



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN A BASE DE
CEMENTO, PARA USO GENERAL EN LA CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS GRUESO
DE CALIZA Y BASALTO EXPUESTO AL FUEGO**

Elfego Bernabé de León Rivera

Asesorado por el Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN A BASE DE
CEMENTO, PARA USO GENERAL EN LA CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS GRUESO
DE CALIZA Y BASALTO EXPUESTO AL FUEGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELFEGO BERNABE DE LEÓN RIVERA
ASESORADO POR EL ING. MARIO CORZO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordoñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN A BASE DE CEMENTO, PARA USO GENERAL EN LA CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS GRUESO DE CALIZA Y BASALTO EXPUESTO AL FUEGO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 29 de febrero de 2016.

Elfego Bernabe de León Rivera




Guatemala 20 de enero de 2017

Ingeniero
José Gabriel Ordoñez Morales
Coordinador Área de Materiales de Construcción
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero:

Cumpliendo con lo resuelto con la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, se procedió a la asesoría y revisión del trabajo de graduación: **COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN A BASE DE CEMENTO, PARA USO GENERAL EN LA CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS GRUESO DE CALIZA Y BASALTO EXPUESTO AL FUEGO**, presentado por el estudiante Elfego Bernabé de León Rivera, quien se identifica con carné 2012 20103.

Considero que el trabajo de graduación se ha desarrollado satisfactoriamente y cumple con los objetivos que motivaron la selección de dicho tema, por lo que hago de su conocimiento que apruebo el trabajo realizado. Sin otro particular, atentamente


Mario Rodolfo Corzo Ávila
Ingeniero Civil Colegiado No. 2089



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
18 de octubre de 2017

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN A BASE DE CEMENTO, PARA USO GENERAL EN LA CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS GRUESO DE CALIZA Y BASALTO EXPUESTO AL FUEGO** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Elfego Bernabé de León Rivera quien contó con la asesoría del Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.



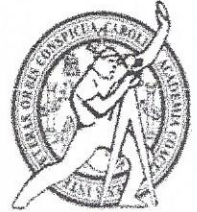
Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Mario Rodolfo Corzo Ávila y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Elfego Bernabé de León Rivera COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN A BASE DE CEMENTO, PARA USO GENERAL EN LA CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS GRUESO DE CALIZA Y BASALTO EXPUESTO AL FUEGO da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, noviembre 2017

/mmm.

Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala

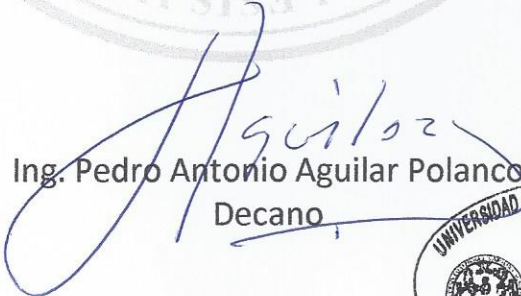


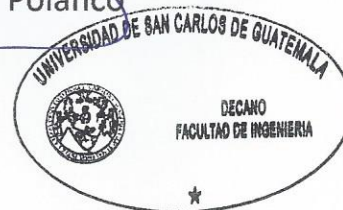
Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 577.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN A BASE DE CEMENTO, PARA USO GENERAL EN LA CONSTRUCCIÓN CON AGREGADOS GRUESO DE CALIZA Y BASALTO EXPUESTO AL FUEGO**, presentado por el estudiante universitario: **Elfego Bernabé de León Rivera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, noviembre de 2017

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la oportunidad de ser profesional y poder concluir este proceso que sin duda es el propósito de Él para mi vida.
- Mis padres** Elfego De León y Mercedes Rivera de León. Por la confianza y recursos que pusieron en mí. Ellos serán siempre mi motivo para esforzarme y poder honrarlos.
- Mis hermanas** Yellmy, Yecenia y Suzzette de León Rivera, por escucharme y brindarme su apoyo.
- Mis tíos** José Gonzales y Olga de León, por darme su apoyo económico y moral.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la única y gloriosa universidad estatal de Guatemala que nos abre las puertas a las personas esforzadas, con determinación y coraje para alcanzar la profesionalización.
Facultad de Ingeniería	Específicamente estoy agradecido con todo el personal docente, administrativo y de mantenimiento que labora en esta facultad y que nos brindan sus servicios para alcanzar el sueño de ser profesional en la ingeniería.
Centro de Investigaciones de Ingeniería	Por la asesoría en la parte experimental de este trabajo.
Sección de Estructuras del Centro de Investigaciones de Ingeniería	Por ser parte fundamental en la concepción de la idea y desarrollo de este trabajo de graduación.
Ingeniero	Mario Corzo, porque además de que fue mi asesor de tesis; fue un tutor que me orientó hacia el camino de la integridad en los últimos semestres de mi carrera.

Señor

Fabio Sánchez, por haberme transmitido sus conocimientos técnicos sin esperar nada a cambio; se extrañará en la Sección de Estructuras.

Mis amigos de la facultad

Mauricio Vargas y Claudia Ramírez por ayudarme en la parte experimental de este trabajo de graduación.

1.1.2.	<i>Consideraciones sobre la resistencia al fuego en elementos de concreto</i> de Omar Flores.....	9
1.1.2.1.	Resultados.....	11
1.1.2.1.1.	Ensayo de estabilidad estructural.....	11
1.1.2.1.2.	Ensayo de la velocidad del pulso ultrasónico	12
1.1.2.1.3.	Ensayo de carga.....	13
1.1.2.1.4.	Ensayo de los testigos extraídos de las losas ...	15
1.1.2.1.5.	Ensayo de las barras de refuerzo	16
1.1.3.	<i>Cálculo y comportamiento de estructuras de concreto y acero sometidas a incendios</i> de Jorge Valdez	16
2.	ORÍGENES, CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EVALUADOS	17
2.1.	Ciclo de las rocas.....	17
2.1.1.	Caminos alternativos del ciclo de las rocas	19
2.2.	Clasificación de las rocas	19
2.2.1.	Rocas ígneas	20
2.2.1.1.	Tipos de rocas ígneas.....	20
2.2.2.	Rocas sedimentarias	21
2.2.2.1.	Tipos de rocas sedimentarias	21
2.2.3.	Rocas metamórficas	21
2.3.	Descripción geológica de Guatemala	22
2.3.1.	Geomorfología de Guatemala.....	22

2.3.2.	Estratigrafía de Guatemala	24
2.4.	Caliza	29
2.4.1.	Generalidades y clasificación	29
2.4.2.	Aplicaciones	30
2.4.3.	Características físicas	31
2.4.3.1.	Color	31
2.4.3.2.	Olor	31
2.4.3.3.	Textura	31
2.4.3.4.	Gravedad específica	32
2.4.3.5.	Porosidad	32
2.4.3.6.	Absorción de agua	32
2.4.3.7.	Densidad evidente	32
2.4.3.8.	Densidad aparente	33
2.4.3.9.	Ángulo de reposo	33
2.4.3.10.	Calor específico	33
2.4.3.11.	Coeficiente de expansión térmica	34
2.4.3.12.	Conductividad térmica	34
2.4.3.13.	Capacidad calorífica	34
2.4.4.	Propiedades mecánicas	35
2.4.4.1.	Resistencia a la compresión	35
2.4.4.2.	Dureza	35
2.5.	Basalto	35
2.5.1.	Generalidades y clasificación	35
2.5.2.	Aplicaciones	36
2.5.3.	Características físicas	36
2.5.3.1.	Color	36
2.5.3.2.	Olor	36
2.5.3.3.	Textura	36
2.5.3.4.	Gravedad específica	36

	2.5.3.5.	Porosidad	37
	2.5.3.6.	Absorción de agua	37
	2.5.3.7.	Densidad	37
	2.5.3.8.	Capacidad calorífica	37
	2.5.3.9.	Coefficiente de expansión térmica	37
	2.5.3.10.	Conductividad térmica	37
	2.5.4.	Propiedades mecánicas	38
	2.5.4.1.	Resistencia a la compresión	38
	2.5.4.2.	Dureza	38
2.6.		Cemento tipo portland modificado (I PM)	38
	2.6.1.	Generalidades	38
	2.6.2.	Definición.....	41
	2.6.3.	Materia prima	42
	2.6.4.	Normas.....	42
3.		PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL FUEGO	43
	3.1.	Características térmicas	43
	3.1.1.	Difusión térmica.....	44
	3.1.2.	Conductividad térmica	46
	3.1.3.	Densidad	50
	3.1.4.	Calor específico.....	52
	3.2.	Propiedades mecánicas	55
	3.2.1.	Módulo de elasticidad	55
	3.2.1.1.	Módulo de elasticidad y esfuerzo	56
	3.2.1.2.	Efectos de la temperatura en el módulo de elasticidad	59
	3.2.2.	Resistencia a la compresión	60

	3.2.2.1.	Influencia de la carga durante el calentamiento.....	61
	3.2.2.2.	Influencia de la temperatura en la resistencia a la compresión	62
3.3.		Microestructura.....	63
	3.3.1.	Pasta de cemento	65
	3.3.2.	Agregados	75
	3.3.3.	Interacción entre el agregado y la pasta de cemento	81
	3.3.3.1.	Interacción física	81
	3.3.3.2.	Interacción química	84
3.4.		Deformaciones durante el calentamiento.....	89
	3.4.1.	Deformaciones térmicas	89
	3.4.2.	Carga inducida por deformaciones térmicas	91
3.5.		Desprendimiento del concreto	94
	3.5.1.	Definición y tipos de desprendimientos	94
	3.5.1.1.	Desprendimientos explosivos.....	95
	3.5.1.2.	Factores de influencia el desprendimiento explosivo.....	96
	3.5.1.2.1.	Permeabilidad	96
	3.5.1.2.2.	Edad del hormigón	97
	3.5.1.2.3.	Resistencia del hormigón	97
	3.5.1.2.4.	Esfuerzo de compresión.....	98
	3.5.1.2.5.	Tipo de agregado	98
	3.5.1.2.6.	Tamaño del agregado ...	99
	3.5.1.2.7.	Agrietamiento	99
	3.5.1.2.8.	Acero de refuerzo.....	99

	3.5.1.2.9.	Recubrimiento del acero de refuerzo.....	99
	3.5.1.2.10.	Fibras de acero.....	100
	3.5.1.2.11.	Fibras de polipropileno	100
	3.5.1.3.	Mecanismo del desprendimiento explosivo.....	100
	3.5.1.3.1.	Desprendimiento por presión en los poros....	100
	3.5.1.3.2.	Desprendimiento por esfuerzos térmicos.....	101
	3.5.1.3.3.	Combinación de ambos mecanismo de desprendimiento	101
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....		103
4.1.	Equipo y materiales utilizados		104
	4.1.1.	Equipo utilizado	104
	4.1.1.1.	Mezcladora manual	104
	4.1.1.2.	Moldes metálicos	105
	4.1.1.3.	Horno de concreto	105
	4.1.1.4.	Termómetro de infrarrojos	106
	4.1.1.5.	Barra apisonadora	107
	4.1.1.6.	Mazos.....	107
	4.1.2.	Materiales utilizados	107
	4.1.2.1.	Agregado grueso basáltico de ½”	108
	4.1.2.2.	Agregado grueso calizo de 1”	109
	4.1.2.3.	Agregado fino	110
	4.1.2.4.	Cemento tipo I PM (UGC).....	111

	4.1.2.5.	Combustible biomasa, madera de ciprés.	111
4.2.		Metodología.....	112
4.3.		Diseño de mezcla	113
	4.3.1.	Procedimiento para determinar el diseño de mezcla para el agregado basalto y caliza	113
		4.3.1.1. Elección del revenimiento	113
		4.3.1.2. Elección del tamaño máximo de agregado.....	114
		4.3.1.3. Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire.....	114
		4.3.1.4. Selección de la relación agua-cemento A/C	115
		4.3.1.5. Cálculo del contenido de cemento.....	116
		4.3.1.6. Estimación del contenido de agregado grueso	117
		4.3.1.7. Estimación del contenido de agregado fino	118
4.4.		Elaboración de cilindros de hormigón (ASTM C192).....	122
4.5.		Exposición al fuego de cilindros de hormigón	125
4.6.		Extracción y ensayo de resistencia a la compresión de núcleos perforados (ASTM C42).....	129
4.7.		Ensayo de resistencia a compresión de cilindros (ASTM C39).....	131
4.8.		Datos obtenidos.....	131
4.9.		Cálculos efectuados	134
4.10.		Resultados.....	136
		4.10.1. Gráficas	136
4.11.		Análisis de resultados.....	140

