	44,25
46	370,8	365,8	154,4	68,5	69,6	69,1	301,8	2,02	44,05
47	371,5	365,7	155,6	69,3	70,5	69,9	301,6	2,02	44,90
48	373,2	363,7	156,9	71,5	72,8	72,2	301,1	2,02	47,15
49	373,7	363,6	157,9	72,4	73,5	73,0	300,8	2,02	47,95
50	376,2	364	159,1	73,3	74,7	74,0	302,2	2,01	49,00
51	374,5	366,7	160,3	74	75,4	74,7	299,8	2,03	49,70
52	375,2	365,8	161,3	74,8	76,5	75,7	299,6	2,03	50,65
53	376	367,5	162,6	79,2	78,1	78,7	297,4	2,05	53,65
54	377,1	367	163,5	78,6	78,9	78,8	298,4	2,04	53,75
55	377,3	366,6	164,6	80,6	80,2	80,4	296,9	2,05	55,40
56	378,5	367	165,5	81,4	81,2	81,3	297,2	2,05	56,30

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K W/m°C)	ΔTa (°C)
57	380,1	367,1	166,4	83,6	81,8	82,7	297,4	2,05	57,70
58	379,5	367,4	167,3	84,7	82,9	83,8	295,7	2,06	58,80
59	379,7	369,4	168,3	85,8	83,8	84,8	294,9	2,06	59,80
60	381,1	367,1	169,5	87,2	84,8	86,0	295,1	2,06	61,00
61	382,2	364,7	170,6	87,9	85,6	86,8	295,5	2,06	61,75
62	381,7	367,7	172	88,4	86,1	87,3	294,5	2,07	62,25
63	382,5	366,2	172,8	89	86,6	87,8	294,7	2,07	62,80
64	383,2	366	173,1	89,8	87,5	88,7	294,6	2,07	63,65
65	383,5	368,5	174,5	92,2	88,4	90,3	293,2	2,08	65,30
66	385	368,5	175,5	93,4	89,3	91,4	293,7	2,07	66,35
67	384,5	367,1	176,2	94	89,8	91,9	292,6	2,08	66,90
68	385,5	369,3	177,1	94,5	90,2	92,4	293,2	2,08	67,35
69	385,5	372,8	177,9	95,5	91,7	93,6	291,9	2,09	68,60
70	385,6	374,2	178,8	96	92,3	94,2	291,5	2,09	69,15
71	386,5	373,4	180,1	96,7	93,4	95,1	291,5	2,09	70,05
72	387	370,4	180,8	97,7	93,8	95,8	291,3	2,09	70,75
73	387,3	368,5	181,3	98,2	84,5	91,4	296,0	2,06	66,35
74	388,5	367,8	181,8	98,9	94,9	96,9	291,6	2,09	71,90
75	388,8	367,2	182,3	99,4	95	97,2	291,6	2,09	72,20
76	389	370,6	183,1	98,9	96,2	97,6	291,5	2,09	72,55
77	389,1	370,3	183,6	99,8	96,4	98,1	291,0	2,09	73,10
78	389,1	371,6	184,3	100	96,9	98,5	290,7	2,09	73,45
79	390	372,1	185,1	101	97,3	99,2	290,9	2,09	74,15
80	390,3	371,1	185,9	101	98,2	99,6	290,7	2,09	74,60
81	390,2	369,8	186,5	102	99,7	100,9	289,4	2,10	75,85
82	392,1	368,4	187,2	102	99,7	100,9	291,3	2,09	75,85
83	391	371,2	187,9	103	100	101,5	289,5	2,10	76,50
84	391,6	372,1	188,4	103	100	101,5	290,1	2,10	76,50
85	391,5	373	189,1	104	101	102,5	289,0	2,11	77,50
86	392,1	370,5	189,6	103	100	101,5	290,6	2,09	76,50
87	393,1	370,7	190,2	105	103	104,0	289,1	2,11	79,00
88	393,5	370,3	190,6	105	103	104,0	289,5	2,10	79,00
89	394,5	366,9	191,1	106	103	104,5	290,0	2,10	79,50
90	394,5	368,1	191,8	106	104	105,0	289,5	2,10	80,00
91	394,3	371	192,2	107	104	105,5	288,8	2,11	80,50
92	394,7	369,5	192,8	107	105	106,0	288,7	2,11	81,00
93	394,5	372	193,2	107	105	106,0	288,5	2,11	81,00
94	395,6	372,6	193,8	108	105	106,5	289,1	2,11	81,50
95	395,2	374	194,3	108	106	107,0	288,2	2,11	82,00
96	396,1	372,2	195	109	106	107,5	288,6	2,11	82,50

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K W/m°C)	ΔT_a (°C)
97	396,1	372,3	195,6	109	106	107,5	288,6	2,11	82,50
98	396,1	374,2	196,1	110	107	108,5	287,6	2,12	83,50
99	397	374,6	196,8	110	107	108,5	288,5	2,11	83,50
100	400	375,2	197,4	111	108	109,5	290,5	2,10	84,50
101	398	371,8	197,7	111	108	109,5	288,5	2,11	84,50
102	397	371,9	198,2	111	109	110,0	287,0	2,12	85,00
103	397,2	367,7	198,6	112	109	110,5	286,7	2,12	85,50
104	398	365,4	198,7	112	109	110,5	287,5	2,12	85,50
105	397,7	369,3	199,2	112	109	110,5	287,2	2,12	85,50
106	397,5	370,1	199,1	113	110	111,5	286,0	2,13	86,50
107	397,5	370,6	201	114	111	112,5	285,0	2,14	87,50
108	398,1	370,3	200,4	114	111	112,5	285,6	2,13	87,50
109	398,5	369,8	200,9	114	112	113,0	285,5	2,13	88,00
110	398,1	368,5	201,4	115	112	113,5	284,6	2,14	88,50
111	398	369,8	201,8	115	112	113,5	284,5	2,14	88,50
112	400,2	370,3	202,3	115	112	113,5	286,7	2,12	88,50
113	400	367,2	202,6	116	112	114,0	286,0	2,13	89,00
114	400	367,9	202,9	116	112	114,0	286,0	2,13	89,00
115	400,2	368,5	203,3	116	113	114,5	285,7	2,13	89,50
116	402,2	365,3	203,6	117	114	115,5	286,7	2,12	90,50
117	400,5	370,3	204	117	114	115,5	285,0	2,14	90,50
118	400,5	370,6	204,3	118	114	116,0	284,5	2,14	91,00
119	401,2	371,6	204,7	118	115	116,5	284,7	2,14	91,50
120	401,5	371,5	205,1	118	115	116,5	285,0	2,14	91,50

Tabla 8. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 15 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015).

En esta prueba puntual se obtuvieron algunos datos que arrojaron resultados no esperados, como lo es el hecho de que la temperatura del acero (T_2) fuera más alta durante los primeros 37 minutos que la temperatura misma de la superficie expuesta directamente a la radiación (T_1), lo cual no es lógico dado que el acero se encuentra unos centímetros dentro de la losa, y lo que verdaderamente tiene sentido, tal y como se observa en las demás pruebas, es que la T_1 sea mayor durante toda la prueba que T_2 , lo que se atribuye a una posible mala colocación del termopar que media T_2 , provocando así que la medición fuera más elevada de lo normal. Más detalles y comentarios al respecto pueden encontrarse en las secciones 14.1.2 y 15.1.4.

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
0	188	86,8	40,8	30,6	30,2	30,4	157,6	3,89	30,4
1	193	121,7	55,3	28,3	28,1	28,2	164,8	3,72	28,2
2	212,2	161,8	72,3	28,1	28,3	28,2	184,0	3,33	28,2
3	219	186,4	88,2	30,7	30,6	30,7	188,4	3,25	30,7
4	229	201,7	99,9	29,7	31,5	30,6	198,4	3,09	30,6
5	233,5	211,6	110,6	31,9	32,1	32,0	201,5	3,04	32,0
6	243,1	220,6	119,4	30,3	31,1	30,7	212,4	2,88	30,7
7	246	224,6	127,3	31,2	32,8	32,0	214,0	2,86	32,0
8	255	227,1	134	31,2	32,9	32,1	223,0	2,75	32,1
9	257,5	229,5	139,5	31,4	33,3	32,4	225,2	2,72	32,4
10	262,8	231,8	144,1	31,5	33,7	32,6	230,2	2,66	32,6
11	267,6	233,1	148,6	32	34,6	33,3	234,3	2,62	33,3
12	271	239,2	152,2	32,2	34,9	33,6	237,5	2,58	33,6
13	273,6	233,6	156	32,8	36,1	34,5	239,2	2,56	34,5
14	277,1	236,5	159,7	33,4	37,1	35,3	241,9	2,53	35,3
15	285	242,5	162,7	33,7	37,1	35,4	249,6	2,45	35,4
16	282,2	243	166,1	34,2	38,8	36,5	245,7	2,49	36,5
17	286,5	243,8	168,9	34,8	39,9	37,4	249,2	2,46	37,4
18	290	247,6	171,6	35,1	40,4	37,8	252,3	2,43	37,8
19	294,1	250,8	174,3	35,5	41,1	38,3	255,8	2,40	38,3
20	295	249,5	177,4	36,2	42,1	39,2	255,9	2,39	39,2
21	296,5	244,3	180,1	36,8	42,6	39,7	256,8	2,39	39,7
22	298,7	243	182,3	37,7	43,6	40,7	258,1	2,37	40,7

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
23	300,8	239,1	184,4	38,4	44,6	41,5	259,3	2,36	41,5
24	302,6	238,7	186,2	38,7	45,3	42,0	260,6	2,35	42,0
25	307	243,6	188,2	39,5	46,2	42,9	264,2	2,32	42,9
26	308	243,4	190,2	40,1	47,4	43,8	264,3	2,32	43,8
27	310,7	245,8	192,5	40,9	48,2	44,6	266,2	2,30	44,6
28	313	250	194,7	41,5	49,2	45,4	267,7	2,29	45,4
29	313,5	245,3	196,9	42,2	50,2	46,2	267,3	2,29	46,2
30	315,3	244,8	198,6	43	51,1	47,1	268,3	2,28	47,1
31	318	247,4	200,5	43,6	47,2	45,4	272,6	2,25	45,4
32	320	248,7	202,3	44,7	42,3	43,5	276,5	2,22	43,5
33	320,6	248	204,2	45,6	48,6	47,1	273,5	2,24	47,1
34	321,3	248,5	206,1	46,8	48,9	47,9	273,5	2,24	47,9
35	325,5	258,5	207,8	47,8	49,7	48,8	276,8	2,21	48,8
36	326	255,5	209,6	48,4	50,3	49,4	276,7	2,21	49,4
37	326,5	256,1	211,6	49,3	51,4	50,4	276,2	2,22	50,4
38	328,7	258,4	213,5	50,5	52,5	51,5	277,2	2,21	51,5
39	329	255,9	215,5	51,4	53,2	52,3	276,7	2,21	52,3
40	330	254,3	217,2	52,3	53,6	53,0	277,1	2,21	53,0
41	330,5	252,7	218,6	53,4	54,7	54,1	276,5	2,22	54,1
42	331,7	253,5	220	54,4	55,8	55,1	276,6	2,22	55,1
43	334,1	255,8	221,4	55,1	56,5	55,8	278,3	2,20	55,8
44	335	256,2	222,9	56,1	57,4	56,8	278,3	2,20	56,8
45	336,2	257,5	224,2	56,7	58,4	57,6	278,7	2,20	57,6
46	337	255,4	225,7	57,3	59,1	58,2	278,8	2,20	58,2
47	337,6	254,8	227	58,1	60,4	59,3	278,4	2,20	59,3
48	339,5	256	228,3	58,8	61,4	60,1	279,4	2,19	60,1
49	340,1	256,3	229,6	60,1	62,2	61,2	279,0	2,20	61,2
50	341,6	257,5	231,6	60,4	63,1	61,8	279,9	2,19	61,8
51	342,6	258	232,2	61,3	63,8	62,6	280,1	2,19	62,6
52	343,5	258,3	233,7	62,5	65,1	63,8	279,7	2,19	63,8
53	344,5	258,9	234,8	63,3	65,7	64,5	280,0	2,19	64,5
54	345,8	262,2	236,1	63,9	66,5	65,2	280,6	2,18	65,2
55	345,1	259,6	237,4	64,7	67,5	66,1	279,0	2,20	66,1
56	345,2	259,4	238,6	65,8	68,4	67,1	278,1	2,20	67,1
57	348,1	261,5	239,6	66,7	69	67,9	280,3	2,19	67,9
58	347,5	264,9	240,9	67,6	70,2	68,9	278,6	2,20	68,9
59	349,3	262,9	242	68,4	70,8	69,6	279,7	2,19	69,6
60	349,8	263,5	243,1	69,3	71,4	70,4	279,5	2,19	70,4
61	350,2	263	244,2	71,4	73,1	72,3	278,0	2,20	72,3
62	352	264,4	245,3	71,2	73,8	72,5	279,5	2,19	72,5

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
63	351,1	267,5	246,4	72,6	74,6	73,6	277,5	2,21	73,6
64	352	265,5	247,3	73,5	75,2	74,4	277,7	2,21	74,4
65	353,2	262,4	248,3	74,5	75,8	75,2	278,1	2,20	75,2
66	354,3	268,5	249,4	75,1	76,4	75,8	278,6	2,20	75,8
67	354	267,4	250,7	75,6	77,2	76,4	277,6	2,21	76,4
68	355	267,4	251,6	76,5	77,4	77,0	278,1	2,20	77,0
69	353,7	264,7	252,5	77,2	78,3	77,8	276,0	2,22	77,8
70	356,2	268	253,3	77,7	79,1	78,4	277,8	2,21	78,4
71	357,5	269,4	254,3	78,5	79,4	79,0	278,6	2,20	79,0
72	359,2	276,6	252,2	79,3	80	79,7	279,6	2,19	79,7
73	370,5	273,6	256,5	80,3	81,2	80,8	289,8	2,11	80,8
74	381,7	274,7	257,8	80,7	81,6	81,2	300,6	2,04	81,2
75	382,0	270	258,7	81,3	82,4	81,9	300,1	2,04	81,9
76	389,7	270,9	259,2	81,9	83,4	82,7	307,1	2,00	82,7
77	393,2	271,1	259,9	82,5	83,7	83,1	310,1	1,98	83,1
78	393,2	272	260,6	83	84,1	83,6	309,7	1,98	83,6
79	394,3	277,1	261,4	83,8	84,6	84,2	310,1	1,98	84,2
80	395,5	274,2	262,3	84,2	85,1	84,7	310,9	1,97	84,7
81	395	272,1	263,1	84,9	86	85,5	309,6	1,98	85,5
82	395,5	272,5	263,8	85,7	86,6	86,2	309,4	1,98	86,2
83	397	273,8	264,4	86,3	87,2	86,8	310,3	1,98	86,8
84	396,7	273,9	265,1	86,5	87,6	87,1	309,7	1,98	87,1
85	398,7	277,2	265,9	88,2	87,8	88,0	310,7	1,97	88,0
86	398,2	278,2	266,8	89	88,9	89,0	309,3	1,98	89,0
87	405,8	287,9	291,5	89,3	90,5	89,9	315,9	1,94	89,9
88	406,3	285,8	291,4	90,3	91,3	90,8	315,6	1,94	90,8
89	406,8	284,3	291,5	91,2	92,0	91,6	315,2	1,94	91,6
90	407,6	283,5	291,7	92,0	92,8	92,4	315,2	1,94	92,4
91	408,4	283,2	292,2	92,9	93,6	93,3	315,1	1,94	93,3
92	409,3	283,1	292,8	93,8	94,3	94,1	315,2	1,94	94,1
93	410,3	283,2	293,6	94,8	95,1	94,9	315,3	1,94	94,9
94	411,3	283,5	294,4	95,6	95,9	95,8	315,6	1,94	95,8
95	412,4	283,9	295,3	96,5	96,6	96,6	315,8	1,94	96,6
96	413,6	284,2	296,3	97,4	97,4	97,4	316,2	1,94	97,4
97	414,8	284,6	297,4	98,3	98,2	98,2	316,5	1,94	98,2
98	416,0	285,1	298,5	99,2	98,9	99,0	316,9	1,93	99,0
99	417,3	285,5	299,6	100,0	99,6	99,8	317,4	1,93	99,8
100	418,6	286,0	300,7	100,9	100,4	100,6	317,9	1,93	100,6
101	419,9	286,5	301,8	101,7	101,1	101,4	318,4	1,92	101,4
102	421,2	286,9	303,0	102,6	101,9	102,2	318,9	1,92	102,2

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 15 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	T _{prom} (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT _a (°C)
103	422,7	287,5	304,2	103,4	102,6	103,0	319,6	1,92	103,0
104	424,0	288,1	305,4	104,3	103,4	103,8	320,2	1,91	103,8
105	425,4	288,7	306,6	105,1	104,2	104,6	320,8	1,91	104,6
106	426,9	289,4	307,9	105,9	104,9	105,4	321,4	1,91	105,4
107	428,4	290,1	309,1	106,8	105,7	106,2	322,1	1,90	106,2
108	429,8	290,8	310,4	107,6	106,5	107,0	322,8	1,90	107,0
109	431,3	291,4	311,6	108,4	107,2	107,8	323,5	1,89	107,8
110	432,8	292,0	312,9	109,2	108,0	108,6	324,2	1,89	108,6
111	434,3	292,5	314,2	110,0	108,8	109,4	324,9	1,89	109,4
112	435,8	292,9	315,5	110,8	109,6	110,2	325,6	1,88	110,2
113	437,4	293,4	316,8	111,6	110,4	111,0	326,4	1,88	111,0
114	439,0	293,9	318,1	112,4	111,2	111,8	327,2	1,87	111,8
115	440,6	294,4	319,5	113,2	112,0	112,6	328,0	1,87	112,6
116	442,3	295,1	320,8	114,0	112,9	113,4	328,8	1,86	113,4
117	443,9	295,6	322,1	114,8	113,7	114,2	329,6	1,86	114,2
118	445,5	296,0	323,5	115,5	114,6	115,0	330,5	1,85	115,0
119	447,2	296,6	324,8	116,3	115,3	115,8	331,4	1,85	115,8
120	448,9	297,1	326,2	117,1	115,9	116,5	332,4	1,84	116,5

Tabla 9. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 15 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

En esta corrida ocurrió una falla eléctrica a los 86 minutos, lo que provocaría que los datos de todas las mediciones a partir de este punto tuvieran que ser estimados a partir de la tendencia lineal expresada hasta el momento donde se pudieron llevar a cabo las mediciones, ahí la explicación de los picos registrados en dicho tiempo, y por qué la temperatura del boquete, termina siendo más alta que la acero misma (los datos estimados se han resaltado en azul).

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
0	197,1	28,6	26,8	28,1	28,3	28,2	168,9	4,58	3,55
1	202,4	33,4	28,1	28,7	29,1	28,9	173,5	4,46	3,80
2	214,5	38,9	28,7	28,5	29	28,75	185,8	4,16	3,90
3	223,8	44,9	29,5	28,4	28,8	28,6	195,2	3,96	4,45
4	233,1	50,3	30,5	28,5	29,2	28,85	204,3	3,78	4,95
5	241,3	55,6	31,6	28,9	29,1	29	212,3	3,64	5,40
6	248,2	60,5	32,9	28,8	29,4	29,1	219,1	3,53	5,55
7	255,1	65,1	34,5	28,8	29,5	29,15	226,0	3,42	6,45
8	260,3	69,4	36,6	29,1	30,5	29,8	230,5	3,35	6,70
9	265,1	73,4	37,9	29,5	30,1	29,8	235,3	3,29	6,85
10	269,7	77,2	39,8	29,4	30,7	30,05	239,7	3,23	6,90
11	274,6	81,3	42	29,8	30,1	29,95	244,7	3,16	7,55
12	278,3	85,2	44	30,1	31,6	30,85	247,5	3,12	8,00
13	282,5	88,8	46,1	30,4	31,6	31	251,5	3,07	8,45
14	286,5	92,6	48,3	30,1	32,4	31,25	255,3	3,03	8,65
15	290	95,8	50,2	30,7	32,8	31,75	258,3	2,99	8,75
16	294,1	99,7	52,6	31	33,1	32,05	262,1	2,95	9,00
17	293	103,6	55,2	31,4	32	31,7	261,3	2,96	9,95
18	387,3	105,7	57,2	31,7	33,4	32,55	354,8	2,18	10,85
19	387,5	108,6	58,5	32	33,4	32,7	354,8	2,18	10,85
20	386,8	112,1	61	32,8	34,7	33,75	353,1	2,19	11,55
21	389,3	114,7	62,7	32,5	35	33,75	355,6	2,17	11,90
22	389,5	117,5	64,8	33,9	37	35,45	354,1	2,18	12,45
23	390,6	120,1	66,7	34,6	38	36,3	354,3	2,18	13,00
24	391,1	122,7	68,6	34,4	38,5	36,45	354,7	2,18	13,40
25	393,2	124,9	70,4	34,6	39,2	36,9	356,3	2,17	13,95
26	393,5	127,1	72	35,1	39,6	37,35	356,2	2,17	14,20
27	397,5	129	73,7	35,5	40,6	38,05	359,5	2,15	15,35
28	395,5	130,5	75,3	36	41,4	38,7	356,8	2,17	16,10
29	397,2	132,6	76,9	36,2	42,3	39,25	358,0	2,16	16,60
30	398,2	134,7	78,5	36,6	42,6	39,6	358,6	2,16	17,00
31	399,3	136,8	80,2	37,2	43,1	40,15	359,2	2,15	17,05
32	400,5	138,9	81,6	37,9	44	40,95	359,6	2,15	18,10
33	401,8	141,4	83,1	38,9	44,9	41,9	359,9	2,15	18,45
34	404,4	144,1	84,8	38,7	45,2	41,95	362,5	2,13	18,85
35	403,3	146,4	87	44,3	46,9	45,6	357,7	2,16	19,95
36	404,8	148,5	88,2	45,6	45	45,3	359,5	2,15	20,70
37	405,7	150,4	89,7	47,5	45,3	46,4	359,3	2,15	20,85
38	406,5	152,3	91,3	48,1	46,1	47,1	359,4	2,15	21,60
39	409,7	154,2	92,8	49,1	46,7	47,9	361,8	2,14	23,30

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
40	408,3	155,8	94,3	50,6	47,8	49,2	359,1	2,15	23,40
41	409	157,5	95,7	50,6	48	49,3	359,7	2,15	24,50
42	410,3	159,2	97	51,4	48,9	50,15	360,2	2,15	25,55
43	412,3	160,8	98,34	51,8	49,7	50,75	361,6	2,14	25,70
44	412,7	162,6	100	52,8	50,5	51,65	361,1	2,14	26,55
45	413	164,2	101,4	53,1	50,9	52	361,0	2,14	27,25
46	415,3	165,6	102,4	54	51,7	52,85	362,5	2,13	27,60
47	415,7	167,3	103,8	54,8	52,3	53,55	362,2	2,13	27,90
48	416	168,8	105,1	55,2	52,9	54,05	362,0	2,14	28,50
49	418,3	170,4	106	55,6	53,7	54,65	363,7	2,13	29,70
50	418,5	172	107,3	56,4	54,7	55,55	363,0	2,13	30,15
51	419,1	173,6	108,8	57,7	55,3	56,5	362,6	2,13	31,10
52	419,5	175,1	110,2	57,9	55,9	56,9	362,6	2,13	31,75
53	421,1	176,9	111,6	59	57	58	363,1	2,13	32,25
54	423,5	178	112,4	59,4	57,1	58,25	365,3	2,12	33,15
55	424,1	179,6	113,5	60,1	58	59,05	365,1	2,12	33,50
56	424,3	181	114,4	60,6	58,4	59,5	364,8	2,12	34,55
57	423,8	182,7	115,2	61,4	59,4	60,4	363,4	2,13	34,90
58	424,2	183,8	115,9	62,4	60	61,2	363,0	2,13	35,40
59	424,5	185,3	116,9	62,7	60,7	61,7	362,8	2,13	36,05
60	425,5	186,7	117,6	63,2	61	62,1	363,4	2,13	36,20
61	426,2	188,2	118,5	64	61,7	62,85	363,4	2,13	37,90
62	426,5	189,5	119,2	64,5	62,2	63,35	363,2	2,13	38,25
63	427,3	191	120,2	64,5	62,7	63,6	363,7	2,13	38,95
64	427,5	192,1	120,9	64,6	62,7	63,65	363,9	2,12	41,35
65	428,2	193,7	121,7	65,4	63,5	64,45	363,8	2,13	40,65
66	428,5	195,5	122,8	66,3	64,3	65,3	363,2	2,13	40,95
67	429,5	197,6	123,9	65,5	64,9	65,2	364,3	2,12	41,35
68	430,3	199,1	124,4	66,1	65,8	65,95	364,4	2,12	42,10
69	431,2	200,8	125,3	67	66,5	66,75	364,5	2,12	42,85
70	431,5	201,8	125,9	67,4	66,2	66,8	364,7	2,12	43,60
71	431,1	203,3	127	68,1	67,6	67,85	363,3	2,13	44,60
72	432	204,5	128	68,9	68,5	68,7	363,3	2,13	44,60
73	432,2	205,8	128,6	69,5	68,8	69,15	363,1	2,13	45,20
74	431,6	207,2	129,6	70,1	69,5	69,8	361,8	2,14	45,65
75	431,6	208,7	130,5	70,8	70,3	70,55	361,1	2,14	46,05
76	432,2	209,8	131,3	71,6	70,6	71,1	361,1	2,14	46,35
77	432,5	211	132	71,9	71,3	71,6	360,9	2,14	47,10
78	433,1	212,4	132,8	72,5	71,9	72,2	360,9	2,14	47,10
79	433,5	213,4	133,3	72,9	72,3	72,6	360,9	2,14	47,70

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
80	433,1	214,8	134,1	73,8	72,9	73,35	359,8	2,15	48,65
81	433,7	216	134,7	76	73,5	74,75	359,0	2,15	49,15
82	434,5	217,4	135,3	76,6	74,5	75,55	359,0	2,15	49,20
83	434,4	218,5	135,9	77,6	75	76,3	358,1	2,16	49,75
84	435,1	219,8	136,8	77,9	75,3	76,6	358,5	2,16	50,15
85	434,7	221,2	137,5	78,5	76	77,25	357,5	2,16	50,85
86	435,2	222,1	138,1	78,7	76,3	77,5	357,7	2,16	51,75
87	435,1	223,2	138,8	79,6	76,9	78,25	356,9	2,17	52,10
88	435,6	224,4	139,5	80,1	77,5	78,8	356,8	2,17	52,50
89	436,1	225,5	140,1	80,9	77,7	79,3	356,8	2,17	52,75
90	436,2	226,8	141	80,2	77,8	79	357,2	2,16	54,50
91	436,1	227,9	141,5	80,5	77,9	79,2	356,9	2,17	55,10
92	436,1	229,3	142,2	82,9	80	81,45	354,7	2,18	55,80
93	436,1	230,3	142,9	83,3	80,5	81,9	354,2	2,18	56,15
94	436,6	231,3	143,2	84,1	81	82,55	354,1	2,18	56,45
95	437,1	232,7	143,9	84,7	81,5	83,1	354,0	2,18	57,45
96	437,1	233,4	144,1	84,9	81,8	83,35	353,8	2,19	58,00
97	437,5	234,5	144,7	85,2	82,1	83,65	353,9	2,18	58,25
98	437,5	235,5	145,4	85,8	82,6	84,2	353,3	2,19	58,70
99	437,5	236,2	145,8	86	82,9	84,45	353,1	2,19	59,00
100	438	237,8	146,3	86,7	83,5	85,1	352,9	2,19	59,50
101	438,3	238,6	146,7	87,4	83,8	85,6	352,7	2,19	59,90
102	438,2	239,6	147,4	87,3	84,1	85,7	352,5	2,19	60,50
103	438,3	240,6	148	87,7	84,5	86,1	352,2	2,19	60,95
104	438,2	241,7	148,6	88,2	85,3	86,75	351,5	2,20	61,00
105	439	242,7	149,1	88,7	85,3	87	352,0	2,20	61,45
106	438,1	243,5	149,6	89	85,6	87,3	350,8	2,20	61,95
107	439,1	244,4	150,2	89,8	86	87,9	351,2	2,20	62,15
108	439,6	245,4	150,9	90,1	86,8	88,45	351,2	2,20	62,50
109	439,1	246,4	151,5	90,2	87	88,6	350,5	2,21	62,45
110	439,7	247,2	151,9	90,9	87,4	89,15	350,6	2,21	62,80
111	440	248,2	152,1	91,3	87,6	89,45	350,6	2,21	62,55
112	440,2	249	152,5	92	87,9	89,95	350,3	2,21	63,25
113	440,1	250	153,1	92,3	88,7	90,5	349,6	2,21	63,40
114	439,1	250,9	153,6	92,6	89	90,8	348,3	2,22	63,60
115	439,6	251,8	153,9	93	89,2	91,1	348,5	2,22	64,15
116	440,1	252,6	154,1	93,5	89,3	91,4	348,7	2,22	64,85
117	440,5	253,4	154,4	93,6	89,8	91,7	348,8	2,22	64,75
118	440,8	254,2	154,8	94	90,1	92,05	348,8	2,22	64,95
119	441,1	254,9	155,2	94,3	90,5	92,4	348,7	2,22	65,50

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
120	441,2	255	155,6	94,6	90,8	92,7	348,5	2,22	65,60

Tabla 10. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 20 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015).

Aquí los resultados fueron los esperados en términos de la tendencia esperable para todas las curvas (ver imagen correspondiente en la sección 14.1.2), y aparte del pico atípico registrado en la curva de la temperatura de la superficie expuesta a los 17 minutos (se le atribuye a haber movido el punto de medición del termómetro laser de un lugar más frío a uno más caliente) el resto de datos se comportan de manera similar a la segunda corrida, lo que nos lleva a pensar que los datos obtenidos son los correctos para este espesor, tal como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
1	216,1	42	30,7	29	28,1	28,55	187,6	4,12	3,55
2	231,1	52	32,1	29	28,6	28,8	202,3	3,82	3,80
3	248,5	61,6	33,8	28,8	29	28,9	219,6	3,52	3,90
4	262,8	69,9	35,5	29,4	29,5	29,45	233,4	3,31	4,45
5	276,1	77,3	37,6	29,8	30,1	29,95	246,2	3,14	4,95
6	287,7	83,8	38,6	30,4	30,4	30,4	257,3	3,00	5,40
7	299,3	91,5	41,2	30,3	30,8	30,55	268,8	2,88	5,55
8	307,5	97,1	43,2	31,2	31,7	31,45	276,1	2,80	6,45
9	315,8	103,4	45,7	31,8	31,6	31,7	284,1	2,72	6,70
10	322,3	109,1	48	31,8	31,9	31,85	290,5	2,66	6,85
11	327,5	112,8	49,7	32,1	31,7	31,9	295,6	2,62	6,90
12	333,3	116,5	51,7	32,9	32,2	32,55	300,8	2,57	7,55
13	339,1	120,4	54,1	33,2	32,8	33	306,1	2,53	8,00
14	343,5	123,7	56,2	33,7	33,2	33,45	310,1	2,49	8,45
15	347,1	126,8	58,5	33,8	33,5	33,65	313,5	2,47	8,65

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
16	351,5	129,4	60,4	34	33,5	33,75	317,8	2,43	8,75
17	355,1	132,8	62,9	34,1	33,9	34	321,1	2,41	9,00
18	359,1	137,6	65	35,2	34,7	34,95	324,2	2,38	9,95
19	362,5	141,7	67,3	36,2	35,5	35,85	326,7	2,37	10,85
20	366,5	145,9	69,7	35,9	35,8	35,85	330,7	2,34	10,85
21	369,8	149,7	72	36,9	36,2	36,55	333,3	2,32	11,55
22	373,1	152,8	74	37,1	36,7	36,9	336,2	2,30	11,90
23	376,3	155,9	76,3	37,6	37,3	37,45	338,9	2,28	12,45
24	379,3	158,8	78,4	38,1	37,9	38	341,3	2,26	13,00
25	382,1	161,6	80,7	38,2	38,6	38,4	343,7	2,25	13,40
26	385,2	164,4	83	38,9	39	38,95	346,3	2,23	13,95
27	387,2	167,3	85,3	39,3	39,1	39,2	348,0	2,22	14,20
28	390,6	169,7	87,2	40,6	40,1	40,35	350,3	2,21	15,35
29	392,5	172,4	89,2	40,9	41,3	41,1	351,4	2,20	16,10
30	396,1	174,9	91,3	41,4	41,8	41,6	354,5	2,18	16,60
31	397,6	177	93,2	41,4	42,6	42	355,6	2,17	17,00
32	399,7	179	95	41,4	42,7	42,05	357,7	2,16	17,05
33	400,6	181,6	97	42,9	43,3	43,1	357,5	2,16	18,10
34	403,2	184,8	99,3	42,6	44,3	43,45	359,8	2,15	18,45
35	404,2	186,5	100,6	43,1	44,6	43,85	360,4	2,15	18,85
36	406,3	189,1	102,3	44,6	45,3	44,95	361,4	2,14	19,95
37	407,7	191,5	104,2	45,1	46,3	45,7	362,0	2,14	20,70
38	409,5	193,9	105,8	45,3	46,4	45,85	363,7	2,13	20,85
39	411,2	196,2	107,2	45,7	47,5	46,6	364,6	2,12	21,60
40	412,2	196,6	108,7	50	46,6	48,3	363,9	2,12	23,30
41	414,1	201,1	110,2	50,3	46,5	48,4	365,7	2,11	23,40
42	415,3	203,3	111,4	51,3	47,7	49,5	365,8	2,11	24,50
43	417,1	205,5	112,7	52,6	48,5	50,55	366,6	2,11	25,55
44	418,5	207,4	114	52,8	48,6	50,7	367,8	2,10	25,70
45	419,8	209,6	115,3	53,7	49,4	51,55	368,3	2,10	26,55
46	420,7	210,9	116,4	54,2	50,3	52,25	368,5	2,10	27,25
47	422,1	213	117,8	54,7	50,5	52,6	369,5	2,09	27,60
48	423,5	214,8	119	55	50,8	52,9	370,6	2,09	27,90
49	424,2	216,8	120,3	55,9	51,1	53,5	370,7	2,09	28,50
50	425,2	218,9	121,6	56,9	52,5	54,7	370,5	2,09	29,70
51	426,3	220,5	122,7	57	53,3	55,15	371,2	2,08	30,15
52	427,1	222,4	124,1	58,2	54	56,1	371,0	2,08	31,10
53	428,5	224,2	125,2	58,9	54,6	56,75	371,8	2,08	31,75
54	429,8	225,9	127,4	59,3	55,2	57,25	372,6	2,07	32,25
55	430,8	227,9	128,9	60,2	56,1	58,15	372,7	2,07	33,15

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
56	431,6	229,3	130,2	60,6	56,4	58,5	373,1	2,07	33,50
57	431,6	231,5	131,6	61,7	57,4	59,55	372,1	2,08	34,55
58	432,2	233,2	132,5	62,2	57,6	59,9	372,3	2,08	34,90
59	433,3	234,8	133,3	62,5	58,3	60,4	372,9	2,07	35,40
60	434,2	236,7	134,5	63,4	58,7	61,05	373,2	2,07	36,05
61	435,1	238,3	135,5	63,5	58,9	61,2	373,9	2,07	36,20
62	436,1	239,9	136,9	64,3	61,5	62,9	373,2	2,07	37,90
63	436,3	241,6	137,9	64,6	61,9	63,25	373,1	2,07	38,25
64	437,1	242,8	138,6	65,5	62,4	63,95	373,2	2,07	38,95
65	438,1	244,7	140	66,4	66,3	66,35	371,8	2,08	41,35
66	438,1	246,2	140,9	67,6	63,7	65,65	372,5	2,08	40,65
67	439,1	247,6	141,9	67,6	64,3	65,95	373,2	2,07	40,95
68	439,3	249,2	143	68,2	64,5	66,35	373,0	2,07	41,35
69	440	250,5	143,9	68,9	65,3	67,1	372,9	2,07	42,10
70	440,5	251,8	144,8	68,8	66,9	67,85	372,7	2,07	42,85
71	441,1	253,4	145,9	69,6	67,6	68,6	372,5	2,08	43,60
72	441,5	254,6	146,7	70,4	68,8	69,6	371,9	2,08	44,60
73	441,6	256,1	147,5	70,8	68,4	69,6	372,0	2,08	44,60
74	442,1	257,8	148,4	71,3	69,1	70,2	371,9	2,08	45,20
75	443,1	259,3	149,5	71,8	69,5	70,65	372,5	2,08	45,65
76	443,5	260,9	150,5	72,3	69,8	71,05	372,5	2,08	46,05
77	443,7	262	151,2	72,6	70,1	71,35	372,4	2,08	46,35
78	444,3	263,3	152	73,6	70,6	72,1	372,2	2,08	47,10
79	445,1	264,8	152,9	73,8	70,4	72,1	373,0	2,07	47,10
80	446,1	265,9	153,6	74,1	71,3	72,7	373,4	2,07	47,70
81	446,1	267,1	154,4	75,2	72,1	73,65	372,5	2,08	48,65
82	446,3	268,5	155,1	75,4	72,9	74,15	372,2	2,08	49,15
83	446,1	269,8	155,7	75,6	72,8	74,2	371,9	2,08	49,20
84	446,3	271,3	156,3	76,4	73,1	74,75	371,6	2,08	49,75
85	447,1	272,6	157	76,6	73,7	75,15	372,0	2,08	50,15
86	447,3	273,9	157,7	77,5	74,2	75,85	371,5	2,08	50,85
87	447,8	275,4	158,5	78,3	75,2	76,75	371,1	2,08	51,75
88	448,1	276,3	159,2	78,7	75,5	77,1	371,0	2,08	52,10
89	448,8	277,1	159,9	79,3	75,7	77,5	371,3	2,08	52,50
90	449,1	278,2	160,6	79,3	76,2	77,75	371,4	2,08	52,75
91	449,3	280	162,4	81,3	77,7	79,5	369,8	2,09	54,50
92	450,1	281	163,4	81,8	78,4	80,1	370,0	2,09	55,10
93	450,3	281,9	164,2	82,7	78,9	80,8	369,5	2,09	55,80
94	450,6	282,7	164,8	83,1	79,2	81,15	369,5	2,09	56,15
95	451,1	283,6	165,5	83,6	79,3	81,45	369,7	2,09	56,45

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 20 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
96	451,3	284,3	166,1	84,6	80,3	82,45	368,9	2,10	57,45
97	451,5	285,4	166,9	85,3	80,7	83	368,5	2,10	58,00
98	451,3	286,3	167,3	85,8	80,7	83,25	368,1	2,10	58,25
99	451,6	287,2	167,9	86,3	81,1	83,7	367,9	2,10	58,70
100	452,2	288,6	168,4	86,7	81,3	84	368,2	2,10	59,00
101	452,1	288,9	169	87,2	81,8	84,5	367,6	2,10	59,50
102	452,5	290,4	169,8	87,7	82,1	84,9	367,6	2,10	59,90
103	452,5	291,2	170,2	88,3	82,7	85,5	367,0	2,11	60,50
104	452,5	292,1	170,7	88,9	83	85,95	366,6	2,11	60,95
105	452,6	293,2	171,1	88,8	83,2	86	366,6	2,11	61,00
106	452,8	294,3	171,6	89,4	83,5	86,45	366,4	2,11	61,45
107	453,3	295,1	172	89,7	84,2	86,95	366,4	2,11	61,95
108	453,6	295,8	172,5	89,7	84,6	87,15	366,5	2,11	62,15
109	453,8	296,6	173	90,1	84,9	87,5	366,3	2,11	62,50
110	453,7	297,7	173,6	90,4	84,5	87,45	366,3	2,11	62,45
111	454,2	298,3	174,2	90,6	85	87,8	366,4	2,11	62,80
112	454,6	299	174,8	90,3	84,8	87,55	367,1	2,11	62,55
113	455,1	299,5	175,2	91,5	85	88,25	366,9	2,11	63,25
114	455,3	300,2	175,7	91,4	85,4	88,4	366,9	2,11	63,40
115	455,1	300,8	176,1	91,5	85,7	88,6	366,5	2,11	63,60
116	455,5	301,6	176,6	91,7	86,6	89,15	366,4	2,11	64,15
117	456	302,3	177,3	92,4	87,3	89,85	366,2	2,11	64,85
118	456,1	303	177,8	92,6	86,9	89,75	366,4	2,11	64,75
119	456,5	303,7	178,2	92,6	87,3	89,95	366,6	2,11	64,95
120	456,6	304,5	178,6	93,6	87,4	90,5	366,1	2,11	65,50

Tabla 11. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 20 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

Nuevamente los resultados fueron congruentes al compararse con la otra losa del mismo espesor probada bajo condiciones similares, el experimento transcurrió de manera ininterrumpida y sin novedades durante las 2 horas de la prueba.