CONCLUSIONES 147
RECOMENDACIONES 151
BIBLIOGRAFÍA 153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclos de carga y descarga en losas de hormigón premezclado	14
2.	Efecto de la temperatura en la difusión térmica del hormigón de peso normal	45
3.	Efecto de la temperatura en la conductividad térmica del hormigón inicialmente saturado	48
4.	Efecto del primer calentamiento (a) enfriamiento (b) y el calentamiento subsecuente (c) en la conductividad térmica del hormigón de peso normal.....	49
5.	Efecto de la temperatura en la densidad real, densidad aparente y la porosidad de la pasta de cemento.....	51
6.	Efecto de la temperatura en la densidad del hormigón con diferentes tipos de agregado.....	52
7.	Efecto de la temperatura en el calor específico del hormigón	54
8.	Reducción relativa del esfuerzo y módulo de elasticidad del hormigón bajo ciclos de calentamiento sin carga y con 20 % de carga.....	57
9.	Módulo de elasticidad de dos hormigones de alta resistencia (C60 y C70) y dos hormigones de alta resistencia con fibras metálicas (CRC y CPC) medido después de un ciclo de calentamiento bajo un 20 % de carga	58
10.	Incompatibilidad térmica entre el agregado y la pasta de cemento	61
11.	Influencia del tipo de agregado en la resistencia a la compresión del hormigón calentado sin cargas	63

12.	Constituyentes de la pasta de cemento	65
13.	Diagrama esquemático que muestra la temperatura (T), humedad (W) y la presión en los poros (P) en función del calentamiento en hormigón normal y de alto rendimiento	67
14.	Influencia de la temperatura y la humedad en las transformaciones químicas de los productos hidratados.....	69
15.	Efectos del calor en la acumulación de volumen de poros y la distribución del tamaño de poros de la pasta de cemento	70
16.	Deformaciones térmicas de tres pastas de cemento durante su primer calentamiento a 2 °C/min hasta 600 °C y durante su enfriamiento.....	73
17.	Efecto de la temperatura en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento	75
18.	Ejemplo de la estabilidad y los procesos de algunos agregados que toman lugar en ellos durante su calentamiento.....	76
19.	Transformaciones Físicoquímicas en 4 diferentes agregados	78
20.	Deformaciones térmicas durante el primer calentamiento a 2 °C/min del basalto, caliza y grava.....	80
21.	Diagrama esquemático que muestra la incompatibilidad térmica entre el agregado y la pasta de cemento durante su primer calentamiento	83
22.	Representación esquemática de la reacción hidrotermal entre óxido (SiO ₂) de silicio y el hidróxido de calcio Ca(OH) ₂	85
23.	Cambios de color en el hormigón después de enfriarse	86
24.	Representación esquemática de los procesos físicoquímicos en el hormigón durante el calentamiento en un termómetro como analogía.....	87
25.	Deformaciones térmicas (a) y coeficiente de deformación térmica (b) durante el primer calentamiento a 1°C/min en cinco hormigones	

	diferentes: caliza (L), basalto (B1 y B2), agregado de peso ligero (LW), Grava (G)	90
26.	Carga inducida por las deformaciones térmicas (LITS) para un hormigón con agregado de basalto en su primer calentamiento a 1 °C/min determinado entre 0 % y 10 % de carga; también, bajo 20 % y 30 % de carga	92
27.	Distribución de la presión del hormigón expuesto al calor de 600 °C ...	97
28.	Diagrama esquemático del desprendimiento explosivo	102
29.	Mezcladora manual	104
30.	Moldes de acero	105
31.	Horno de concreto	106
32.	Termómetro de infrarrojos	107
33.	Gráfica granulométrica del agregado basáltico	108
34.	Gráfica granulométrica del agregado calizo	109
35.	Gráfica granulométrica del agregado fino	110
36.	Materiales utilizados	111
37.	Mezclado del hormigón	123
38.	Colocación del hormigón	123
39.	Desencofrado de la muestras cilíndricas	124
40.	Curado de las muestras cilíndricas	124
41.	Horno de hormigón	125
42.	Rejilla de barras de acero	126
43.	Colocación de las muestras cilíndricas en el horno	127
44.	Exposición al fuego de los cilindros	128
45.	Extracción de los cilindros del horno	128
46.	Enfriamiento	129
47.	Desprendimientos explosivos	130
48.	Extracción, nivelación y ensayo de núcleos	130
49.	Nivelación y ensayo de cilindros	131

50.	Porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión del hormigón con agregado grueso de caliza	137
51.	Porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión del hormigón con agregado grueso de basalto	138
52.	Porcentaje de reducción del peso específico del hormigón con agregado grueso de caliza.....	139
53.	Porcentaje de reducción del peso específico del hormigón con agregado grueso de basalto	140

TABLAS

I.	Resultados del efecto del fuego en la resistencia a la compresión	5
II.	Resultado del efecto del fuego en la velocidad del pulso ultrasónico	6
III.	Resultado del efecto del fuego en la resistencia a la flexión	7
IV.	Resultados del efecto del fuego en el acero de refuerzo	8
V.	Resultados del efecto del fuego en la adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón	9
VI.	Resultado del ensayo de losa expuesta al fuego	12
VII.	Resultado del ensayo de testigos	15
VIII.	Calor específico de la roca caliza	34
IX.	Conductividad térmica a temperatura ambiente	47
X.	Breve descripción de las transformaciones del hormigón durante el calentamiento	88
XI.	Orden de influencia de los materiales y el medio ambiente en las deformaciones térmicas del hormigón durante su primer calentamiento	91
XII.	Características, agregado grueso basáltico	108
XIII.	Características, agregado grueso calizo	109
XIV.	Características agregado fino	110

XV.	Revenimiento recomendado para varios tipos de construcción	113
XVI.	Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños nominales recomendados .	115
XVII.	Relación agua-cemento y esfuerzo a compresión del hormigón.....	116
XVIII.	Cantidad de agregado grueso por unidad de volumen del hormigón..	117
XIX.	Primera estimación del peso unitario del hormigón	118
XX.	Temperaturas alcanzadas en cada muestra cilíndrica.....	132
XXI.	Datos obtenidos de los ensayos con muestras de agregado grueso de caliza.....	133
XXII.	Datos obtenidos de los ensayos con muestras de agregado grueso de basalto	134
XXIII.	Promedio de las muestra cilíndricas con agregado grueso calizo	135
XXIV.	Promedio de las muestra cilíndricas con agregado grueso basáltico .	135
XXV.	Variación absoluta y relativa de la resistencia a la compresión de hormigón con agregado grueso basáltico.....	141
XXVI.	Variación absoluta y relativa de la resistencia a la compresión de hormigón con agregado grueso calizo.....	142

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
c_p	Calor específico (J/kgK)
ρc_p	Calor volumétrico específico (J/m ³ K)
Cal	Calorías
cm	Centímetro
λ	Conductividad térmica (W/mK)
ρ	Densidad (kg/m ³)
D	Difusión térmica
°C	Grados centígrados
g	Gramos
kg	Kilogramo
lb	Libras
m	Metro
mm	Milímetro
min	Minutos
γ	Peso específico
%	Porcentaje
H	Ritmo de calor generado internamente

GLOSARIO

Absorción	Es la adhesión de moléculas de gases o de moléculas en solución a las superficies de los cuerpos sólidos con los que están en contacto.
Agregados de peso ligero	Agregados de densidades menores a los valores normales.
Calor específico	Cantidad de calor que por kilogramo necesita un cuerpo para que su temperatura se eleve en un grado centígrado.
Color	Impresión que producen en la retina los rayos de luz reflejados y absorbidos por un cuerpo.
Conductividad térmica	Se refiere a la cantidad o velocidad de calor transmitida a través de un material.
Contracción	Disminución de volumen.
Deformación	Medida que expresa un cambio de tamaño o forma producidos por esfuerzos, aplicados al objeto en evaluación.
Descarbonización	Proceso que elimina el dióxido de carbono del agua.

Desgasificación	Proceso de eliminación de gases disueltos en el agua usando calor.
Deshidratación	Pérdida del contenido de agua.
Densidad	Es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa.
Difusión térmica	Propiedad específica de cada material que describe el ritmo de cambio de temperatura.
Dureza	Es la resistencia de los materiales para resistir la penetración de otro cuerpo.
Endotérmico	Reacción química que absorbe la energía, normalmente en forma de calor.
Entalpía	Es una magnitud termodinámica cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.
Expansión	Aumento de volumen.
Expansión térmica	Es el incremento en el volumen de un material a medida que aumenta su temperatura.

Desprendimiento Explosivo	Separación imprevista de fragmentos previamente unidos por un material aglomerante.
Fuego	Moléculas incandescentes de materia combustible.
Gravedad específica	Relación entre la densidad de una sustancia y la de otra, tomada como patrón, generalmente, para sólidos y líquidos se emplea el agua destilada.
Calentamiento	Aumento gradual de la temperatura.
Litificación	Proceso mediante el cual un material se convierte en roca compactada en la corteza terrestre.
Micro	Unidad de medida la cual se expresa en potencias de 10^{-6} .
Olor	Emanación volátil de ciertos cuerpos que se percibe a través del sentido del olfato.
Pasta de cemento	Mezcla de cemento, agregado fino y agua.
Peso específico	Es la razón entre la masa de una unidad de volumen de la sustancia y la masa de la misma unidad de volumen de agua destilada.
Petrología	Es la ciencia que se ocupa de las rocas que están formadas por conjuntos minerales definidos y constituyen la mayor parte de la tierra.

Porosidad	Es el volumen de espacios abiertos que contiene relativo a su volumen total.
Puzolanas	Roca volcánica fragmentada de composición basáltica.
Cuarzo	Óxido de silicio que se presenta en cristales hexagonales; es uno de los constituyentes de granito y otras rocas.
Residual	Porción derivada de la descomposición de un todo.
Serpentina	Mineral que se presenta de la alteración de ciertos silicatos; se produce en rocas ígneas y metamórficas.
Silíceo	Subconjunto de las rocas sedimentarias que se caracterizan por poseer un alto contenido de sílice.
Temperatura	Magnitud escalar de la energía interna de un sistema termodinámico.
Textura	Forma en que están entrelazadas las fibras de un tejido, lo que produce una sensación táctil o visual.

RESUMEN

El hormigón es el material de infraestructura que más se utiliza en obras de ingeniería civil, por lo tanto, vale la pena someterlo a diversos escenarios en donde se ponen a prueba sus características resistivas. Tal es el caso de esta investigación donde se pone a prueba la resistencia a la compresión del hormigón al ser expuesto al fuego.

Como objetivo principal de la investigación se realizó la comparación de los dos agregados más abundantes en Guatemala. Uno proveniente de las rocas sedimentarias, la roca caliza que es abundante en la parte norte del país, y otro proveniente de las rocas ígneas, el basalto que es abundante en las zonas volcánicas de Guatemala.

La comparación entre estos dos agregados consistió en determinar qué agregado proporciona mayor estabilidad térmica al hormigón cuando cumplen la función de agregado grueso. Para lo cual se investigaron los orígenes y características de cada agregado.

Entre los fundamentos teóricos más relevantes están la interacción que toma lugar entre los agregados y la pasta de cemento endurecida cuando el hormigón es expuesto al fuego, en general, el proceso de degradación del hormigón a medida que el tiempo y la temperatura aumenta.

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Investigaciones de Ingeniería donde todos los procesos se realizan bajo normativos que garantizan los resultados de esta investigación. En este

laboratorio se realizaron muestras cilíndricas de hormigón que luego fueron expuestas al fuego en un horno con el uso de leña como combustible.

Después de enfriadas las muestras, se procedió al ensayo de la resistencia a la compresión de los cilindros que presentaban sus caras de apoyo intactas. Debido a los desprendimientos explosivos que sufre el hormigón en el fuego algunas muestras tenían sus caras fracturadas que inhabilitaron el ensayo de la resistencia a la compresión bajo la norma ASTM C39. De estas muestras dañadas se extrajeron núcleos bajo la norma ASTM C42 para determinar su resistencia a la compresión.