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 25 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
0	195,1	25,8	26,5	26,7	27,2	26,95	168,2	5,78	-0,05
1	221,1	27,5	26,6	27,3	26,8	27,05	194,1	5,01	0,05
2	240,6	31,1	26,9	27,3	27,2	27,25	213,4	4,56	0,25
3	257,3	35,8	27,3	27,2	27,1	27,15	230,2	4,23	0,15
4	271,3	41,1	27,9	27,4	27,3	27,35	244,0	3,99	0,35
5	283,3	46,8	28,7	27,5	27,3	27,4	255,9	3,80	0,40
6	295,2	52,2	29,6	28	27,6	27,8	267,4	3,64	0,80
7	304,3	57,5	30,6	27,6	27,4	27,5	276,8	3,51	0,50
8	312,4	62,7	32	28,3	28,1	28,2	284,2	3,42	1,20
9	319,3	67,4	33,4	28,5	28,4	28,45	290,9	3,34	1,45
10	326,5	72	34,9	29,7	28,7	29,2	297,3	3,27	2,20
11	333,1	75,8	36,5	28,8	28,7	28,75	304,4	3,20	1,75
12	339,5	78,9	38,1	28,8	28,6	28,7	310,8	3,13	1,70
13	344,1	82,3	39,8	30,1	29,7	29,9	314,2	3,10	2,90
14	350,1	85,9	41,6	30,1	30	30,05	320,1	3,04	3,05
15	353,3	89,6	43,4	30,2	30,1	30,15	323,2	3,01	3,15
16	358,7	92,4	45,1	30,7	30,5	30,6	328,1	2,96	3,60
17	363,5	94,8	46,9	31,4	31,3	31,35	332,2	2,93	4,35
18	367,5	95,4	48,7	31,4	31,1	31,25	336,3	2,89	4,25
19	371,6	97,6	50,4	31,8	31,6	31,7	339,9	2,86	4,70
20	375,3	99,2	53,5	32,1	32,3	32,2	343,1	2,83	5,20
21	378,3	99,5	54	32,3	32,6	32,45	345,9	2,81	5,45
22	380,5	100,2	55,6	32,5	32,3	32,4	348,1	2,79	5,40
23	383,7	101,6	57,4	32,5	32,5	32,5	351,2	2,77	5,50
24	386,5	108,9	59	33,4	33,6	33,5	353,0	2,76	6,50
25	389,2	117,9	60,6	34,2	33,9	34,05	355,2	2,74	7,05
26	392,7	122,5	62,2	34,4	34,2	34,3	358,4	2,71	7,30
27	394,6	126,1	63,7	34,3	34,5	34,4	360,2	2,70	7,40
28	397,2	128,8	65,2	34,9	35,4	35,15	362,1	2,69	8,15
29	399,2	131,5	66,7	36,3	35,1	35,7	363,5	2,68	8,70
30	401,2	134,1	68,6	37,1	35,8	36,45	364,8	2,67	9,45
31	404,3	136,5	69,3	37,2	36,8	37	367,3	2,65	10,00
32	406,3	138,4	70,7	38,2	38,1	38,15	368,2	2,64	11,15
33	408,5	140,5	72,2	38,4	38,6	38,5	370,0	2,63	11,50
34	410,3	142,3	73,4	39,2	39,1	39,15	371,2	2,62	12,15
35	411,8	144,3	74,7	39,5	39,3	39,4	372,4	2,61	12,40
36	414,2	146,2	76,1	40,1	39	39,55	374,7	2,60	12,55
37	415,8	147,9	77,3	40,5	39,8	40,15	375,7	2,59	13,15
38	417	149,6	78,2	41,1	40,3	40,7	376,3	2,58	13,70
39	419,1	151,2	79,3	41,4	40,8	41,1	378,0	2,57	14,10

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 25 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
40	420,8	152,9	80,5	41,8	41,1	41,45	379,4	2,56	14,45
41	423,1	154,5	81,8	42,3	41,4	41,85	381,3	2,55	14,85
42	424,6	156,2	83,1	42,7	41,7	42,2	382,4	2,54	15,20
43	425,5	157,9	84,1	43,3	42,7	43	382,5	2,54	16,00
44	426,2	159,7	85,2	44,1	43,2	43,65	382,6	2,54	16,65
45	428	161,5	86,5	44,5	43,5	44	384,0	2,53	17,00
46	428,5	163,3	87,6	44,8	43,9	44,35	384,2	2,53	17,35
47	430,2	165,1	88,5	45,3	44,8	45,05	385,2	2,53	18,05
48	432,1	167	89,3	45,8	44,7	45,25	386,9	2,51	18,25
49	433,5	168,8	89,9	46,7	45,5	46,1	387,4	2,51	19,10
50	434,8	170,9	90,6	47,5	46,2	46,85	388,0	2,51	19,85
51	436,5	173	91,3	47,7	47,1	47,4	389,1	2,50	20,40
52	437,1	175	92,1	47,7	47,1	47,4	389,7	2,50	20,40
53	439,6	176,8	92,7	48,5	48,2	48,35	391,3	2,49	21,35
54	440,8	178,8	93,5	49,6	48,9	49,25	391,6	2,48	22,25
55	441,7	180,8	94,5	50,1	49,5	49,8	391,9	2,48	22,80
56	443,5	182,5	95	50,7	50,2	50,45	393,1	2,47	23,45
57	443,1	184,5	95,8	51,3	50,8	51,05	392,1	2,48	24,05
58	444,8	186,2	96,5	51,5	51,3	51,4	393,4	2,47	24,40
59	446,2	187,9	97,5	51,7	51,2	51,45	394,8	2,46	24,45
60	447,1	189,7	98,5	51,8	51,7	51,75	395,4	2,46	24,75
61	448,6	191,6	99,8	52,4	52,5	52,45	396,2	2,46	25,45
62	448,6	193,3	100,7	53,1	52,3	52,7	395,9	2,46	25,70
63	449,7	194,9	101,8	53,9	52,6	53,25	396,5	2,45	26,25
64	450,7	196,4	102,6	54,1	53,1	53,6	397,1	2,45	26,60
65	451,5	198,1	103,8	54,9	53,7	54,3	397,2	2,45	27,30
66	452,2	199,7	104,5	55,1	53,7	54,4	397,8	2,44	27,40
67	453,2	201,3	105,2	55,4	54,2	54,8	398,4	2,44	27,80
68	455,3	203	105,9	55,8	54,7	55,25	400,1	2,43	28,25
69	454,3	204,3	106,6	56,2	54,9	55,55	398,8	2,44	28,55
70	456,1	205,7	107,8	57	55,6	56,3	399,8	2,43	29,30
71	457,5	207,2	108,4	57,5	56,4	56,95	400,6	2,43	29,95
72	457,8	208,8	109,2	58,1	56,7	57,4	400,4	2,43	30,40
73	459	210,1	110	58,7	57,1	57,9	401,1	2,42	30,90
74	460,1	211,5	110,8	59,1	57,7	58,4	401,7	2,42	31,40
75	459,7	213	111,3	59,2	58,1	58,65	401,1	2,43	31,65
76	461	214,2	111,9	59,8	58,3	59,05	402,0	2,42	32,05
77	462,5	215,7	112,6	60,3	58,9	59,6	402,9	2,41	32,60
78	462,1	216,9	113,2	60,3	58,9	59,6	402,5	2,42	32,60
79	462,6	218,3	113,9	60,7	59,2	59,95	402,7	2,42	32,95

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 25 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
80	463,2	219,8	114,4	61,3	60	60,65	402,6	2,42	33,65
81	463,3	220,9	114,9	61,4	60,9	61,15	402,2	2,42	34,15
82	463,3	222,2	115,7	61,6	60,9	61,25	402,1	2,42	34,25
83	464	223,5	116,3	62,3	61,9	62,1	401,9	2,42	35,10
84	464,5	224,8	117,2	62,9	62,3	62,6	401,9	2,42	35,60
85	463,1	226,1	117,8	63,4	62,9	63,15	400,0	2,43	36,15
86	463,3	227,6	118,8	64,1	63,4	63,75	399,6	2,43	36,75
87	464,2	228,5	119,5	64,7	63,6	64,15	400,1	2,43	37,15
88	465	229,6	120	65	63,9	64,45	400,6	2,43	37,45
89	464,5	230,8	120,5	64,9	63,8	64,35	400,2	2,43	37,35
90	463,6	232	121	65,5	64,2	64,85	398,8	2,44	37,85
91	464,1	233,2	121,5	65,7	64,8	65,25	398,9	2,44	38,25
92	465,1	234,3	122,3	66	64,7	65,35	399,8	2,43	38,35
93	466,5	235,6	122,8	66,5	65,1	65,8	400,7	2,43	38,80
94	466,3	236,6	123,3	67,1	65,7	66,4	399,9	2,43	39,40
95	465,8	237,8	123,8	67,5	66,1	66,8	399,0	2,44	39,80
96	466,5	239	124,6	67,7	66,5	67,1	399,4	2,44	40,10
97	467,1	240,1	124,8	67,9	66,8	67,35	399,8	2,43	40,35
98	466,7	241,2	125,1	68,1	67	67,55	399,2	2,44	40,55
99	468,2	242,2	125,7	68,5	67,7	68,1	400,1	2,43	41,10
100	468,5	243,4	126,8	69,2	68,1	68,65	399,9	2,43	41,65
101	468,6	244,5	127,2	69,6	68,5	69,05	399,6	2,43	42,05
102	468,7	245,6	127,5	69,6	68,2	68,9	399,8	2,43	41,90
103	468,5	246,6	127,9	70,2	69,1	69,65	398,9	2,44	42,65
104	467,5	247,6	128,3	70,4	69,3	69,85	397,7	2,45	42,85
105	469,5	248,6	128,8	70,5	69,7	70,1	399,4	2,44	43,10
106	467,5	249,7	129,3	70,6	69,8	70,2	397,3	2,45	43,20
107	470,1	250,6	129,8	70,1	69,7	69,9	400,2	2,43	42,90
108	470,5	251,6	130,3	70,4	70,2	70,3	400,2	2,43	43,30
109	469,2	252,5	130,8	71,3	70,9	71,1	398,1	2,44	44,10
110	471,6	253,5	131,4	71,6	71,2	71,4	400,2	2,43	44,40
111	471,6	254,5	131,9	72,4	71,8	72,1	399,5	2,43	45,10
112	470,1	255,5	132,3	72,3	72,2	72,25	397,9	2,44	45,25
113	472	256,3	132,9	72,8	72,4	72,6	399,4	2,44	45,60
114	472,5	257,2	133,2	73,6	72,3	72,95	399,6	2,43	45,95
115	472,1	258,1	133,5	74	72,9	73,45	398,7	2,44	46,45
116	471,1	259	133,8	74,2	73,2	73,7	397,4	2,45	46,70
117	472,1	259,9	134,2	74,3	73,5	73,9	398,2	2,44	46,90
118	473,1	260,7	134,7	75	74	74,5	398,6	2,44	47,50
119	473,1	261,7	135,4	75,2	74,3	74,75	398,4	2,44	47,75

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco de 25 cm de espesor (Corrida #1).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
120	472,3	262,5	135,7	75,2	74,3	74,75	397,6	2,45	47,75

Tabla 12. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 25 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015).

Para el primer experimento de 25 cm de espesor, no hubo anomalías, y el comportamiento de las gráficas obtenidas a partir de la siguiente tabla, tal y como se puede apreciar en la sección 14.1.2, y las tendencias del comportamiento de todas las curvas, se asemejan a otros espesores, así como a la segunda prueba del mismo espesor.

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco 25 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
0	169,5	28,3	30,8	31,6	32,8	32,2	137,3	7,44	4,20
1	200,2	29,6	31,3	32,2	32,4	32,3	167,9	6,08	4,30
2	224,2	33,6	32	32,1	33	32,55	191,7	5,33	4,55
3	244,1	38,3	32,5	32,3	33,2	32,75	211,4	4,83	4,75
4	260,5	43,4	33,3	32,1	33,2	32,65	227,9	4,48	4,65
5	275,1	48,9	44,1	32	33,3	32,65	242,5	4,21	4,65
6	288	54,3	35,1	32,4	33,2	32,8	255,2	4,00	4,80
7	298,7	59,4	36,1	32,3	33,4	32,85	265,9	3,84	4,85
8	308,5	64,4	37,2	32,5	33,1	32,8	275,7	3,70	4,80
9	317,3	69,1	38,3	32,6	33,3	32,95	284,4	3,59	4,95
10	325,3	73,6	39,6	32,9	33,5	33,2	292,1	3,50	5,20
11	333	77,4	41	32,9	33,2	33,05	300,0	3,40	5,05
12	340,1	81,1	42,4	32,8	33,7	33,25	306,9	3,33	5,25
13	346,2	85,2	43,9	32,5	33,7	33,1	313,1	3,26	5,10
14	351,6	89,2	45,3	33,6	33,9	33,75	317,9	3,21	5,75
15	357,3	92,8	46,9	33,9	34,4	34,15	323,2	3,16	6,15
16	362,2	95,1	48,2	33,9	34,3	34,1	328,1	3,11	6,10

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco 25 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
17	367,1	95,8	49,6	34,1	35	34,55	332,6	3,07	6,55
18	371,5	96,6	51	34,2	35,1	34,65	336,9	3,03	6,65
19	375,5	101,9	52,7	35,1	35,2	35,15	340,4	3,00	7,15
20	379,6	103,9	54,1	35,2	35,3	35,25	344,4	2,97	7,25
21	383,5	105,3	55,5	34,8	35,4	35,1	348,4	2,93	7,10
22	386,5	106,6	56,8	34,5	35,3	34,9	351,6	2,90	6,90
23	389,5	107,6	58,3	35,3	35,7	35,5	354,0	2,88	7,50
24	392,5	108,8	59,5	35,5	36,2	35,85	356,7	2,86	7,85
25	396,2	110,9	60,9	36,2	36,6	36,4	359,8	2,84	8,40
26	399,5	114,5	62,3	36,5	36,6	36,55	363,0	2,81	8,55
27	402,5	119,9	63,6	36,4	36,5	36,45	366,1	2,79	8,45
28	405,5	124,7	65,1	37,1	37,1	37,1	368,4	2,77	9,10
29	407,1	128,3	66,5	37,4	37,2	37,3	369,8	2,76	9,30
30	410,6	130,5	67,5	37,5	37,1	37,3	373,3	2,74	9,30
31	412,2	133,3	68,9	37,7	37,5	37,6	374,6	2,73	9,60
32	414	135,5	70	38,3	37,9	38,1	375,9	2,72	10,10
33	417,1	137,5	71,3	39	38,9	38,95	378,2	2,70	10,95
34	418,6	139,5	72,5	39,2	38,8	39	379,6	2,69	11,00
35	420,1	141,5	73,8	39,7	39,3	39,5	380,6	2,68	11,50
36	422,8	143,6	75,3	39,6	39,2	39,4	383,4	2,66	11,40
37	423,7	145,4	76,6	39,7	39,3	39,5	384,2	2,66	11,50
38	425,1	147,6	78,1	40,5	39,3	39,9	385,2	2,65	11,90
39	426	149,5	79,5	40,8	39,7	40,25	385,8	2,65	12,25
40	428	151,5	81	41,4	40,6	41	387,0	2,64	13,00
41	429,6	153,4	82,4	41,9	40,3	41,1	388,5	2,63	13,10
42	431,5	155,2	83,6	41,8	40,3	41,05	390,5	2,62	13,05
43	433,1	156,9	84,7	42,2	40,9	41,55	391,6	2,61	13,55
44	435	158,9	86	42,7	41,8	42,25	392,8	2,60	14,25
45	436,1	160,6	87,1	43,4	42,5	42,95	393,2	2,60	14,95
46	437,5	162,3	88,2	43,9	42,5	43,2	394,3	2,59	15,20
47	437,8	164,4	89,3	44	42,7	43,35	394,5	2,59	15,35
48	438	171,3	89,8	52,5	50,1	51,3	386,7	2,64	23,30
49	438,4	173,6	91	52,3	50,3	51,3	387,1	2,64	23,30
50	438,6	175,9	92,2	52,5	50,6	51,55	387,1	2,64	23,55
51	438,8	178,5	93,8	52,9	51,1	52	386,8	2,64	24,00
52	440	180,1	94,9	53,1	51,1	52,1	387,9	2,63	24,10
53	440,2	182,1	95,9	53,6	51,3	52,45	387,8	2,63	24,45
54	440,4	183,9	96,8	53,5	51,6	52,55	387,9	2,63	24,55
55	440,6	185,8	97,9	54,1	51,7	52,9	387,7	2,63	24,90
56	441,1	187,6	98,9	54,1	52	53,05	388,1	2,63	25,05

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco 25 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔTa (°C)
57	443,2	189,3	100	55,4	52,6	54	389,2	2,62	26,00
58	443,3	191	100,8	55,9	52,8	54,35	389,0	2,63	26,35
59	445,5	192,8	102	55,9	53	54,45	391,1	2,61	26,45
60	447,1	194,3	103,1	56,1	53,5	54,8	392,3	2,60	26,80
61	448,2	195,9	104	56,4	53,7	55,05	393,2	2,60	27,05
62	449,1	197,4	105	56,7	53,8	55,25	393,9	2,59	27,25
63	450,3	198,9	106	57,2	53,1	55,15	395,2	2,58	27,15
64	452,5	200,4	107,2	57,3	54,1	55,7	396,8	2,57	27,70
65	453,5	201,9	108	57,6	54,8	56,2	397,3	2,57	28,20
66	453,4	203,3	108,8	58	54,7	56,35	397,1	2,57	28,35
67	455,5	204,7	109,7	58,5	55,2	56,85	398,7	2,56	28,85
68	454,7	206	110,4	58,7	55	56,85	397,9	2,57	28,85
69	455	207,3	110,9	59,3	55,1	57,2	397,8	2,57	29,20
70	456,7	208,6	112	59,5	55,8	57,65	399,1	2,56	29,65
71	457,5	209,9	112,9	59,6	55,6	57,6	399,9	2,55	29,60
72	458,2	211,2	114,1	60,1	56	58,05	400,2	2,55	30,05
73	458,5	212,4	114,6	60,4	56,7	58,55	400,0	2,55	30,55
74	459,1	213,6	115,5	60,5	56,8	58,65	400,5	2,55	30,65
75	460,1	214,8	116,2	61,2	57,1	59,15	401,0	2,55	31,15
76	460,5	216	116,6	61,3	57,2	59,25	401,3	2,55	31,25
77	461,6	217,2	117,6	61,4	57,8	59,6	402,0	2,54	31,60
78	462	218,4	118,3	62,1	58,3	60,2	401,8	2,54	32,20
79	462	219,4	119,2	62,7	58,3	60,5	401,5	2,54	32,50
80	463,3	220,5	120,1	63,1	58,8	60,95	402,4	2,54	32,95
81	464,8	221,7	120,9	63,1	58,9	61	403,8	2,53	33,00
82	464,7	222,8	121,5	63,2	59,9	61,55	403,2	2,53	33,55
83	464,5	223,9	122,3	63,7	59,6	61,65	402,9	2,54	33,65
84	465,5	224,8	122,6	64,1	59,6	61,85	403,7	2,53	33,85
85	465,5	225,8	123,2	64,4	60,3	62,35	403,2	2,53	34,35
86	466	226,8	123,8	64,7	60,5	62,6	403,4	2,53	34,60
87	464,5	227,8	124,3	64,2	60,6	62,4	402,1	2,54	34,40
88	466,2	228,8	125	65,6	60,9	63,25	403,0	2,53	35,25
89	466,2	229,7	125,7	65,6	61,3	63,45	402,8	2,54	35,45
90	468	230,8	126,6	66,1	61,5	63,8	404,2	2,53	35,80
91	466,3	231,8	127,4	66,3	61,8	64,05	402,3	2,54	36,05
92	467,2	232,7	128,1	66,7	61,7	64,2	403,0	2,53	36,20
93	468,5	233,6	128,9	66,9	62,5	64,7	403,8	2,53	36,70
94	470,5	234,6	129,7	67,3	63	65,15	405,4	2,52	37,15
95	472	235,5	130,3	67,6	62,6	65,1	406,9	2,51	37,10
96	472	236,5	130,8	68,4	63,7	66,05	406,0	2,52	38,05

Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de núcleo hueco 25 cm de espesor (Corrida #2).									
Tiempo (min)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C) (cam)	T5 (°C) (cam)	Tprom (°C)	ΔT (°C)	K (W/m°C)	ΔT_a (°C)
97	472,7	237,5	130,8	68,3	63,8	66,05	406,7	2,51	38,05
98	472	238,4	131	68,7	64,3	66,5	405,5	2,52	38,50
99	473,5	239,4	131,1	68,9	64,7	66,8	406,7	2,51	38,80
100	473,5	240,5	131,6	69,5	64,9	67,2	406,3	2,51	39,20
101	476,2	241,4	131,8	69,7	65,2	67,45	408,8	2,50	39,45
102	477,7	242,5	132,6	70,1	65,6	67,85	409,9	2,49	39,85
103	477,8	243,5	132,9	70,2	65,6	67,9	409,9	2,49	39,90
104	479,8	244,5	133,4	70,7	66,9	68,8	411,0	2,48	40,80
105	481,6	245,6	134,2	70,9	66,2	68,55	413,1	2,47	40,55
106	482,7	246,6	134,5	71,3	66,7	69	413,7	2,47	41,00
107	482,3	247,8	134,9	71,5	67,7	69,6	412,7	2,47	41,60
108	484,1	248,8	135,4	71,8	67,8	69,8	414,3	2,46	41,80
109	485,5	249,9	136,2	72,3	68,2	70,25	415,3	2,46	42,25
110	488,1	251	136,7	72,5	68,5	70,5	417,6	2,45	42,50
111	489,5	252	137,3	72,6	68,6	70,6	418,9	2,44	42,60
112	490,2	253,2	137,9	73,3	69,1	71,2	419,0	2,44	43,20
113	491,2	254,1	138,5	73,5	69,1	71,3	419,9	2,43	43,30
114	490,2	255,1	138,7	73,7	69,6	71,65	418,6	2,44	43,65
115	491,5	256,2	138,9	74,1	69,8	71,95	419,6	2,43	43,95
116	492,7	257,3	139	74,3	69,9	72,1	420,6	2,43	44,10
117	494,4	258,3	139,6	74,6	70,3	72,45	422,0	2,42	44,45
118	495,2	259,4	140,2	75,3	70,4	72,85	422,4	2,42	44,85
119	495,6	260,4	141	75,1	70,9	73	422,6	2,42	45,00
120	495,8	260,6	141,5	75,6	71,2	73,4	422,4	2,42	45,40

Tabla 13. Distribución la temperatura en la sección transversal de una losa de concreto de 25 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

Finalmente, en el segundo experimento de 25 cm de espesor, al igual que en el primero, no hubo ninguna novedad, más allá de un corte del compresor que alimenta la mezcla de propano con aire usado para que el IMO funcione (lo anterior alrededor de los 47 minutos, los datos aberrantes se han señalado en otro color), sin embargo esto no afectó significativamente las tendencias de las curvas correspondientes graficadas en la sección 14.1.2, algunas de las medidas tomadas posterior al corte, son señaladas con color amarillo en las primeras dos columnas.

En las columnas de las tablas anteriormente mostradas, se pueden encontrar las mediciones de temperatura de la superficie de la losa expuesta directamente a la fuente de calor (T1), la del acero estructural [cuando la muestra contaba con un torón de acero en el corte suministrado por el proveedor del concreto] pretensado en la losa (T2), la del espacio de aire en medio de la losa (T3), así como de la cara del espécimen, no expuesta directamente a la radiación de la fuente puntual de calor.

Como ya se mencionó, todas las mediciones se registraron cada 60 s durante 120 minutos por prueba individual; posteriormente se tabularon los promedios de las temperaturas registradas simultáneamente por el equipo termográfico en la superficie no expuesta directamente (T_{prom} , obtenido a raíz de T4 y T5), así como la diferencia de temperatura entre la superficie expuesta y la cara opuesta de la losa (ΔT).

Finalmente, la columna del coeficiente de transmisión de calor por conducción (k) se obtuvo a partir de un análisis de estado estable de la transferencia de calor visualizada en la losa, dadas las mediciones de las temperaturas registradas en los especímenes estudiados. Fue entonces que a partir de los datos obtenidos, utilizando la ley de Fourier, el cual se detalla más ampliamente en la sección de análisis de resultados, [Por ahora nos limitamos a enunciar la procedencia de la información contenida en esta columna.] se logró obtener una aproximación de dicho coeficiente.

14.1.2 Distribución gráfica de la temperatura en la sección transversal de las losas de concreto estudiadas.

Posteriormente se graficaron los resultados obtenidos en la experimentación con el aparato de panel radiante, y las losas de concreto, de forma que se pudiera extraer cualitativamente, una interpretación más didáctica de las mediciones obtenidas, tales gráficas se muestran a continuación:

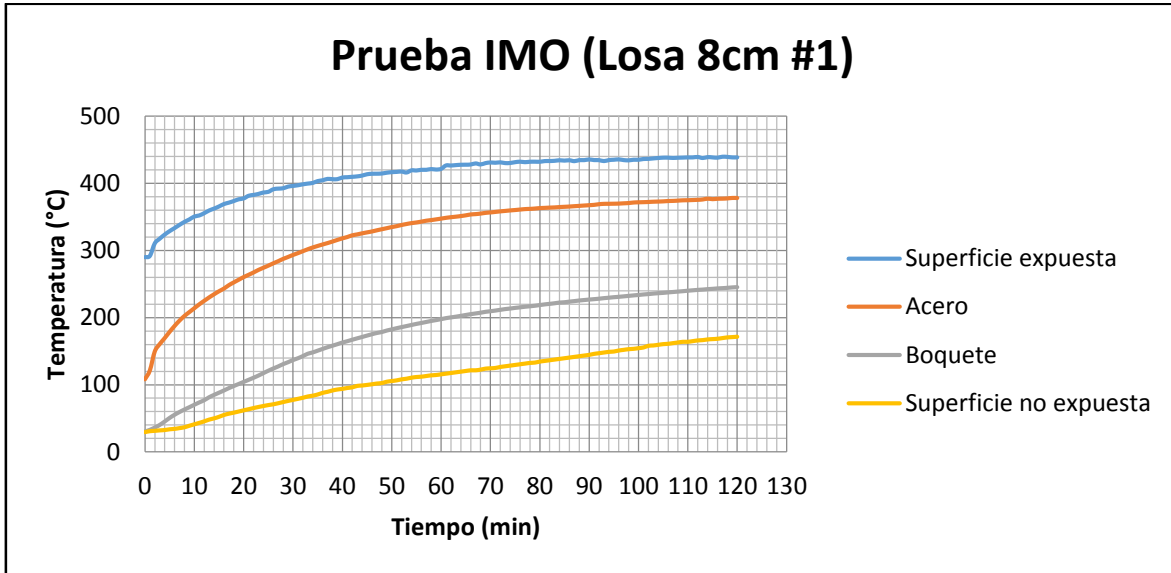


Imagen 47. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015)

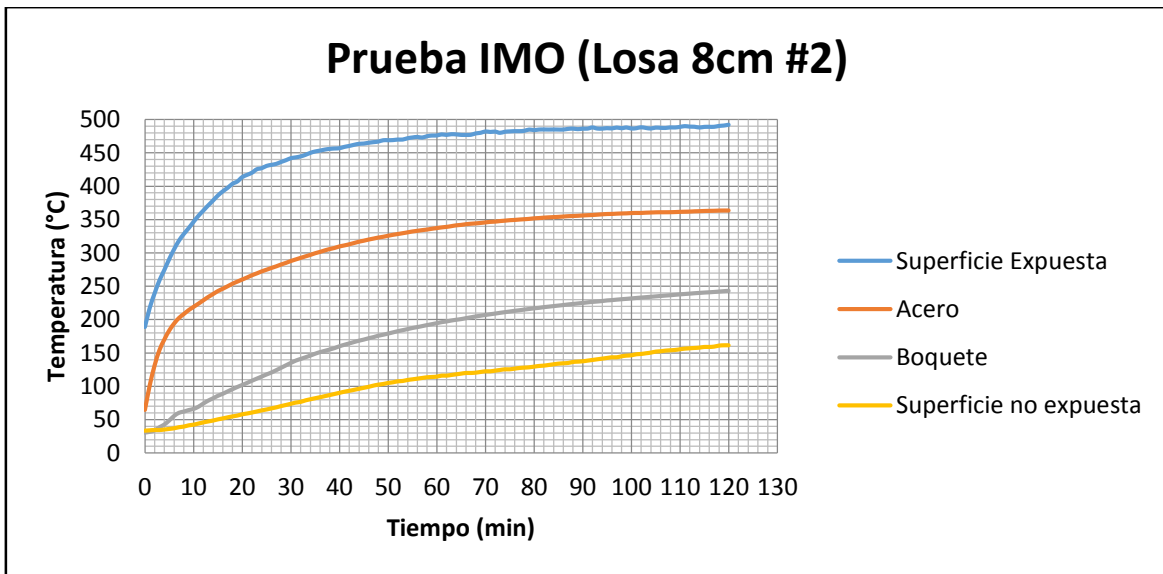


Imagen 48. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015)

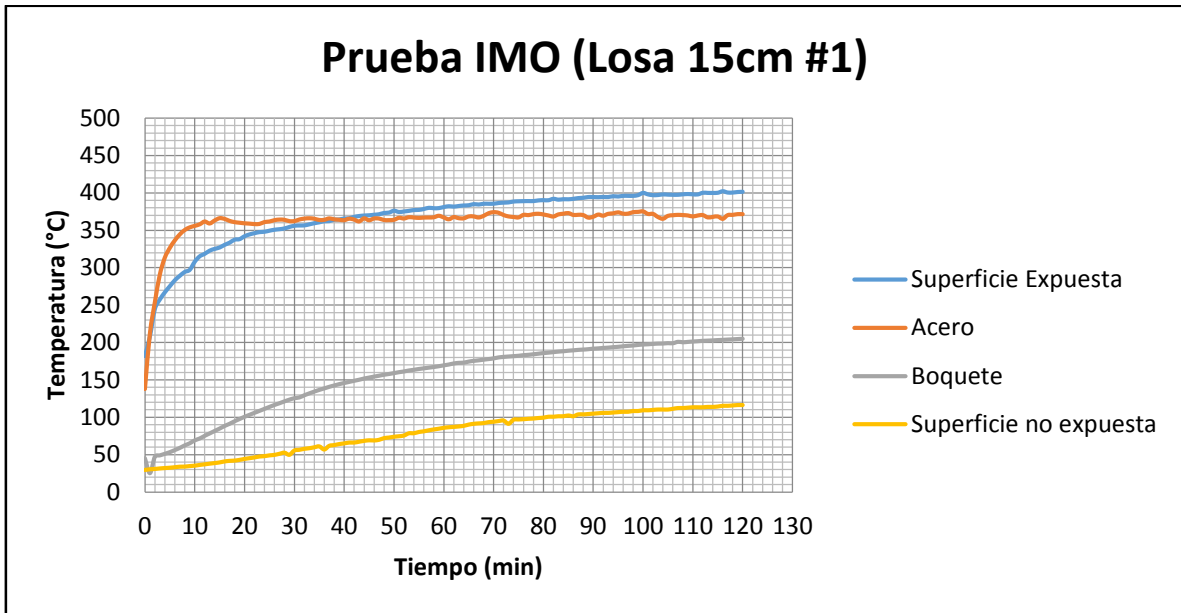


Imagen 49. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015)

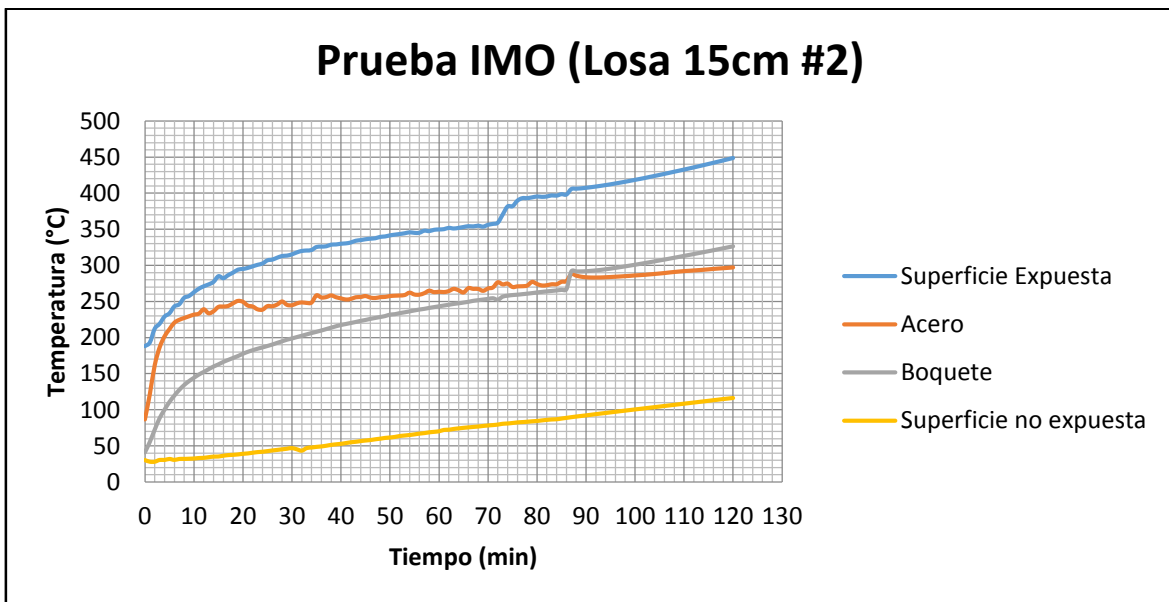


Imagen 50. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015)

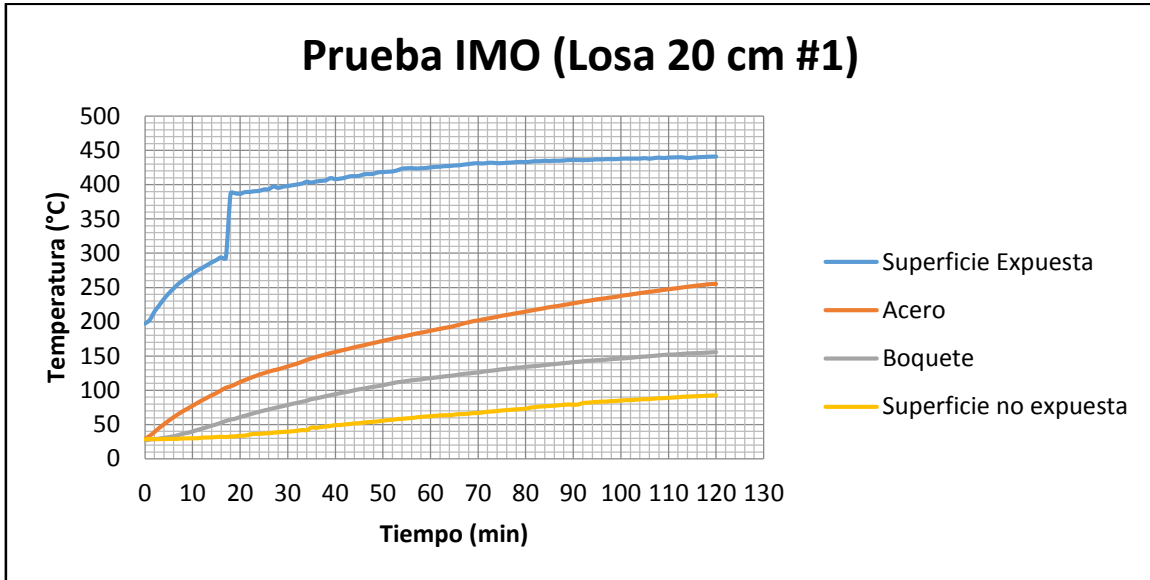


Imagen 51. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015)

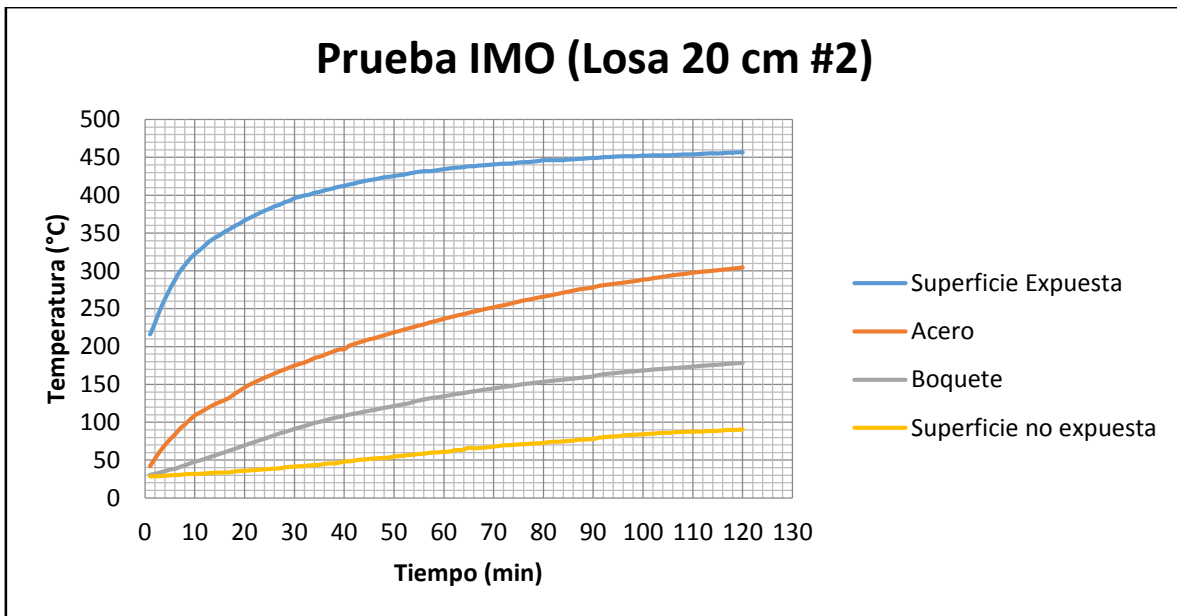


Imagen 52. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015)

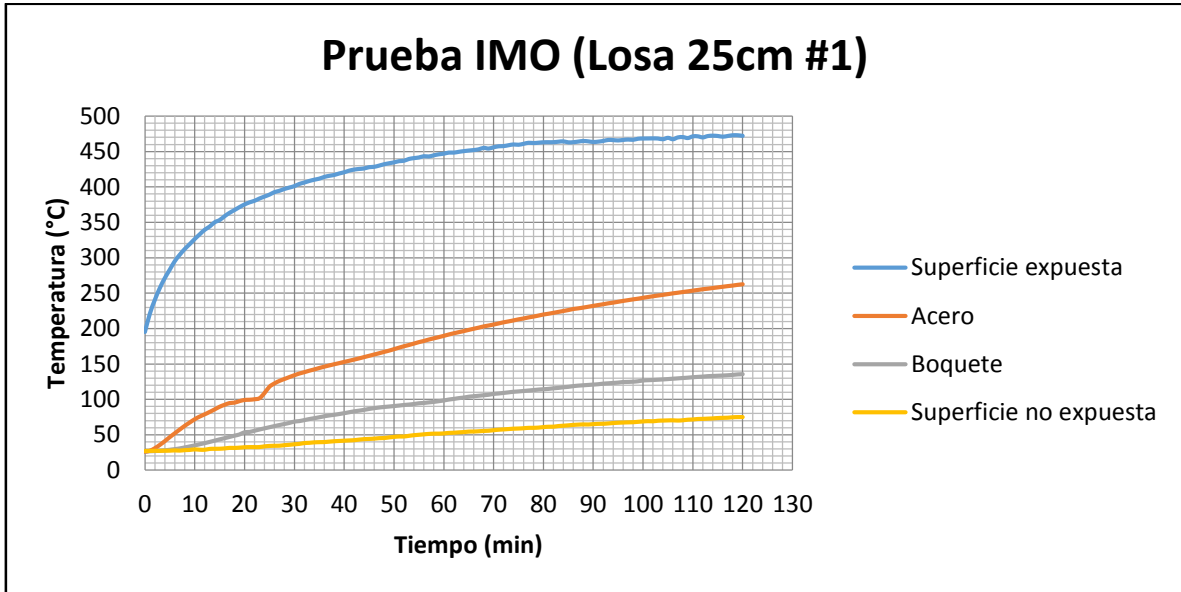


Imagen 53. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015)

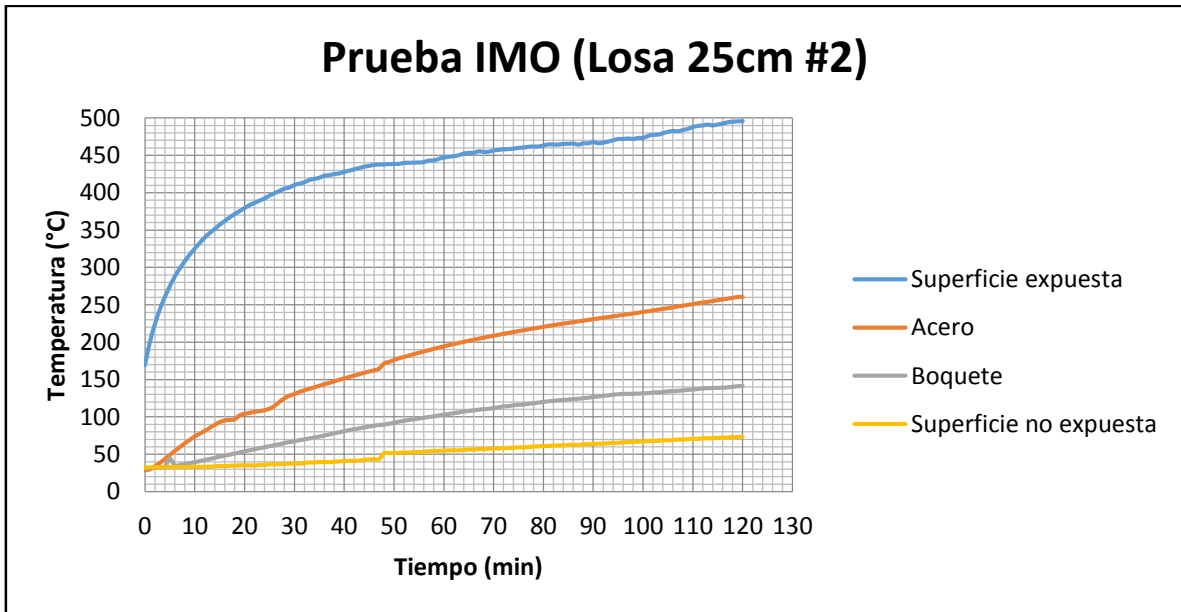


Imagen 54. Distribución de temperaturas en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015)

14.1.3 Resumen de las condiciones iniciales de cada prueba, gradiente térmico, y coeficiente de transferencia de calor por conducción.

Para concluir con los resultados del experimento de los cortes de entrepiso, se resumieron los registros de la humedad relativa al inicio de cada prueba, los tiempos de inicio de las mismas, así como el gradiente de temperatura promedio de cada experimento, con su respectiva estimación de la conducción de calor del ensamble, en la parte del experimento, donde las tendencias se aproximaron a un estado estable de conducción de calor.

Inicio	11:50 a.m.
Tamb (°C)	28
HR (%)	70
ΔT_{prom} (°C)	299,42
Kprom (W/m°C)	1,31

Tabla 14. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015).

Inicio	02:53 p.m.
Tamb (°C)	28
HR (%)	69
ΔT_{prom} (°C)	342,60
Kprom (W/m°C)	1,15

Tabla 15. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 8 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

Inicio	10:45 a.m.
Tamb (°C)	25
HR (%)	50
ΔT_{prom} (°C)	287,52
Kprom (W/m°C)	2,13

Tabla 16. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015).

Inicio	03:45 p.m.
Tamb (°C)	25,9
HR (%)	71,8
ΔT_{prom} (°C)	282,50
Kprom (W/m°C)	1,87

Tabla 17. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

Inicio	11:11 a.m.
Tamb (°C)	27
HR (%)	83
ΔT_{prom} (°C)	338,23
Kprom (W/m°C)	2,21

Tabla 18. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015).

Inicio	03:13 p.m.
Tamb (°C)	25
HR (%)	49
ΔT_{prom} (°C)	352,17
Kprom (W/m°C)	2,11

Tabla 19. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 20 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

Inicio	01:25 p.m.
Tamb (°C)	27
HR (%)	70
ΔT_{prom} (°C)	371,99
Kprom (W/m°C)	2,44

Tabla 20. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015).

Inicio	04:19 p.m.
Tamb (°C)	28
HR (%)	65
ΔT_{prom} (°C)	375,26
Kprom (W/m°C)	2,43

Tabla 21. Medición del Kprom y ΔT_{prom} en la sección transversal de una losa de 25 cm de espesor (Corrida #2).

Fuente: Autores (2015).

14.1.4 Formación de grietas, astillamiento y fenómenos de carbonización de bastos de algodón, ante la exposición prolongada del concreto a una fuente de calor.

La formación de pequeños astillamientos y grietas fueron constantes en todos los espesores de losa, y en todas las pruebas.



Imagen 55. Formación de astillas y grietas en losas sometidas a radiación durante 2 horas.

Fuente: Autores (2015).



Imagen 56. Formación de astillas y grietas en losas sometidas a radiación durante 2 horas.

Fuente: Autores (2015).



Imagen 57. Carbonización de los bastos de algodón colocados en la superficie no expuesta de las losas de 8 cm de espesor.

Fuente: Autores 2015.

14.1.5 Resultados de la simulación mediante el uso de COMSOL Multiphysics®.

Una vez hechas las pruebas con el IMO, se procedió a simular la parte del experimento descrito en la ASTM E119 que involucra observar la transferencia de calor en el ensamble de entrepiso, siguiendo la curva de tiempo vs temperatura indicada en dicha norma, con ayuda del paquete de software de simulación COMSOL Multiphysics, a través de la empresa SAUBER que nos brindó el servicio de simulación con fines académicos.

En esta parte del experimento se analizaron dos espesores de ensambles de entrepisos de losas alveolares, Losa Lex de 8 cm y de 25 cm de espesor de losa, en las configuraciones comerciales vendidas por Productos de Concreto, las

medidas geométricas de los ensambles, fueron tomados del Manual Técnico de PC versión 2012.

El programa trabaja con modelos en 2D o 3D de cuerpos de distintas formas y características, realizando análisis de diferentes fenómenos físicos y mecánicos, por medio del método de elementos finitos; en el caso en particular del desarrollo de la simulación del sistema de entrepisos de concreto, se analizaron modelos construidos en SolidWorks, que es una herramienta de diseño mecánico de sólidos y fluidos, desde donde los modelos se exportaron en 2D hacia COMSOL, donde se le asignó un material y sus respectivas características a cada elemento que forma parte del ensamble.

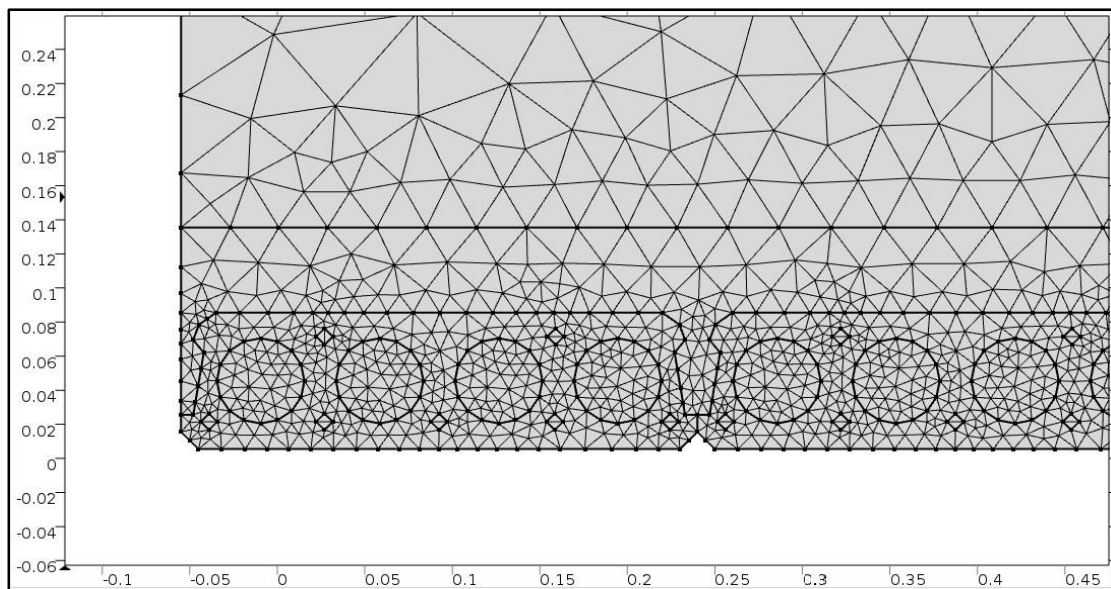


Imagen 58. Estructura de la malla de elementos finitos para el ensamble de Losa Lex de 8 cm.

Fuente: Autores (2016).

Inicialmente se le construyó una malla sobre el modelo, para que el programa pudiera realizar el análisis, la malla es una forma de partir el sólido en elementos de menor complejidad de procesamiento, para así poder trabajar porciones más pequeñas del sólido a la vez, y de esta forma, por medio del estudio computarizado,

poder sumar los efectos combinados de todos elementos en los que fue dividido el cuerpo en estudio.

Cabe destacar que los ejes en las imágenes 58, 59 y 60 no representan las medidas físicas de los ensambles, ni son ningún tipo de escala, sino que son ejes para la colocación espacial de los ensambles dentro de la interfaz de COMSOL, lo anterior es importante para la claridad de la interpretación de dichas imágenes y para evitar cualquier posible confusión.

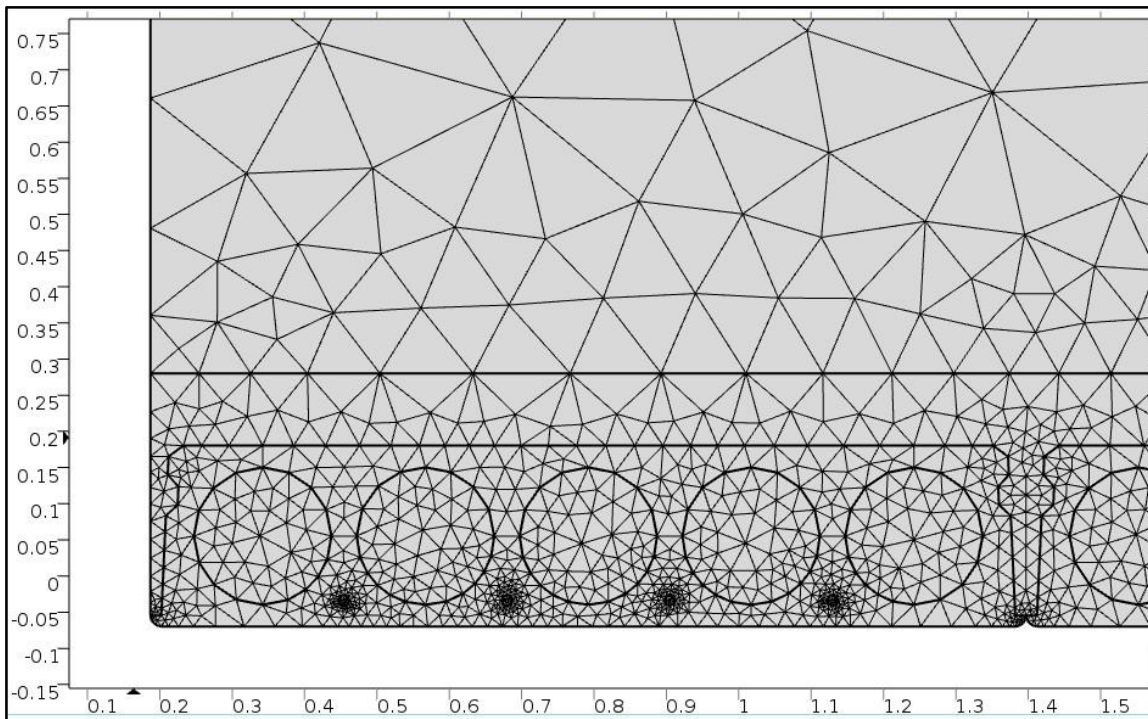


Imagen 59. Estructura de la malla de elementos finitos para el ensamble de Losa Lex de 25 cm.

Fuente: Autores (2016).

Aunque se considera que la malla es gruesa, para el análisis de transferencia de calor a través del ensamble, es suficientemente precisa.

Se le asignaron materiales a cada elemento del ensamble, de tal forma que se pudiera simular la interacción de cada parte del ensamble en común.

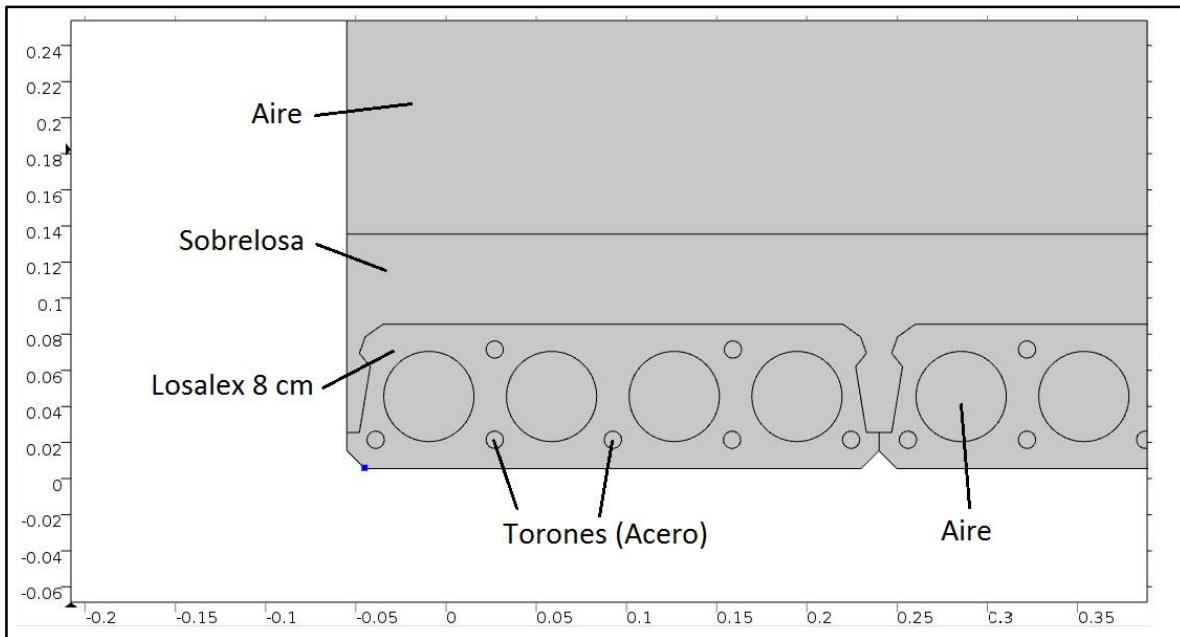


Imagen 60. Ensamble para su análisis en COMSOL Multiphysics.

Fuente: Autores (2016).

En la parte inferior del ensamble se le asignó una condición de frontera de temperatura transitoria, siguiendo la curva de temperatura vs tiempo descrita en la ASTM E119 en ambos casos de estudio, cabe mencionar que se respetó el área mínima de análisis de 16 m^2 señalada en la misma norma.

Para el caso del ensamble de entrepiso formado por Losa Lex de 8 cm, cada losa tiene un ancho de unos 0.295 m, y se le asignó una longitud de 4.28 m, por lo que se requirieron ensamblar 13 losas para formar un entrepiso de 16.41 m^2 , para el caso del ensamble de Losa Lex de 25 cm, las losas miden 1.2 m de ancho, así que acomodando 4 de ellas en fila, se consiguen 4.8 m de ancho, por lo que se

necesitan al menos 3.5 m de profundidad para formar un entrepiso de al menos 16.7 m².

Luego, en la parte superior de la chorrea que constituye la sobrelosa, se le aplicó a los modelos una condición de frontera de disipación de calor por el efecto combinado de radiación y convección, tal y como sucedería en un caso real de incendio.

Posteriormente se hicieron 10 estudios o cortes (cada 12 minutos, durante las 2 horas de duración del experimento) donde se observó el gradiente térmico presentado en el corte transversal del ensamble.

Ya para el segundo corte (1440 s – 24 minutos) se registraron temperaturas de alrededor de 782 °C en la superficie expuesta, la norma indica que a los 1800 s dicha temperatura debía haber alcanzado los 843 °C, y ya para una hora (3600 s) se debían haber alcanzado al menos los 927 °C, lo cual se observa en la imagen 63 en el caso del ensamble de Losa Lex de 8cm, y en la imagen 69 en el caso del ensamble de 25 cm.

Las escalas de temperatura de todas las imágenes obtenidas a partir de la simulación de la condición de transferencia de calor a través de los espesores de ensamble estudiados, que se presentan en la parte derecha de cada imagen, son en grados Celsius, lo anterior es importante para la correcta interpretación por parte del lector, de los resultados mostrados a continuación.

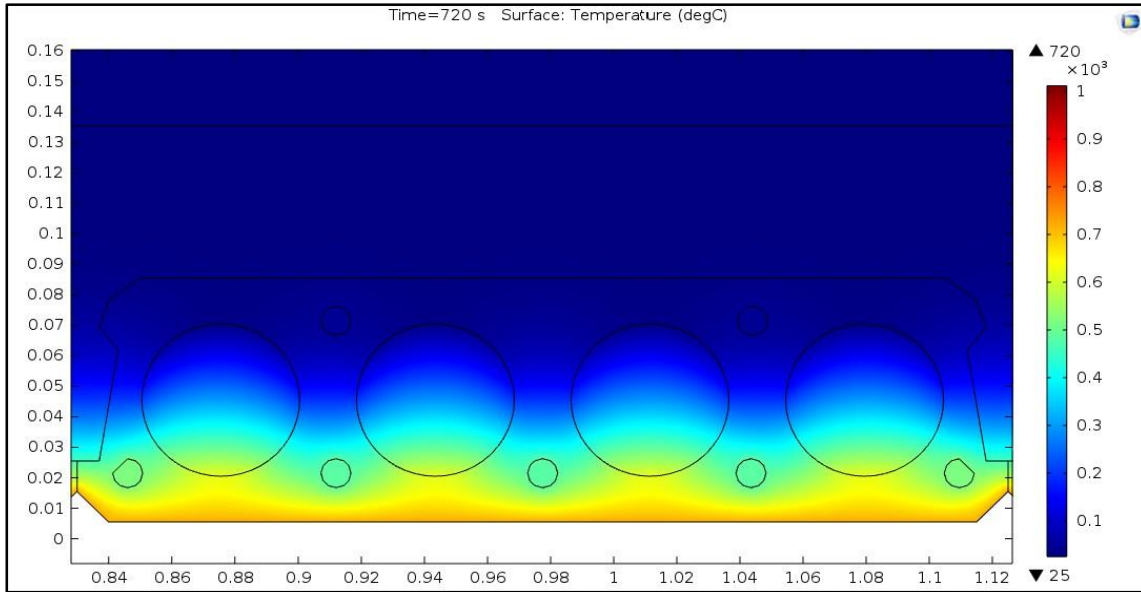


Imagen 61. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 720s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

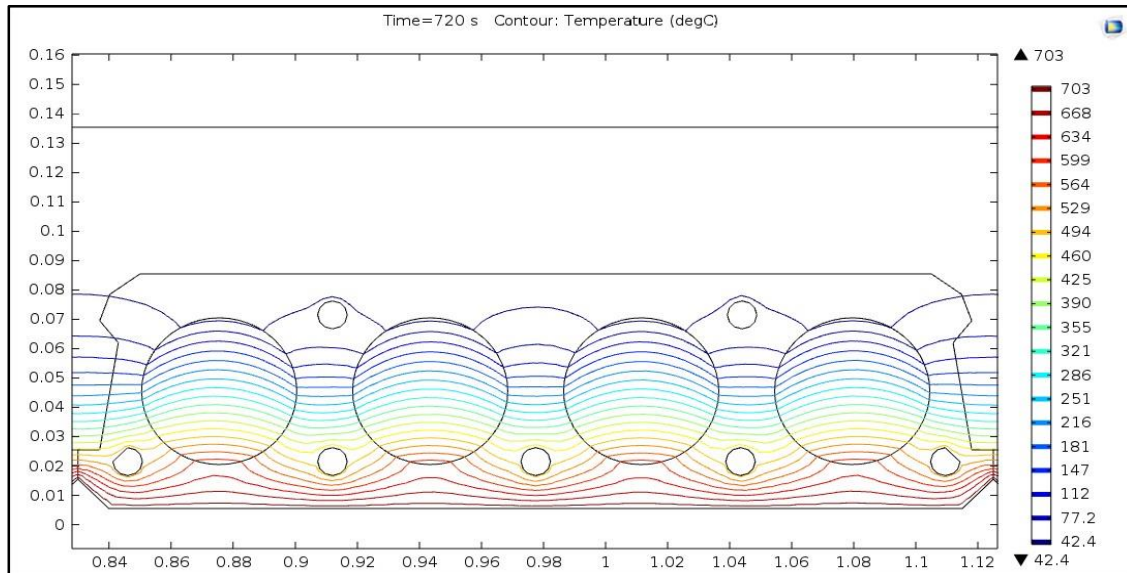


Imagen 62. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 720s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

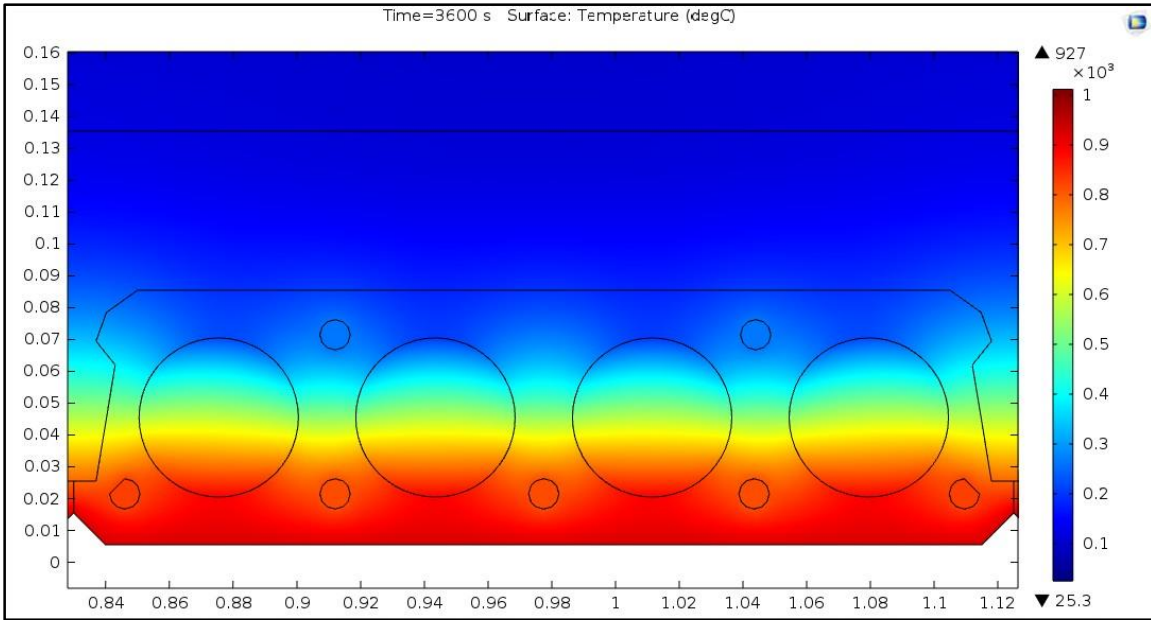


Imagen 63. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entepiso con Losa-Lex de 8cm a los 3600 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

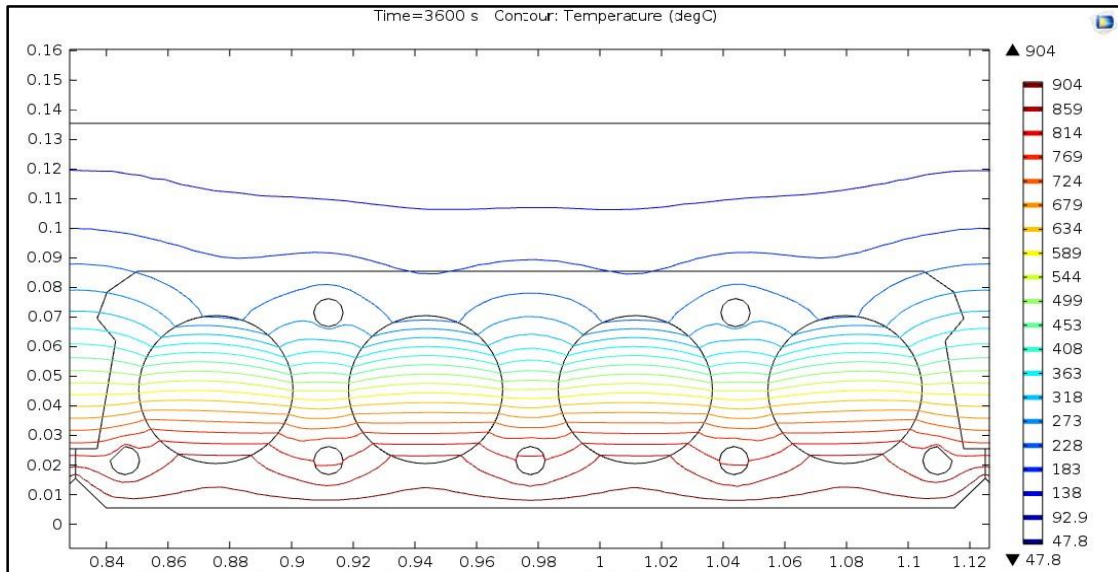


Imagen 64. Contorno del perfil de temperaturas de un entepiso con Losa-Lex de 8cm a los 3600 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

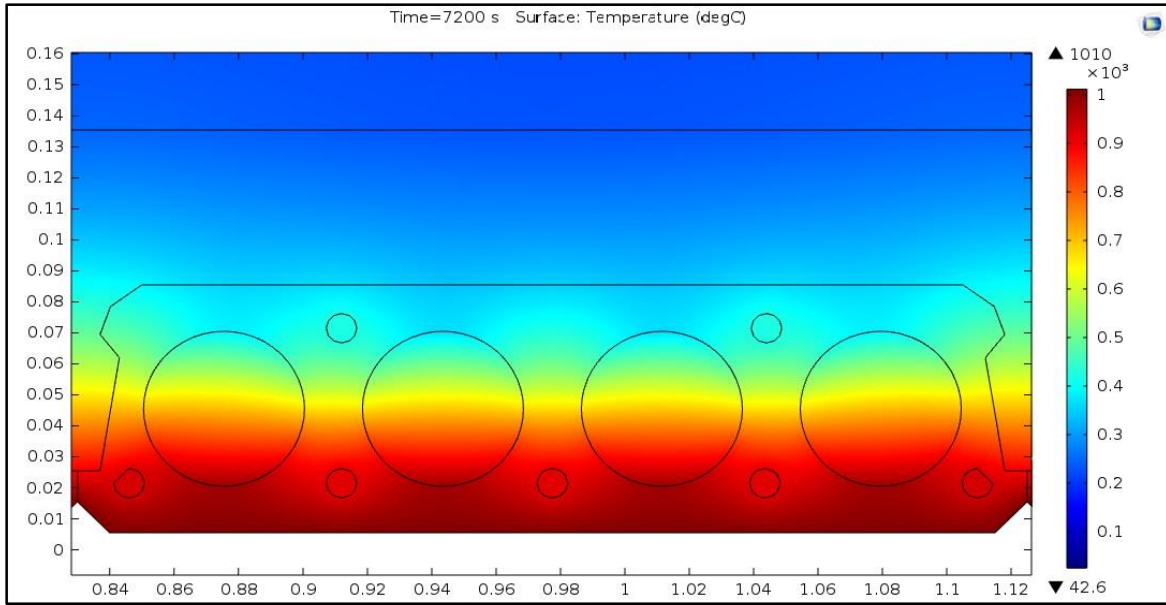


Imagen 65. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 7200 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

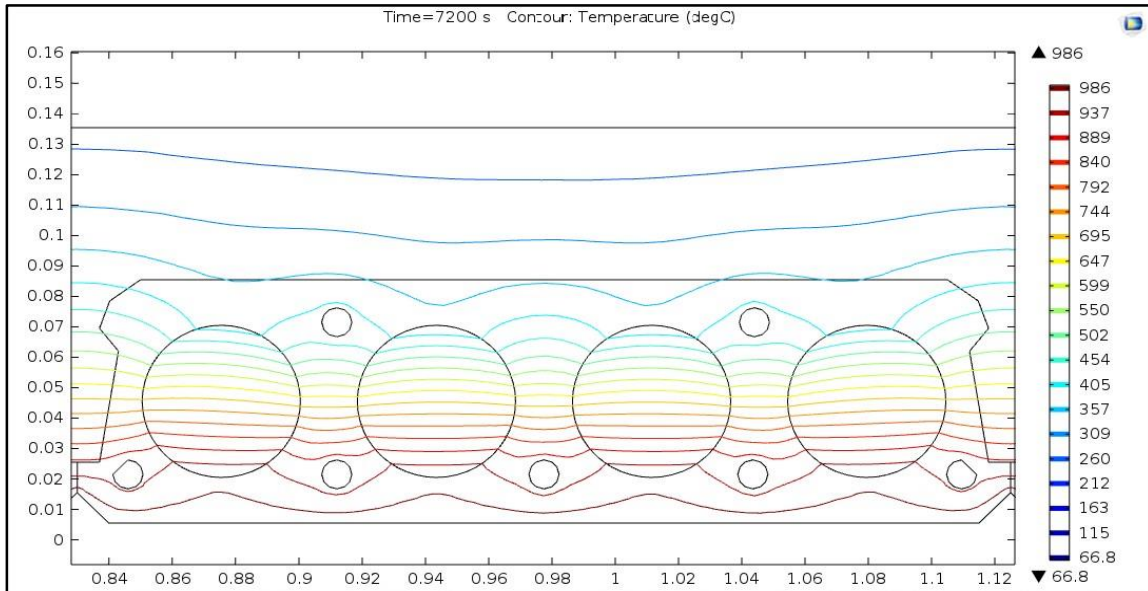


Imagen 66. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 8cm a los 7200 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

Para el final de la prueba (7200 s) se pudieron registrar temperaturas de alrededor de 400 °C en la superficie no expuesta, y de alrededor de 1000 °C en la

superficie expuesta, la cual según la curva de la norma ASTM E119 debía ser 1010 °C, lo anterior para el caso del ensamble de 8 cm.