Como lo describen varios autores, la resistencia a la compresión es inminente cuando el hormigón se expone al fuego pero depende en gran manera del tipo de agregado y cemento utilizado. Como lo describen los resultados de esta investigación, hay diferentes reacciones entre los dos agregados utilizados, esto se debe a que unos agregados son más estables térmicamente que otros.

OBJETIVOS

General

Comparar la resistencia a la compresión de hormigón a base de cemento tipo 1 PM con agregado de caliza y basalto expuesto al fuego.

Específicos

1. Determinar la variación de la resistencia a la compresión del hormigón cuando es expuesto al fuego.
2. Determinar si la variación de la resistencia a la compresión es por el desprendimiento entre el agregado grueso y la pasta de cemento o si la falla es por la fisuración del agregado grueso.
3. Identificar la tendencia del tipo de falla de los testigos de hormigón después de ser expuestos al fuego.
4. Determinar si la falla es por la separación entre el agregado grueso o por la cristalización de la caliza o el basalto al verse sometida al fuego.
5. Determinar que agregado grueso (caliza o basalto) provee una mejor resistencia en el hormigón después de ser expuesto al fuego.

INTRODUCCIÓN

El propósito de esta investigación es conocer el comportamiento y las reacciones del hormigón cuando se expone al fuego. Dicho comportamiento está en función de sus constituyentes; tanto el agregado grueso como la pasta de cemento presentan reacciones que causan efectos dañinos en las propiedades y características resistivas del hormigón.

En esta investigación se evaluaron específicamente la caliza y el basalto, los agregados con mayor abundancia en Guatemala. Estos agregados por su proceso de formación tienen características distintas que se ven reflejadas en el comportamiento del hormigón cuando se expone a altas temperaturas.

El primer capítulo describe y brinda análisis de las investigaciones realizadas en Guatemala, dichas investigaciones fueron realizadas como trabajos de graduación de estudiantes de ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El segundo capítulo describe los fundamentos teóricos como las principales características de los agregados evaluados y el tipo de cemento utilizado. El capítulo tres describe específicamente los efectos en las características del hormigón en función de la temperatura.

La parte experimental se describe en el capítulo cuatro donde detalladamente se explica el proceso que se llevó a cabo para obtener parámetros de comparación entre los dos agregados evaluados.

1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los países más desarrollados han implementado técnicas para disminuir la amenaza y daños causados en el hormigón por el fuego. Estas técnicas constan de regulaciones que especifican requerimientos para proporcionar a las edificaciones y sus usuarios una adecuada protección estructural contra los incendios.

Estas regulaciones tienen el objetivo de minimizar las posibles causas del inicio de un incendio, reducir su crecimiento, prevenir su propagación, facilitar las vías de escape, facilitar el acceso para controlarlo y, por supuesto, evitar la falla de la estructura.

Para desarrollar dichas técnicas preventivas contra los incendios, se tiene que investigar para establecer los requisitos mínimos en los materiales o elementos de construcción bajo ciertas circunstancias.

Estas investigaciones desarrollan temas como: ensayos de combustibilidad de materiales, propagación del fuego, propagación superficial de la llama en materiales, propagación del humo, emanación de gases tóxicos y ensayos de elementos estructurales expuestos al fuego.

Los primeros ensayos de elementos estructurales sometidos al fuego fueron realizados en Inglaterra y Estados Unidos a finales del siglo diecinueve. Estos eran efectuados usando madera, alquitrán y brea como combustible. Las

temperaturas eran medidas con termopares conectados entre un elemento a otro.

A principios del siglo veinte, emplearon hornos capaces de regular la temperatura y se desarrolló la curva tiempo – temperatura normalizada la cual fue presentada por el comité C-5 de incendios de ASTM y la Asociación Nacional de Protección contra Incendios.

La curva tiempo–temperatura fue creada con el objeto de reproducir en el laboratorio el comportamiento ante el fuego de un material o elemento estructural, bajo condiciones de ensayo normalizadas, las cuales se asemejan al comportamiento de un incendio real.

El procedimiento básico de ensayo consiste en que el elemento estructural sometido a una prueba es colocado en el horno de ensayo de tal manera que una de sus superficies esté expuesta hacia el fuego generado por el horno.

En la mayoría de los ensayos es aplicada una carga, igual a la carga máxima permisible contemplada en el diseño del elemento. La temperatura de la superficie expuesta durante el ensayo debe incrementarse de acuerdo a la curva tiempo–temperatura normalizada.

La resistencia al fuego del elemento se determina por el tiempo requerido para que el elemento pierda su estabilidad, integridad o aislamiento. Dicha estabilidad está determinada por el criterio de que el elemento falla cuando es incapaz de soportar las cargas aplicadas y colapsa o que ocurran deflexiones no permitidas.

La pérdida de integridad ocurre cuando aparecen grietas y otras aberturas capaces de dejar pasar llamas, humo o gases calientes a través del elemento que provocan la ignición de un material colocado en el lado no expuesto.

No todos los ensayos tienen que cumplir con los requerimientos descritos anteriormente ya que eso depende del tipo de material y elemento que se esté evaluando. La resistencia al fuego es generalmente asignada de acuerdo a la última hora completada exitosamente por el material. Bajos los requerimientos anteriores se realizan los ensayos de vigas, losas, muros de mampostería, columnas y demás elementos estructurales.

1.1. Estudios realizados en Guatemala

La investigación y experimentación de este tema en Guatemala se inició en 1982 a raíz de los estudios solicitados por la municipalidad de Guatemala al Centro de Investigaciones de Ingeniería. Dichos estudios tenían el objetivo de determinar el estado estructural del mercado La Terminal que un año atrás se había incendiado.

Los estudios fueron realizados a cargo del ingeniero Aníbal Rodas que en ese momento cumplía la función de director de la Sección de Concretos del Centro de Investigaciones de Ingeniería. En primer lugar, se realizó una inspección visual de los elementos estructurales dañados por el siniestro; luego, se realizaron pruebas no destructivas como el ensayo de la velocidad del pulso ultrasónico y pruebas de carga normalizadas por ACI.

También, se extrajeron núcleos de hormigón de las partes afectadas y no afectadas; por último, se hizo la extracción de barras de acero de refuerzo para ensayarlas a tensión. El dictamen técnico del Centro de Investigaciones de

Ingeniería reveló que no sería necesaria la demolición de la estructura ya que el edificio aún se podía reparar. Este hecho marcó el inicio de las investigaciones realizadas en Guatemala que a continuación se describen:

1.1.1. *Estudio preliminar sobre el efecto que produce el fuego en las características físicas y mecánicas del concreto y el acero de refuerzo* de Pamela Chang y Julio Reynosa

Esta investigación fue realizada como trabajo de graduación de los ingenieros civiles Pamela Chang y Julio Reynosa en la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala en 1983.

Chang y Reynosa hicieron ensayos de la resistencia a la compresión, resistencia a flexión y la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón. También, evaluaron el acero de refuerzo y su adherencia con la pasta endurecida. Para exponer las muestras al fuego emplearon un quemador de gas propano, alcanzado temperaturas hasta los 450 °C y 500 °C.

Chan y Reynosa realizaron variaciones con la cantidad de cemento que utilizaron; dichas variaciones fueron llamadas 'mezclas pobres', donde utilizaron 7 sacos por metro cúbico, 'mezclas intermedias', donde utilizaron 8 sacos por metro cúbico y 'mezclas ricas', donde utilizaron 9 sacos por metro cúbico. También, hicieron variaciones con el agregado grueso, para ello elaboraron muestras con agregado grueso de andesita y muestras con agregado grueso de caliza.

1.1.1.1. Resultados

1.1.1.1.1. Ensayo de resistencia a compresión

Chang y Reynosa evaluaron la resistencia a la compresión por medio de 72 cubos de hormigón de 7 cm de arista. La mitad de esos cubos fue expuesta al fuego con el objetivo de compararlos con la otra mitad no expuesta y encontrar un porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión, causada por la exposición al fuego. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos por Chan y Reynosa.

Tabla I. **Resultados del efecto del fuego en la resistencia a la compresión**

Agregado	Mezcla	Relación A/C	Muestras no expuestas kg/cm ²	Muestras expuestas kg/cm ²	Porcentaje de reducción	Porcentaje de reducción promedio
Andesita	Pobre	0,76	296,59	274,00	7,62	15,58
	Intermedia	0,53	342,11	288,69	15,60	
	Rica	0,41	391,64	299,45	23,54	
Caliza	Pobre	0,59	267,2	222,8	16,62	21,51
	Intermedia	0,57	308,66	230,27	25,40	
	Rica	0,53	340,57	266,24	21,83	

Fuente: CHANG, Pamela; REYNOSA, Julio. *Estudio preliminar sobre el efecto que produce el fuego en las características físicas y mecánicas del concreto y el acero de refuerzo*. p. 85.

Se puede observar que el hormigón con caliza como agregado grueso presenta el mayor porcentaje de reducción. Otro dato curioso es que la reducción es mayor conforme la mezcla sea más rica.

1.1.1.1.2. Ensayos de resistencia a flexión y velocidad de pulso ultrasónico

Para determinar la resistencia a flexión y la velocidad del pulso ultrasónico, Chang y Reynosa elaboraron 72 prismas de las siguientes dimensiones 10 cm x 20 cm x 30 cm, de los cuales la mitad fue expuesta al fuego. La siguiente tabla muestra los resultados del ensayo de la velocidad del pulso ultrasónico.

Tabla II. Resultado del efecto del fuego en la velocidad del pulso ultrasónico

Agregado	Mezcla	Velocidad del pulso ultrasónico cm/seg				Porcentaje de reducción		Porcentaje promedio de reducción	
		No expuesto		Expuesto		Largo	Ancho	Largo	Ancho
		Largo	Ancho	Largo	Ancho				
Andesita	Pobre	4.054,15	3.713,08	3.472,90	3.130,38	14,34	15,69	18,13	17,11
	Intermedia	4.369,79	3.956,20	3.712,97	3.333,13	15,03	15,74		
	Rica	4.918,52	4.083,63	3.687,83	3.271,19	25,02	19,89		
Caliza	Pobre	4.269,83	3.897,27	3.555,23	3.128,43	16,73	19,73	17,13	18,90
	Intermedia	4.323,34	3.866,73	3.633,05	3.260,49	15,97	15,68		
	Rica	4.260,75	3.870,13	3.464,24	3.846,05	18,69	21,29		

Fuente: CHANG, Pamela; REYNOSA, Julio. *Estudio preliminar sobre el efecto que produce el fuego en las características físicas y mecánicas del concreto y el acero de refuerzo*. p. 85.

Los resultados muestran que la velocidad del pulso ultrasónico en las muestras expuestas al fuego es menor que la velocidad de las muestras no expuestas. Esto debido a que la señal viaja más lento a través del hormigón expuesto al fuego por las fisuras y la calcinación de los materiales. En la siguiente tabla se encuentran los resultados de la resistencia a la flexión.

Tabla III. **Resultado del efecto del fuego en la resistencia a la flexión**

Agregado	Mezcla	Relación A/C	Muestras no expuestas kg/cm ²	Muestras expuestas kg/cm ²	Porcentaje de reducción	Porcentaje de reducción promedio
Andesita	Pobre	0,76	34,63	21,39	38,23	39,91
	Intermedia	0,63	39,29	21,59	45,05	
	Rica	0,53	41,56	27,66	33,45	
Caliza	Pobre	0,66	39,23	20,3	48,25	47,79
	Intermedia	0,63	42,61	19,16	56,03	
	Rica	0,53	44,56	26,36	42,11	

Fuente: CHANG, Pamela; REYNOSA, Julio. *Estudio preliminar sobre el efecto que produce el fuego en las características físicas y mecánicas del concreto y el acero de refuerzo*. p. 88.

Los resultados muestran que el hormigón con agregados de caliza presenta mayor reducción a la resistencia a la flexión, al contrario de la resistencia a la compresión, las mezclas pobres son ahora las que presentan mayor reducción a la resistencia a la flexión.

1.1.1.1.3. **Ensayo de tensión en el acero**

Para evaluar el acero de refuerzo, Chang y Reynosa realizaron prismas de hormigón reforzado de las siguientes dimensiones 10 cm x 15 cm x 50 cm. El refuerzo empleado fueron varillas de 0,95 cm, 1,27 cm y 1,59 cm de diámetro con diferentes recubrimientos.