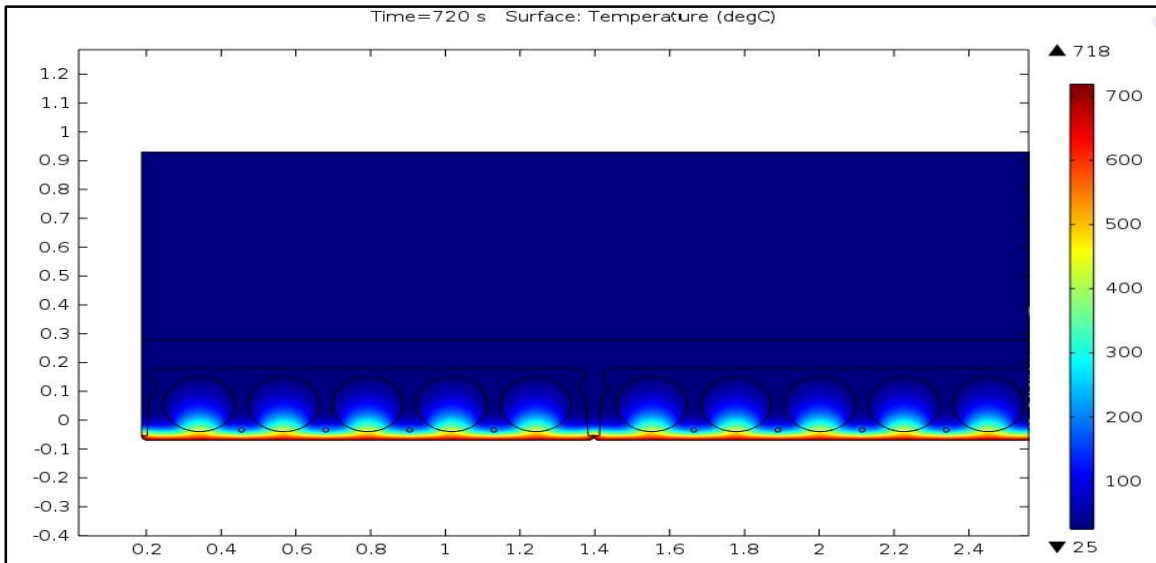


Imagen 67. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 720 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

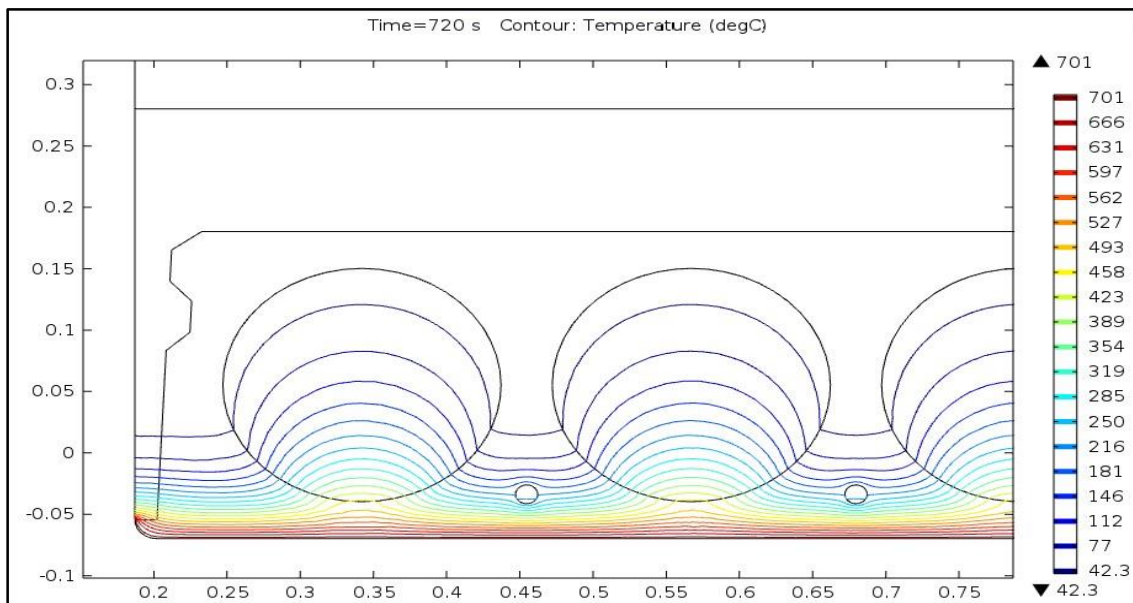


Imagen 68. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 7200 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

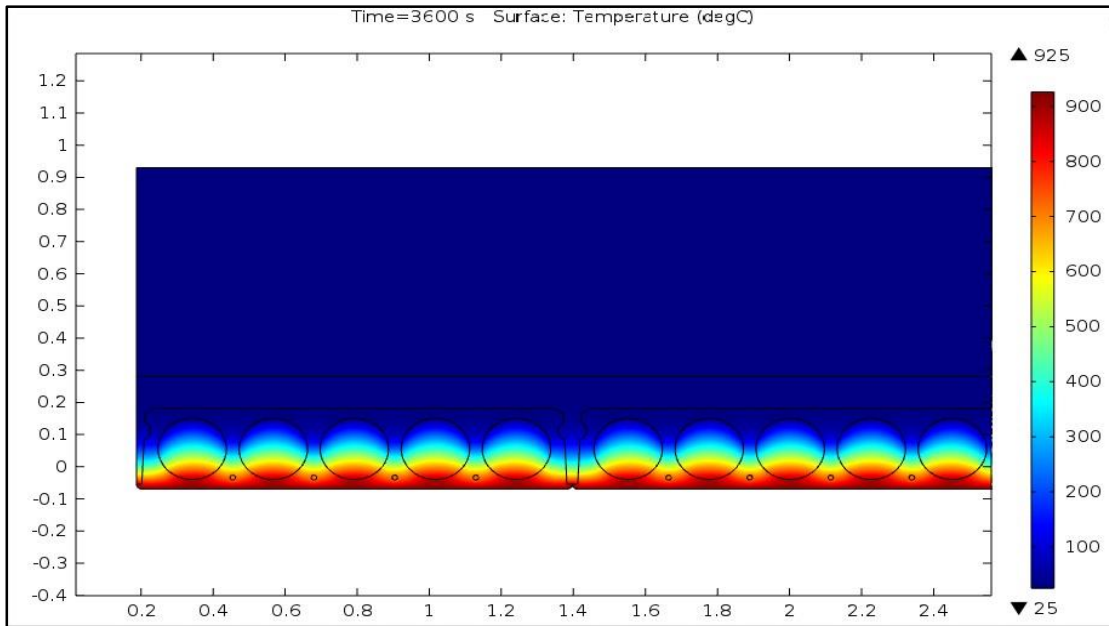


Imagen 69. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 3600 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

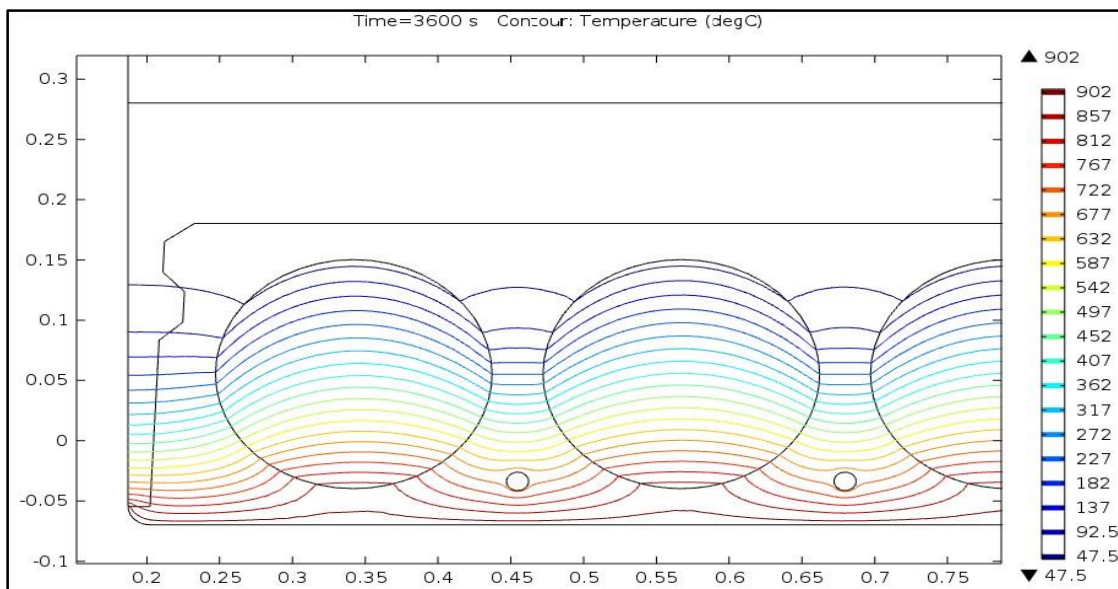


Imagen 70. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 3600 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

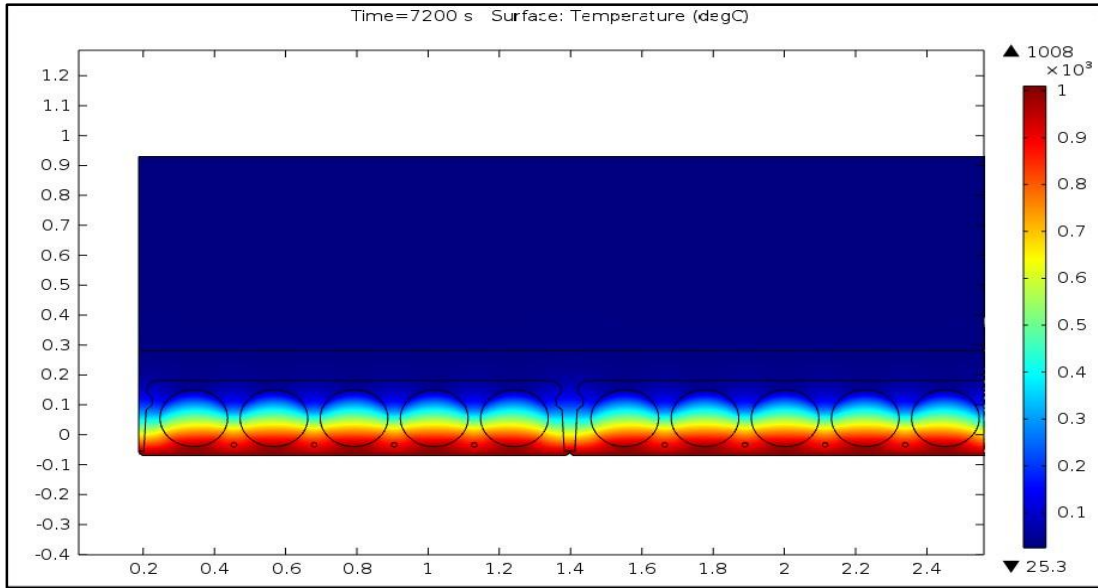


Imagen 71. Termografía computarizada del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 7200 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

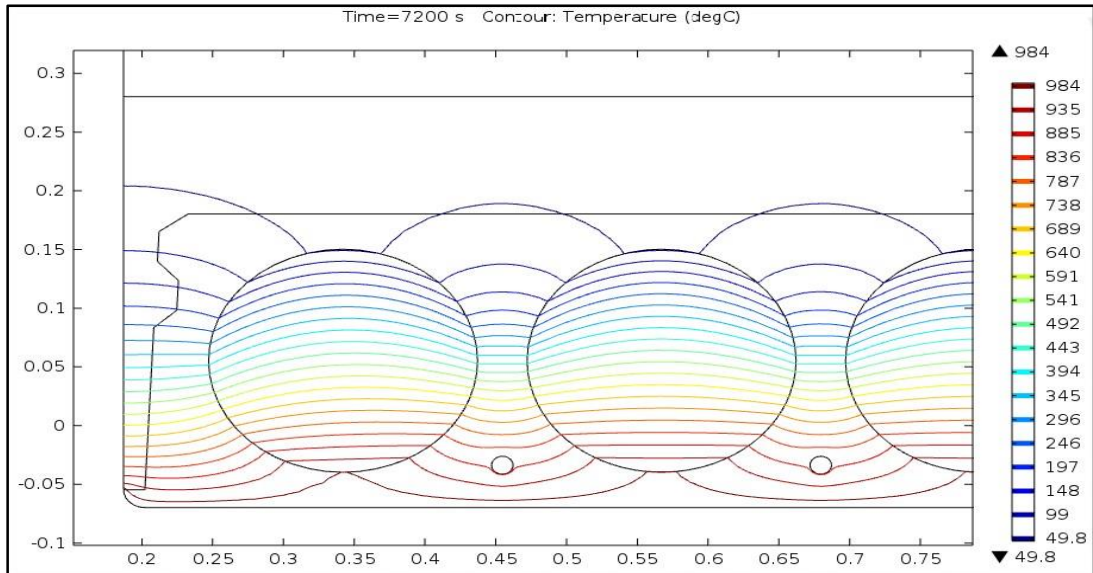


Imagen 72. Contorno del perfil de temperaturas de un entrepiso con Losa-Lex de 25cm a los 7200 s de iniciada la prueba.

Fuente: Autores (2016).

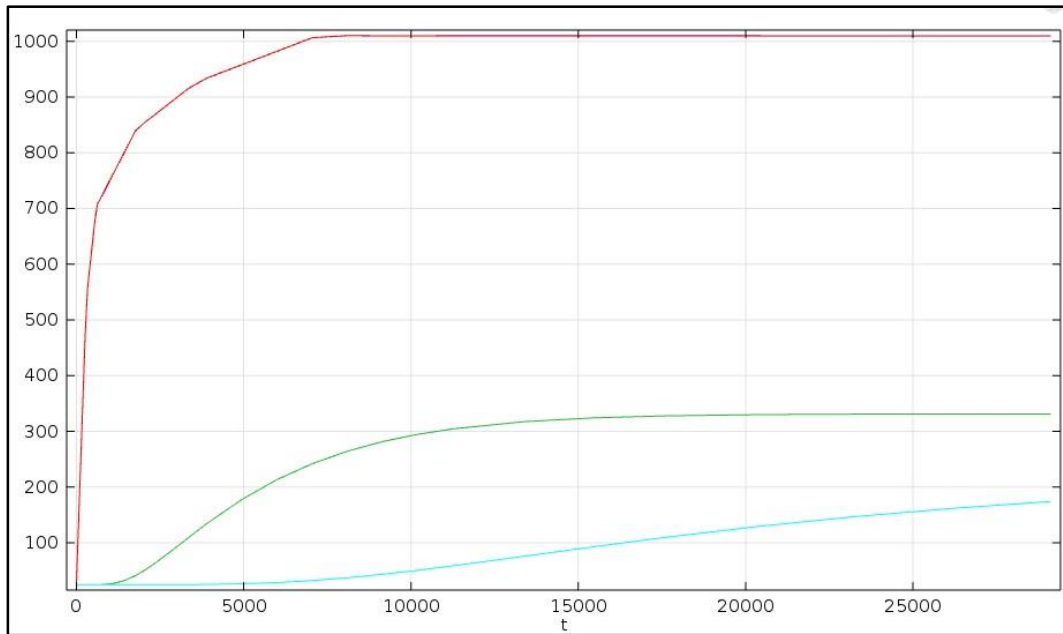


Imagen 73. Curvas de temperatura del horno, y superficies no expuestas de 8 cm y 25 cm de espesor.

Fuente: Autores (2016).

En la Imagen anterior, se pueden observar tanto el comportamiento transitorio de las temperaturas del horno (curva roja), como de la superficie no expuesta directamente a la radiación del ensamble de entrepiso de 8 cm de espesor (curva verde), y el de 25 cm (curva turquesa), de donde se pueden extraer gráficamente, las temperaturas máximas alcanzadas durante las pruebas.

14.2 Experimento de horno de convección.

En el caso de las pruebas realizadas a los cilindros, se trazaron dos curvas, una por cada resistencia donde se observa las temperaturas de interés, como se comentó anteriormente, la superficial, la temperatura interna del cilindro y la del horno.

Dichos datos, fotografías del montaje, de las fallas así como las gráficas se presentan a continuación.

14.2.1 Curva Temperatura vs Tiempo cilindro de resistencia de 700 kg/cm²

Se extrajo la tabla 22 y la imagen 74 los cuales ilustran las temperaturas y el tiempo de los tres focos de interés, temperatura del horno, la superficial del cilindro y la interna

Tiempo (min)	Temperatura a horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
0	32	26	26
1	50	28	26
2	69	30	27
3	87	32	27
4	108	35	28
5	129	39	29
6	145	43	30
7	165	49	32
8	182	55	34
9	197	61	37
10	211	68	40
11	224	76	44
12	236	83	47
13	248	91	52
14	259	99	56
15	270	107	61
16	280	113	65
17	290	121	70
18	299	127	76
19	308	133	82
20	316	139	86
21	322	148	89
22	331	152	96
23	341	160	95
24	349	163	102
25	358	169	102
26	366	172	104
27	375	177	105
28	382	181	106
29	390	187	107
30	397	191	108
31	405	197	115
32	411	202	120
33	418	206	129
34	426	212	135
35	432	216	143
36	438	221	149

Tiempo (min)	Temperatura a horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
37	445	226	154
38	453	232	159
39	458	236	162
40	464	240	166
41	470	245	170
42	476	250	173
43	482	254	176
44	488	259	180
45	494	264	183
46	500	269	187
47	506	273	190
48	511	278	194
49	517	283	198
50	523	288	201
51	529	294	205
52	535	299	209
53	540	304	213
54	546	309	218
55	552	315	222
56	559	321	228
57	562	325	232
58	568	331	238
59	573	337	242
60	578	343	249
61	583	350	253
62	589	355	260
63	594	362	267
64	599	369	272
65	604	375	280
66	610	382	286
67	615	388	294
68	620	396	300
69	626	402	309
70	631	410	315
71	637	416	322
72	642	424	331
73	647	430	338
74	652	437	346
75	657	444	354
76	662	451	362
77	667	459	371
78	671	465	378
79	677	472	386
80	681	478	393
81	686	484	400

Tiempo (min)	Temperatura a horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
82	691	491	407
83	696	497	415
84	701	503	423
85	706	510	429
86	711	515	436
87	715	521	443
88	720	527	450
89	725	540	457
90	730	541	462
91	735	547	469
92	740	554	476
93	744	561	483
94	749	568	490
95	754	574	496
96	758	579	503
97	763	586	509
98	768	592	514
99	772	598	520
100	777	604	526
101	782	610	532
102	786	617	537
103	791	623	543
104	796	629	548
105	800	635	553
106	805	641	558
107	809	648	563
108	814	654	568
109	819	660	573
110	823	666	578
111	828	672	583
112	833	678	589
113	837	684	594
114	842	691	601
115	846	698	607
116	851	705	613
117	855	711	620
118	860	718	626
119	862	726	633
120	869	733	639
121	873	740	645
122	878	747	651
123	882	754	657
124	886	760	662
125	890	767	668
126	894	774	673

Tiempo (min)	Temperatura a horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
127	900	783	681
128	903	789	686
129	907	795	690
130	911	801	695
131	915	807	700
132	919	814	705
133	923	821	710
134	928	829	714
135	932	835	717
136	936	844	721
137	941	852	725
138	944	859	727
139	948	867	730
140	952	874	732
141	956	884	735
142	960	892	736
143	963	899	738
144	967	908	740
145	971	916	741
146	975	925	743
147	980	936	745
148	983	943	747
149	987	951	749
150	991	962	751
151	994	970	753
152	998	981	755
153	1002	993	757
154	1005	1000	759

Tabla 22. Temperatura superficial, interna y del horno para la resistencia de 700kg/cm²

Fuente: Autores (2015)



Imagen 74: Temperatura vs tiempo para la resistencia de 700 kg/cm²

Fuente: Autores (2015)

Para la medición de las curvas de temperaturas vistas en la imagen anterior, se ingresó por la mufla del horno un termopar que hacia contacto con el interior del cilindro y otra con la superficie exterior del mismo, además de la temperatura censada por el termopar integrado en el horno propiamente y que es mostrada en una pantalla digital, en la parte exterior del horno.

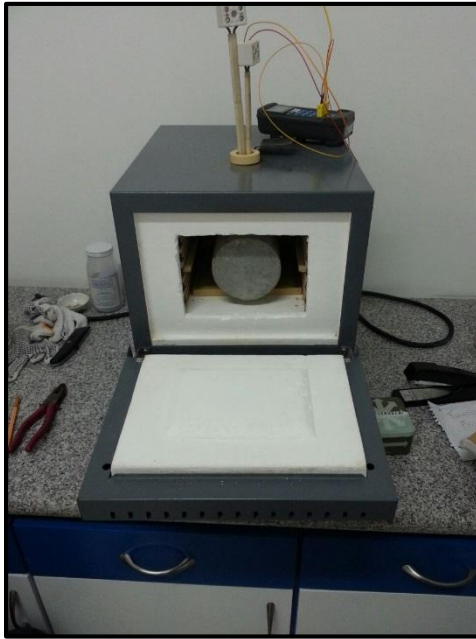


Imagen 75: Montaje de los termopares para el trazo de las curvas de la imagen 74

Fuente: Autores (2015)



Imagen 76: Montaje de los termopares para el trazo de la imagen 74

Fuente: Autores (2015)

Esta fotografía detalla mejor como se ingresó el termopar en el interior del cilindro el cual fue perforado hasta aproximadamente el centro del mismo, el termopar fue cubierto con la cinta de cerámica para protegerlo y evitar que las

mediciones se vieran afectadas por la degradación de los materiales al ser sometidos a altas temperaturas.



Imagen 77: Montaje de los termopares para el trazo de las curvas de la imagen 74

Fuente: Autores (2015)

14.2.2 Resultados de los cilindros fallados para la resistencia de 700kg/cm²

Ahora bien en el caso de los cilindros de 700 kg/cm² que fueron fallados a las distintas temperaturas se obtuvo los siguientes datos y gráficos.

Espécimen	Temperatura interna (°C)	Tiempo de exposición (min)	Resistencia real (kg/cm ²)	Porcentaje de pérdida (%)	Promedio de pérdida por temperatura (%)
1	759	154	74,19	89,1	88,7
2	759	154	78,92	88,4	
3	695	130	147,32	78,3	81
4	695	130	111,09	83,6	
5	526	100	218,92	67,7	70,4
6	526	100	183,11	73	
7	309	69	232,50	65,7	64,5
8	309	69	249,83	63,2	
9	120	32	289,78	57,3	58,4
10	120	32	274,78	59,5	

Tabla 23: Resistencia del concreto a las temperaturas de interés de la superficie del cilindro y su porcentaje de pérdida (resistencia 700kg/cm²)

Fuente: Autores (2015)

Diferencia entre temperaturas	Diferencia entre porcentajes de pérdida
1000°C-600°C	6,1 %
800°C-600°C	5,9 %
600°C-400°C	10,6 %
400°C-200°C	7,8 %
Promedio	7,6 %

Tabla 24: Diferencia porcentual de las caídas de resistencia promedio (resistencia 700kg/cm²).

Fuente: Autores (2015)

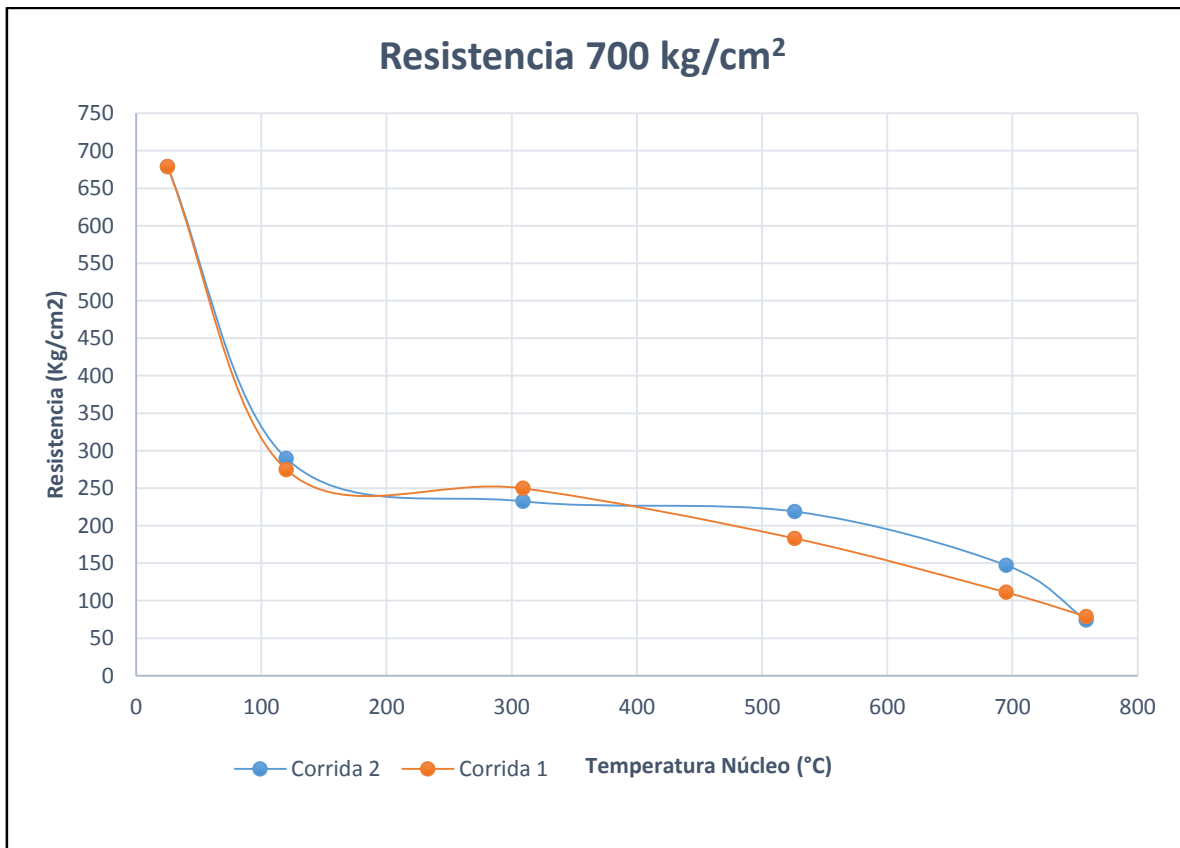


Imagen 78: Variación de la resistencia con respecto a la temperatura (resistencia 700 kg/cm²)

Fuente: Autores (2015)

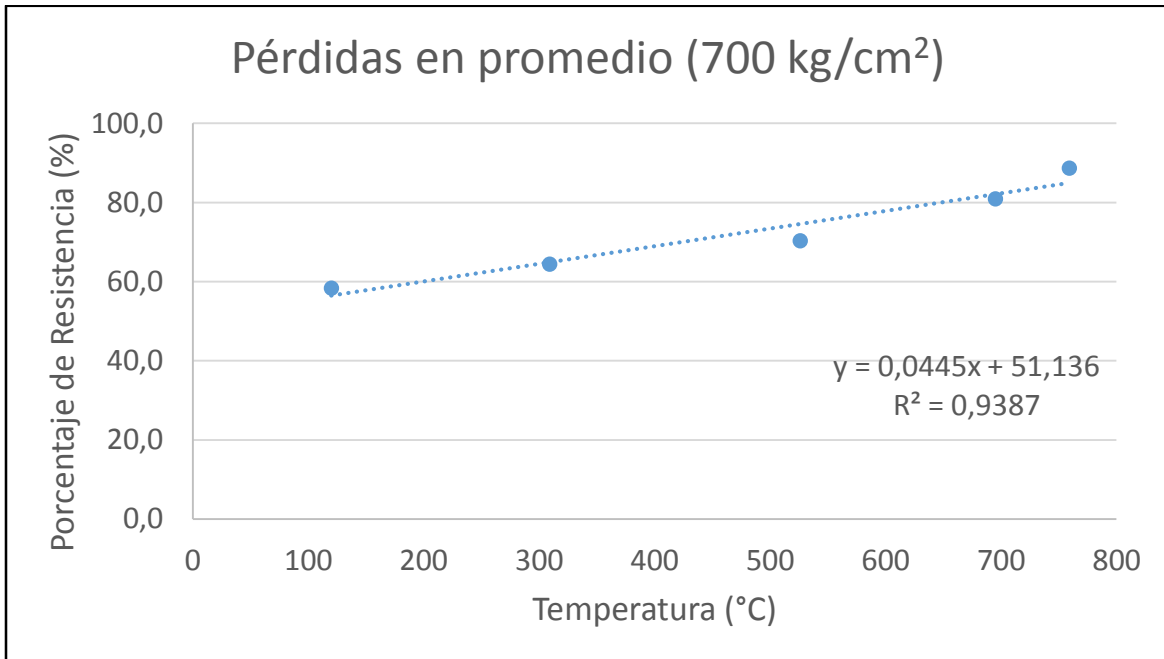


Imagen 79: Curva de pérdidas resistencia vs temperatura (700kg/cm²).

Fuente: Autores (2015)

Cilindro	Resistencia Real (Kg/cm ²)
1	639,9198006
2	685,0394137
3	710,0117008
4	680,1510008
Promedio	678,780479

Tabla 25: Promedio de la resistencia real (en frío) para la resistencia teórica de 700 kg/cm²

Fuente: Autores (2015)

14.2.3 Curva Temperatura vs Tiempo cilindro de resistencia de 420 kg/cm²

Se extrajo la tabla 26 y la imagen 80 los cuales ilustran las temperaturas y el tiempo de los tres focos de interés, temperatura del horno, la superficial del cilindro y la interna

Tiempo (min)	Temperatura horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
0	34	30	30
1	70	30	30
2	95	32	30
3	123	34	30
4	148	37	31
5	173	42	32
6	196	46	33
7	216	51	35
8	234	57	37
9	247	63	40
10	260	69	43
11	273	76	47
12	287	83	51
13	300	90	55
14	312	97	60
15	324	104	65
16	334	110	69
17	344	117	74
18	353	125	78
19	362	131	84
20	371	138	90
21	379	143	96
22	387	148	99
23	395	154	102
24	403	159	103
25	410	165	104
26	417	169	105
27	425	175	106
28	432	181	108
29	440	187	110
30	447	192	112
31	453	198	118
32	460	204	126
33	466	209	135
34	473	215	142
35	479	221	148
36	485	226	151
37	492	231	157
38	498	236	162
39	503	242	166
40	509	247	170
41	514	252	173
42	519	257	177
43	525	262	180
44	530	267	184

Tiempo (min)	Temperatura horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
45	536	273	187
46	542	278	191
47	548	284	195
48	554	290	199
49	559	296	204
50	565	303	209
51	570	309	214
52	577	317	221
53	581	323	225
54	587	330	232
55	593	337	238
56	599	345	245
57	604	352	251
58	610	360	258
59	616	369	266
60	622	378	275
61	627	386	283
62	633	394	291
63	639	403	300
64	644	411	309
65	650	420	319
66	654	427	327
67	660	435	337
68	665	442	345
69	670	450	354
70	675	457	362
71	680	464	370
72	685	471	379
73	690	477	387
74	695	484	395
75	700	491	402
76	705	497	410
77	710	503	418
78	715	509	426
79	720	515	433
80	725	522	441
81	729	528	448
82	734	534	455
83	739	541	462
84	744	547	469
85	749	553	477
86	754	560	483
87	759	567	490
88	763	573	497
89	768	580	503

Tiempo (min)	Temperatura horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
90	773	586	510
91	778	593	517
92	783	600	523
93	788	606	529
94	793	612	535
95	797	619	541
96	802	625	547
97	807	632	553
98	811	639	559
99	816	645	564
100	821	651	570
101	825	657	576
102	830	664	582
103	834	670	588
104	839	676	594
105	844	683	600
106	848	689	607
107	853	696	613
108	858	703	619
109	862	710	626
110	867	717	633
111	871	724	639
112	875	730	645
113	879	737	652
114	884	745	657
115	888	751	663
116	893	757	668
117	897	764	675
118	902	771	681
119	906	777	688
120	910	782	694
121	915	788	700
122	919	794	707
123	924	800	714
124	928	806	718
125	932	813	723
126	936	821	728
127	941	828	733
128	945	835	737
129	949	842	741
130	953	850	744
131	957	858	748
132	961	866	751
133	966	874	754
134	969	883	758

Tiempo (min)	Temperatura horno (°C)	Temperatura superficial del cilindro (°C) T2	Temperatura Interna del cilindro (°C) T1
135	973	886	761
136	977	894	765
137	982	901	767
138	985	908	771
139	989	915	775
140	993	920	779
141	997	926	782
142	1001	935	784
143	1005	942	786
144	1009	948	790
145	1013	955	792
146	1017	961	795
147	1020	967	797
148	1024	975	799
149	1028	982	801
150	1031	988	803
151	1035	992	809
152	1038	1000	810

Tabla 26: Temperatura superficial, interna y del horno para la resistencia de 420kg/cm²

Fuente: Autores (2015)

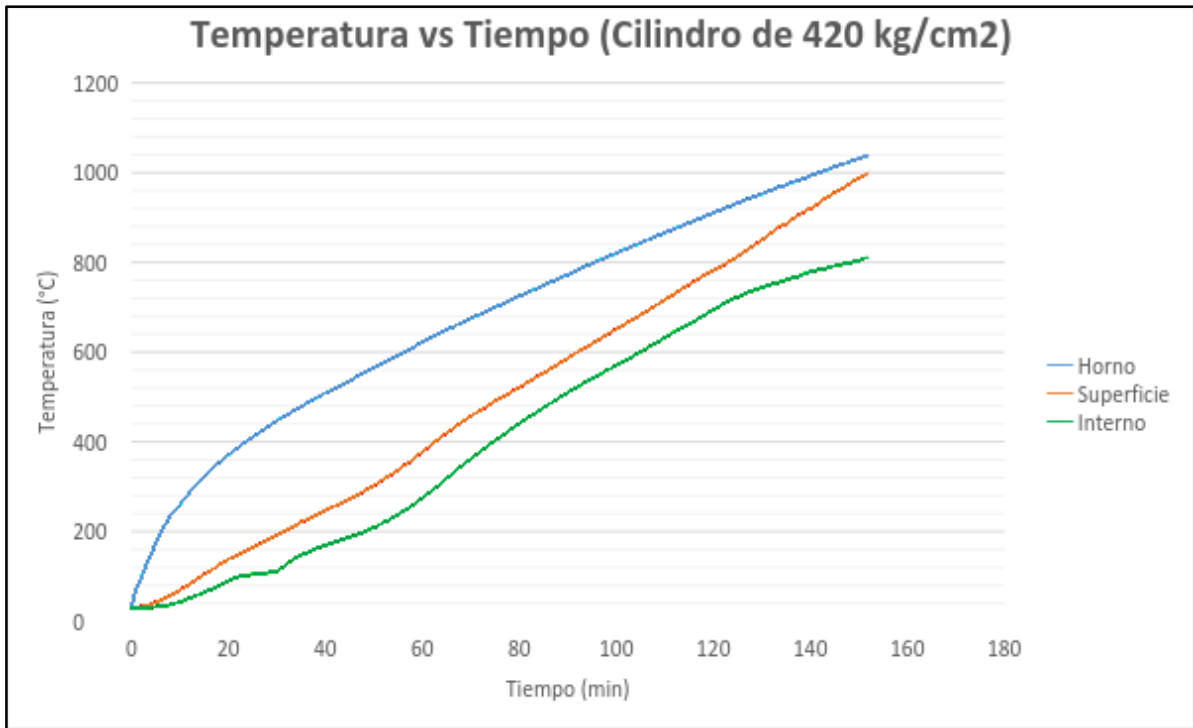


Imagen 80: Temperatura vs tiempo para la resistencia de 420 kg/cm²

Fuente: Autores (2015)

14.2.4 Resultados de los cilindros fallados para la resistencia de 420kg/cm²

Mientras que en el caso de los cilindros de 420 kg/cm² que fueron fallados a las distintas temperaturas se obtuvo los siguientes datos y gráficos.

Espécimen	Temperatura interna °C	Tiempo de Exposición (min)	Resistencia Real (kg/cm ²)	Porcentaje de pérdida (%)	Promedio de Pérdida por temperatura (%)
2	810	152	69,25	83,6	84,1
1	810	152	73,76	84,6	
2	714	123	131,11	73,5	72,2
1	714	123	119,17	70,9	
2	523	92	224,94	54,3	52,2
1	523	92	205,5	50	
2	300	63	333,88	29,6	27,7
1	300	63	316,91	25,8	
2	126	32	349,89	22,3	17,3
1	126	32	394,45	12,3	

Tabla 27: Variación de la resistencia con respecto a la temperatura (resistencia 420 kg/cm²)

Fuente: Autores (2015)

Diferencia entre temperaturas	Diferencia entre porcentajes de pérdida
1000°C-600°C	10,4 %
800°C-600°C	24,5 %
600°C-400°C	20,0 %
400°C-200°C	11,9 %
Promedio	16,7 %

Tabla 28: Diferencia porcentual de las caídas de resistencia promedio (resistencia 420kg/cm²).

Fuente: Autores (2015)

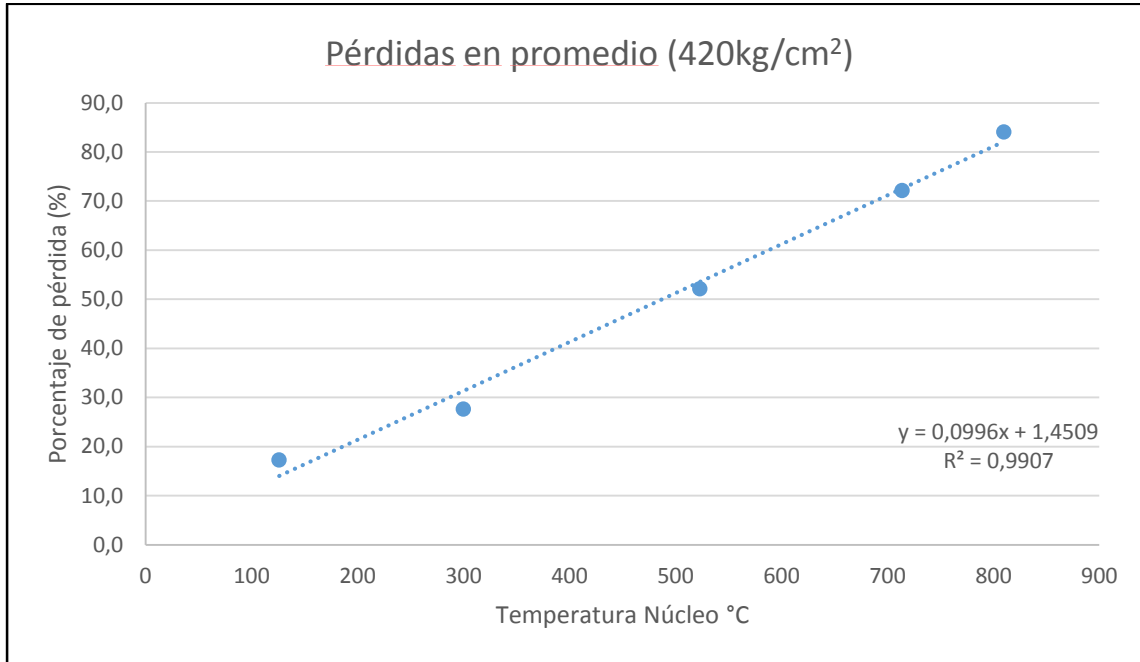


Imagen 81: Curva de pérdidas resistencia vs temperatura (420kg/cm²).

Fuente Autores (2015)



Imagen 82: Extracción de cilindros antes de ser fallados.

Fuente: Autores (2015)



Imagen 83: Extracción de cilindros antes de ser fallados.

Fuente: Autores (2015)



Imagen 84: Extracción de cilindros antes de ser fallados.

Fuente: Autores (2015)



Imagen 85: Extracción de cilindros antes de ser fallados.

Fuente: Autores (2015)

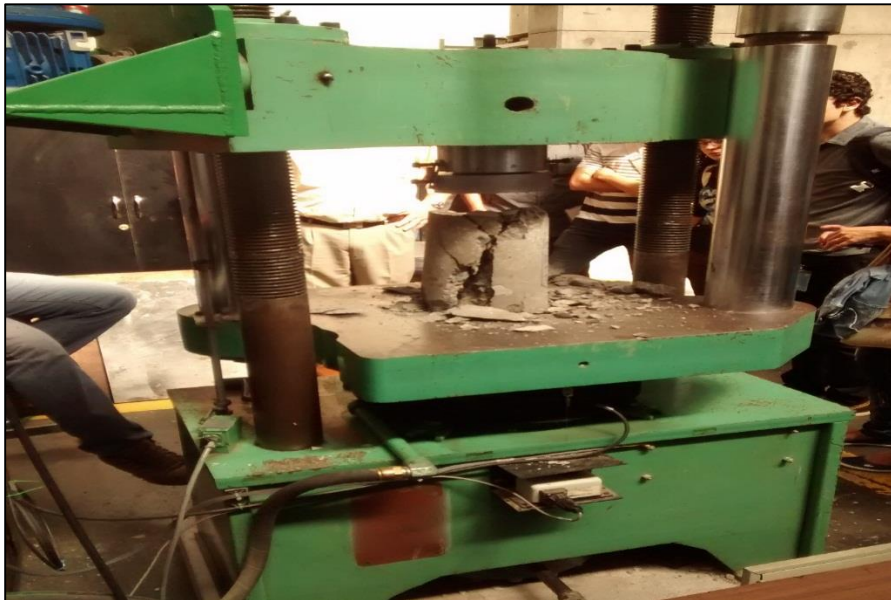


Imagen 86: Falla de cilindros.

Fuente: Autores (2015)

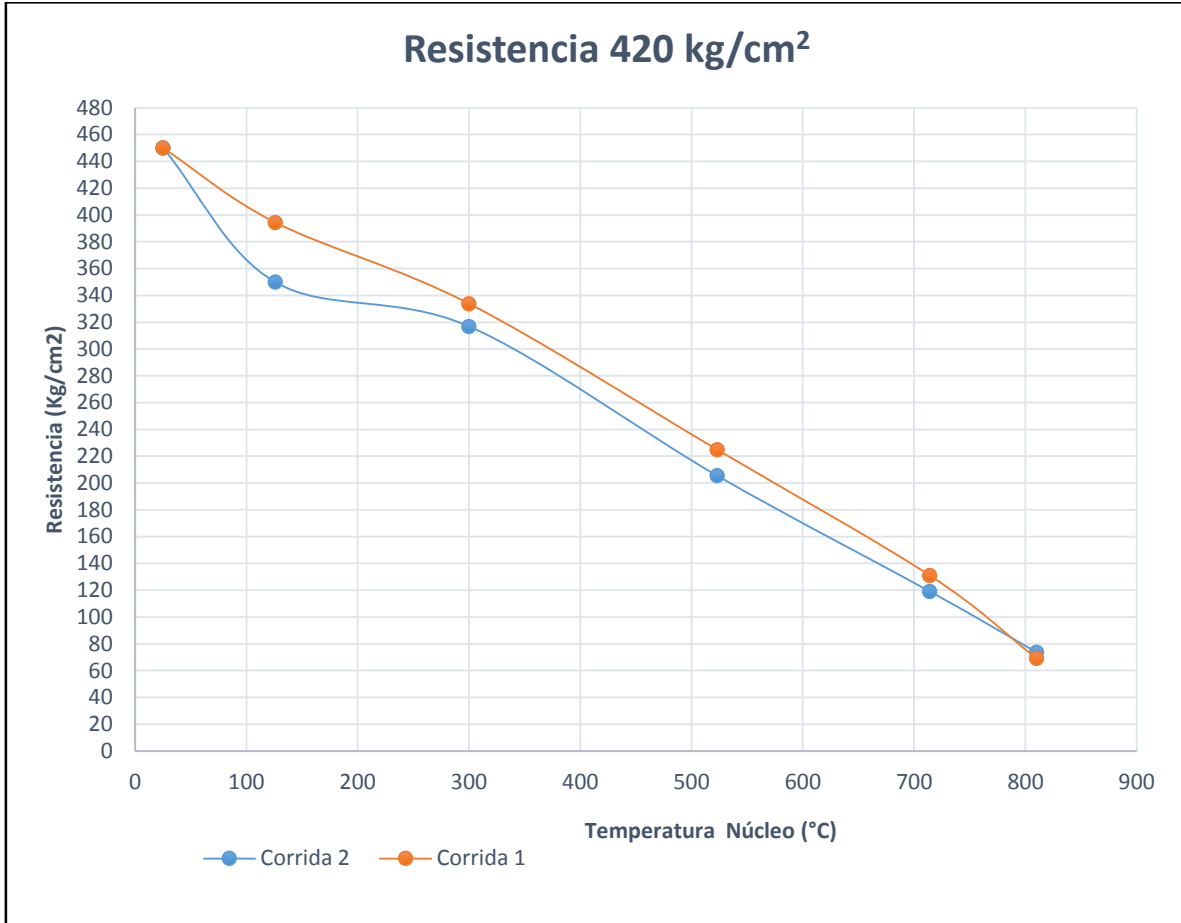


Imagen 87: Variación de la resistencia con respecto a la temperatura (resistencia 420 kg/cm²)

Fuente: Autores (2015)

Cilindro	Resistencia Real (Kg/cm ²)
1	449,7187823
2	436,7283578
3	492,6712428
4	421,2417862
Promedio	450,0900422

Tabla 29: Promedio de la resistencia real para la resistencia teórica de 420 kg/cm²

Fuente: Autores (2015)

14.3 Observación microscópica.

El siguiente apartado presenta los resultados de las observaciones microscópicas a las muestras de concreto que fueron calentadas en el horno con el fin de reconocer diferencias claras entre las piezas y establecer alguna correlación con el calor aplicado.

La primera muestra los resultados de las observaciones de la petrografía, donde se brinda información sobre la mineralogía y clasificación de los componentes de las muestras con la ayuda de un microscopio polarizado de luz. En la segunda parte se presentan imágenes hechas con el microscopio de barrido, que arrojará mayor información de los cambios ocurridos en el concreto para cada temperatura a la que fue sometida.

14.3.1 Condiciones de exposición de muestras en el horno de convección

Para cada uno de los tipos de concretos estudiados (concreto de resistencias de 420 y 700 kg/cm²), las temperaturas señaladas en la siguiente tabla fueron obtenidas utilizando un termopar que estuvo en contacto directo con la pieza de concreto mientras el horno calentaba, además se indica el tiempo que cada muestra estuvo dentro del horno hasta alcanzar cada temperatura.

Temperatura en la pieza (°C)	Tiempo (minutos)
200	9,43
400	24,83
600	39,48
800	56,38
1000	60,33

Tabla 30: Tiempo de exposición en el horno para las muestras utilizadas en la observación microscópica.

Fuente: Autores (2015)

Una vez alcanzada la temperatura para cada muestra de concreto, se apagó el horno y se retiró la pieza enfriándose a la temperatura ambiente, para su posterior observación microscópica.

14.3.2 Observación petrográfica a diferentes temperaturas:

14.3.2.1 Observación petrográfica del concreto a 420 kg/cm²

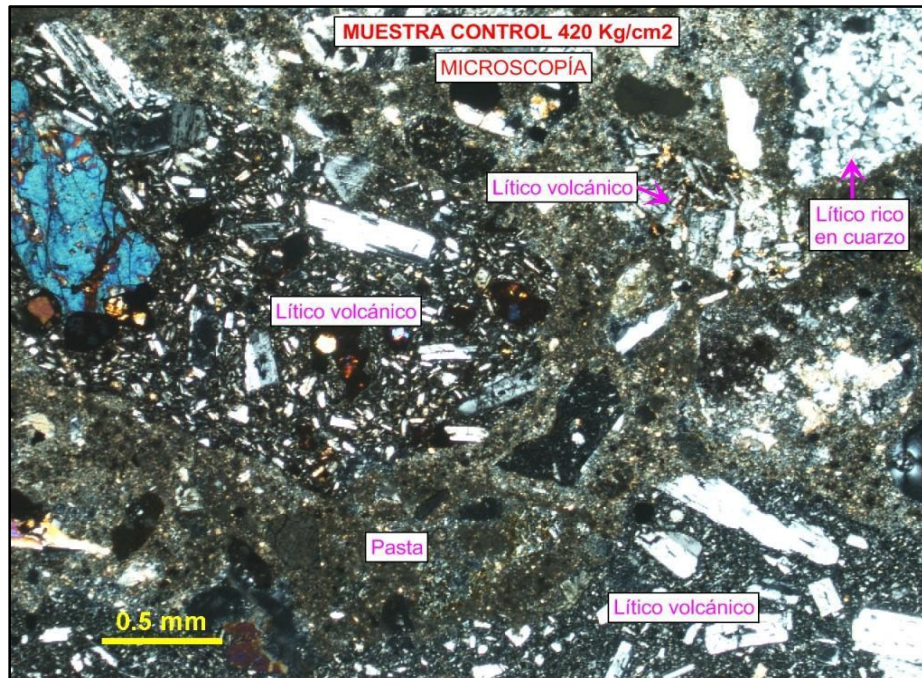


Imagen 88: Muestra de control del concreto de 420 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

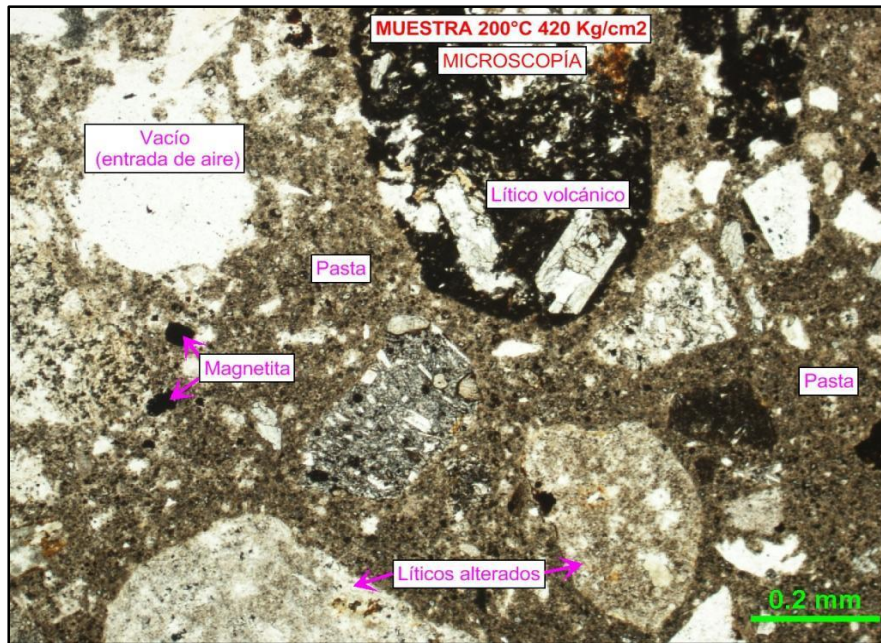


Imagen 89: Muestra a 200 °C del concreto de 420 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

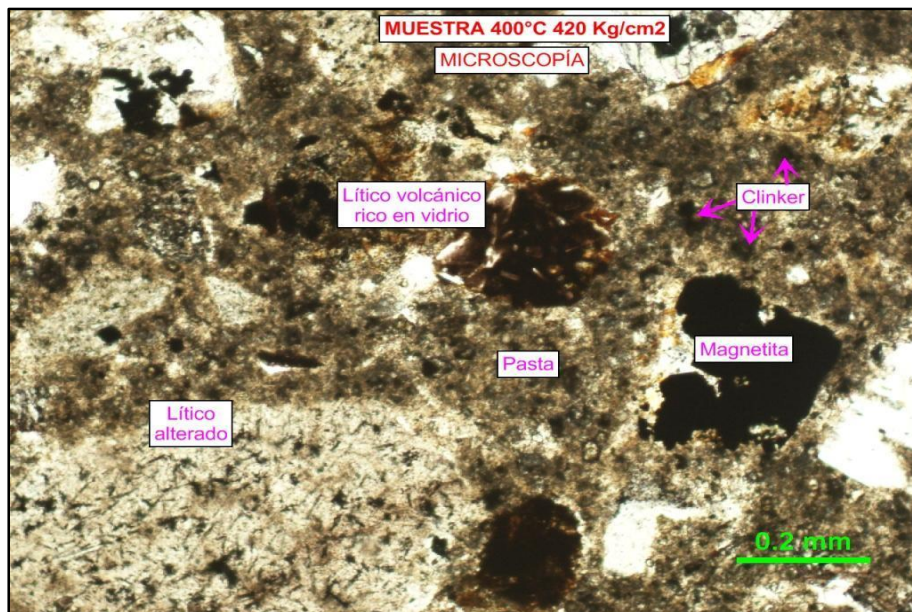


Imagen 90: Muestra a 400°C del concreto de 420 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

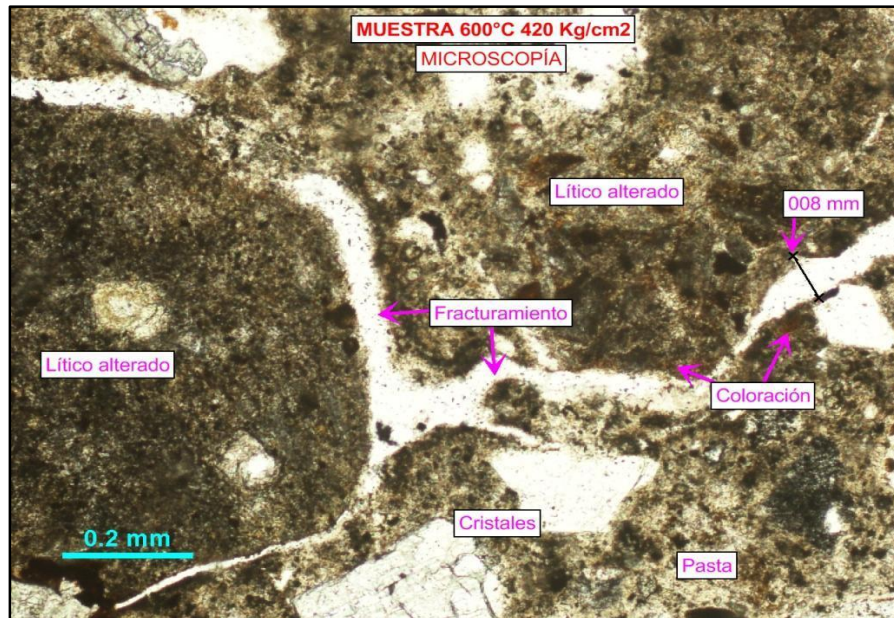


Imagen 91: Muestra a 600°C del concreto de 420 kg/cm2

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

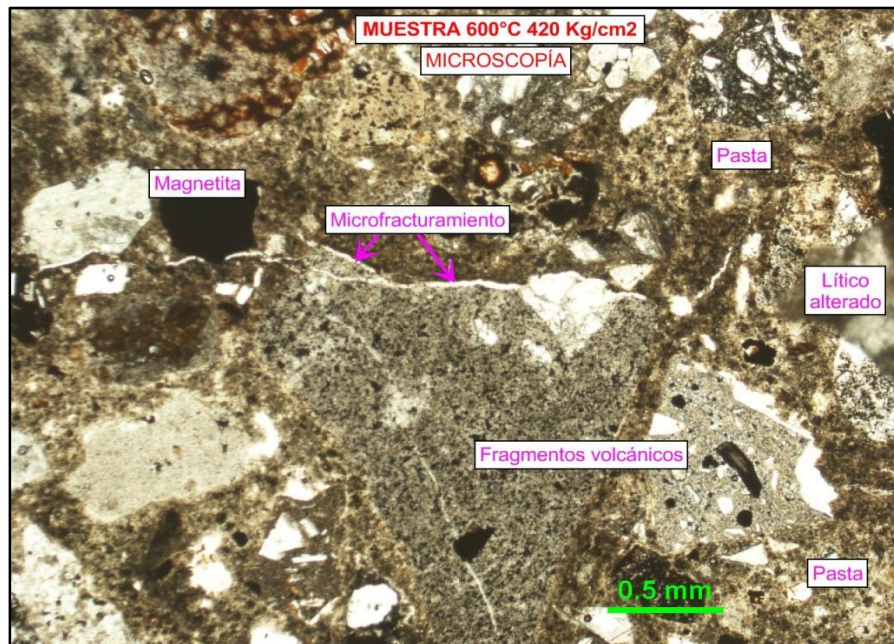


Imagen 92: Muestra a 600°C del concreto de 420 kg/cm2

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

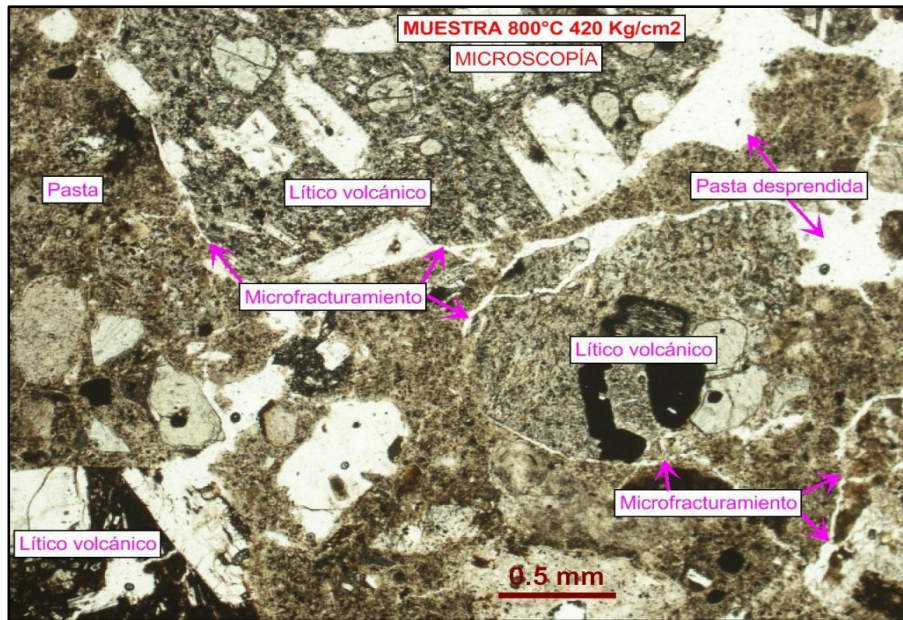


Imagen 93: Muestra a 800°C del concreto de 420 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

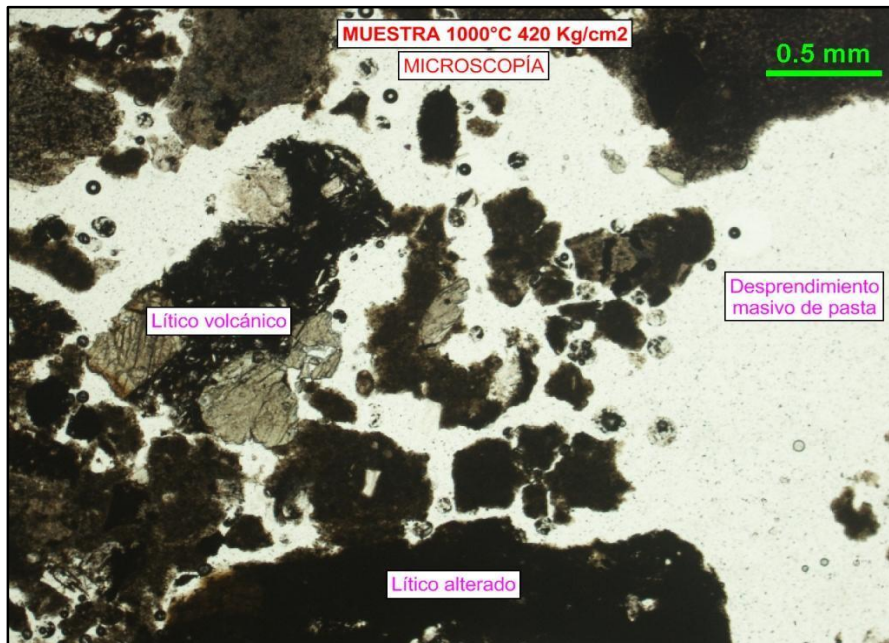


Imagen 94: Muestra a 1000°C del concreto de 420 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

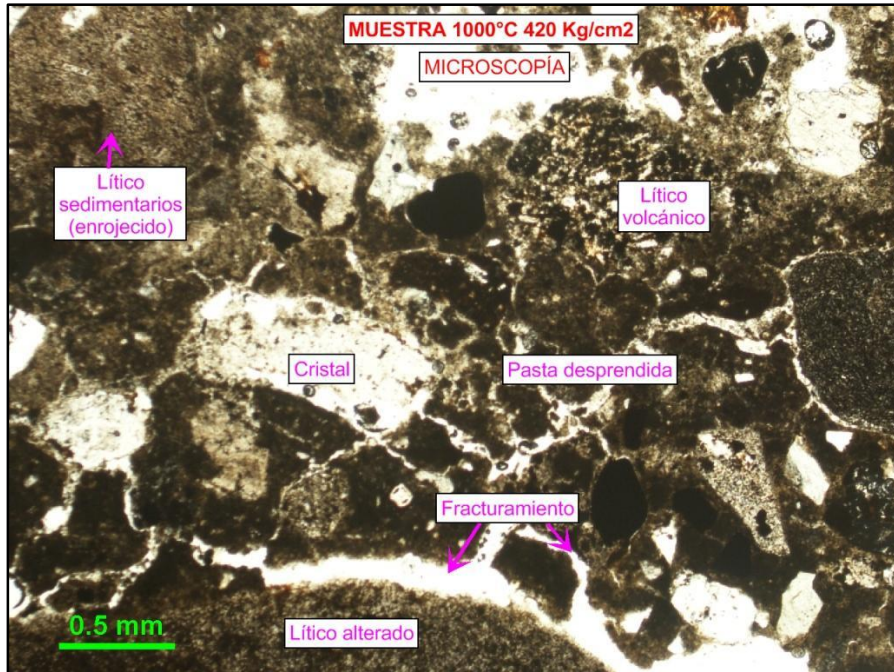


Imagen 95: Muestra a 1000°C del concreto de 420 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

14.3.2.2 Observación petrográfica del concreto a 700 kg/cm²

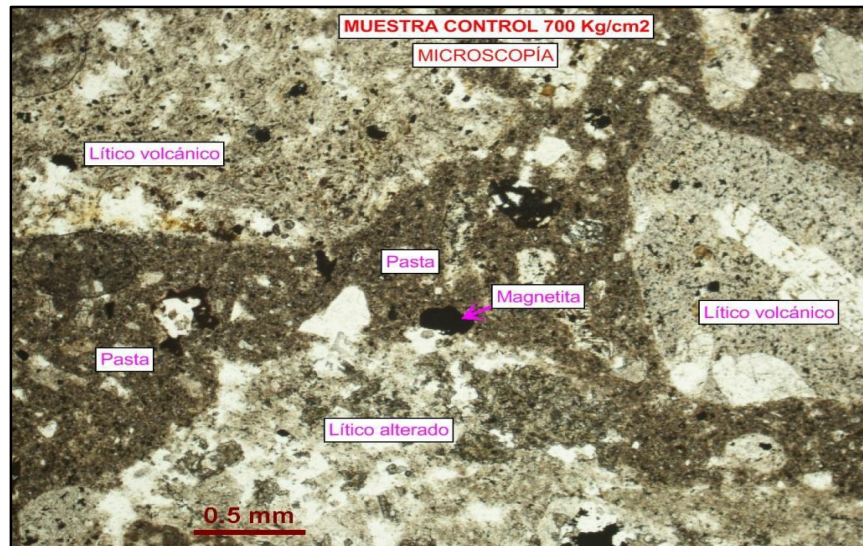


Imagen 96: Muestra de control del concreto de 700 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

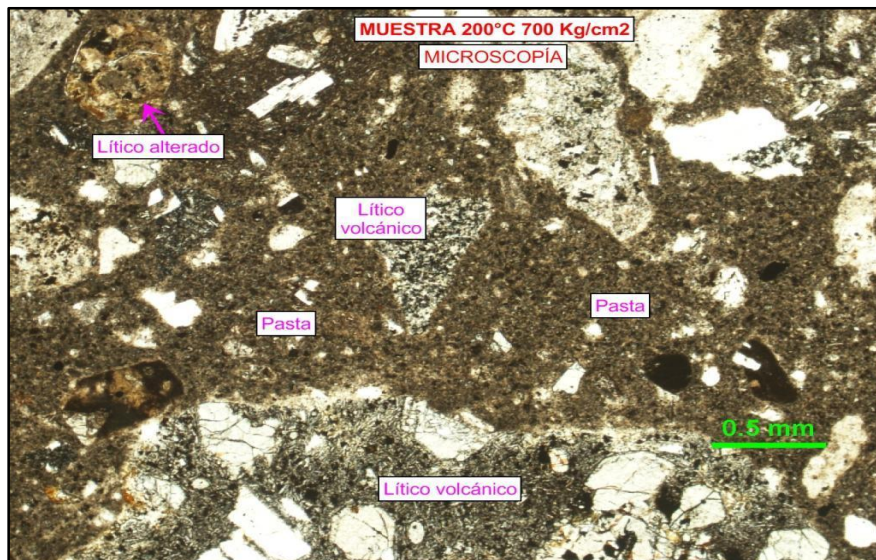


Imagen 97: Muestra a 200 °C del concreto de 700 kg/cm²

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

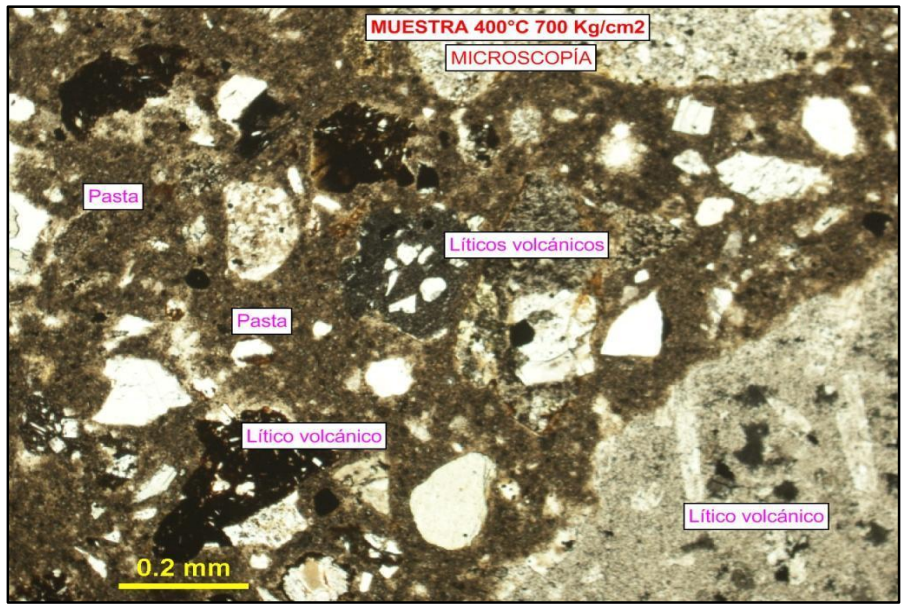


Imagen 98: Muestra a 400 °C del concreto de 700 kg/cm2

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

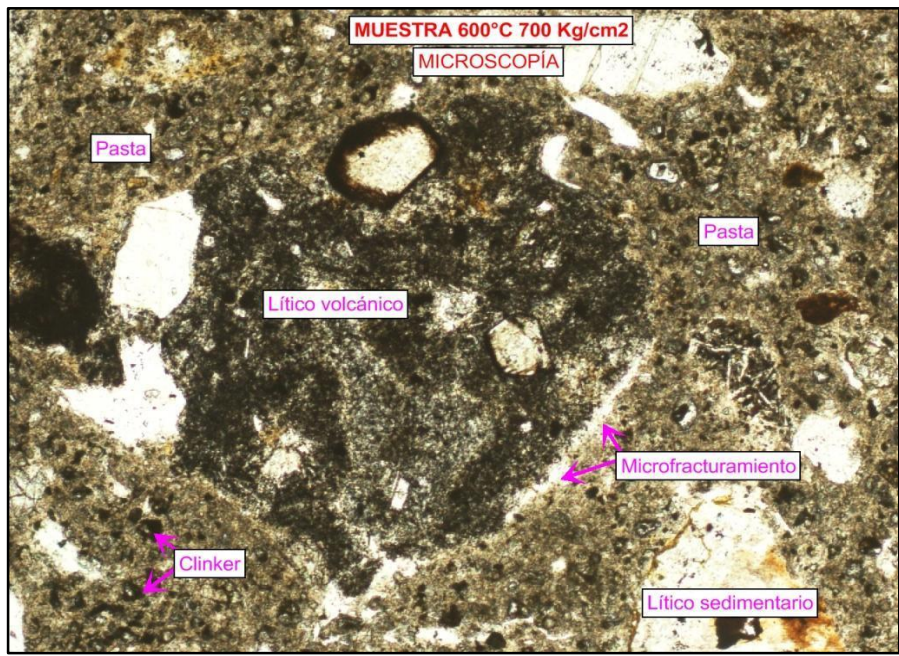


Imagen 99: Muestra a 600 °C del concreto de 700 kg/cm2

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

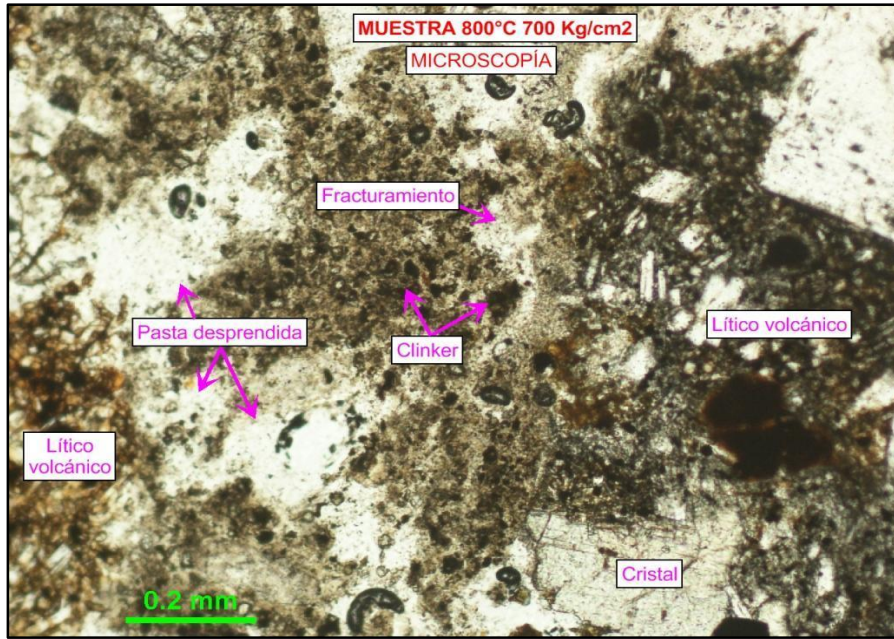


Imagen 100: Muestra a 800 °C del concreto de 700 kg/cm2

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

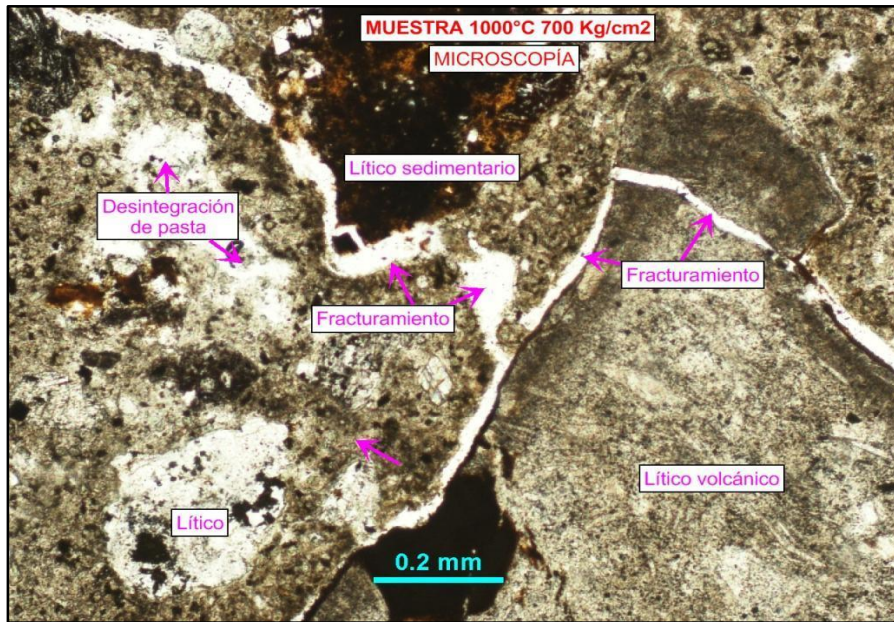


Imagen 101: Muestra a 1000 °C del concreto de 700 kg/cm2

Fuente: Manuel Barrantes (2015)

14.3.3 Observación microscópica a través del microscopio electrónico de barrido.



Imagen 102: Imagen del concreto calentado a 200 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

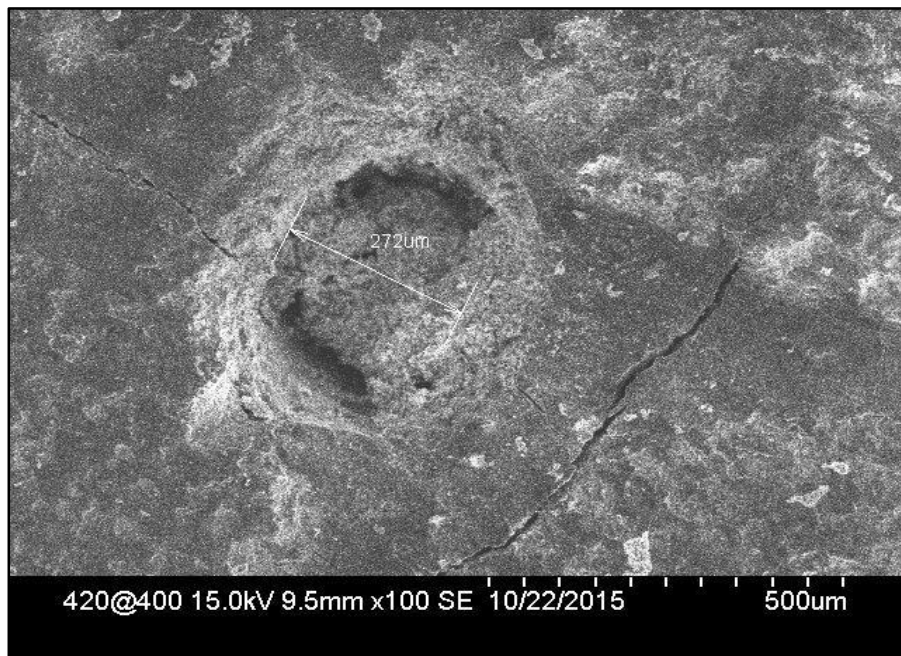


Imagen 103: Desprendimiento en concreto calentado a 400 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

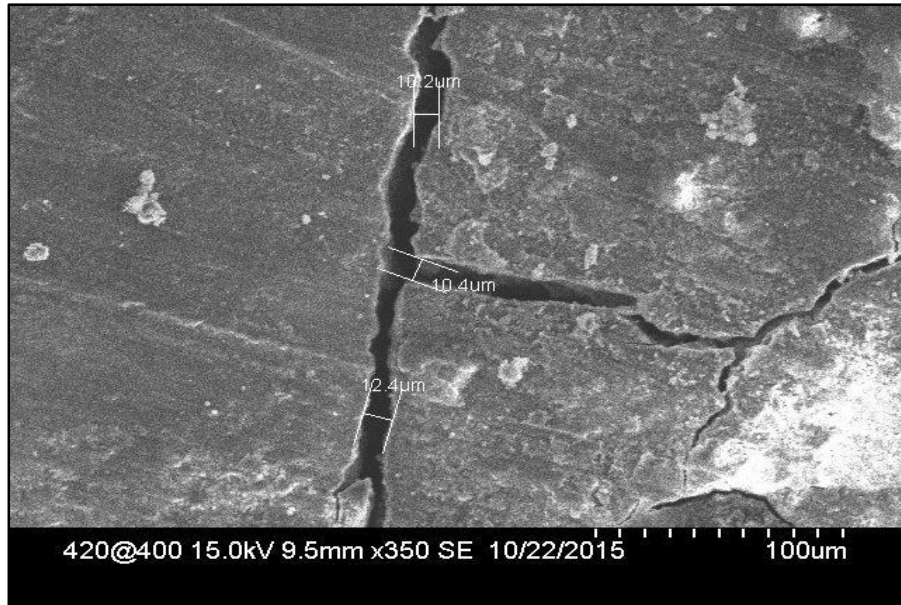


Imagen 104: Agrietamiento en concreto calentado a 400 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