Después de haber expuesto al fuego las muestras, Chang y Reynosa procedieron a demoler el hormigón y extraer las barras de acero que luego fueron ensayadas a tensión. La siguiente tabla muestra los resultados de dichos ensayos.

Tabla IV. **Resultados del efecto del fuego en el acero de refuerzo**

Grado	Diámetro cm	Muestras no expuestas fy kg/cm ²	Muestras expuestas fy kg/cm ²	Porcentaje de diferencia
40	0,95	4.091,40	4.087,15	0,1
	1,27	3.932,10	2.880,04	1,78
	1,59	---	---	---
60	0,95	5.134,31	5.227,67	1,82
	1,27	4.579,36	4.600,96	0,47
	1,59	5.367,84	5.194,50	3,23

Fuente: CHANG, Pamela; REYNOSA, Julio. *Estudio preliminar sobre el efecto que produce el fuego en las características físicas y mecánicas del concreto y el acero de refuerzo*. p. 89.

Los resultados muestran que las barras de refuerzo no tienen mayor cambio en su resistencia e incluso las barras de grado 60 aumentaron su resistencia en pequeñas cantidades que son despreciables. Chang y Reynosa, también realizaron ensayos de doblado en las barras expuestas al fuego pero los resultados no tuvieron mayor relevancia ya que las características del acero no se ven afectadas cuando el acero está frío.

1.1.1.1.4. **Ensayo de adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón**

Por último, para determinar si la adherencia entre el hormigón y las barras de refuerzo ha sido afectada por la exposición al fuego, Chang y Reynosa realizaron prismas de las siguientes dimensiones 10 cm x 15 cm x 60 cm. Para el refuerzo se utilizaron barras de 1,27 cm de diámetro. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos.

Tabla V. **Resultados del efecto del fuego en la adherencia entre el acero de refuerzo y el hormigón**

Agregado	Mezcla	Relación A/C	Muestras no expuestas kg/cm ²	Muestras expuestas kg/cm ²	Porcentaje de reducción	Porcentaje de reducción promedio
Andesita	Pobre	0,76	18,76	13,32	29,85	33,40
	Intermedia	0,61	28,00	14,02	14,02	
	Rica	0,53	34,59	27,28	21,13	
Caliza	Pobre	0,57	27,35	13,74	49,76	50,70
	Intermedia	0,52	39,58	14,56	63,21	
	Rica	0,43	40,2	19,52	39,14	

Fuente: CHANG, Pamela; REYNOSA, Julio. *Estudio preliminar sobre el efecto que produce el fuego en las características físicas y mecánicas del concreto y el acero de refuerzo*. p. 90.

Los resultados demuestran que la adherencia es reducida en un 50 % cuando se utiliza agregado grueso de caliza y en un 30 % cuando se utiliza agregado grueso de andesita. Estos resultados son muy importantes ya que en las suposiciones de diseño del hormigón armado, se asume que hay una adherencia perfecta entre el hormigón y el acero de refuerzo. Tener este conocimiento es importante porque es evidente que la adherencia es muy afectada durante un incendio.

1.1.2. Consideraciones sobre la resistencia al fuego en elementos de concreto de Omar Flores

Al igual que la investigación anterior, esta también fue realizada como trabajo de graduación del ingeniero civil de Omar Flores en la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala en 1989.

Flores realizó un estudio experimental con 8 losas de hormigón reforzadas en un sentido, las cuales fueron expuestas al fuego para evaluar la estabilidad estructural y las propiedades mecánicas de dichas losas. Flores realizó los ensayos con el equipo y material que tenían a la mano, ya que no contaba con equipo sofisticado; además, uno de sus principales objetivos fue diseñar una propuesta de evaluación que se adaptase a las condiciones técnicas con las que el ingeniero civil trabaja en Guatemala.

Las losas tenían las siguientes dimensiones: 240 cm de largo, 52 cm de ancho y 8 cm de espesor; estas dimensiones las consideraron de esa manera para la facilidad de movilización. Para experimentar con la calidad del hormigón, realizaron 4 losas con hormigón hecho en obra y 4 losas con hormigón premezclado. Tres de las losas fueron expuestas al fuego, utilizando leña como material combustible y un horno de ladrillos de barro cocido hecho a la medida.

El refuerzo estaba formado de tres barras de 1,27 cm de diámetro, distribuidas en el ancho de la losa, dicho refuerzo fue calculado para soportar la carga muerta de la losa y una carga viva de 150 kg/m². Otro factor importante que contribuyó a las deflexiones registradas, fue el tipo de apoyo, ya que Flores consideró exponer las losas simplemente apoyadas sobre el horno.

Flores expuso al fuego las losas con una hora de diferencia, así la losa que más tiempo estuvo expuesta fue de 3 horas. Flores tomó medidas de deflexión y temperatura en intervalos de 10 minutos hasta completar el tiempo respectivo. Después de exponer las losas al fuego las dejaron enfriar por 24 horas y nuevamente midieron la deflexión para determinar la deformación permanente.

Posteriormente, hicieron el ensayo de pulso ultrasónico; luego, el ensayo de carga normalizado por reglamento ACI 318–83; por último, extrajeron 3 testigos de hormigón y una fracción de una barra de acero para realizar los ensayos de compresión y tensión, respectivamente; todo lo realizaron por cada losa ensayada.

1.1.2.1. Resultados

1.1.2.1.1. Ensayo de estabilidad estructural

Flores descubrió que a medida que la temperatura aumenta, el hormigón pierde humedad y esto genera pequeñas explosiones que se deben a la rapidez con que el vapor de agua emerge de las losas. De las 6 losas ensayadas no colapsó ni una pero si presentaron deflexiones excesivas soportando únicamente su propio peso.

La deflexión ocurre a razón de 0,38 mm/min para las losas de hormigón hecho en obra y 0,44 mm/min para las losas de hormigón premezclado, lo cual fue determinado experimentalmente por Flores.

Con las deflexiones producidas durante la exposición al fuego, Flores calculó la carga equivalente que se necesitaría para obtener las mismas deflexiones, pero el resultado generó cargas excesivas que resultan ser irreales. También, se concluyó que esto se debe a la fluencia que se provoca en el acero a causa del aumento de temperatura. La siguiente tabla muestra los resultados de una losa de hormigón premezclado que fue expuesta 3 horas.

Tabla VI. **Resultado del ensayo de losa expuesta al fuego**

Losa de hormigón hecho en obra, tiempo de exposición 3 horas.		
Tiempo (min)	Temperatura °C	Deflexión (mm)
0	23	3
10	360	10
20	540	15
30	703	20
40	408	23
50	546	23
60	563	29
70	610	34
80	726	41
90	462	45
100	653	46
110	528	48
120	631	54
130	776	57
140	700	59
150	661	65
160	535	67
170	629	68
180	635	71

Fuente: FLORES BELTETON, Omar Gilberto. *Consideraciones sobre la resistencia al fuego en elementos de concreto.* p. 63.

1.1.2.1.2. Ensayo de la velocidad del pulso ultrasónico

Después de la exposición al fuego, Flores realizó el ensayo del pulso ultrasónico para determinar la magnitud del daño en la uniformidad del hormigón. Los resultados muestran que la velocidad del pulso ultrasónico es reducida a causa de la exposición al fuego y que los porcentajes de reducción no varían en los dos tipos de hormigón empleado.

El porcentaje de reducción de velocidad del pulso ultrasónico aumenta a medida que el tiempo pasa; de esta manera, la losa con una hora de exposición presenta 18 %, la losa expuesta 2 horas presenta 28 % de reducción y la losa expuesta 3 horas presenta 35 % de reducción, lo cual fue observado por Flores.

Flores determinó cualitativamente la condición del hormigón con base en la velocidad del pulso ultrasónico ya que velocidades menores de 3 000 m/s indican que el hormigón es de mala calidad. Efectivamente, en las muestras no expuestas al fuego las velocidades fueron mayores a ese límite y todas las velocidades que presentaron las losas que ya habían sido expuestas fueron menores a esa cantidad.

En la tesis mencionada, Flores concluyó que la calidad del hormigón disminuye por la disgregación que se provoca por la incompatibilidad del agregado y la pasta de cemento cuando se expanden con el incremento de la temperatura o por la descomposición química.

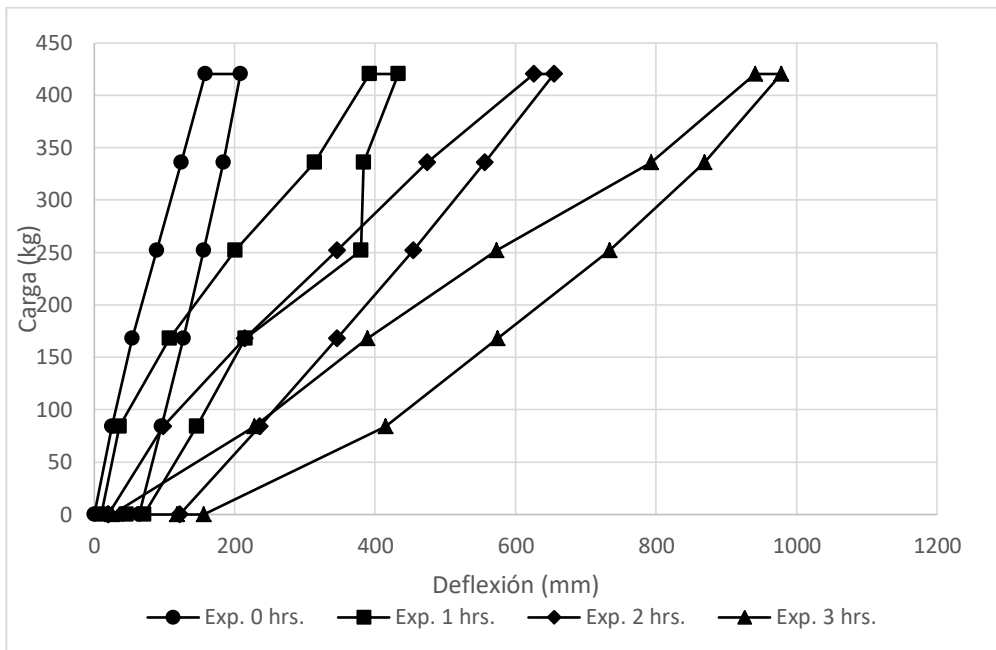
1.1.2.1.3. Ensayo de carga

Flores realizó este ensayo de acuerdo con el procedimiento establecido en el capítulo 20 del reglamento ACI 319 – 83 para la evaluación de elementos sujetos a flexión. El principal objetivo de Flores fue obtener información sobre la capacidad de carga y las deflexiones de las losas después de su exposición al fuego y comparar los resultados de las losas no expuestas.

La siguiente gráfica muestra el proceso de carga y descarga una losa hecha de hormigón premezclado a diferentes tiempos de exposición. La gráfica muestra que los materiales pierden sus características resistivas conforme el

tiempo de exposición al fuego incrementa, ya que con la misma cantidad de carga, las losas presentaban una mayor deflexión.

Figura 1. Ciclos de carga y descarga en losas de hormigón premezclado



Fuente: FLORES BELTETON, Omar Gilberto. *Consideraciones sobre la resistencia al fuego en elementos de concreto*. p. 81.

Por inspección visual, Flores determinó que se generaron fisuras debido al ensayo de carga en las losas expuestas al fuego durante 2 y 3 horas. Otro factor importante que Flores evaluó, las deflexiones admisibles; de acuerdo al reglamento ACI 318–83, la deflexión máxima admisible para esa longitud es de 3 mm. Las únicas losas que cumplieron esta condición fueron las no expuestas al fuego, las losas expuestas rebasaron este límite hasta un máximo de 270 %, deflexión que presentó una losa de hormigón expuesta al fuego por 3 horas.

1.1.2.1.4. Ensayo de los testigos extraídos de las losas

El objetivo de extraer testigos cilíndricos de las losas aparte de determinar la resistencia a la compresión en cada losa fue observar la profundidad del daño en el concreto a partir de la superficie expuesta. Visualmente, los testigos extraídos no muestran daño severo a causa de la deshidratación de la pasta, más allá de 3 mm de la superficie expuesta.

La deshidratación antes mencionada se pudo notar por el cambio de peso que muestran los testigos; sin embargo, no presentaron fisuramiento, disgregación u otro tipo de defecto. En la siguiente tabla se pueden observar las características antes mencionadas.