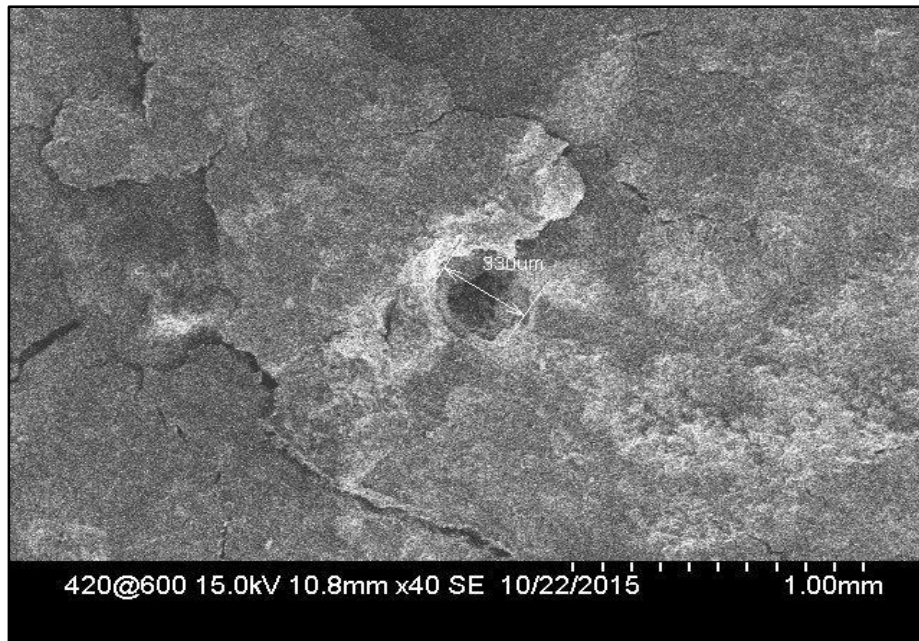


Imagen 105: Desprendimiento en concreto calentado a 600 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

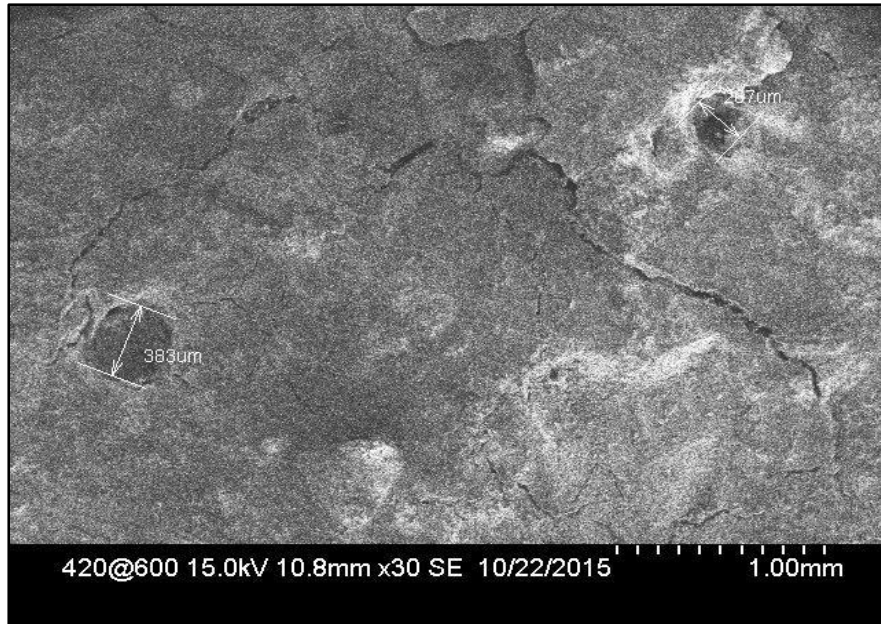


Imagen 106: Desprendimientos en concreto calentado a 600 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

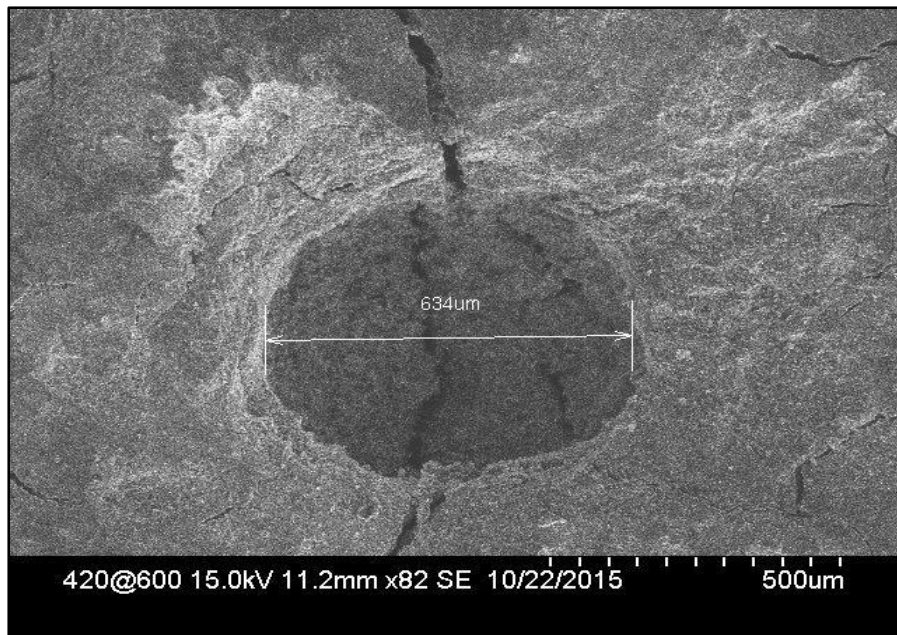


Imagen 107: Desprendimiento en concreto calentado a 600 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

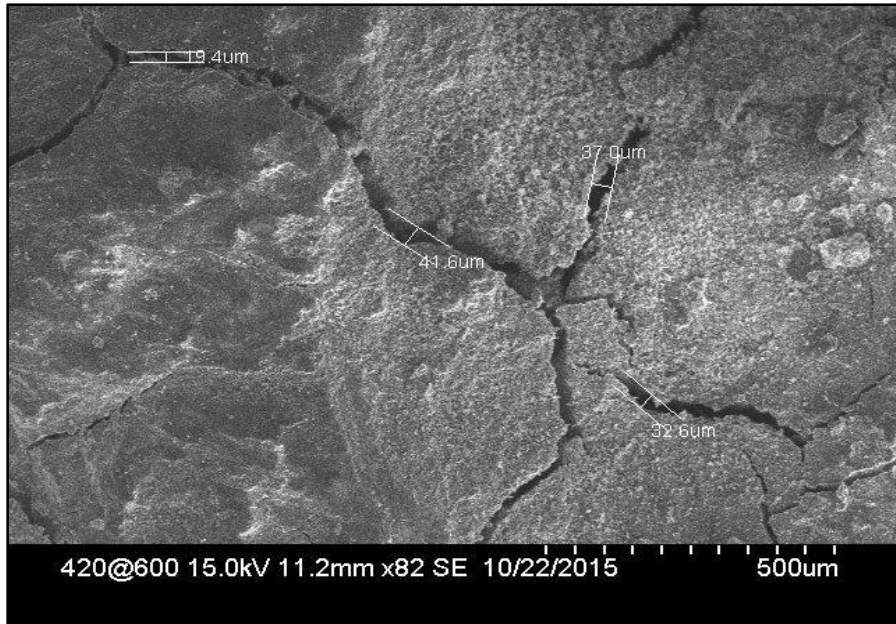


Imagen 108: Agrietamiento en concreto calentado a 600 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

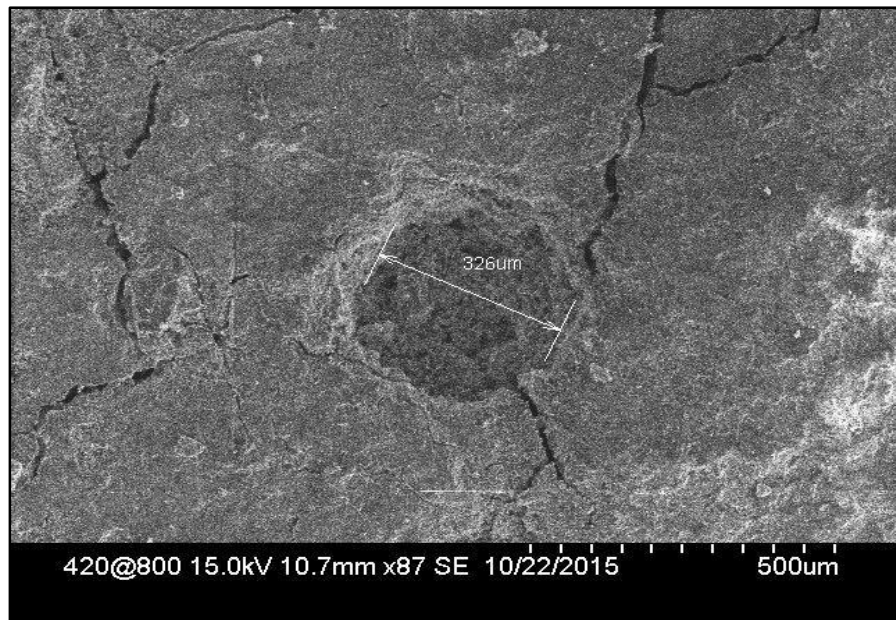


Imagen 109: Desprendimiento en concreto calentado a 800 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

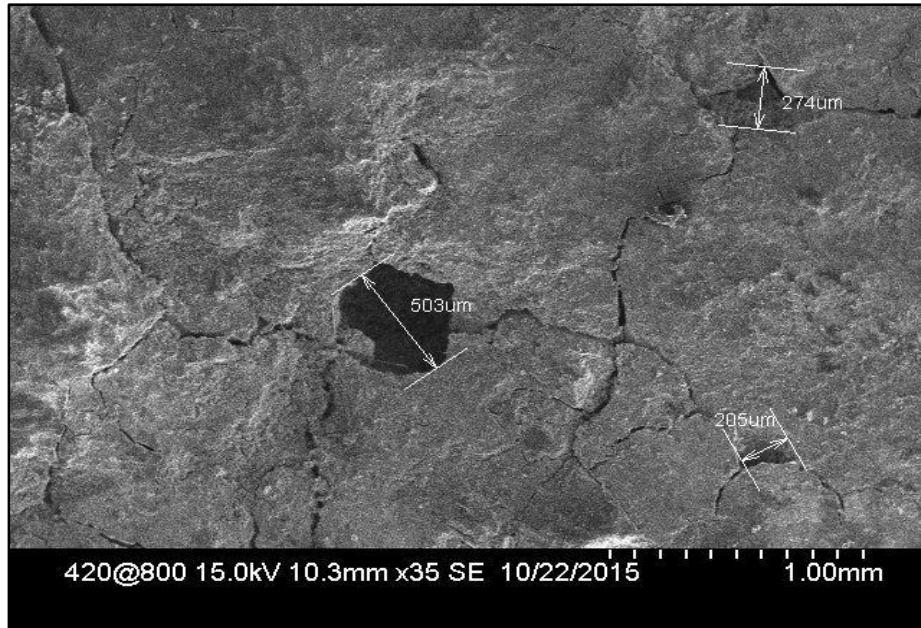


Imagen 110: Desprendimiento en concreto calentado a 800 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

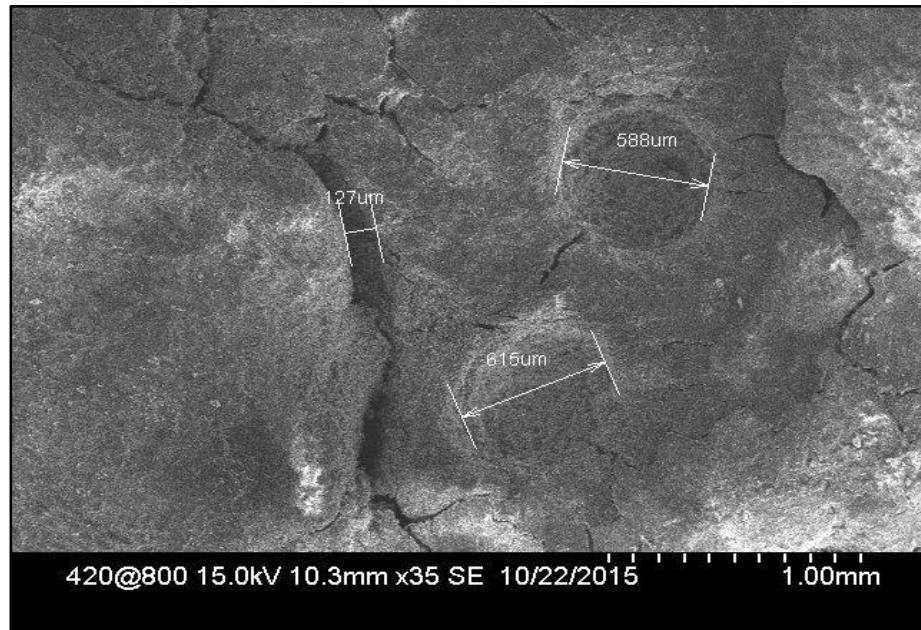


Imagen 111: Fracturación y desprendimiento en concreto calentado a 800 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

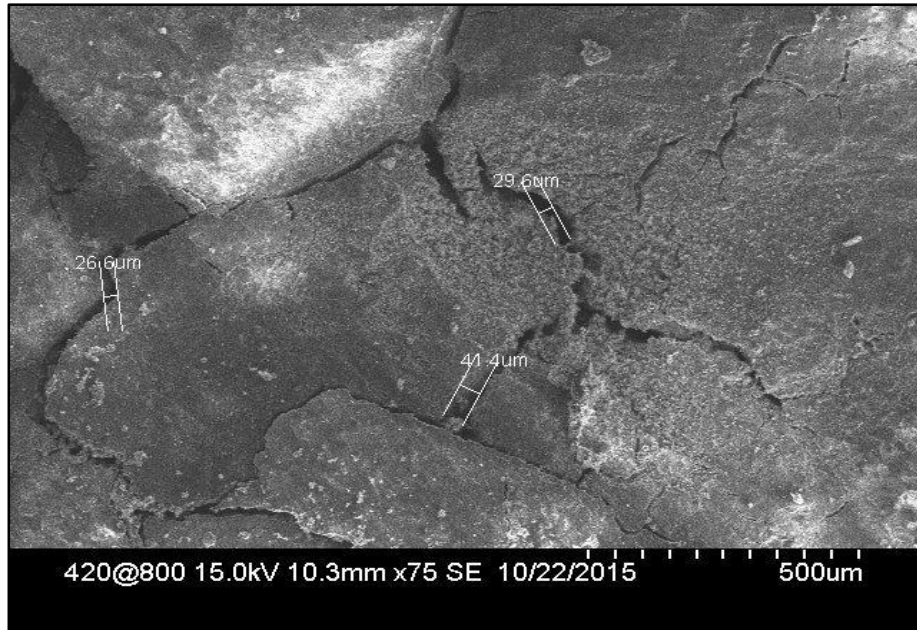


Imagen 112: Fracturación en concreto calentado a 800 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

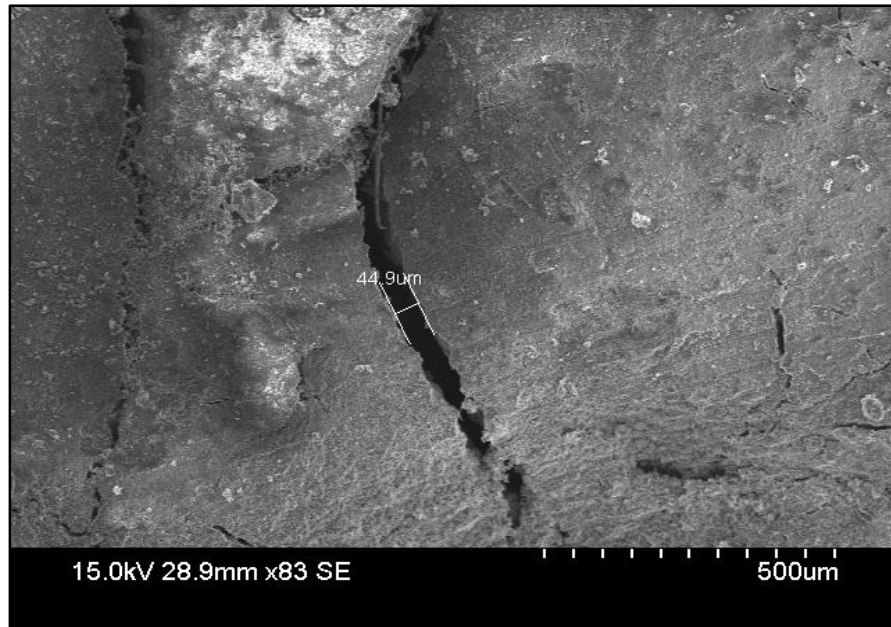


Imagen 113: Fracturación en concreto calentado a 1000 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

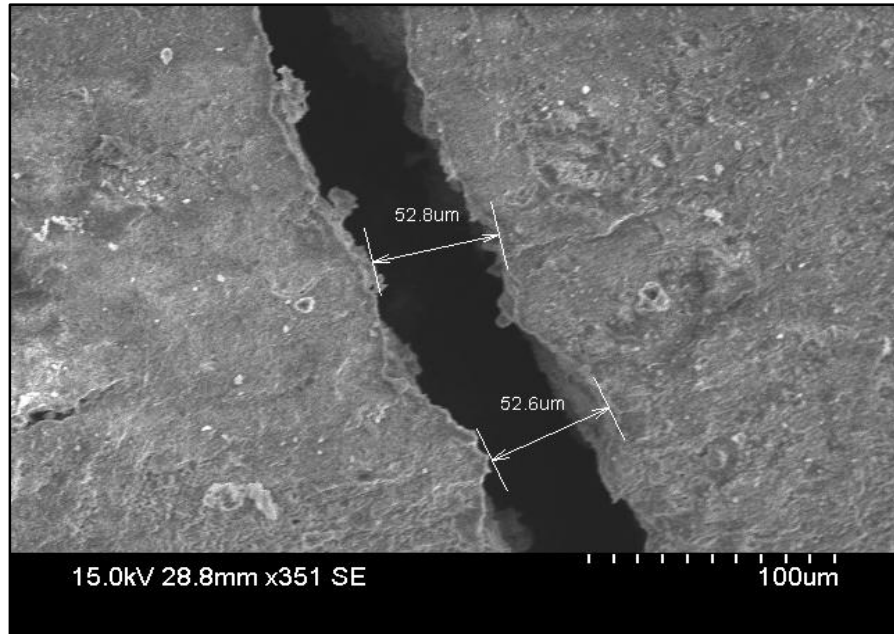


Imagen 114: Fracturación en concreto calentado a 1000 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

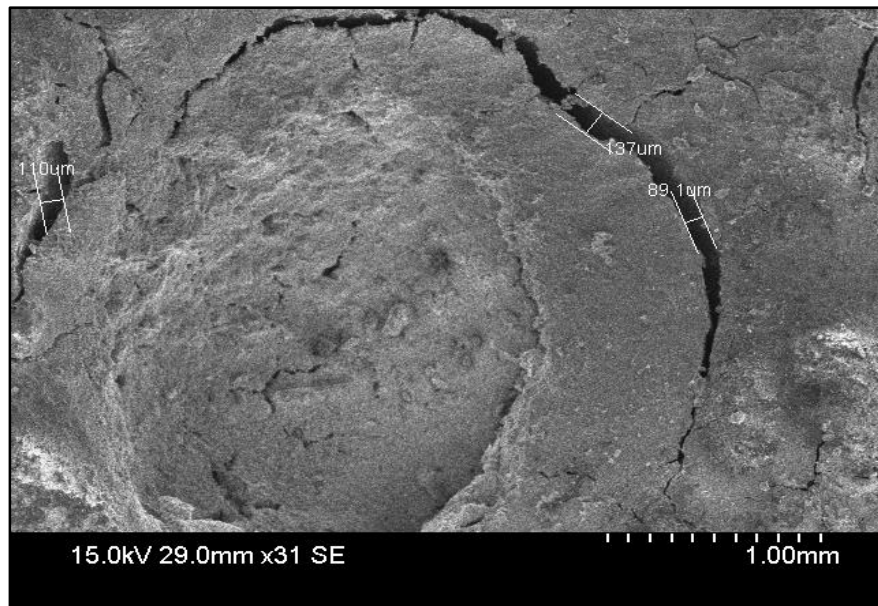


Imagen 115: Fracturación en concreto calentado a 1000 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

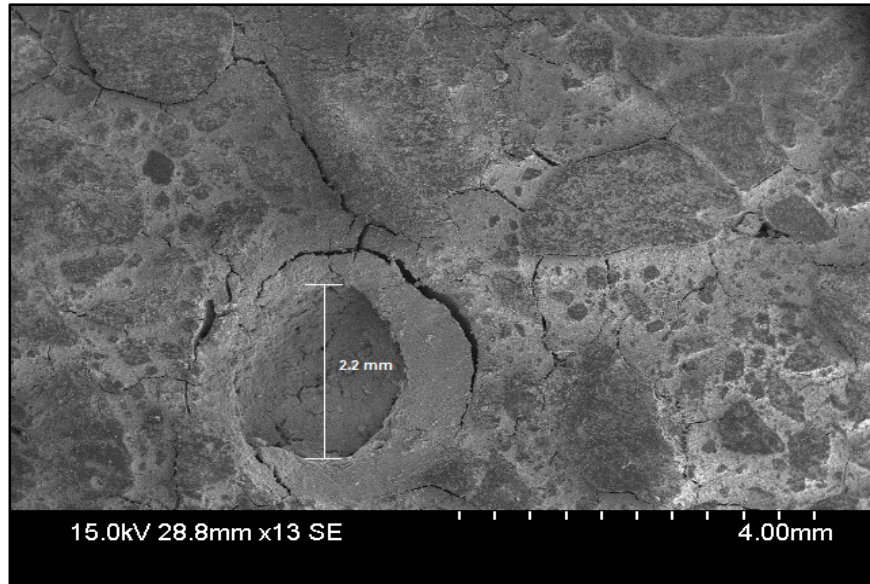


Imagen 116: Fracturación y desprendimiento en concreto calentado a 1000 °C.

Fuente: Ciemic (2015)

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se ofrece una interpretación a los resultados obtenidos durante las experimentaciones llevadas a cabo en el laboratorio, mientras se estudiaron las losas y cilindros de concreto durante la extensión de esta investigación.

15.1 Resultados del experimento de panel radiante.

15.1.1 Estimación empírica del coeficiente de conducción de calor del concreto.

La determinación de la conductividad térmica del concreto no siempre es una tarea sencilla, y aunque existen distintas aproximaciones tanto en análisis de estado estable como transitorio, los equipos necesarios para la repetición de experimentos normados como se propone en ISO 8301 (Determinación de la resistencia térmica en estado estable y propiedades relacionadas – Aparato de medición de flujo de calor) e ISO 8302 (Aislamiento térmico – Determinación de la resistencia térmica y propiedades relacionadas – Aparato confinado de placas calientes), donde se utiliza un aparato de medición de flujo de calor (que incluye un transductor de flujo de calor bastante costoso), o un aparato de placas calientes, que debe diseñarse especialmente, además de otros inconvenientes de dichos experimentos según señalan Zach, Hubertova , & Hroudova, (2009).

La mayoría de situaciones del diario vivir que involucran algún tipo de transferencia de calor, implican condiciones transitorias, es decir, variables en el tiempo, como por ejemplo la ganancia de calor a través de las paredes de una casa en verano, o el enfriamiento de la comida en nuestro refrigerador, donde la variaciones de temperatura de los cuerpos en estudio, cambian tanto con la posición dentro del mismo, como con el tiempo, sin embargo, la mayoría de estos escenarios pueden ser aproximados por métodos simplificados de análisis de estado estable, tal y como lo indica Cengel (2007), con porcentajes de error relativamente bajos para la mayor cantidad de situaciones, despreciando las muchas veces complejas

distribuciones de los gradientes térmicos encontrados en un gran número de los modelos de interés.

En el caso del análisis de la transferencia de calor a través de una losa de concreto, expuesta a una fuente de radiación -aunque ésta sea constante- representa claramente un efecto transitorio de las condiciones dentro de la misma, ya que las temperaturas de todos los puntos del cuerpo en estudio, varían con el tiempo, conforme el volumen de control tiende a estabilizarse buscando un equilibrio térmico, el cual se alcanzaría si el experimento se extendiera lo suficiente.

En nuestro caso específico de estudio, al final de la prueba, las mediciones expresan un comportamiento que se asemeja a un estado invariable con el tiempo, lo anterior se ve reflejado en la estabilización del gradiente de térmico que se muestra en el siguiente gráfico, donde vemos que todas las mediciones de temperatura, aunque continúan variando durante la totalidad de la prueba (aún no se ha alcanzado una homogeneización térmica), tienden a hacerlo en menor medida, y el gradiente entre las temperaturas de la superficie expuesta y la no expuesta directamente, tiende a comportarse de manera estacionaria.

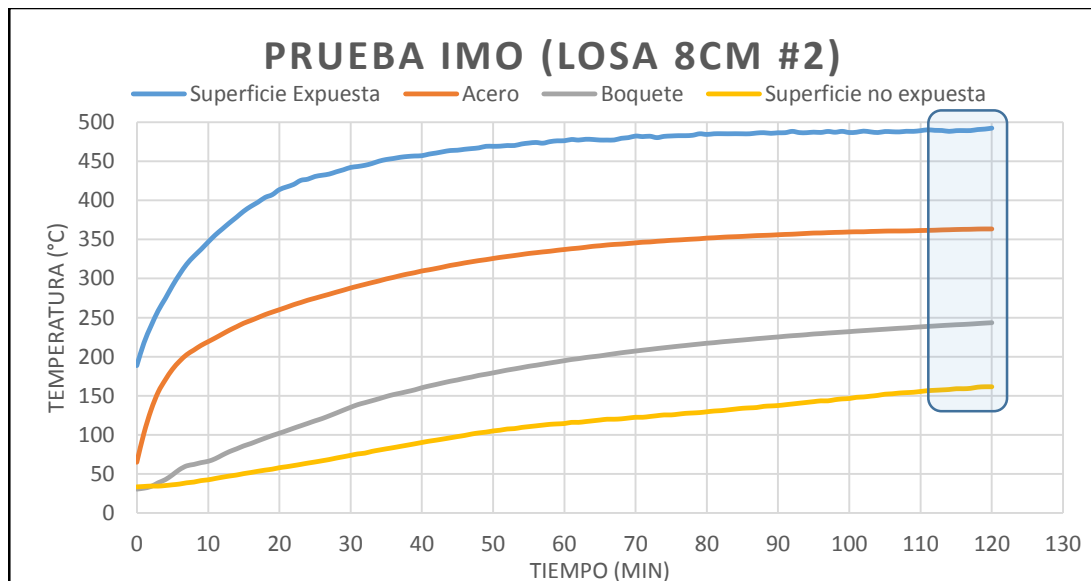


Figura 1: Estabilización del gradiente térmico en la sección transversal de una losa de 15 cm de espesor (Corrida #1).

Fuente: Autores (2015)

Como se comentó en la sección 14.1 de la presentación de los resultados obtenidos en el experimento de la exposición de las losas de concreto al flujo de calor obtenido del IMO, a partir de las mediciones de temperatura se logró estimar el coeficiente de transferencia de calor por conducción (k) del concreto, basándonos en el modelo de análisis de estado estable propuesto por el francés J.B. Fourier en 1822 (Mills, 1997) quien establecería inicialmente que en un cuerpo de sustancia homogénea, el flujo de calor por unidad de área, perpendicular a la dirección del mismo, se referiría al gradiente térmico mediante una relación directamente proporcional a la razón del cambio de temperatura con la distancia en un eje coordenado (espesor) que se relaciona físicamente con las dimensiones del cuerpo, es decir:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde el flujo de calor por unidad de área se puede expresar como:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = q \quad (2)$$

Finalmente, despejando (2) en (1), e integrando sobre el espesor de pared y el tiempo, luego de reacomodar la ecuación, podemos obtener:

$$\frac{\dot{Q}}{A} \int_0^L dx = - \int_{T_1}^{T_2} k dT \rightarrow \frac{\dot{Q}L}{A} = k(T_1 - T_2) \quad (3)$$

Luego de despejar la relación anterior para el coeficiente de conducción de calor, y de sustituir la diferencia de temperaturas por un gradiente operacional se obtiene:

$$k = \frac{\dot{Q} * L}{\Delta T * A} \quad (4)$$

Donde k es el coeficiente de conducción de calor (expresado en W/m^0C), L el espesor de la losa de concreto (expresado en m), ΔT la diferencia de

temperaturas entre la superficie expuesta directamente a la radiación y la superficie no expuesta (expresado en $^{\circ}\text{C}$ o K), y A (expresado en m^2) el área transversal de la losa de concreto analizada.

Cabe destacar que el flujo obtenido del IMO fue constante durante toda la prueba, con magnitud de 50 KW/m^2 , lo que representa un flujo de calor por unidad de área, el cual disminuye considerablemente al alejarnos del punto de radiación máxima sobre la losa, ubicado cerca de la colocación del radiador del aparato de panel radiante, es por eso que para que el flujo de calor por unidad de área pudiera incluirse en (4) este debía ser multiplicado por un área crítica, la cual fue considerada el diámetro del transductor de flujo de calor usado para constatar el flujo de 50 KW/m^2 en la calibración de las condiciones iniciales de cada prueba individual.

Lo anterior, dado que el IMO está construido de tal manera que el flujo de calor varía con el posicionamiento de la muestra, ya que el aparato está diseñado para medir la propagación de la llama de ciertos materiales combustibles al exponerlos a una radiación crítica, y no está hecho para entregar un flujo estable a lo largo de todo el espécimen.

Hay que aclarar también que el enfoque anterior, representa un análisis unidimensional, es decir, que supone que la transferencia de calor en cualquier otro eje aparte del eje x (representado por el espesor de la losa), se puede desestimar, o bien, representa un cambio muy pequeño como para tener un efecto perceptible en el resultado de la estimación de la conducción de calor, además, las mediciones en otros ejes coordenados hubieran complicado severamente el análisis de los resultados, y finalmente, el objetivo del análisis del comportamiento de entrepisos de concreto sujetos a las posibles condiciones de un incendio, desestima la transferencia de calor que no sea a través del entrepiso atravesándolo perpendicularmente, siendo este mecanismo, el que implica un mayor efecto sobre el ensamble.

15.1.2 Observaciones y correlaciones de las condiciones de aceptación de la norma ASTM E119.

Tal y como se señaló en la **Sección 3 de Alcance y Limitaciones**, luego de concluida cada prueba, se analizarían las condiciones de aceptación propuestas por la publicación ASTM E119, las cuales se extraen de la sección *8.6.5 Condiciones de Aceptación – Clasificación de ensamble restringido*, luego de haber clasificado el tipo de ensamble probado en base al apéndice X3 de la misma publicación, y el Manual Técnico PC 2012, los cuales concuerdan en que la forma en la que se instalan los sistemas de entrepiso estudiados, lo clasifican como un ensamble restringido, según la tabla X3.1 de la ASTM E119, dicho esto, las condiciones enumeradas en la sección 8.6.5 de la misma norma son:

1. El espécimen de prueba debe haber soportado la carga aplicada durante el periodo de su clasificación sin haber desarrollado condiciones en la superficie no expuesta que conllevarían la ignición de bastos de algodón.
2. La transmisión de calor a través del espécimen durante el tiempo de su clasificación no debe elevar la temperatura promedio de la superficie no expuesta más de 139 °C sobre su temperatura inicial.
3. Para especímenes que empleen miembros estructurales de acero (vigas, viguetas de acero de alma abierta, etc.) espaciados más de 1.2m entre centros, el espécimen debe alcanzar una clasificación de ensamble restringido en base a la temperatura del acero estructural, sin haber excedido 704 °C en ningún punto, y sin que la temperatura promedio de las mediciones del acero haya excedido 593 °C durante la primer hora. Para clasificaciones de más de una hora, este criterio debe aplicar para la mitad de su clasificación o una hora, cualquiera que sea mayor.
4. Para especímenes que empleen miembros estructurales de acero (vigas, viguetas de acero de alma abierta, etc) espaciados 1.2m entre centros o menos, el espécimen debe alcanzar una clasificación de ensamble restringido en base a la temperatura promedio del acero estructural, sin haber

excedido 593 °C durante la primera hora. Para clasificaciones de más de una hora, este criterio debe aplicar para la mitad de su clasificación o una hora, cualquiera que sea mayor.

5. Para especímenes que emplean vigas de concreto convencionales espaciadas más de 1.2 m entre centros, el espécimen debe alcanzar una clasificación de ensamble restringido en base a la temperatura promedio del acero de tensión, en cualquier sección de la viga de concreto sin haber excedido 427 °C para acero pre-tensado estirado en frío, o 593 °C para acero de refuerzo, durante la primera hora. Para clasificaciones de más de una hora, este criterio debe aplicar para la mitad de su clasificación o una hora, cualquiera que sea mayor.
6. La clasificación de resistencia contra el fuego debe ser reportada según se desarrolla al aplicar las condiciones de aceptación anteriormente descrita.

Cabe destacar que criterios anteriores, coinciden con los propuesto en la sección 11.5 de la NFPA 251, y cualquiera de los dos métodos son congruentes en cuanto a resultados de la clasificación de un ensamble dado como resistente al fuego.

Posteriormente según la sección 9 de ASTM E119 se indica que se debe reportar dentro de los resultados de una inspección posterior al experimento, la formación de grietas, astillamiento deformaciones, ignición del espécimen, propagación de llama, o formación de humo.

De lo anterior, en cuanto a las condiciones de aceptación propuestas en ASTM E119 y NFPA 251, se expone un análisis general de los resultados obtenidos en las pruebas llevadas a cabo:

1. Al no poder emular la condición de carga a escala, esta variable no pudo ser estudiada en el laboratorio, sino que mediante el experimento, se estimó el coeficiente de conducción de calor del concreto de la prueba, y con esta información se simularon condiciones a escala real de dos espesores de losa (8 cm y 25 cm) mediante el uso de software capaz de estudiar grandes matrices de variables, a través del método de análisis de elementos finitos

(ver sección 15.1.3) y durante ningún experimento se percibió la ignición de los bastos de algodón colocados sobre la superficie no expuesta del espécimen en estudio, aunque en los espesores de 8 cm, el algodón se carbonizó a raíz del aumento de temperatura (ver sección 14.1).

2. La transmisión de calor a través del espécimen, tabulada en la última columna en las tablas de resultados de la sección 14.1 (ΔT_a) representada por la elevación de la temperatura crítica (diferencia de temperatura entre la superficie no expuesta al inicio y al final de la prueba), no debía superar nunca los 139 °C antes de que se considerase que el entrepiso había fallado en su clasificación como resistente al fuego 2 horas (condición de estudio durante las pruebas llevadas a cabo), lo cual ocurrió únicamente en la primer prueba a losas de 8cm de espesor, donde dicha temperatura fue alcanzada a los 114 minutos cuando se registraron 167,5 °C en la primer corrida, dado que el experimento inició a los 28 °C, una temperatura mayor a los 167 °C representa romper el límite crítico de temperatura permitido por la norma.

Lo anterior no se observó en ninguna otra prueba individual, incluso en la segunda prueba a una losa de 8 cm de espesor, donde la temperatura crítica alcanzó solo 133.5 °C, posteriormente, dicho gradiente disminuye gradualmente con el aumento de espesor, llegando a un valor mínimo de alrededor los 50 °C, lo cual no deja de representar una elevación importante en la temperatura de un suelo que podría ser habitado por personas.

Es importante considerar que en ASTM E119 la temperatura del horno debe alcanzar 1010 °C al llegar a las dos horas de exposición, y en el caso del experimento usando el IMO no se registraron más de 500 °C en ningún caso, lo que descarta prácticamente a las losas de 8 cm de espesor como resistentes dos horas al fuego, análisis posterior del aumento de la temperatura crítica bajo condiciones simuladas por computadora se ofrecen en 15.1.3.

3. Esta condición no aplica dada la configuración de las losas estudiadas, donde el acero de refuerzo se dispone a menos de 1.2 m de distancia entre los torones, medidos horizontalmente.
4. En ningún caso particular el acero de refuerzo alcanzó más de 370 °C, por lo que ningún entrepiso mostró falla en este punto, resultados estimados en condiciones más extremas simuladas por computadora se pueden encontrar en 15.1.3.
5. Esta condición no aplica dada la configuración de las losas estudiadas, dada la configuración de instalación de las mismas, y la ausencia de vigas de concreto para ensamble.
6. Ya que el experimento llevado a cabo no tenía por intención una catalogación de los ensambles estudiados por su resistencia ante el fuego, clasificándolos en horas de resistencia, no podemos entonces pretender dicha clasificación, pero si la estimación del comportamiento de los mismos antes el fuego.

15.1.3 Resultados de la simulación en COMSOL Multiphysics®.

Dado que al momento de realizarse los experimentos, no se podían emular en el laboratorio las condiciones de prueba sugeridas por la ASTM E119, se optó por realizar una simulación mediante el software de solución de sistemas de elementos finitos COMSOL Multiphysics, como ya se comentó previamente.

Una de las condiciones de aceptación para poder clasificar un ensamble de entrepisos como resistente ante el fuego 2 horas, según la normativa adoptada para los experimentos llevados a cabo, es que el ensamble no debía permitir la transferencia de calor a través del mismo en tal medida que la temperatura de la superficie no expuesta directamente a la radiación de calor, aumentare más allá de 139 °C respecto a su temperatura inicial, lo cual ocurriría cuando la superficie no expuesta lograra alcanzar los 167 °C, ya que el experimento inició a 28 °C en promedio, y dicha condición se alcanzó antes de las dos horas para el caso del ensamble de Losa Lex de 8cm, aunque lo anterior no sucedió así para el ensamble de 25 cm de espesor.

La condición de mantener la carga de diseño durante la prueba no pudo ser emulada dada la gran capacidad de computación de datos requerida para analizar el modelo en tres dimensiones, sin embargo, la transferencia de calor en el mismo mediante un análisis del modelo en 2D, si pudo llevarse a cabo, haciendo evidente la falla del entrepiso de 8 cm en su condición de no poder garantizar una resistencia térmica según lo estipulado en la ASTM E119, para el periodo de tiempo en estudio.