Tabla VII. Resultado del ensayo de testigos

Losa de hormigón premesclado					
Tiempo de exposición	Testigo	Peso (g)	Densidad (kg/m ³)	Esfuerzo (kg/m ²)	Porcentaje de reducción
0 horas	I	309,70	2.251,43	500,93	Referencia
	II	322,00	2.332,57	675,29	
	III	321,00	2.309,01	587,96	
Promedio		317,57	2.297,67	588,06	
1 hora	I	314,00	2.162,55	349,33	37,74
	II	308,70	2.145,26	325,96	
	III	304,10	2.130,14	423,13	
Promedio		308,93	2.145,98	366,14	
2 horas	I	285,20	2.139,06	386,23	46,10
	II	286,60	2.037,73	337,03	
	III	282,70	2.669,83	227,56	
Promedio		284,83	2.282,21	316,94	
3 horas	I	297,90	2.098,67	318,58	54,06
	II	285,10	2.075,05	284,06	
	III	291,30	2.083,19	207,88	
Promedio		291,43	2.085,64	270,17	

Fuente: FLORES BELTETON, Omar Gilberto. *Consideraciones sobre la resistencia al fuego en elementos de concreto.* p. 85.

Como se puede notar en la tabla anterior, la resistencia a compresión disminuye a medida que el tiempo de exposición aumenta. Lo más importante a notar es que cuando el hormigón ha pasado 3 horas de exposición al fuego, también, ha perdido el 50 % de su resistencia a compresión.

1.1.2.1.5. Ensayo de las barras de refuerzo

Para realizar este ensayo se extrajo una muestra de un metro de longitud del tramo central del refuerzo. Los resultados obtenidos demuestran que características como el límite de fluencia, esfuerzo máximo y el esfuerzo de rotura no son significativamente afectados por la exposición de las losas al fuego. Esto fue producto de que las temperaturas alcanzadas durante el ensayo no fueron lo suficiente para afectar al acero de refuerzo.

1.1.3. *Cálculo y comportamiento de estructuras de concreto y acero sometidas a incendios de Jorge Valdez*

Esta investigación fue realizada como trabajo de graduación del ingeniero civil Jorge Valdez G., en la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala en 1989.

Valdez reunió información de las principales características del hormigón y el acero en función de la temperatura pero no realizó parte experimental así que su investigación se basa en información teórica de ese tiempo.

2. ORÍGENES, CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES EVALUADOS

El planeta Tierra está formado por placas continentales y oceánicas constantemente en movimiento que dan lugar a la formación del relieve que diariamente se puede apreciar. Los cambios de presión y temperatura en el interior del planeta Tierra producen un ciclo de formación de las rocas, el cual produce una serie de rocas con características diferentes según el camino que sea tomado en dicho ciclo.

2.1. Ciclo de las rocas

El ciclo de las rocas es un esquema representativo de las diferentes vías que puede tomar la formación de una roca; también, hace referencia a la vinculación que existe entre los diferentes tipos de rocas que por su origen se conocen como rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias.

Como es un ciclo, se podría partir en cualquier punto para explicarlo, en esta ocasión se empezará con el magma, que es roca fundida constantemente en movimiento en el interior de la Tierra. El magma tiende a ascender a la superficie de la Tierra y acaba por enfriarse y solidificarse. Este proceso, denominado cristalización, puede ocurrir debajo de la superficie terrestre o, después de una erupción volcánica, en la superficie.

En cualquiera de las dos situaciones, las rocas resultantes se denominan rocas ígneas.

Las rocas ígneas que se solidifican en la superficie experimentan meteorización, en el cual los agentes erosivos de la atmósfera desintegran, erosionan y diluyen las rocas. El material resultante de la meteorización es transportado pendiente abajo por la gravedad y algún agente erosivo como el agua superficial y el viento.

Estas partículas y sustancias disueltas se denominan sedimentos y la mayoría termina llegando al océano o a zonas de acumulación como las llanuras de inundación de los ríos, desiertos, pantanos y dunas. Seguido de lo anterior, los sedimentos se convierten en roca por un proceso denominado litificación que da lugar a las rocas sedimentarias. Este proceso convierte los sedimentos en roca por medio la compactación del peso de las capas suprayacentes o por el proceso de cementación cuando el agua de infiltración llena los poros con material mineral.

En este punto casi es completado el ciclo de formación de las rocas; solo falta explicar el proceso de formación de las rocas metamórficas. Las rocas sedimentarias resultan cada vez más en la profundidad del planeta Tierra que quedan sometidas a grandes presiones y temperaturas que dan lugar a la formación de rocas metamórficas.

Cuando la roca metamórfica es sometida a cambios de presión adicionales o a temperaturas aún mayores, se fundirá, creando un magma, que acabará cristalizando en rocas ígneas. En este punto se completa el ciclo de formación de las rocas.

Describen que los procesos impulsados por el calor desde el interior de la Tierra son responsables de la creación de las rocas ígneas y metamórficas. La meteorización y la erosión, procesos externos alimentados por una combinación

de energía procedente del Sol y la gravedad, producen el sedimento a partir del cual se forman las rocas sedimentarias. Este es un buen resumen para entender de manera simplificada los procesos que intervienen en la formación de las rocas.

2.1.1. Caminos alternativos del ciclo de las rocas

El ciclo de formación de las rocas es dinámico y puede tomar vías alternas: las rocas ígneas, en vez de ser expuestas a la meteorización y a la erosión en la superficie terrestre, pueden permanecer enterradas profundamente. Estas rocas enterradas pueden acabar siendo sometidas a fuertes fuerzas de compresión y a temperaturas elevadas asociadas con la formación de montañas. Cuando esto ocurre, se transforman directamente en rocas metamórficas.

Por otro lado, las rocas metamórficas y sedimentarias no siempre permanecen enterradas. Las capas superiores pueden ser eliminadas, dejando expuestas las rocas que antes estaban enterradas. Cuando esto ocurre, los materiales son meteorizados y convertidos en nueva materia prima para las rocas sedimentarias. Las rocas pueden parecer masas invariables, pero el ciclo de las rocas demuestra que no es así.

2.2. Clasificación de las rocas

Los geólogos centran su principal interés en el registro que revelan las rocas acerca del ambiente geológico en función del tiempo de los minerales que las formaron. Con base en su origen y el contenido mineralógico, los geólogos clasifican las rocas en ígneas, sedimentarias y metamórficas.

2.2.1. Rocas ígneas

Las rocas ígneas se forman por el enfriamiento del magma o lava que en determinado tiempo fue un fluido de roca fundida a altas temperaturas y presiones.

Por la diferencia de densidades el magma asciende hacia la superficie, esto produce erupciones volcánicas y algunas ocasiones produce explosiones cuando las chimeneas y cráteres se encuentran patadas. Sin embargo, no todas las erupciones son violentas; algunos volcanes generan tranquilas efusiones de lavas muy fluidas.

Las rocas ígneas constituyen la mayor parte de la corteza terrestre. Ellos especifican que a excepción del núcleo exterior líquido, la porción sólida restante del planeta Tierra es básicamente una enorme roca ígnea parcialmente cubierta por una delgada capa de rocas sedimentarias.

2.2.1.1. Tipos de rocas ígneas

Si la cristalización tiene lugar en la superficie terrestre, las rocas ígneas se clasifican como extrusivas o volcánicas. Por otro lado, si el magma pierde su movilidad antes de alcanzar la superficie y acaba cristalizado en la profundidad, la rocas ígneas se denominan intrusivas o plutónicas. Las rocas ígneas intrusivas nunca se observarían si la corteza no ascendiera y las capas superficiales no fueran eliminadas por erosión.

2.2.2. Rocas sedimentarias

La meteorización inicia el proceso de formación de las rocas sedimentarias ya que desintegra y descompone lentamente las rocas superficiales. Luego, agentes erosivos transportan los productos de la meteorización a otra nueva localidad, donde son depositados.

Los sedimentos al ser depositados se transforman en rocas por medio de la litificación. La litificación transforma los sedimentos en rocas por medio de la compactación y cementación que sufren los sedimentos por el agua de infiltración. El proceso descrito anteriormente da lugar a la formación de las rocas sedimentarias.

2.2.2.1. Tipos de rocas sedimentarias

Existen dos tipos de rocas sedimentarias y se clasifican en función del tipo de meteorización que sufrieron los sedimentos que las forman. El primer tipo de roca sedimentaria se debe a la meteorización mecánica y química, que da origen a las rocas sedimentarias detríticas. El segundo tipo de roca sedimentaria se debe a la meteorización química, que da origen a las rocas sedimentarias no detríticas o químicas.

2.2.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas son el resultado de la transformación de otras rocas debajo de la superficie de la tierra, sometidas a cambios de presión y temperatura. La clasificación de las rocas metamórficas se basa en la composición mineralógica, textura y tipo de roca inicial antes del producirse el metamorfismo.

2.3. Descripción geológica de Guatemala

Guatemala está asentada sobre la influencia de tres placas tectónicas: Norteamérica, Caribe y Cocos. Los movimientos entre estas determinan los principales rasgos topográficos del país y la distribución de los volcanes. Estas placas hacen que Guatemala sea un país con mayor actividad sísmica.

La placa de Cocos se desplaza por debajo de la placa de Norteamérica, fenómeno que se denomina subducción, este proceso da origen a la formación de volcanes y al mismo tiempo a una gran cantidad de sismos. El contacto entre las placas del Caribe y de Norteamérica es de tipo transcurrente que forman cadenas montañosas en el área de la Sierra de las Minas, que toman como punto de partida la falla del río Motagua.

Por esfuerzos en la corteza causados por desplazamientos entre las placas tectónicas antes mencionadas, se han formado fallas de menor dimensión: Mixco y Santa Catarina Pinula, Zunil, Jalpatagua y Olintepeque.

2.3.1. Geomorfología de Guatemala

Guatemala está dividida por dos orientaciones estructurales:

- Formando un arco de este a oeste, convexo hacia el sur, está la primera orientación compuesta por rocas cristalinas y sedimentarias de los periodos paleozoico y mesozoico. Se extiende desde Chiapas hasta el mar Caribe.

- Un alineamiento de noreste a sureste a través de Centro América, compuesto por rocas volcánicas terciarias recientes, acentuado por una hilera de conos cuaternarios.

Las regiones que conforman estas orientaciones se les denominan respectivamente sierras del Norte de América Central y la Provincia Volcánica.

En el norte del país se encuentra la cuenca sedimentaria de El Petén. Dicha cuenca tiene afinidad con la costa del Golfo de México.

En territorio guatemalteco se pueden distinguir cuatro provincias fisiográficas, descritas de sur a norte:

- Planicie costera del Pacífico

Esta planicie está formada por los productos de la erosión de las tierras altas volcánicas con un ancho promedio de 50 km. Dichos productos consisten en arenas, gravas y ceniza.

- Provincia volcánica o cinturón volcánico

El cinturón volcánico cubre la parte occidental, sur y oriental de Guatemala, extendiéndose hasta las otras repúblicas centroamericanas. Esta zona se caracteriza por sus altas montañas, por su cadena de altos conos y domos, varios de ellos todavía activos, como los volcanes de Santiaguito, Fuego y Pacaya, que se encuentran alineados entre el plano costero del Pacífico y un cinturón de rocas volcánicas terciarias.

En esta franja se encuentra también las cuencas que contienen los lagos de Atitlán, Amatitlán y Ayarza, profundamente rellenos con depósitos de pómez cuaternarios.

- **Cordillera central de Guatemala**

Esta área la conforma una franja de rocas plutónicas, metamórficas y sedimentarias plegadas, incluyendo esquistos, mármoles, serpentinas y granitos que se extiende a través del centro del país. Las rocas metamórficas disminuyen hacia el norte, al pasar de rocas cristalinas a sedimentos plegados. También, pasan a sedimentos mesozoicos y cenozoicos hacia las tierras bajas de El Petén.

- **Tierras bajas de Petén**

Las tierras bajas de Petén las constituyen un área de bosque tropical húmedo con elevaciones promedio de 100 metros conformado por sedimentos mesozoicos y terciarios levemente plegados.

También, se encuentran calizas y dolomías cretácicas donde se desarrolló una topografía Karst, dando lugar a terrenos muy accidentados. En ciertas partes del bosque tropical se encuentran amplias sabanas con pinos esparcidos y cerros calcáreos, que sobresalen de 30 a 100 metros sobre la planicie de la sabana.