Cabe señalar que lo anterior es parte de una estimación del comportamiento del entrepiso, basado en su configuración geométrica, y un coeficiente de transmisión de calor por conducción más conservador ($1.8 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$) mayor que el hallado empíricamente ($1.29 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$) para los ensambles de 8 cm de espesor, a partir del análisis estacionario de los resultados obtenidos en el laboratorio, lo cual indicaría que el entrepiso podría ser aún más débil de lo estipulado mediante la simulación.

Para el caso del ensamble de 25 cm de espesor de losa, se utilizó el coeficiente de transmisión de calor por conducción hallado durante el experimento de panel radiante ($2.4 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$), siendo este menos resistivo que el valor usado durante la prueba de 8 cm de espesor, y aun así, el entrepiso resistió satisfactoriamente la prueba, alcanzó temperaturas de alrededor de tan solo 60°C , por lo que basándose en solamente la transferencia de calor en este sistema de entrepisos, el mismo podría ser clasificado como resistente más de 2 horas contra el fuego.

15.1.4 Comentarios generales del análisis gráfico.

Esta sección pretende señalar algunos resultados que pueden obtenerse a partir de un simple análisis gráfico de las curvas de temperatura vs tiempo, obtenidas durante los experimentos de las losas de concreto expuestas a una radiación controlada.

A continuación podemos entonces enumerar los siguientes puntos de interés:

1. La temperatura del aire dentro del boquete presente en las losas muestra un comportamiento muy similar para experimentos distintos en los mismos

espesores, lo que indicaría que las condiciones de repetibilidad de cada prueba son buenas, tal y como puede observarse en las gráficas obtenidas a partir de las mediciones de temperatura en cada losa en cada experimento, donde por ejemplo, en las dos corridas de losas de 25 cm de espesor, la temperatura máxima alcanzada por el aire atrapado en los boquetes, al finalizar las dos horas, alcanzó 135.7 °C y 141.5 °C, representado una diferencia de tan solo un 4.1%, algo similar se observa en las losas de 8 cm de espesor, donde dichas temperaturas fueron 245.5 °C y 243.3 °C, para una diferencia de menos del 1%.

2. Lo anterior no se observa con el comportamiento de la temperatura de la superficie expuesta directamente en todas las pruebas, ya que esta fue posiblemente la temperatura más difícil de registrar durante las pruebas, dado que el método utilizado fue un termómetro láser, y en todas las ocasiones de debía apuntar al mismo punto, en este caso se encuentran diferencias de hasta 10.9% en el caso de las losas de 8 cm, 10.5% en las losas de 15 cm, 3.37% en las losas de 20 cm y 4.73% en las losas de 25 cm, siendo aun así, porcentajes de diferencia relativamente bajos en casi todos los experimentos.
3. La temperatura de la superficie no expuesta, alcanza valores máximos como es de esperarse en el caso de las losas más delgadas (8 cm de espesor), donde se registraron 161.5 °C y 171.5 °C durante los experimentos, lo cual representa un gradiente importante de temperatura para un suelo que podría estar siendo habitado en condiciones de un incendio, o que lo convertiría en un riesgo importante de propagación de un incendio en un edificio, tanto así, que el ensamble estudiado, podría ser descartado como resistente 2 horas fuego incluso a partir de los resultados de una prueba mucho menos riguroso que la ASTM E119, como lo es el caso del experimento llevado a cabo por los autores.
4. Finalmente, el gradiente total de temperatura, vendría a ofrecer información de que tanto calor la losa permite pasar a través de ella, esto, como es lógico, aumenta al con el grosor del ensamble de concreto, y lo podemos

observar con la siguiente tabla, donde se muestran los gradientes de temperatura registrados durante los experimentos, y como se da la variación de los mismos a lo largo de todas las pruebas.

Grosor de losa (cm)	8		15		20		25	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Gradiente Térmico (°C)	267.1	330.8	285.0	332.4	348.5	336.1	397.6	422.4

Tabla 31 Variación del gradiente térmico con el grosor de las losas.

Fuente: Autores (2015)

Esto indica que en ensamble al hacerse más grueso, permite que menos calor pase a través de él, es decir, la diferencia de las temperaturas entre las caras del mismo, aumenta con el grosor de las losas.

15.2 Resultados del experimento con el horno de convección.

En cuanto al experimento realizado con el horno de convección y la falla de los cilindros, primeramente se analizó qué pasó con la resistencia teórica de 700 kg/cm² y luego se revisaron las similitudes en el comportamiento que se obtuvo con la resistencia teórica de 420 kg/cm², ambas resistencias representan los valores de interés definidos en el alcance de la investigación.

15.2.1 Análisis del comportamiento de los cilindros de 700 kg/cm².

Es así que, para la resistencia de 700 kg/cm², tal y como se observa en la tabla 23 y las imágenes 75, 76, 77 se insertó dos termopares a lo interno del horno, recubiertos por el cinta cerámica, protegiéndolo así de una lectura errónea, con ello

se trazaron las curvas de temperatura en función del tiempo para la superficie del cilindro, el interno del cilindro y la temperatura del horno, se tomaron mediciones de estos tres parámetros cada minuto por un lapso de aproximado de 160 minutos, como era de esperarse la curva que dibuja el horno va en crecimiento constante con respecto pasa el tiempo, se pudo observar y según como lo indica la tabla 23 hay un cambio de temperatura de 5°C cada minuto, la cual va acortándose cuando el horno alcanza su temperatura máxima.

Caso contrario se observó en la temperatura de la superficie del cilindro, la cual se mantiene a una temperatura menor que la del mismo horno esto es un resultado según la termodinámica de esperarse ya que debe pasar un Δt considerable en este caso de 160 minutos para que el calor por convección del cilindro alcance la temperatura del horno, el cambio de temperatura entre la superficie y el horno fue aproximadamente de 200°C por más de dos horas, ahora bien el caso del centro o interno del cilindro se observó un fenómeno más interesante, el primero de los 25 a 30 minutos de exposición dentro del cilindro que alcanza una temperatura de 126°C en ese tiempo, luego de hecho la temperatura del cilindro a lo interno crece muy rápido, pero este fenómeno observado es debido a que a ese tiempo el agua se de todo el cilindro se encuentra evaporándose y en cuestión de 5 minutos el cilindro ya se encuentra ausente de agua, esto y como se analizará más adelante es uno de los detonantes que produce la pérdida de resistencia estructural del concreto expuesto a condiciones de fuego, como lo dijimos luego de este fenómeno la temperatura sube considerablemente manteniéndose a una diferencia de 100°C con respecto a la superficie y 300°C con respecto al horno mismo, al pasar 140 minutos el interior del cilindro alcanza su temperatura máxima y se mantiene constante.

Una vez realizadas las mediciones anteriores, se cuenta con una gráfica de temperatura en función del tiempo, para los tres parámetros estudiados, con esto es posible determinar aproximadamente a que temperatura estará el cilindro en un tiempo dado.

Se observó así en la tabla 24 el resumen de los cilindros de 700 kg/cm² a temperaturas internas de 759 °C, 695°C, 526°C, 309 °C y 120 °C expuestos a tiempos de 154 min, 130 min, 100 min, 69 min y 32 min respectivamente y debidamente fallados, lo más destacable a rescatar en esta tabla es el porcentaje de pérdida de resistencia con respecto al promedio de resistencia de los cilindros fallados en frío cuyo resumen se encuentra en la tabla 25. Ahora bien en la tabla 24 se destaca la diferencia porcentual de pérdida en los intervalos de temperatura, con ello se pudo sacar un promedio de porcentaje de pérdida de 7,6%. Esto se pudo ver reflejado en la imagen 79 el cual describe la ecuación de porcentaje pérdida para cualquier temperatura, dado que esta pérdida describe un comportamiento muy cercano a uno lineal

En el imagen 78 se observó los fenómenos antes mencionados caracterizando la caída de resistencia según la temperatura alcanzada, esto para el caso de la resistencia teórica de 700 kg/cm², tomando en cuenta el promedio de la resistencia real teórica a la temperatura de falla (temperatura ambiente 25°C) para las dos corridas de cilindros.

15.2.2 Análisis del comportamiento de los cilindros de 420 kg/cm².

Como se mencionó anteriormente la resistencia teórica de 420 kg/cm² tiene una similitud de comportamiento a la de 700 kg/cm² observable en las tablas 23 y 27 por lo que, a partir de esta observación, a nivel de transferencia de calor la resistencia teórica a la compresión no vendría a aportar ningún efecto para mejorar o encarecer la resistencia del concreto en términos de su resistividad térmica.

También se analizó según la imagen 80 el mismo comportamiento que la resistencia de 700 kg/cm², la similitud es tal que en el lapso de los 20 a 30 min se observó el mismo comportamiento del agua evaporándose y de la misma forma el crecimiento de la temperatura después de este fenómeno, con respecto a la pérdida de resistencia a los 126 °C de exposición se pierde un poco menos del 60% de la resistencia y de ahí al igual que la resistencia de 700 kg/cm² la pérdida es de aproximadamente un 17% cada 200°C todo esto comparado con la resistencia real

de los cilindros fallados en frío, luego de esto en la imagen 87 se puede ver el trazo de la pérdida de la resistencia respecto a la temperatura, el proceso efectuado de llevar cilindros a distintas temperaturas sirven para caracterizar la respuesta térmica y resistiva de las dos resistencias teóricas estudiadas, en pocas palabras se efectuó una caracterización termo-mecánica.

En la tabla 29 se evidencia el promedio de la resistencia real teórica y en la tabla 28 al igual que en la resistencia anterior se evidenció la diferencia porcentual de pérdida en los intervalos de temperatura estudiados, esto se denotó mejor en su forma lineal en la imagen 81, representada en su ecuación para cualquier temperatura.

Algo a rescatar durante la falla de los cilindros fue ver el tipo de comportamiento en el momento en que el cilindro fallaba, cuando ambas resistencias fueron llevadas a 300°C y 523°C la falla era abrupta y explosiva, mientras que para los 714°C y 810°C la falla era silenciosa, esto se deduce a los porcentajes de resistencia aún presentes en el concreto, ahora bien un fenómeno interesante fue cuando se llevó a 126°C recordemos que estas temperaturas representan la superficie del cilindro por lo cual como analizamos anteriormente a esta temperatura la superficie interna estaba en el rango de los 100°C y como vimos el vapor de agua se encuentra saliendo del concreto, esto se puede tomar como una sumatoria de fuerzas, por su parte el vapor de agua saliendo del concreto contra la presión ejercida por el pistón de la máquina de fallas que comprime el cilindro, claramente la máquina seguirá aumentando la presión paulatinamente y vencerá al vapor de agua, llevando esto a una explosión dentro de la máquina muy violenta, se pudo observar como el vapor de agua salía del cilindro una vez fallado. El montaje y falla de los cilindros puede denotarse en las imágenes 82, 83, 84, 85 y 86.

15.2.3 Análisis estadístico de regresión lineal en el comportamiento de las curvas de pérdida de resistencia a la compresión.

Al realizar un muestreo de la naturaleza presente en este estudio, siempre es sano revisar la calidad de los datos al someterlos a un análisis estadístico, que nos ayude a saber de qué información estadística se dispone, y a la vez condicionar el modelo que pueda proponerse como idóneo (Del Barrio Castro, Clar López, & Suriñach Caralt, 2002).

Inicialmente se ajustó el modelo a una tendencia lineal, tal y como se observa en las imágenes 117 y 118, de donde se obtuvo el coeficiente de determinación, indicado como R^2 en la misma imagen, que denota la medida en la que el ajuste encontrado describe una relación lineal, donde $R^2 = 1$ si todas las observaciones caen dentro de la recta de regresión, y caso contrario $R^2 = 0$ si no hay relación lineal entre las variables dependiente e independiente (De la Puente Viedma, 1995).

Luego al obtener al obtener los valores de las covarianzas S_{xy} para cada una de las corridas de los puntos de caída de resistencia (variable dependiente) vs temperatura (variable independiente) mediante el software Excel, se obtuvieron valores negativos en ambos casos, indicando así que la relación lineal entre valores es inversa, es decir, que un aumento de la temperatura, representa una disminución de la resistencia, con una tendencia lineal de buen ajuste (valor del coeficiente de determinación R^2 cercano a 1).

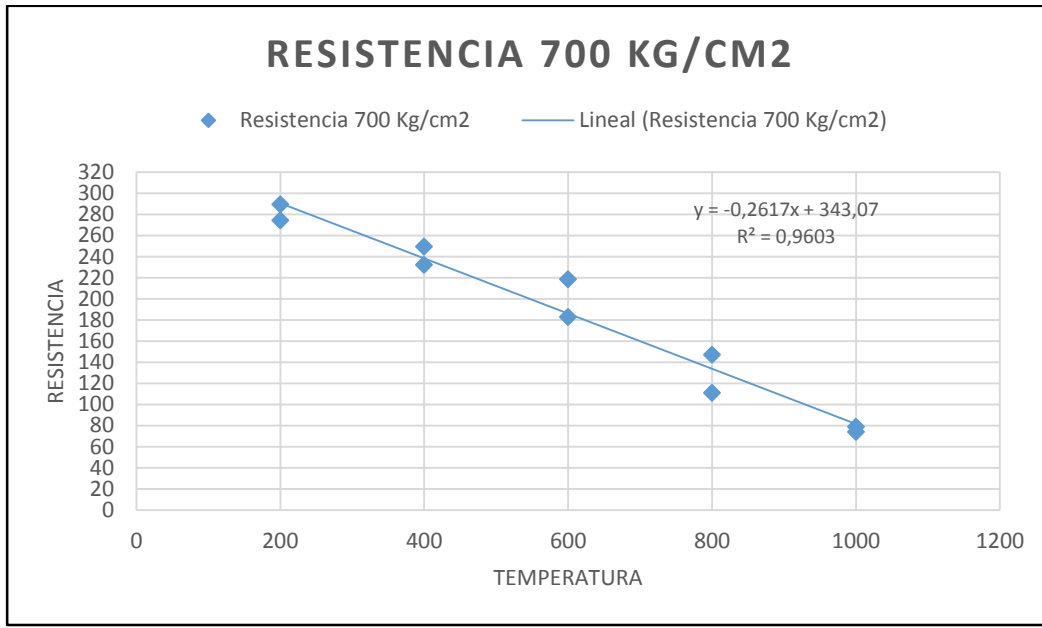


Imagen 117. Regresión lineal y coeficiente de determinación de los datos obtenidos en la estimación de la pérdida de resistencia de cilindros de 700 kg/cm2.

Fuente: Autores 2016.

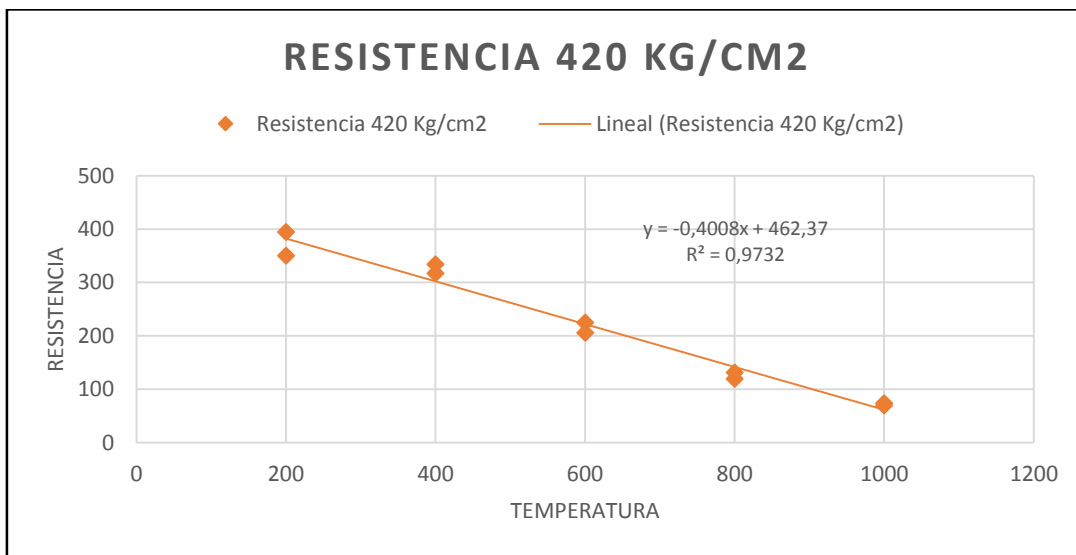


Imagen 118 Regresión lineal y coeficiente de determinación de los datos obtenidos en la estimación de la pérdida de resistencia de cilindros de 420 kg/cm2.

Fuente: Autores 2016.

15.3 Resultados de la observación microscópica.

15.3.1 Definiciones:

La siguiente tabla presenta definiciones de términos que son necesarias para una mejor comprensión de los resultados:

Término	Significado
Clinker	Mezcla de arcillas con calizas calentadas hasta el punto de pulverización es el principal componente del cemento Portland. (Harmsen, 2005)
Lítico	Pertenece o relativo a la piedra (roca), así mismo piedra es una sustancia mineral, más o menos dura y compacta. (Rodríguez, 2014). Lítico alterado: fragmento de roca volcánica que muestra cambios en la composición original de sus minerales debido a la interacción con el ambiente por procesos naturales. Barrantes, M. (2016) Lítico sedimentario: fragmento de roca cuya formación se dio en la corteza terrestre Barrantes, M. (2016)
Magnetita	Mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico (Fe_3O_4), se presenta de forma masiva granular o granos sueltos, también en forma de cristales octaédricos posee propiedades ferromagnéticas. (Málaga, 2015)
Pasta	Modificación química que sufre el cemento con el agua, posee la característica de cohesionar las partículas pétreas y agregados áridos para la fabricación del concreto (Manual Técnico PC, 2012)

Tabla 32. Definiciones de palabras usadas en el análisis microscópico

(2016)

15.3.2 Resultados en la observación petrográfica

15.3.2.1 Resultados de la observación petrográfica en las muestras de concreto a 400 kg/cm²

La imagen 88, corresponde al concreto sin haber sido sometido a calor, en ella se observan regiones de líticas volcánicas y líticas ricas en cuarzo así como un sector donde se identifica la pasta del cemento.

La imagen 89 revela en concreto calentado hasta una temperatura de 200 °C, no se observan cambios aparentes en la estructura. Aparecen nuevamente fragmentos de roca volcánicas, algunas piezas de magnetita y regiones de líticas alterados.

La imagen 90 muestra líticas alterados, líticas volcánicas ricas en vidrio, se identifica regiones de clinker y de magnetita. Se comienza a notar fracturaciones en las interfaces de los líticos y la pasta, por motivo del calor aplicado para la muestra a 400 °C.

En la imagen 91 se evidencian cambios importantes debido a los efectos del calor en la muestra sometida a 600 °C se aprecian fracturaciones en la estructura y coloración rojiza en algunas regiones, se indica además una fractura con 0,08 mm de espesor, estas fracturas rodean los contornos de los líticos, en la imagen 92 se puede ver además fracturamientos que afectan el lítico volcánico ubicado en el sector central de la imagen.

La imagen 93 muestra el concreto sometido hasta los 800 °C, se logra ver un aumento en la cantidad de las fracturaciones, se muestran además regiones de pasta desprendida que indica una pérdida de la cohesión de la pasta con los demás componentes, los líticos se ven afectados por las fracturaciones, se evidencia líticas volcánicas fracturados.

La imagen 94 corresponde al concreto sometido a 1000 °C, ahí se puede ver como gran cantidad de la pasta se ha desprendido por las pérdidas en la cohesión, se logra ver líticos los cuales han sufrido fracturaciones severas, la imagen 95

muestra más fracturas en elementos de roca, regiones de pasta desprendida y un aumento en la coloración roja de un lítico sedimentario.

15.3.2.2 Resultados de la observación petrográfica en las muestras de concreto con resistencia de 700 kg/cm²

La imagen 96 muestra el concreto sin ser sometido a la prueba de calor, en él se observa una composición de lítico volcánico, pasta y minerales de magnetita.

En la imagen 97 se ha aplicado al concreto calor hasta llegar a 200 °C, sin mostrar aún cambios aparentes debido a la exposición térmica.

En la imagen 98, para el concreto sometido a 400 °C se comienzan a notar algunas fracturaciones, son tenues y estas se ubican en la interfaz de la pasta con los agregados.

Ya en la imagen 99 se comienzan a divisar microfracturamientos en la estructura en las regiones de interfaz entre el lítico volcánico con la pasta para el concreto calentado a 600 °C.

En la imagen 100 aparece el concreto calentado hasta los 800 °C, se pueden apreciar pasta desprendida y fracturaciones, similar al encontrado en el concreto de 420 kg/cm².

Por último la imagen 101 muestra el concreto a 1000 °C, los efectos de la exposición térmica producen una serie de fracturaciones entre los líticos encontrado y la pasta, se observa fracturamientos en líticos volcánicos y sedimentarios. Se observa además regiones de desprendimiento y desintegración de pasta.

15.3.3 Análisis de datos de las imágenes tomadas a través del microscopio electrónico de barrido para el concreto de 420 kg/cm².

En la imagen 102, que fue tomada al concreto calentado a 200 °C, se observa una superficie irregular, no se observan fracturaciones ni cambios de color apreciables a una magnificación de 87 aumentos.

La imagen 103 permite ver un desprendimiento de material dejando una huella de 272 μm , para el concreto calentado a 400 $^{\circ}\text{C}$, un desprendimiento se refiere a la separación de algún material que compone la matriz de concreto ocasionando cavidades en la superficie, se observa además una fracturación que converge en la cavidad y otra fracturación a la derecha de la misma. Luego en la imagen 104 se observa la presencia de una serie de fracturaciones que convergen en el centro de la fotografía, el diámetro promedio mostrado de las fracturaciones es de 11 μm .

En la imagen 105 para el concreto calentado a 600 $^{\circ}\text{C}$, se aprecia otro desprendimiento de material dejando una cavidad de 330 μm de diámetro y un agrietamiento que converge nuevamente en el espacio donde se encontraba el material, la foto permite ver además una serie de fracturamientos en el lado izquierdo y superior de la foto. La imagen 106 presenta la aparición de dos desprendimientos uno de ellos, el mayor, con un diámetro de 383 μm y la presencia de fracturas sobre la superficie. La imagen 107 presenta un desprendimiento y una fracturación atravesando la cavidad casi por su ecuador, según Barrantes, M (2016) esa fractura que atraviesa la huella es una clara señal que el elemento fue afectado pudiendo haberse fracturado. La imagen 108 muestra una región con fracturamientos, el promedio de las fracturas con mayor diámetro de 32.65 μm .

Con respecto al concreto calentado a 800 $^{\circ}\text{C}$, la imagen 109 muestra un desprendimiento con un diámetro de 326 μm junto a varias fracturaciones, de las cuales una de ellas converge con el contorno de la cavidad del desprendimiento. La imagen 110 presenta un desprendimiento con diámetro de 503 μm y otro con diámetro de 274 μm , así como la presencia de fracturamientos, algunas de las cuales convergen con la cavidad del desprendimiento de huella de 503 μm , para Barrantes, M (2016), ese patrón de fracturas en la huella indican que el elemento pudo haber sufrido fracturaciones. En la imagen 111 se observan 2 desprendimientos con diámetros de 615 y 588 μm y un fracturamiento cuyo mayor diámetro es de 127 μm . En la imagen 112 aparecen las dimensiones de los mayores

diámetros que hay en la en las fisuras, el promedio de los diámetros máximos para los 800 °C de 56.15 μm .

Del concreto calentado hasta los 1000 °C se tomaron las siguientes imágenes: la imagen 113 muestra el diámetro de mayor dimensión de fisura el cual es de 44.9 μm , en la imagen 114 una fractura refleja que su mayor dimensión es de 52.8 μm , en la imagen 115 la dimensión de mayor tamaño de fracturamiento es de 137 μm siguiéndole otra con una dimensión de 110 μm y otra de 89.1 μm . La imagen 116 refleja un diámetro del desprendimiento en la huella de 2.2 mm.

La tabla 33 muestra el diámetro promedio de fisuración para cada una de las muestras sometidas a las diferentes temperaturas para el concreto de 420 kg/cm^2 .

Temperatura a la que el concreto fue sometido (°C)	Diámetro de fisuración (µm)
400	11
600	32,65
800	56,15
1000	79

Tabla 33: Diámetro promedio de fisuración para las imágenes analizadas en el microscopio de barrido según la temperatura aplicada en el concreto de 420 kg/cm².

Fuente: Autores (2015)

La imagen 119 revela el comportamiento de los promedios de fisuración según la temperatura aplicada a las muestras de concreto.

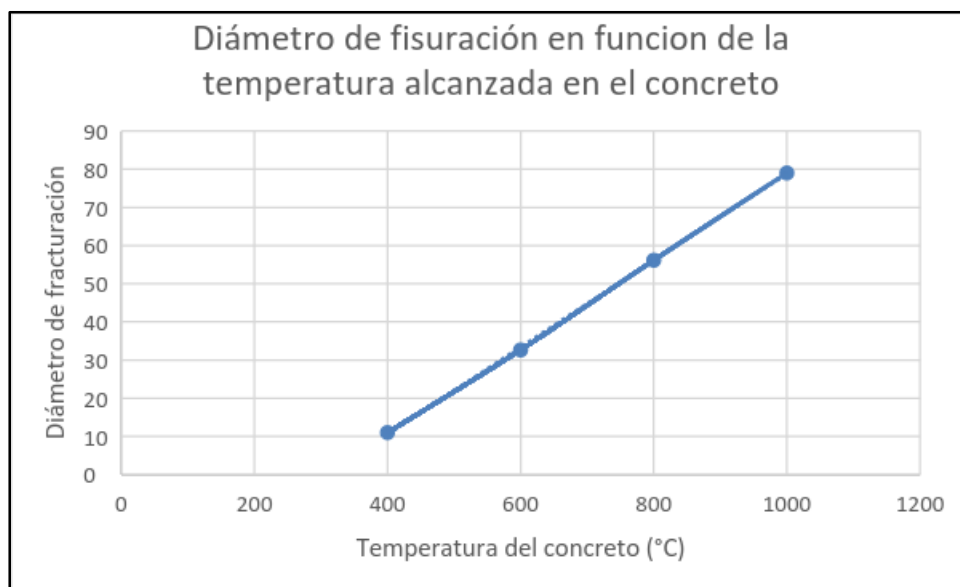


Imagen 119: Comportamiento del promedio del diámetro de fisuración en el concreto de 420 kg/cm² para las distintas temperaturas sometidas.

Fuente: Autores (2015)

En la imagen 119 se puede apreciar una tendencia creciente casi lineal de los promedios en el diámetro de las fracturas encontradas para cada muestra,

mostrado una pendiente positiva de 0.1138, indicando que a mayor calor aplicado, mayores son los diámetros de las grietas encontradas.

La tabla 34 permite ver el promedio de las huellas debido a desprendimientos en el concreto para cada una de las temperaturas sometidas.

Temperatura a la que el concreto fue sometido (°C)	Diámetro la huella de desprendimiento (µm)
400	272
600	356,5
800	405,5
1000	2200

Tabla 34: Promedio en las huellas en el concreto de 420 kg/cm² debido a desprendimientos para cada temperatura sometida.

Fuente: Autores (2015)

La imagen 120 y 121 contienen la información acerca del promedio en diámetros de las huellas por desprendimiento para cada una de las temperaturas aplicadas. En la imagen 120, el grafico abarca todas las temperaturas a las que se realizaron pruebas, en la imagen 121, se excluye el concreto sometido a 1000 °C, con el fin de apreciar el comportamiento del concreto a 400, 600 y 800 °C.

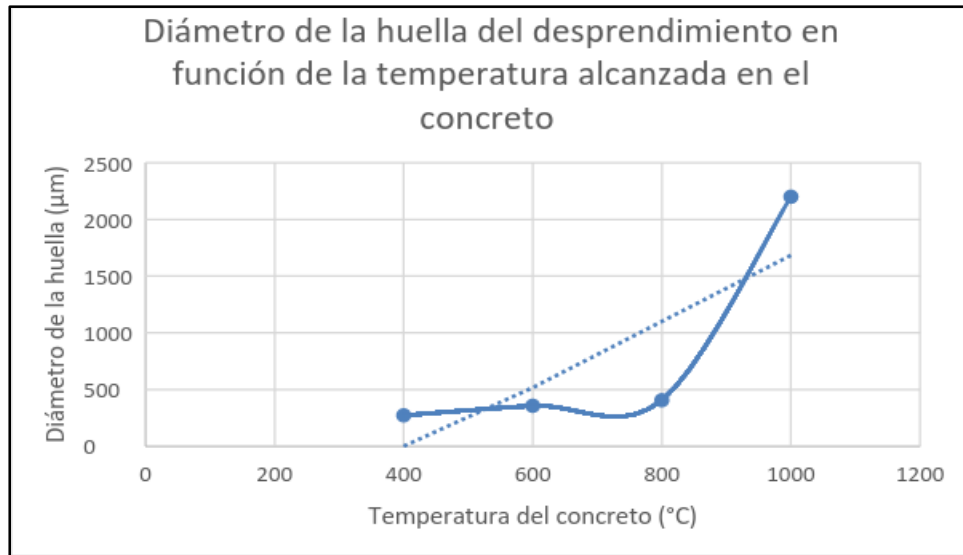


Imagen 120: Diámetro de huella en función la temperatura en el concreto de 420 kg/cm2.

Fuente: Autores (2015)

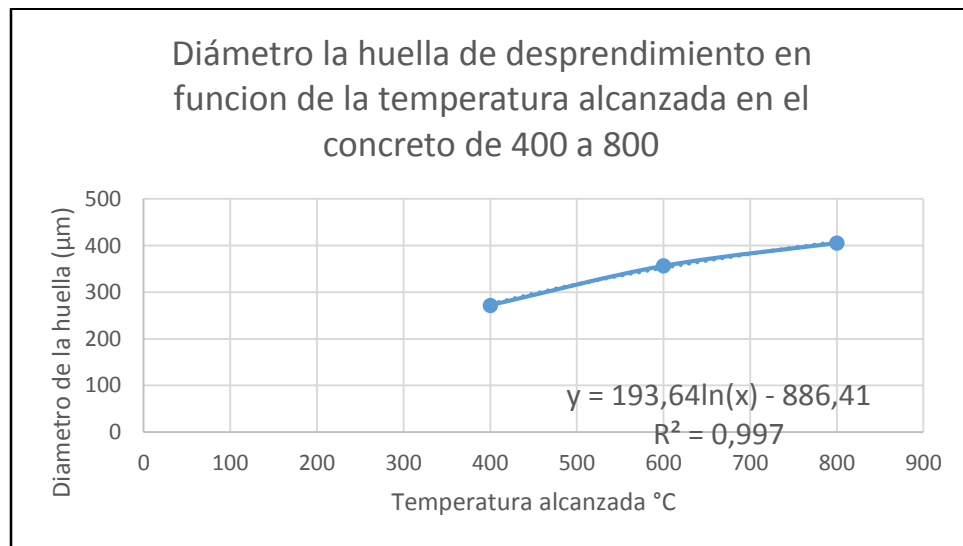


Imagen 121: Diámetro de la huella en el concreto de 420 kg/cm2 para las temperaturas de 400, 600 y 800 °C.

Fuente: Autores (2015)

En el gráfico de la imagen 120, se observa una curva con pendiente positiva que relaciona el tamaño de la huella por desprendimiento con la temperatura que alcanzó cada muestra de concreto, se observa también que para 1000 °C hay un

diámetro de 2.2 mm, ya que esta dimensión dista mucho de las demás, obtenidas de las otras temperaturas, en el gráfico de la imagen 121, se creó un nuevo gráfico sin la huella vista en la observación de 1000 °C y poder modelar una función para los datos obtenidos del concreto a las temperaturas de 400, 600 y 800 °C la cual es logarítmica y se muestra en la imagen 121.

16 Recursos humanos y financieros para el proyecto.

El equipo investigativo está conformado por tres estudiantes de la Universidad de Costa Rica, de la carrera de Ingeniería Mecánica con énfasis en Diseño de Sistemas de Protección Contra Incendios, así como al menos dos Ingenieros Civiles especializados en estructuras, que servirán como consultores directos del proyecto; los análisis microscópicos serán efectuados con la ayuda de los profesionales calificados del CIEMIC, y posteriormente serán evaluados por un profesional dedicado al campo de las ciencias de los materiales, para poder así fortalecer con criterios técnicos cualquier conclusión obtenida en el estudio.

El presupuesto que se ha efectuado preliminarmente para la elaboración y puesta en práctica del proyecto de investigación se muestra a continuación:

Rubro	Costo Aproximado (₡)
1 Cilindro propano 100 lb	900 000
1 Cilindro metano 80 ft ³	600 000
Transporte y alimentación	*
Modificación de los porta muestras (2 unidades acero inox)	350 000 c/u
3 resmas de papel	*
2 Cartuchos de tinta para impresora	*
Empaste y encuadernación	*
Total	2 200 000

**Rubros por definir en las etapas preliminares del proyecto*

Tabla 35: Presupuesto preliminar del proyecto.

Fuente: autores (2015)

VI. CONCLUSIONES

- Se obtuvo información importante sobre el concreto usado en entrepisos, se concluye que el componente estructural más importante es el concreto mismo, puesto que es en éste donde se distribuye la mayor cantidad de cargas de calor y de compresión, las características que presenta el concreto son determinantes debido a que conforma gran parte en un sistema de entrepisos, los demás componentes estructurales como los torones de acero, o cables trenzados y los no estructurales como la malla electro soldada, no contribuyen en que el sistema tenga una mejor transmisión del calor, al contrario dichos componentes generan un aumento en la velocidad de transferencia de calor en el ensamble.

Adicional a esto, podemos clasificar los componentes que componen los sistemas de entrepisos estudiados, tal y como se muestra en las siguientes tablas:

Viguetas y bloques	
Componentes Estructurales	Componentes no estructurales
Viguetas	Malla electro soldada
Bloques	Sobre losa

Tabla 36: Clasificación de los componentes de un entrepiso de viguetas y bloques.

Fuente: Autores (2016)

Losa Lex	
Componentes estructurales	Componentes no estructurales
Losas	Malla electro soldada
	Sobre losa

Tabla 37: Clasificación de los componentes de un entrepiso de losas alveolares.

Fuente: Autores (2016)

- Mediante el experimento del panel radiante, se logró constatar los cambios físicos en las superficies expuestas directamente al calor de las losas alveolares estudiadas, donde se observó la formación de grietas y canales, producidos por el astillamiento de la superficie, indicando de esta manera pérdidas de resistencia locales en el concreto, debido a las micro fracturaciones producidas a las temperaturas alcanzadas.

Se pudieron igualmente determinar los gradientes térmicos presentes en cada losa analizada, demostrando la variación de la temperatura en la superficie no expuesta en distintos espesores de losa, donde se determinó que losas de 8 cm de espesor no son recomendables para una instalación donde se pretenda garantizar una resistencia de 2 horas contra el fuego, pues la temperatura alcanzada en la cara no expuesta al final de una de las pruebas del panel radiante, fue de 171,5 °C, superando de esta forma, el incremento de temperatura máximo permitido por ASTM E119 (139 °C), este hecho se corrobora al observar el resultado de la simulación del comportamiento térmico realizado por computadora, donde se obtuvo en la superficie no expuesta, medidas de temperaturas cercanas a los 400 °C, en donde se incluyó además el efecto de aislamiento generado por la sobrelosa.

Se debe mencionar que en los experimentos realizados, solamente en los espesores de 8 cm, los bastos de algodón registraron signos de carbonización, más no ignición de los mismos.

- El experimento del horno de convección y la posterior falla de los cilindros, permitió conocer como parámetro práctico que el concreto pierde aproximadamente en promedio un 7.5 % de su resistencia cada 200 °C, esto en el caso de los cilindros de 700 Kg/cm², donde el porcentaje de pérdida fue mayor entre los 600 °C y los 800 °C siendo este de 10.6 %.

En el caso de los cilindros de 420 Kg/cm², el porcentaje de pérdida de resistencia constituye en promedio aproximadamente un 17% cada 200 °C, y el mayor porcentaje de pérdida se registró entre los 400 °C y 600 °C, siendo este de 24.5%.

- Se obtuvo información petrográfica donde se identifican los componentes que forman parte la matriz del concreto utilizado en la construcción de los sistemas de entresijos analizados, se reconocen fragmentos de roca de origen volcánico, y se evidencia la presencia de rocas volcánicas alteradas que indican una interacción con la superficie terrestre. Se concluye que los agregados utilizados son ricos en fragmentos de origen volcánico.

Además se identificaron una serie de cambios a nivel microscópico, entre las muestras de concreto sometidas a la exposición térmica, con respecto al concreto no calentado, tales como: cambios en coloración de agregados a tonalidades rojizas que se hace evidente a los 600 °C, aparición de fisuras en la pasta que comienzan a notarse en la muestra a 400 °C alrededor de los agregados en forma incipiente, desprendimientos de agregados, fracturaciones notorias en los agregados a partir de los 600 °C y desintegración de la pasta que se observa a los 800 °C, esto se acentúa en

gran manera a los 1000 °C. No se observaron cambios aparentes en el concreto sometido a 200 °C.

Adicionalmente se observó que en cuanto mayor fue el tiempo de exposición térmica que se aplicó al concreto, se produjo aumento en la dimensión promedio del diámetro de las fisuras, con una relación casi lineal entre ambas variables, de igual forma, los desprendimientos presentan diámetros de mayor tamaño cuando más calor se aplicó; en todos los desprendimientos observados, se tuvo en común que una fractura atravesará o al menos tocará el contorno de la huella.

- Por medio de la simulación con la ayuda del software COMSOL Multiphysics, se logró estimar el comportamiento real del ensamble completo de entrepiso para los espesores de 8 cm y 25 cm, incluyendo el efecto de la sobre losa, y siguiendo la curva normativa aceptada por ASTM y NFPA, en términos de la resistencia térmica que el entrepiso ofrece ante la transferencia de calor, a raíz de este análisis, se reiteró que el entrepiso formado por Losa Lex de 8 cm de espesor, no cumple con una clasificación de resistente 2 horas contra el fuego, al fallar a la condición de aceptación de temperatura de superficie no expuesta, propuesta por ASTM E119 antes del periodo de clasificación requerido.

Por otro lado, el entrepiso compuesto por Losa Lex de 25cm de espesor, expresó un comportamiento favorable ante la transferencia de calor, al no permitir que la temperatura alcanzada por la superficie no expuesta directamente al calor, se elevara más allá de los 139 °C respecto a la temperatura inicial de la misma superficie, superando de esta forma dicha condición de aceptación.

Cabe señalar que los resultados anteriormente mencionados, no permiten clasificar los entrepisos como resistentes o no ante el fuego, sino que representan una estimación del comportamiento ante el fuego de los

ensambles estudiados, observando la condición de aceptación de ASTM E119 que tiene que ver con la transferencia de calor, es necesario evaluar adicionalmente la capacidad del entrepiso de soportar las cargas de diseño durante el periodo de clasificación, parámetro que no forma parte del alcance de esta investigación.

- A modo de resumen, se puede concluir que, de todos los elementos que forman el montaje de un sistema de entrepisos, el componente estructural de mayor importancia, en términos de la resistencia contra el fuego, es el concreto con el que se construyen las losas y sobrelosa del ensamble...

Finalmente se caracterizó la respuesta termo-mecánica del concreto de los entrepisos típicamente más utilizados en Costa Rica del fabricante nacional Productos de Concreto. Se observó la caída de los porcentajes de resistencia según la temperatura que se alcanzó, pudiendo estimar con este modelo el porcentaje de pérdida de resistencia para temperaturas y tiempos mayores a los estudiados. Se estudió la transferencia de calor a través de los distintos espesores de losas, de donde se estimó que los entrepisos alveolares de 8 cm de espesor, no resistirían las 2 horas de protección requerida, ratificando esto más tarde por medio de la simulación por computadora. Se cuantificó mediante las observaciones microscópicas de barrido y de luz los agrietamientos y fisuras que experimentó el concreto expuesto a la gama de temperaturas de interés para este experimento. Todo lo anterior se comparó con las condiciones de aceptación sugeridas en ASTM E119.

VII. RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones que los autores pueden ofrecer, una vez concluida la investigación, ya sea para futuros trabajos similares relacionadas con el comportamiento del concreto ante el fuego utilizado en Costa Rica, o la oportuna clasificación de los sistemas constructivos en términos de su resistencia contra el fuego están.

- A quien se interese en el tema, se le recomienda la lectura apropiada de las normativas aplicables, de tal forma que se pueda conocer a ciencia cierta la meta a la que se desea llegar, y planear de manera oportuna un cronograma del desarrollo de la investigación, así como ampliar el enfoque a distintos tipos de concreto producido por más fabricantes nacionales..
- Es importante continuar con el estudio de entrepisos, llevando a cabo pruebas en laboratorios certificados, o bien, invirtiendo en la construcción de un horno que permita realizar pruebas a escala real, en donde se cuente con los equipos estandarizados que requieren las normas
- Aplicar choques térmicos intensos de agua, a presiones similares a las utilizadas por el cuerpo de bomberos, para así observar el comportamiento del concreto ante un cambio intenso de temperatura, con el fin de simular el impacto del agua de un chorro de manguera que se aplicaría durante la supresión de un incendio, cuantificando las diferencias entre aplicar o no agua a una estructura de concreto en llamas).
- Una recomendación que se logró llevar a cabo en esta investigación, fue la modificación del portamuestras que utiliza el IMO, dicho equipo fue un portamuestras de acero inoxidable con hierro negro con la capacidad de soportar losas de cualquier material de más de 50 kg de peso.

- Se permite y se propone utilizar los resultados obtenidos en este documento para incentivar el fortalecimiento de los contenidos impartidos en el curso de Ciencia y Tecnología de los materiales, en la parte de microscopía de barrido así pinceladas de lo que se puede observar mediante una petrografía de un material rocoso, como el concreto u otros materiales que se extraigan de rocas.
- Dado que esta investigación es pionera en el análisis de la resistencia contra el fuego del concreto, se recomienda al CFIA tomar estos resultados como un precedente para en el futuro fiscalizar la construcción de elementos estructurales mas allá del concreto únicamente, para conocer a ciencia cierta la resistencia en horas al fuego que las construcciones ofrecen.
- De manera que se puedan enriquecer los resultados en el tema, se sugiere a la Universidad de Costa Rica, la inversión en la investigación de fenómenos afines a los estudiados en este TFG, fieles a los acatamientos de las normativas, o bien así, adecuando los experimentos para la obtención de resultados relevantes.

VIII. CRONOGRAMA

Agosto 2014

En agosto se recibió la primera lección del curso IM 0410 Proyecto de Ingeniería Mecánica I, requisito para optar por el grado de Licenciatura in Ingeniería Mecánica donde, se nos planteó a los autores, todos los requerimientos que necesita un Trabajo Final de Graduación para ser elaborado.

Posteriormente se asistió a una charla por parte de un personero de la Biblioteca Luis Demetrio Tinoco, sobre el uso de los sistemas informáticos que brinda el *Sistema de Bibliotecas Documentación e Información* (SIBDI) de la Universidad de Costa Rica.

El resto del mes se atendió a la necesidad de buscar un tema para la tesis, se realizó una investigación bibliográfica de trabajos de graduación publicados, dirigidos a diseño en ingeniería mecánica, o diseños de protección contra incendios basados en desempeño activo y pasivo; los autores se reunieron con la Ing. Hennis Cavallini, directora de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica en la Sede Interuniversitaria de Alajuela, para escuchar ideas de proyectos disponibles en la escuela.

Septiembre 2014

Durante este mes los autores fueron contactados por el Ing. Esteban Ramos, con la necesidad del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de generar un nuevo Manual de diseño simplificado, que incluyera características termo mecánicas de sistemas de entresijos fabricados en Costa Rica.

Por parte del CFIA el coordinador de este proyecto es el Arq. Hernán A. Hernández, con quién, se tuvo un acercamiento donde fue planteada la posibilidad de hacer una investigación sobre el comportamiento y resistencia ante fuego de los sistemas de entresijos más utilizados en el país.

Inicialmente en el estudio participarían tres fabricantes, sin embargo solo Productos de Concreto mostró el interés de analizar sus sistemas de entresijos,

para atender a los requerimientos futuros que exigirá el CFIA. El tema fue expuesto a la Comisión de Trabajos Finales de Graduación y se dio el aval de seguir adelante con el estudio.

Octubre 2014

Se inició la investigación bibliográfica en los sitios de bibliotecas en línea ofrecidos por el SIBDI, con el fin de conocer sobre publicaciones que pudieran haberse realizado, afines con el tema de la resistencia contra el fuego de los sistemas de entresijos de concreto, tanto dentro como fuera de Costa Rica.

Fue así como verificamos la inexistencia de algún estudio relacionado específicamente con la resistencia de los entresijos ante el fuego, en el proceso se hallaron títulos donde alimentar el nuestro marco teórico de la investigación.

Se visitó las instalaciones de Productos de Concreto S.A. ubicados en San Rafael de Alajuela, recibidos por el Ingeniero Estructural Luis Jiménez quien le mostró al equipo de investigación la planta de producción que PC posee en este lugar, para poder observar de primera mano cómo se elaboran los entresijos y se pudo tener acceso además al laboratorio de fallas que ellos mismos tienen para probar las resistencias de los concretos.

Posterior a esta visita se acordó en conjunto con el Ingeniero Ramos la cantidad de probetas necesarias para el diseño de los experimentos, y se discutieron las primeras propuestas para la realización de los mismos, así como la fecha en la que PC se comprometió a entregarnos los especímenes para las futuras pruebas de laboratorio. La entrega estaría lista entre finales de diciembre de 2014 e inicios de enero de 2015.

Se acordó que era necesario el diseño y construcción de dos porta-muestras nuevos para la máquina de panel radiante, que permitiera el ajuste hasta espesores de losa de 25cm, se realizó la toma de medidas y se comenzó a elaborar los planos.

Noviembre 2014

Durante el mes de noviembre se elaboró el marco metodológico donde se centró la forma en la que se iba a realizar el estudio, así como el tiempo de uso de los equipos de laboratorio, además se generó un presupuesto para tener una idea preliminar del gasto financiero que significaría la elaboración del estudio.

Se inició con la elaboración del cronograma y se empezó a recopilar la bibliografía empleada en la elaboración del marco teórico y en el desarrollo de la investigación.

Se envió el trabajo al tribunal examinador y se inició la presentación para defender ante la Comisión de Trabajos Finales de Graduación la primera parte del curso Proyecto de Ingeniería Mecánica I.

Diciembre 2014

Se llevará a cabo la defensa de la primera parte del proyecto, y se presentará la bitácora, impresión del trabajo y la información grabada en un disco compacto.

Enero 2015

Se recibirán las probetas por parte de Productos de Concreto y se iniciarán las primeras pruebas de laboratorio en el LAPCI.

Febrero 2015

Se continuará con las pruebas en el LAPCI y seguidamente en el LANAMME.

Marzo 2015

Se llevarán los especímenes analizados en LAPCI y LANAMME al CIEMIC para su análisis microscópico con la ayuda de profesionales especializados en el área, se observarán los cambios a nivel microscópico de la estructura del concreto que fue sometida a las pruebas para determinar su posible disminución en la resistencia mecánica.

Abril 2015

Se recopilará la información y se iniciará el análisis de datos y resultados obtenidos.

Mayo 2015 – Abril 2016

Se plasmarán todos los resultados en el cuerpo del trabajo final de graduación y se iniciará la elaboración de la presentación de la defensa final ante la Comisión de Trabajos Finales de Graduación. Se ofrecerá una defensa pública ante la Comisión de Trabajos Finales, y se entregarán los resultados al Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, a la empresa Productos de Concreto S.A. De esta forma se dará por concluido el curso Proyecto de Ingeniería Mecánica II.

IX. ANEXOS

19.1 Modificación realizada al porta muestras para el experimento del panel radiante.

Para llevar a cabo las pruebas de exposición al calor de los cortes de losas alveolares o de núcleo hueco en estudio, fue necesario realizar una modificación al porta muestras del aparato de panel radiante (IMO) utilizado durante los ensayos.

Dado que el IMO está diseñado para realizar pruebas de otra índole, se diseñó una estructura capaz de soportar el peso de las losas de concreto estudiadas, y que a la vez facilitara la manipulación de los especímenes a altas temperaturas, como lo exigían las pruebas.

A continuación se muestran vistas incluidas en planos desarrollados para la construcción del mismo:

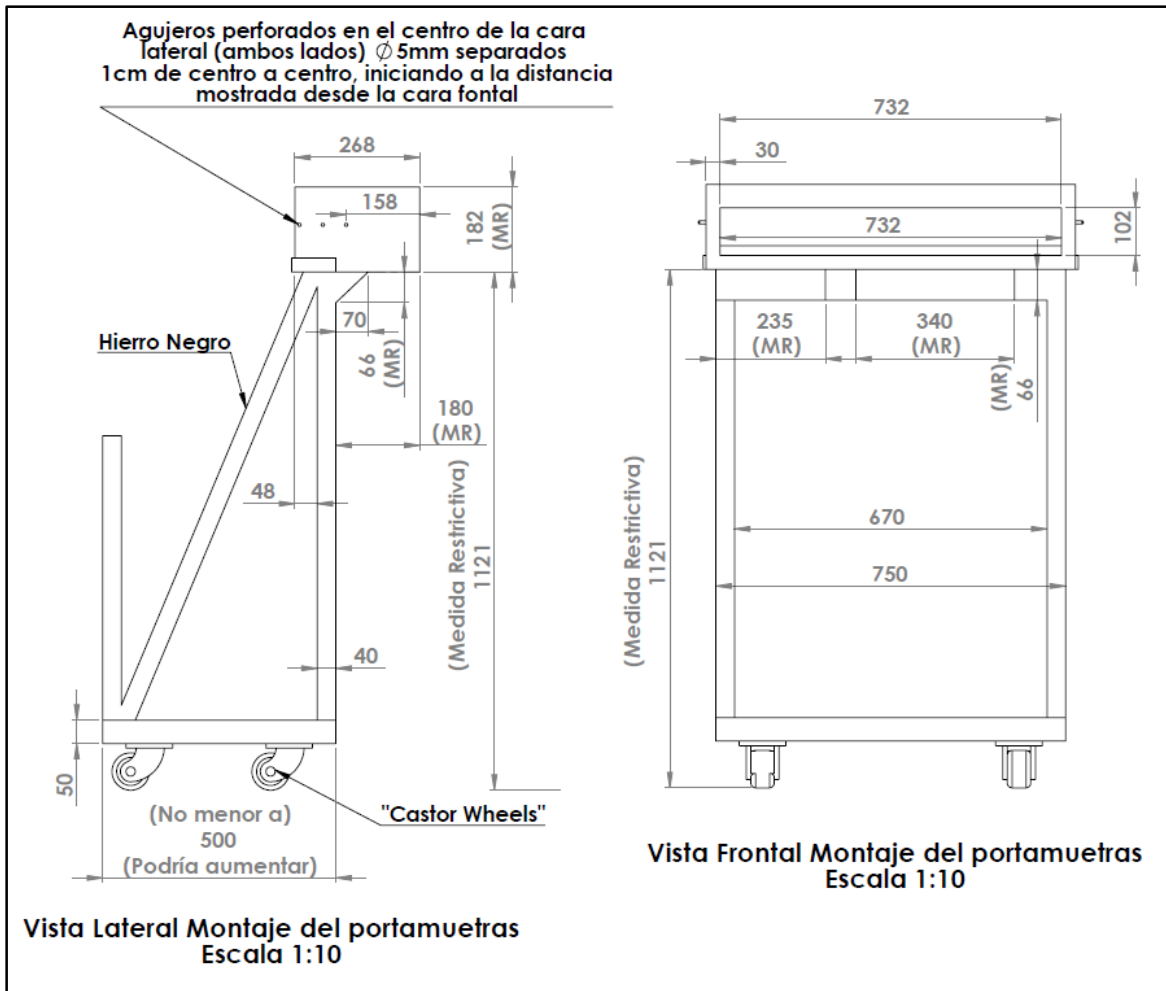


Imagen 122. Vista frontal y lateral de la estructura soportante de las losas durante las pruebas del panel radiante.

Fuete: Autores (2015).

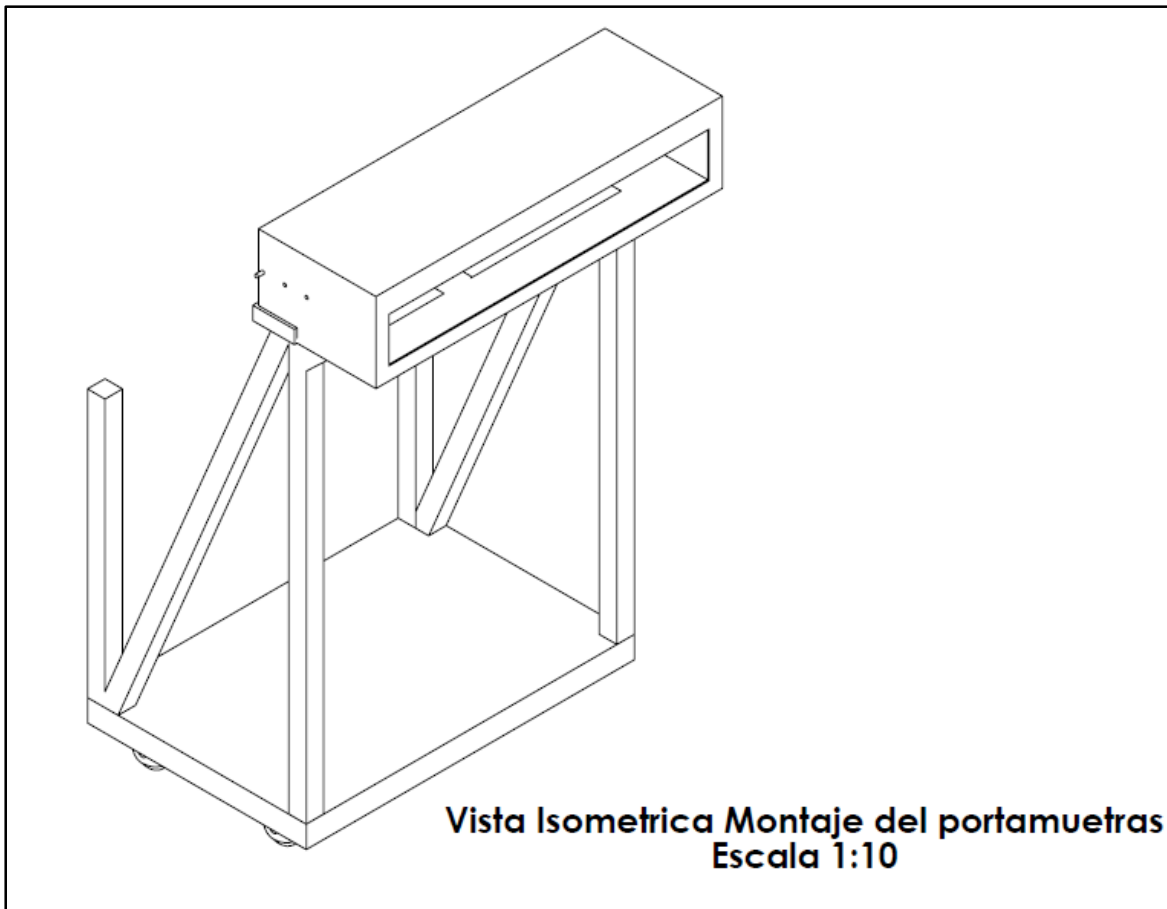


Imagen 123. Vista isométrica de la estructura soportante de las losas durante las pruebas del panel radiante.

Fuente: Autores (2015)

19.2 Normativas y procedimientos.

A continuación se presentan todos los aspectos que han sido extraídos directamente de la normativa aplicable, seleccionada para el experimento, incluyendo las condiciones de aceptación que se tomarán en cuenta para la evaluación de las pruebas de resistencia al fuego.

Las normas consultadas están dirigidas a la clasificación de los materiales como resistentes - y que periodo de resistencia ofrecen - o no ante el fuego, y han sido usadas solamente para la elaboración y puesta en marcha del experimento; tal y como está delimitado en los alcances de esta investigación, el presente estudio

no busca dicha clasificación, sino describir el comportamiento que los sistemas de entresijos podrían presentar actualmente ante un incendio, a partir de la caracterización termo-mecánica del concreto utilizado para la fabricación de los mismos, obtenida de los resultados de las pruebas realizadas, que se comentan posteriormente.

Dadas las limitaciones del equipo con que se cuenta, las pruebas ejecutadas no son normadas, ni el resultado de ellas indicará si un sistema constructivo es o no resistente contra el fuego según la clasificación de NFPA; la normativa expuesta en las secciones siguientes, no son los lineamientos bajo los cuales se llevaron a cabo las pruebas, sino que, has sido tomadas como guía para el diseño del experimento, y se muestran con la intención de ilustrar este hecho.

Cuando las circunstancias lo permitan, las condiciones que se puedan repetir, o simular a escala, serán así puestas en práctica, y reportadas de manera oportuna en los resultados que este estudio arroje.

ASTM E 119 – 12a (Métodos de prueba estándar para las pruebas de resistencia al fuego de construcción de edificios y materiales)

Los métodos de pruebas de resistencia contra el fuego descritos en este estándar, son aplicables a una amplia gama de elementos constructivos y estructurales usados en la edificación de obras civiles, entre ellos, los ensambles de entresijos que conforman el objetivo del presente estudio.

Este estándar es usado para medir y describir la respuesta de los materiales a condiciones controladas de experimentación, con la exposición a simulaciones de las condiciones que se presentan durante un incendio; sin embargo por sí mismo, no incluye todos los aspectos necesarios para la evaluación del riesgo de un incendio, y el criterio profesional siempre forma parte de la interpretación de los resultados obtenidos.

Es la intención de ésta norma, evaluar la duración que los elementos constructivos, incluidos en la lista de materiales que pueden ser probados usando

este método, exhiben en soportar o contener el fuego, mantener su integridad estructural, o ambas características, durante la duración de la prueba (ASTM E 119, 2014, pág. 2).

13.3.1.1 Control de la prueba:

La temperatura del horno debe controlarse siguiendo la figura estándar tiempo-temperatura presente en la ASTM E119, o cualquier otra curva publicada y aceptada; los puntos de la curva que determinan su carácter serán los que se muestran a continuación:

Temperatura	Tiempo
1000°F (538°C)	5 min
1300°F (704°C)	10 min
1550°F (843°C)	30 min
1700°F (927°C)	1 hora
1850°F (1010°C)	2 horas
2000°F (1093°C)	4 horas
2300°F (1260°C)	8 horas o más

Tabla 38: Puntos de la curva tiempo -temperatura.

Fuente: ASTM E119 (2012)

La temperatura ajustada por la curva, debe ser el promedio de no menos de 9 termopares, los cuales deben ser dispuestos simétricamente y distribuidos de tal forma que cubran todas las partes del espécimen de muestra.

Los termopares deben ser contruidos con cable de cobre-aluminio, ya sea 14 AWG (0.0642 pulgadas de diámetro - 1,628 mm de diámetro), 16 AWG (0.0508 pulgadas de diámetro – 1.450 mm de diámetro), o 18 AWG (0.0403 pulgadas de diámetro – 1.024 mm de diámetro). La unión del termopar debe ser mediante soldadura por fusión de las puntas del cable para formar un cordón. Una configuración sugerida para la construcción de los termopares se muestra en la figura 2 de la norma (ASTM E119, 2012).

Se sugiere que los termopares se separen unas 12 pulgadas (305 mm) del espécimen, de manera que no toquen el mismo en caso de presentarse alguna deflexión. La temperatura debe leerse en intervalos no mayores a 5 minutos durante las primeras 2 horas de la prueba, y si esta se extendiera más allá, los intervalos de lectura no deben superar los 10 minutos.

La precisión del control del horno deberá ser tal que el área bajo la curva de tiempo-temperatura, obtenida mediante el promedio de los resultados de las lecturas del pirómetro, está dentro del 10% del área correspondiente bajo la curva estándar tiempo-temperatura mostrada en el cuadro 2.

La parte no expuesta del espécimen de pruebas debe ser monitoreada con termopares colocados bajo almohadillas de fieltro seco, estando en contacto con la superficie a no más de 89 mm (3½ pulgadas). La medición debe ser promediada por 9 termopares, 5 dispuestos de forma simétrica con 1 en el centro del espécimen, y los 4 restantes en el centro de las secciones de cuarto de área formadas por los 5 primeros termopares.

Los intervalos de medición para la superficie no expuesta, deben ser cada 30 segundos o un minuto máximo (según lo permitido por NFPA 251), y la condición de aceptación de la elevación de la temperatura de la misma, evaluada por el promedio de todos los termopares, a no ser que en un punto en específico se registre un incremento de un 30% más del valor de temperatura permitido, momento en el cual la prueba se puede dar por terminada.

ASTM E 2748 – 12a (Guía estándar para experimentos de resistencia al fuego)

Esta guía busca proveer un medio de asegurar compatibilidad en los hallazgos encontrados por investigadores en sus estudios de resistencia contra el fuego, innovando la manera en la que se llevan a cabo las pruebas usualmente (ASTM E 2748, 2012).

Esta publicación está dirigida a crear consistencia en la manera en la que se modifican las pruebas sugeridas por la ASTM E 119, y en la forma en la que se reportan los resultados obtenidos, cuando las condiciones bajo las cuales la norma sugiere que se lleven a cabo los experimentos, no pueden ser reunidas por completo.

El objetivo es empezar a ofrecer información que sea útil en los campos de ingeniería de protección contra incendios y en los modelos de resistencia al fuego, conforme estos evolucionan.

La guía es usada para medir y describir la respuesta de materiales, productos o ensambles usados en construcción, a la exposición de los mismos a calor o flama, bajo condiciones controladas, con la finalidad de describir su posible comportamiento bajo condiciones reales de un incendio, pero por si misma, no representa o abarca todos los factores a considerarse o presentarse en un incendio real; y es responsabilidad del usuario de ésta, y cualquier otra norma, establecer las prácticas de seguridad, aplicabilidad, y limitaciones regulatorias antes de su uso.

Principios generales:

Excepto en los especificados en la guía, las pruebas de resistencia al fuego deben ser llevadas a cabo utilizando los hornos, condiciones de exposición, especímenes de prueba, instrumentación, y criterios de aceptación establecidos en la norma ASTM E119, y es deseable variar únicamente un parámetro a la vez, cuando se realice una prueba, con el fin de generar resultados con cierta uniformidad y validez.

Se permite el uso de curvas de tiempo-temperatura aceptadas a nivel internacional, distintas de la curva descrita en E119. Cuando estas curvas reconocidas sean usadas, o en caso de utilizarse la curva tiempo-temperatura de la norma E119, se debe citar la referencia de la publicación de donde se obtuvo la gráfica, en el reporte de los resultados obtenidos. Lo mismo ocurre con los diferenciales de presión utilizados en el horno durante las pruebas, los cuales deben ser medidos de acuerdo con NFPA 251.

Modificación de los especímenes:

Las dimensiones de los especímenes (una vez modificadas) deben ser reportadas, así como cualquier método de modificación que se haya aplicado al horno para acomodar la probeta dentro de él.

Cualquier indentación o protuberancia (irregularidad) en el espécimen probado debe ser registrado, descrito, y reportado, en cuanto a su forma, tamaño y ubicación relativa en la probeta.

Si se prueba un espécimen cuya profundidad exceda la del marco donde se ha de montar la probeta, el método utilizado para proteger el exceso de material debe ser descrito y reportado igualmente.

Medición de temperatura del horno:

Cuando se utilice el método de medición de temperatura dentro del horno especificado en E119 (el cual consiste en termopares blindados o protegidos), se debe establecer de esa forma en el reporte. Cuando se utilicen termómetros de placa, deben existir nueve de ellos igualmente distribuidos a lo largo de la superficie del espécimen. Cualquier otro método de medición de temperatura en el horno, así como el proceso y descripción de su montaje, debe ser descrito y reportado. De igual forma, si se utiliza algún método de medición del flujo de calor, su montaje, descripción, y funcionamiento debe ser descrito e incluido en el reporte de resultados.

En caso de medirse la presión dentro del horno, debe hacerse acorde con las normas ISO 834-1 y NFPA 251.

Si se midiera la concentración de oxígeno durante la prueba, debe utilizarse un analizador de tipo paramagnético, su montaje y descripción deben reportarse.

NFPA 251 (Métodos estándar de pruebas de resistencia al fuego de construcción de edificios y materiales).

13.2.3.1 Sobre el espécimen o probeta de prueba:

La norma indica que el espécimen debe ser una verdadera representación de la construcción para la cual se desea determinar la resistencia contra el fuego, respecto a la elaboración, materiales y detalles que son incluidos en este, y debe ser construido en condiciones representativas de las propiedades aplicadas al producto real comercializado. El mismo debe ser protegido durante, y después de su fabricación para asegurar su calidad a la hora de la prueba, y no debe contener exceso en el contenido de humedad. Las propiedades físicas de los materiales que componen el espécimen deben ser determinadas y anotadas.

Sobre las condiciones a la hora de la prueba:

El equipo y el espécimen envueltos en la prueba de fuego deben estar protegidos de viento o condiciones climáticas que puedan afectar el resultado de la prueba, la temperatura ambiente al inicio del estudio debe estar en el rango entre 0°C y 32°C. La velocidad del viento que cruza la superficie no expuesta del espécimen medida justo antes de iniciar la prueba no debe exceder 1.3 m/s (4.4 ft/s), si se usa ventilación mecánica, el flujo de aire no debe estar dirigido al espécimen que está siendo probado.

Antes de la prueba, la construcción debe ser condicionada con el objetivo de proveer una condición de humedad al espécimen representativa a la que probablemente ocurriría en una construcción de un edificio. Para los fines de normalización, esta condición es establecido en el equilibrio resultante de acondicionamiento en un atmósfera ambiente de humedad relativa de 50% a 73°F.

Con algunas construcciones es difícil o imposible lograr dicha uniformidad. Cuando este es el caso, las muestras de ensayo se ponen a prueba cuando la parte

más húmeda de la muestra de ensayo, o la parte a las 6-in. (152 mm) de profundidad por debajo de la superficie de las construcciones, ha alcanzado un contenido de humedad correspondiente a acondicionado a equilibrio con el aire en el rango de 50 a 75% de humedad relativa a $73 \pm 5^{\circ}\text{F}$ ($23 \pm 3^{\circ}\text{C}$).

Un método recomendado para medir la humedad del concreto endurecido con elementos sensores eléctricos se encuentra en anexo I del Menzel "A Method for Determining the Moisture Condition of Hardened Concrete in Terms of Relative Humidity" (NFPA 251, 2006).

La información sobre el contenido real de humedad y distribución dentro de la muestra de ensayo se obtendrá dentro de 72 horas antes del incendio. Dicha información se deberá incluir en el informe de la prueba.

Sobre la conducción de la prueba de fuego.

El área expuesta al fuego no debe ser menor a 16 m² con ninguna de sus dimensiones menores a 3.7m, y debe existir una distancia de al menos 8 pulgadas (203 mm) entre las paredes del horno y las superficies de la probeta que pudieran estar en contacto con él.

Se debe aplicar una carga a lo largo de la prueba de resistencia al fuego con el fin de simular condiciones máximas de carga real, las cuales deben ser tan cercanas como sea práctico a las circunstancias máximas permitidas por la condición limitante de diseño, bajo criterios reconocidos a nivel nacional de diseño estructural.

La prueba al espécimen incluyendo la carga aplicada, debe continuar hasta que se produzca una falla, o el espécimen haya soportado las condiciones de prueba para un periodo igual al especificado en la NFPA 251 en las condiciones de aceptación para el tipo de construcción dado. Con el propósito de obtener información adicional del desempeño de la construcción en estudio, la prueba puede continuar luego que el tiempo de resistencia ha sido superado por el espécimen.

Cuando se conduzca la prueba, la parte de abajo, o al cara inferior de la probeta debe ser expuesta al fuego, y las pruebas se deben seguir según las

condiciones de aceptación para ensambles no restringidos mencionadas a continuación.

(1) El espécimen debe soportar la carga de calor aplicada durante la exposición a la prueba de fuego, según sea la clasificación deseada, sin que se desarrollen condiciones en la superficie no expuesta al fuego que provoquen la ignición de bastos de algodón.

(2) La transmisión de calor a través del espécimen durante el tiempo de exposición a la prueba, no debe elevar la temperatura promedio de la superficie no expuesta al fuego más de 140 °C (250 °F).

(3) Para especímenes que cuenten con miembros estructurales de acero espaciados más de 1.2 m (4 ft) de centro a centro, la temperatura del acero no debe exceder 704 °C (1300 °F) en ningún punto, y la temperatura promedio registrada por cuatro termopares en cualquier sección no deberá exceder 593 °C (1100 °F)

(4) Para especímenes que cuenten con miembros estructurales de acero espaciados 1.2 m (4 ft) o menos de centro a centro, la temperatura promedio registrada por todos los termopares ubicados en las viguetas o vigas no debe exceder 593 °C (1100 °F) durante la duración de la prueba

(5) Para especímenes que cuenten con miembros estructurales de concreto convencionalmente diseñados (incluyendo viguetas de concreto chorreadas en sitio, con claros iguales o menores o los probados) la temperatura promedio del acero en tensión en cualquier sección, durante la duración de la prueba no debe exceder:

(a) 426°C (800°F) para acero pretensado colado en frío.

(b) 593°C (1100°F) para acero de refuerzo.

X. BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing Material, A. C. (2010). *Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy* . Harbor Drive: ASTM International.

American Society for Testing Material, A. S. (1994). *Petrography of Cementitious Materials*. Dehaves/Stark, editors.

American Society for Testing Materials, ASTM E 119. (2014). *Métodos estándar para pruebas de fuego en construcción y materiales*.

American Society for Testing Materials, ASTM E 2748 . (2012). *Guía estándar para experimentos de resistencia al fuego*.

Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica. (29 de Octubre de 2014). Obtenido de Manual de disposiciones técnicas generales sobre seguridad humana y protección incendios: <http://www.bomberos.go.cr/leyes-y-normas/>

Block, F., & Et, a. (2008). *Assessment, design and repair of fire-damaged concrete*. Concrete Society.

Cabañas, A. (2008). *Tesis Profesional "Concreto Presforzado"*. Mexico, D.F.: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.

Características del hierro. (2016). Obtenido de http://www.ejemplode.com/38-quimica/3525-caracteristicas_del_hierro.html

Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Marcombo S.A.

Construcción: *Losas de entresijos*. (2009). Obtenido de: <http://cecasayelen.blogspot.com/2009/03/losas-de-entresijos.html>

De Loranzo, V., Morales, A., & Yañez, M. (2014). *Principios y Práctica de la Microscopía Electrónica*. 1 ed, Buenos Aires, Argentina: Bahía Blanca.

Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. UK: John Wiley & Sons.

Eurobau S.A. Prefabricados de Concreto. (2014). *Sistema de Entresijos Prefabricados a Base de Viguetas y Bloques* . Costa Rica.

Fink, D. G., Wayne H, B., Carroll, J. M., & Casas, J. (1984). *Manual práctico de electricidad para ingenieros*. Barcelona: Reverté.

- Furton, K. G., & Almirall, J. R. (2004). *An Introduction to Fire Dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Giancoli, D. C., & Victor, C. (2006). *Física: Principios con aplicaciones, 6ta ed.* México: Pearson Education.
- Gil, P. (2009). *El microscopio petrográfico*. Departamento de Mineralogía y Petrografía. Universidad del país Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea. Obtenido de http://www.ehu.eus/mineralogiaoptica/Atlas_de_Mineralogia_Optica/Propiedades_Opticas/Paginas/El_Microscopio_Petrografico.html
- Gómez M, M. (2006). *Introducción a la Metodología de la investigación*. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- Groover, M. P., & De la Peña Gómez, C. M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Prentice Hill.
- Hager. (2013). *Behaviour of cement concrete at high temperature*. Kraków: Institute of Building Materials and Structures, Cracow University of Technology.
- Harmsen, T. (2005). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado* (Cuarta Edición ed.). Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica de Perú.
- Incropera P, F., & De Witt P, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hill.
- Ingham, J. (2007). *Assessment of fire-damaged concrete and masonry structures: The application of petrography, Proceedings of the 11th Euroseminar on Micro*. Porto, Portugal.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (2013). *Enclosure Fire Dynamics* . Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group.
- Lentini, J. J. (2013). *Scientific Protocols for Fire Investigation, 2nd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press.
- Málaga, U. d. (2015). Uciencia. Obtenido de <http://www.uciencia.uma.es/Coleccion-cientifico-tecnica/Mineralogia/Galeria/Magnetita>
- Manual de Construcción de Edificios. (2004). Cochabamcha, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.

- Manual Técnico PC. (2012). *Productos de concreto S.A. Entrepisos pretensados*. Alajuela, Costa Rica.
- Mills, A. (1997). *Transferencia de Calor*. Colombia: Mc Graw-Hill/Irwin.
- National Fire Protection Association, NFPA 101. (2006). *Código de Seguridad Humana*. NFPA, Quincy , MA.
- National Fire Protection Association, NFPA 220. (2015). *Standard on Types of Building Construction* . NFPA, Quincy, MA.
- National Fire Protection Association, NFPA 251. (2006). *Standard Methods of Tests of Fire Resistance of Building Construction and Materials*. NFPA, Quincy, MA.
- Neira, J. A. (2008). *Instalaciones de Protección Contra Incendios*. Madrid: Fund. Confometal.
- Polinorte. (29 de Octubre de 2014). *Polinorte Productos de Poliestireno Expandido*. Recuperado el 29 de Octubre de 2014, de <http://www.polinorte.com/poliblock.html>
- Popov, E. P. (1990). *Engineering Mechanics of Solids*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Presec. (2011). *Presec P-02 Mortero Piso Normal*. Recuperado el 29 de Octubre de 2014, de Ficha técnica de productos: <http://www.melon.cl/documents/10157/21853/p-02.pdf>
- Purkiss, J. A., & Li, L. (2013). *Fire Safety Engineering Desing of Structures, 3rd ed*. Boca Raton, FL : Taylor & Francis Group.
- Purkiss, J. A., & Yuan Li, L. (2013). *Fire Safety Engineering Design of Structures, 3ed*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Real Academia Española*. (3 de Octubre de 2014). Obtenido de Diccionario de la lengua española: <http://lema.rae.es/drae/?val=astillamiento>.
- Redsicker, D. R., & O'Connor, J. J. (1996). *Practical Fire and Arson Investigation, 2nd ed*. New York: Elsevier.
- Rodriguez, G. (2014). Dirae.es. Obtenido de <http://dirae.es/palabras/l%C3%ADtico>
- Stutzman, P. E. (2001). *Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography*. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology.

- Valverde, D. (2005). *Matrices comparativas técnico-económicas para los tipos de entrepisos más usados en Costa Rica*. Intituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de ingeniería en construcción.
- Wang, Y. A., Burgess, I., & Gillie, M. (2013). *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- William F. Riley, L. D. (1995). *Ingeniería Mecánica Estática*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Yunus , C. A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. México, D.F.: McGraw Hill.
- Zach, J., Hubertova , M., & Hroudova, J. (2009). Posibilidades de la Determinación de la Conductividad Térmica del Concreto Liviano con la Utilización del Método no Estacionario de Alambre Caliente. *10ma Conferencia Internacional de la Sociedad Eslovena para Pruebas no Destructivas* (pág. 7). Slovenia: Brno University of Technology.
- Zamudio, L. M. (2000). *Diseño de Estructuras de Concreto Presforzado*. México D.F.: Universidad de Veracruz.
- Zingoni, A. (2013). *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. Cape Town, South Africa: CRC Press.