2.3.2. Estratigrafía de Guatemala

En Guatemala se distinguen diecisiete litologías diferenciables a gran escala; se hace una breve descripción de dichas litologías; se inicia por la más

antigua y se hace énfasis en el tipo de roca que las constituye, la zona del territorio donde más afloran y su edad.

- Rocas metamórficas

Constituidas principalmente por filitas, esquistos, gneises, mármol y migmatitas; se encuentran principalmente en una franja que va de este a oeste, afloran en el oeste y norte de San Marcos, en el sur y este de Huehuetenango, en el sur de Quiché, Alta Verapaz, Izabal, Jalapa, Jutiapa y cubren casi totalmente los departamentos de Baja Verapaz, El Progreso y Zacapa. Estas rocas son de la edad paleozoica.

- Rocas sedimentarias

En este grupo se han abarcado lutitas, arenisca, conglomerados y filitas; se encuentran de este a oeste en los departamentos de Huehuetenango, Quiché, Baja Verapaz, Alta Verapaz e Izabal; también, se formaron en el sureste de Petén. Estas rocas son de edad carbonífero permiano.

- Carbonatos del pérmico

Estos carbonatos se encuentran en una franja que va del este a oeste de Guatemala; en los departamentos de Huehuetenango, el Quiché, las verapaces e Izabal. Son de edad permiana.

- Formación Todos Santos

Estas formaciones alargadas de areniscas, se encuentran principalmente en los departamentos de Huehuetenango y Quiché, existen además pequeñas áreas en las verapaces y en el sur de Petén. Su edad es jurásico cretácico.

- Carbonatos del cretácico

Están localizados principalmente en el centro y sur de los departamentos de Petén y Quiché; en el norte y sur de Izabal y en casi todo los departamentos de Alta Verapaz y Huehuetenango; así como unas pequeñas áreas distribuidas en San Pedro Sacatepéquez, San Juan Sacatepéquez, Tecpán y San José Poaquil; además de encontrarse en San José Acatempa, en el centro de Jutiapa, en el norte de Baja Verapaz y Chiquimula y en el sur del departamento de El Progreso. Son rocas de edad cretácica.

- Rocas ígneas del cretácico – jurásico

Estas rocas se localizan en una franja que va de este a oeste del territorio de Guatemala; encontrándose en el centro y el oeste de Izabal, en el este de los departamentos de Alta Verapaz y Quiché y al norte del departamento de Baja Verapaz. Se formaron en el período jurásico cretácico.

- Rocas intrusivas

Este grupo está formado por granitos y dioritas así como rocas transicionales, es decir, granodioritas. Afloran especialmente en el norte de los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Guatemala y Chiquimula. En el sur de Huehuetenango, Sololá, Zacapa y Cobán. Así como al

este de Zacapa y Baja Verapaz. Se han formado en diferentes tiempos, principalmente, en el paleozoico y mesozoico.

- Sedimentos clásticos marinos

Están distribuidos de este a oeste del territorio de Guatemala, encontrándose en el noreste de Huehuetenango, al norte de Quiché, Cobán e Izabal y al sur de Petén. Son de edad cretácica terciaria.

- Areniscas subinal

Estas rocas afloran en el oriente y sur del departamento de Chiquimula y unas pequeñas áreas en el norte y noreste de Jalapa. Son de edad cretácica terciaria.

- Sedimentos marinos

Formados por areniscas, lutitas y carbonatos; se encuentran dispersos en el departamento de Petén, principalmente el centro y al noreste. Además, se pueden encontrar en una pequeña parte de Cobán en los márgenes del río Negro o Chixoy. Son de edad terciaria.

- Yeso y marga

Esta formación se localiza al norte y noreste del departamento de Petén. Son de edad terciaria.

- Calizas, areniscas y conglomerados

Estos tipos de roca se encuentran exclusivamente en una pequeña área del departamento de Izabal. Son de edad terciaria.

- Depósitos continentales

Estos depósitos se localizan en el sureste de Petén principalmente y a noreste de Alta Verapaz, así como en distintas zonas del departamento de Izabal. Son de edad terciaria.

- Rocas volcánicas sin dividir

Constituidas por tobas, lavas y lahares; pertenecen al cinturón volcánico y se pueden encontrar en los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Quiché, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala y Santa Rosa, en Jalapa, Chiquimula y una pequeña franja al sur de Huehuetenango. Se formaron durante el período terciario.

- Rocas volcánicas

Constituidas por tobas, lavas y lahares; son propias del cinturón volcánico ya que su formación se debió a la aparición de la cadena volcánica que se localiza en Guatemala, de este a oeste. Se encuentran en el norte de los departamentos de Retalhuleu, Mazatenango y Escuintla, así como en el sur y el oeste de San Marcos y en el sur de los departamentos de Quetzaltenango, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala y Jutiapa. También, en el oeste de Santa Rosa. Se formaron al principio del período cuaternario.

- Cenizas volcánicas

Esta clase de cenizas y pómez de origen volcánico se encuentra diseminados principalmente, en el cinturón volcánico. Se encuentran en las cabeceras departamentales de San Marcos, Quetzaltenango, Sololá, Quiché, Huehuetenango y Totonicapán, Chimaltenango, Salamá, Santa Rosa, Jutiapa y Guatemala. Son rocas recientes del cuaternario.

- Aluviones cuaternarios

La mayor concentración de estos, se encuentra en la parte sur del país; a lo largo de toda la franja costera del pacífico, en los departamentos de San Marcos, Retalhuleu, Mazatenango, Escuintla, Santa Rosa y Jutiapa. Encontrándose también al noroeste y noreste del departamento de Petén, así como en los márgenes del río Motagua y lago de Izabal. Existen zonas de menor concentración, como las localizadas al oeste de Zacapa y al sur de Jalapa y Chiquimula. Son rocas tan recientes del cuaternario que aún sigue el proceso de denostación.

2.4. Caliza

2.4.1. Generalidades y clasificación

La caliza es la roca sedimentaria más abundante, representan aproximadamente, 10 % del volumen total de las rocas sedimentarias. Ya sea por orígenes inorgánicos o bioquímicos, su composición mineralógica es similar.

Entre los minerales más comunes a encontrar en la roca caliza se pueden mencionar el magnesio, calcita, sílice y fosfato. Cuando la concentración de

algunos de estos minerales es predominante; la roca caliza se denomina de acuerdo al mineral con mayor concentración, como las calizas magnesianas, calizas silíceas o calizas fosfatadas, según sea el caso.

En el caso de las calizas magnesianas, de alta concentración de magnesio, se forma la sal doble calcio y magnesio, dando lugar a un tipo diferente de caliza, que se conoce con el nombre de dolomita. Las calizas silíceas son las más desfavorables, ya que el material resulta insoluble y abrasivo.

2.4.2. Aplicaciones

En la industria de los aglomerantes la caliza toma un papel importante, ya que es la materia prima para la fabricación de cal y cemento. En la fabricación del cemento, la caliza y arcilla son pulverizadas y debidamente dosificadas para formar el 'clinker', que es la clave de la reacción cementante al adicionar agua al cemento.

Por las características que adquiere al ser formada, la roca caliza es una excelente opción para emplearse como agregado grueso para en el concreto.

La caliza se utiliza para la obtención de cal que es un material constructivo empleada para la elaboración de morteros, estucos o enlucidos. En la construcción de carreteras se utiliza para estabilizar y conformar la estructura del pavimento. La cal se utilizada también como materia prima en la depuración de aguas residuales.

2.4.3. Características físicas

Las características físicas de la caliza varían dependiendo de la ruta de sedimentación donde se formó, ya que su composición química cambia dependiendo de los materiales sedimentados durante su formación. Por esta razón, algunas de las propiedades dadas a continuación deben considerarse típicas.

2.4.3.1. Color

El color de la caliza refleja el nivel y naturaleza de las impurezas presentes. Depósitos blancos son generalmente de una alta pureza. Sombras grises y tonos oscuros son usualmente causados por material de carbono y/o sulfuro de hierro. Colores como el amarillo, crema y tonos rojos indican hierro y magnesio. Impurezas en el mármol causan variedad de colores y patrones.

2.4.3.2. Olor

La caliza con frecuencia tiene un olor a humedad o terroso, que es causado por el contenido de carbono.

2.4.3.3. Textura

La textura de la caliza varía extensamente. Toda caliza es cristalina, el promedio del tamaño del grano es desde 4 micrómetros hasta 1 000 micrómetros. La distribución del tamaño del grano afecta la textura.

2.4.3.4. Gravedad específica

Las gravedades específicas de las formas cristalinas formadas por carbonato de calcio y dolomita a 20 °C son: calcita 2,27 g/cm³, aragonito 2,94 g/cm³ y dolomita 2,86 g/cm³.

2.4.3.5. Porosidad

La porosidad de la caliza varía considerablemente dependiendo del grado de compactación y la estructura. Valores típicos por volumen son 0,1 % a 2 % para el mármol, 0,1 % a 3 % para la caliza, 15 % a 40 % para tiza y arriba de 50 % para marga. La porosidad de la dolomita es generalmente en el rango de 1 a 10 %.

2.4.3.6. Absorción de agua

Esta propiedad depende de la porosidad, la distribución de los tamaños de los poros y del nivel de carbono. Así una caliza densa puede contener 0,4 % de agua por peso, mientras una tiza puede contener 20 % de agua.

2.4.3.7. Densidad evidente

Esta propiedad está en función de la porosidad, la densidad del cristal y de la cantidad de agua contenida en los poros. Para la caliza seca a 110 °C, valores típicos son 1,5 g/cm³ a 2,3 g/cm³ para la tiza, arriba de 2,7 g/cm³ para caliza con alto contenido de calcio y 2,7 g/cm³ a 2,9 g/cm³ para la dolomita.

2.4.3.8. Densidad aparente

La densidad aparente depende de la densidad evidente, de la distribución de las partículas y de su forma. La caliza triturada y tamizada con una densidad evidente de $2,7 \text{ g/cm}^3$ y un tamaño de radio de arriba hacia abajo de 2:1 generalmente tiene una densidad aparente de $1\ 400 \text{ g/cm}^3$ a 1450 kg/m^3 . Un alto contenido de finos puede incrementar la densidad aparente en un 25 %.

La presencia de agua entre los poros también puede aumentar significativamente la densidad aparente.

2.4.3.9. Ángulo de reposo

El ángulo de reposos para la caliza triturada está generalmente en el rango de 35° a 45° , pero es afectado por factores como la cantidad de distribución, la limpieza y el contenido de humedad. El ángulo se acerca a 90° para material húmedo con contenido de finos.

2.4.3.10. Calor específico

El calor específico de la caliza está dado en la siguiente tabla. Un valor de $0,22 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ fue reportado para un rango aproximado de temperatura de 20°C a 100°C .

Tabla VIII. **Calor específico de la roca caliza**

Temperatura °C	Calor específico cal/g°C
0	0,191
200	0,239
400	0,270
600	0,296
800	0,322

Fuente: OATES, Joseph. *Cal y roca caliza*. p. 20.

2.4.3.11. Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica para la caliza esta entre el rango de 4 a $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, mientras que para el mármol está entre 3 a $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

2.4.3.12. Conductividad térmica

La conductividad térmica depende de la porosidad. Valores para caliza con alto contenido de calcio, caliza dolomítica y tiza son 0,0039, 0,0034 y 0,0022 cal/cm/cm² sec °C, respectivamente. La conductividad térmica disminuye con un incremento de temperatura.

2.4.3.13. Capacidad calorífica

La capacidad calorífica de la caliza es 484 kcal/m³ °C, aproximadamente.

2.4.4. Propiedades mecánicas

2.4.4.1. Resistencia a la compresión

El esfuerzo de compresión de la caliza varía de 102 kg/cm² para algunas margas y tizas hasta 2 000 kg/cm² para algunos mármoles. Un valor típico del esfuerzo a compresión para la caliza con alto contenido de calcio es 1 800 kg/cm².

2.4.4.2. Dureza

La dureza de la caliza generalmente se encuentra entre el rango de 2 a 4 en la escala de Mohs.

2.5. Basalto

2.5.1. Generalidades y clasificación

El basalto es la roca ígnea más abundante del planeta Tierra; por el proceso de formación que sufre, su grano es fino y es de color negro o verde oscuro. En su composición mineralógica prevalecen minerales como el hierro, magnesio, calcio y sílice en escasas proporciones.

Por el contenido de minerales ferromagnéticos, los geólogos también se pueden referir a estas como rocas máficas. Debido a su contenido en hierro, las rocas máficas son normalmente más oscuras y densas que otras rocas ígneas que se encuentran normalmente en la superficie de la Tierra.

2.5.2. Aplicaciones

El basalto poco poroso y compactado puede ser empleado como árido para pavimentaciones asfálticas o en vías de ferrocarril y los basaltos con estructuras pumíticas se utilizan como agregado pétreo en el hormigón.

2.5.3. Características físicas

2.5.3.1. Color

El basalto puede ser negro, marrón o gris oscuro dependiendo del contenido mineralógico y las condiciones donde fue formada.

2.5.3.2. Olor

El basalto desprende un olor bituminoso cuando se acaba de fracturar.

2.5.3.3. Textura

Usualmente, luce densa, su textura es vidriosa, porfídica, escoriácea, vesicular.

2.5.3.4. Gravedad específica

La gravedad específica a 20 °C se encuentra entre 2,8 g/cm³ a 3 g/cm³, aproximadamente.

2.5.3.5. Porosidad

Por su proceso de formación el basalto presenta una porosidad alta, el valor aproximado de porosidad es de 7,8 %.

2.5.3.6. Absorción de agua

A pesar de su porosidad el basalto presenta un valor bajo de absorción de agua. Aproximadamente menos del 0,1 %.

2.5.3.7. Densidad

Esta propiedad está en función de la porosidad, la densidad del cristal y de la cantidad de agua contenida en los poros. Para el basalto seco valores típicos son 2,9 a 3,1 g/cm³.

2.5.3.8. Capacidad calorífica

Su capacidad calorífica es 0,84 kJ/KgK aproximadamente.

2.5.3.9. Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica para el basalto es 8°C ppm/°C aproximadamente (5,5 x 10/k).

2.5.3.10. Conductividad térmica

La conductividad térmica está en función de la porosidad pero un valor típico en el basalto es 3,97 mcal/cm/sec (0,031 – 0,038 W/mk).

2.5.4. Propiedades mecánicas

2.5.4.1. Resistencia a la compresión

Aproximadamente, la resistencia a compresión del basalto es 380 kg/cm^2 dependiendo del contenido mineralógico, pero ese valor es bastante confiable.

2.5.4.2. Dureza

La dureza de la caliza generalmente se encuentra entre el rango de 2,3 a 2,5 en la escala de Mohs.

2.6. Cemento tipo portland modificado (I PM)

2.6.1. Generalidades

Se fabrican diferentes tipos de cemento portland con características físicas y químicas que se especifican según el propósito. La norma ASTM C150 clasifica 8 tipos de cemento Portland, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado.

- Tipo I: uso general.
- Tipo II: uso general; calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos.
- Tipo III: alta resistencia inicial.
- Tipo IV: bajo calor de hidratación.
- Tipo V: alta resistencia a los sulfatos.

Los tipos I, II, y III tiene la variante que pueden ser fabricados con inclusores de aire y para identificarlos se le agrega la literal A.

Además de la clasificación anterior, existe otra variedad de cementos que es denominada cementos hidráulicos mezclados. Estos cementos han sido desarrollados debido al interés de la industria por la conservación de la energía y la economía en su producción.

Estos cementos consisten en mezclas de clinker y cenizas muy finas, puzolana natural o calcinada, o bien, escoria, dentro de los límites en porcentaje especificados de los componentes. En general, pero no necesariamente, estos cementos dan lugar a una resistencia mayor a la reacción álcali – agregado, al ataque por sulfatos y al ataque del agua de mar, pero requieren un curado de mayor duración y tienden a ser menos resistentes a los daños por la sal para descongelar. Dan lugar a una mejor liberación de calor y es posible que ganen resistencia con mayor lentitud, en especial a bajas temperaturas.

Los cementos hidráulicos mezclados deben cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C595, la cual clasifica las siguientes 7 clases de cementos mezclados:

- Tipo IS: cemento portland de escoria de altos hornos.
- Tipo IP: cemento portland con adición puzolánica.
- Tipo P: cemento portland con puzolana para uso cuando no se requiere alta resistencia inicial.
- Tipo I (PM): cemento portland con puzolana modificado.
- Tipo I (SM): cemento portland con escoria modificado.

- Tipo S: cemento con escoria para la combinación con cemento portland en la fabricación de concreto y en combinación con cal hidratada en la fabricación del mortero de albañilería.

Otra clasificación es llamada cementos de mampostería, estos son cementos hidráulicos diseñados para emplearse en morteros para construcciones de mampostería. Tiene una mayor retención de agua y un mayor tiempo de fraguado que el usual.

Los cementos de mampostería cumplen con la norma ASTM C 91, la cual clasifica los cementos de mampostería de acuerdo a su capacidad de brindar trabajabilidad, plasticidad y retención de agua a los morteros.

Existen variedad de cementos que han sido modificados de acuerdo a las condiciones del entorno donde se empleará y de acuerdo a las propiedades resistivas que se requieren para que el cemento sea funcional en dichas condiciones. Estos no tienen una clasificación propia ya que son modificaciones de los cementos antes mencionados.

Como ejemplo de estos cementos llamados “cementos especiales” se pueden mencionar los siguientes:

- Cemento expansivo
- Cemento para pozos petroleros
- Cemento impermeabilizante
- Cementos plásticos
- Cementos de colocación regulada
- Cementos con adiciones funcionales

Existen diferentes tipos de cementos gracias a la investigación, experimentación y desarrollo del campo de la construcción. Cada tipo de cemento creado tiene un propósito específico y cumple a cabalidad su función si es empleado de la manera correcta.

Para la parte experimental de esta investigación se utilizó el cemento tipo PM 1, conocido comúnmente como cemento UGC.

2.6.2. Definición

El cemento portland modificado es un cemento que se utiliza para diferentes fundiciones, es por ello que los fabricantes en Guatemala lo han llamado como cemento UGC (uso general en la construcción). Es decir, debido a sus características, puede ser utilizado en todas las actividades típicas de construcción, en especial, en la fabricación de concreto premezclado y mezclado en obra. Es fabricado mediante la combinación de cemento portland (tipo I) o cemento portland con escorias de altos hornos (tipo IS) y puzolana fina.

Existen 4 posibles combinaciones para fabricar este cemento:

- Combinación de cemento portland con puzolana.
- Combinación de cemento portland de escorias de altos hornos con puzolana.
- Molienda de escorias de cemento portland y puzolana.
- Combinación de molienda y mezcla de los anteriores.

Es importante mencionar que las puzolanas pueden ocupar 15 % del peso del cemento terminado aproximadamente.

2.6.3. Materia prima

El principal material utilizado como materia prima es una mezcla de materiales calcáreos (caliza y marga), materiales arcillosos (pizarra, arcilla y esquistos), material arcilloso – calcáreo (caliza arcillosa) y puzolanas (rocas con alto contenido de sílice y aluminio).

La norma ASTM C 595–2008, *especificación normalizada para cementos adicionados hidráulicos* especifica que las puzolanas son un material con minerales silíceos y aluminosos, el cual no posee características aglomerantes, pero en presencia de cal y humedad, reacciona químicamente con hidróxido de calcio (compuesto contenido en el clinker) a temperaturas comunes para formar compuestos que poseen propiedades aglomerantes.

Las puzolanas requieren de un alto grado de finura y algunas necesitan de calcinación para ser efectivas. Guatemala posee grandes depósitos de tobas, arenas volcánicas y arcillas que son utilizados por la industria local.

2.6.4. Normas

En Guatemala, se fabrica cemento portland modificado de acuerdo a la norma ASTM C–595 que tiene equivalencia con la COGUANOR NGO 41 001, *Cementos hidráulicos mezclados. Terminología y especificaciones*.

3. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE LA EXPOSICIÓN AL FUEGO

3.1. Características térmicas

En los cálculos de diseño del hormigón, debería incluirse el análisis térmico como un proceso separado o como un proceso integrado con el análisis hidráulico y mecánico. El análisis térmico en ocasiones simplifica los cálculos de diseño. La clave para el éxito del análisis térmico es escoger y usar apropiadamente las propiedades térmicas de los materiales que constituyen al hormigón armado.

Según el reporte técnico 38, presentado por la Federación Internacional del Concreto Estructural, por sus siglas en francés se conoce como FIB (*Fédération Internationale du Béton*), en 2007, el primer factor que se tiene que tomar en cuenta en el proceso de diseño es la predicción de la distribución de la temperatura en un miembro estructural. La fiabilidad del manejo térmico de los miembros estructurales depende en la exactitud y el suficiente conocimiento de las características térmicas de los materiales usados en la construcción de los miembros estructurales. Según este reporte, las propiedades normalmente empleadas para los cálculos de diseño son: conductividad térmica (λ) y calor volumétrico específico (ρc_p). Las demás son simplemente el producto de la densidad y una constante llamada presión específica de calor.

Existen tres propiedades que necesitan ser determinadas experimentalmente para un hormigón dado, que son requeridas para la solución de la ecuación diferencial presentada por la FIB, ecuación de segundo orden

basado en el principio de la conservación de la energía y es dada en su forma general como:

$$\rho c_{\rho} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + H \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- λ = conductividad térmica (W/mK)
- c_{ρ} = calor específico (J/kgK)
- ρ = densidad (kg/m³)
- ρc_{ρ} = calor volumétrico específico (J/m³K)
- H = ritmo de calor generado internamente

3.1.1. Difusión térmica

La FIB define la difusión térmica (D) como una medida del ritmo del flujo de calor bajo las condiciones de transmisión térmica y la facilidad con que el hormigón puede mostrar cambios de temperatura. Se puede calcular con la siguiente ecuación:

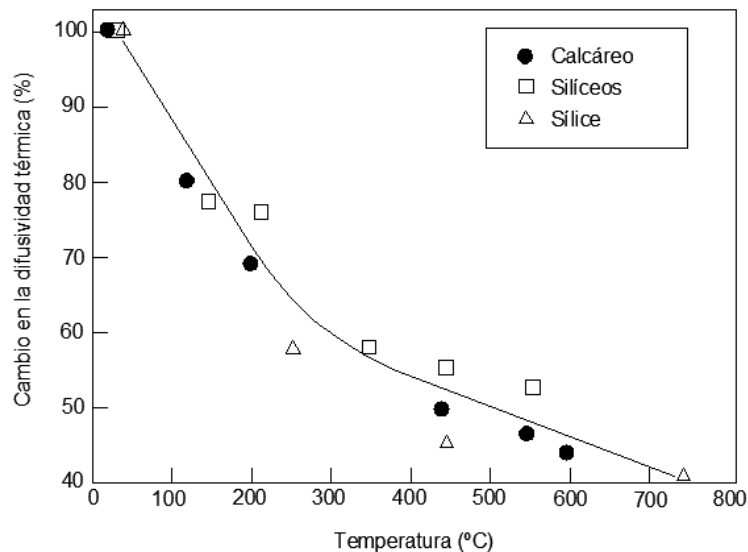
$$D = \frac{\lambda}{\rho c_{\rho}} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

La difusión térmica del hormigón es más fácil medirla experimentalmente que sus tres componentes separados, pero la conductividad térmica (λ) y el calor volumétrico específico (ρc_{ρ}) son requeridos para realizar los cálculos de diseño y es allí donde aparecen discrepancias. Por ejemplo, la conductividad térmica a una temperatura dada es normalmente medida en condiciones

estables de temperatura, esto no es representativo para el hormigón que se encuentra bajo condiciones dinámicas de temperatura.

La difusión térmica del hormigón de peso normal decrece marcadamente con el incremento de la temperatura, como se muestra en la figura 2, la cual fue realizada por la FIB en el reporte técnico 38, titulado *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*; en la figura se puede apreciar el comportamiento de la difusividad térmica del hormigón con dos tipos de agregados diferentes: calcáreos y silíceos.

Figura 2. **Efecto de la temperatura en la difusión térmica del hormigón de peso normal**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 52.

La FIB descubrió que el hormigón decrece en conductividad térmica e incrementa en el calor específico a elevadas temperaturas. Desde que el calor

específico cambia moderadamente con la temperatura, excepto cuando el calor latente empieza a ser absorbido, la dependencia de temperatura de la difusión muestra una tendencia similar a la conductividad térmica. La dependencia del tiempo en las reacciones que afectan el calor específico se debe reflejar en las correspondientes variaciones en la difusión térmica del hormigón. La disminución de la difusión térmica con la temperatura podría ser menor con agregado de peso ligero amorfo y como resultado mostraría un incremento en la conductividad térmica con la temperatura.

3.1.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica fue por primera vez definida por Fourieir en 1822 como el ritmo del flujo de calor a un gradiente de temperatura. Es calculada indirectamente de medidas transitorias de la difusión térmica. Medidas directas de conductividad son complicadas por la interacción entre la humedad y el flujo de calor.

La FIB determinó que la conductividad térmica del hormigón depende de todos sus constituyentes pero mayormente depende del tipo de agregado grueso utilizado, ya que constituye entre 60 % y 80 % del volumen del hormigón. Otro factor importante es la humedad y el contenido de vacíos al momento de la exposición al fuego ya que la conductividad térmica del agua es mayor que la del aire. A continuación, se presenta la tabla IX, extraída del reporte técnico 38 de la FIB, en la cual se muestra la conductividad térmica de los constituyentes del hormigón.

Tabla IX. **Conductividad térmica a temperatura ambiente**

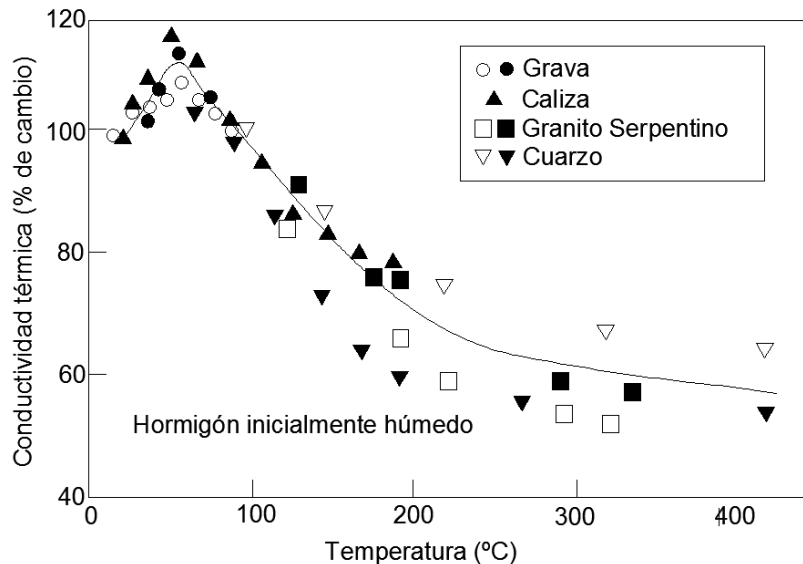
Material	Conductividad Térmica (W/m°C)
Agregados	0,7 – 4,2
Hormigón saturado	1,0 – 3,6
Pasta de cemento saturada	1,1 – 1,6
Agua	0,515
Aire	0,0034

Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 53.

La conductividad térmica es mayor cuando el hormigón se encuentra saturado ya que el calor se trasmite mejor por el agua que por los espacios vacíos que tenga la pasta de cemento y, en general, el hormigón.

La FIB descubrió que las proporciones y el contenido de cemento son otros factores que tienen efectos en la conductividad térmica por la diferencia que hay entre la conductividad térmica de los agregados y de la pasta de cemento. Una mezcla rica tiene una conductividad térmica alta, comparada con una mezcla pobre, esto si el agregado utilizado es de peso ligero. Al incrementar la relación agua/cemento, aumenta la porosidad y se reduce la conductividad térmica, especialmente, cuando el hormigón endurecido está seco, ya que el aire y el agua tienen baja conductividad térmica comparado con la pasta de cemento. Aunque la temperatura ambiente no tiene mayor efecto sobre la conductividad térmica del hormigón, si puede causar cambios en la estructura físico – química si la temperatura es demasiado alta.

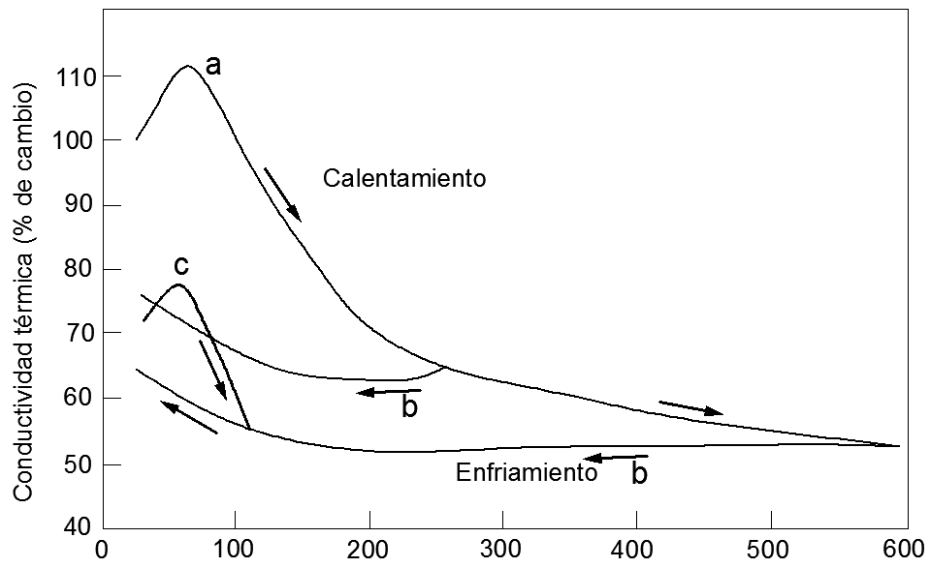
Figura 3. **Efecto de la temperatura en la conductividad térmica del hormigón inicialmente saturado**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 53.

La FIB realizó ensayos para determinar la conductividad térmica con diferentes tipos de agregado, los resultados fueron presentados en la figura 3, donde se puede observar que cuando la temperatura incrementa la conductividad térmica, también, lo hace en el inicio hasta que alcanza un máximo, luego de eso empieza el descenso a temperaturas más elevadas. Esto se debe a que al inicio el hormigón se encontraba húmedo y el agua contenida hacía que la conductividad térmica aumentara. A medida que el agua contenida se evaporaba, la conductividad térmica disminuyó, como lo muestra la gráfica antes mencionada.

Figura 4. **Efecto del primer calentamiento (a) enfriamiento (b) y el calentamiento subsecuente (c) en la conductividad térmica del hormigón de peso normal**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 54.

Otro aspecto de interés que investigó la FIB se representa en la figura 4, en esta figura se puede observar que el hormigón fue calentado dos veces, con la finalidad de representar que ocurre con la conductividad térmica. Se puede observar que la conductividad térmica incrementa entre 10 % – 20 % al enfriarse el hormigón. Esto podría ser por la rehidratación del hormigón a medida que se enfría. La rehidratación puede ser atribuida a la humedad relativa de la atmósfera.

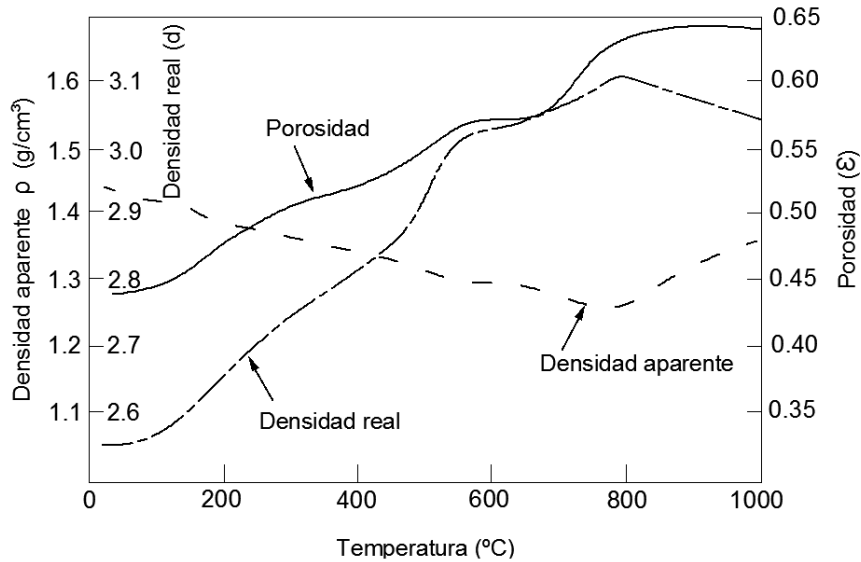
Entre los descubrimientos más relevantes plasmados en el reporte técnico 38 de la FIB, se puede observar que después de enfriarse el hormigón, la conductividad térmica cae a un nivel más bajo que el nivel original sin calor; es

decir, los cambios en su estructura son irreversibles. En el segundo proceso de calentamiento, la curva alcanzó un valor máximo cuando la temperatura estaba entre 50 °C – 60 °C pero a 105 °C la curva interseca a la curva de enfriamiento. El incremento de conductividad térmica indica que el hormigón al enfriarse se vuelve a humedecer, entonces, el incremento de conductividad térmica es por la presencia de agua y no por alguna restauración significativa en los constituyentes del hormigón. El primer proceso de calentamiento del hormigón causa los cambios físico–químicos irreversibles que determinan el comportamiento de la curva en del segundo proceso de calentamiento del hormigón. Más procesos de calentamiento solo llevarán a pequeñas variaciones en relación con la temperatura; estas variaciones pueden llegar tan lejos como la máxima temperatura inicial no es excedida.

3.1.3. Densidad

La FIB descubrió que los cambios en la densidad del hormigón están relacionados con los cambios de peso, dilatación térmica y cambios en la porosidad producidos por las altas temperaturas. La figura 5 muestra la variación de la densidad real, densidad aparente y porosidad para la pasta de cemento en función de la temperatura. Se puede apreciar que la densidad de la pasta de cemento tiene un comportamiento irregular pero que en general la disminuye a medida que la temperatura aumenta. Por otro lado, la porosidad de la pasta de cemento aumenta con el incremento de la temperatura. Resultados que concuerdan con lo desarrollado en parte experimental de esta tesis.

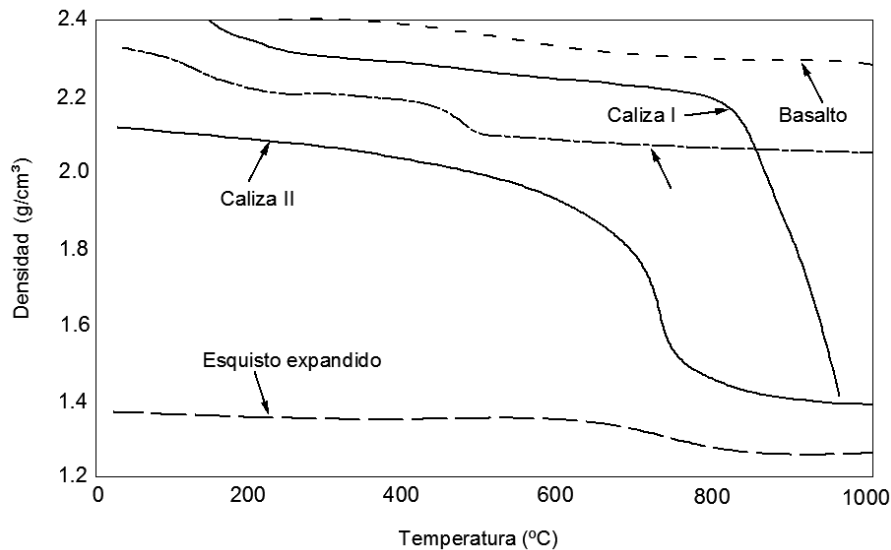
Figura 5. **Efecto de la temperatura en la densidad real, densidad aparente y la porosidad de la pasta de cemento**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 55.

El papel que toman los agregados en el hormigón es importante, como lo demuestran los resultados plasmados en la figura 6. La FIB determinó que el tipo de agregado utilizado es determinante en términos de dilatación térmica y la reacción negativa de algunos agregados como los agregados carbonatados que reducen la densidad alrededor de los 600 °C y marcan un incremento en la porosidad. Al analizar la figura 6 se puede concluir que con agregados basálticos hay una mayor reducción gradual en la densidad que se ve reflejada en la pasta de cemento y en la dilatación térmica del agregado.

Figura 6. **Efecto de la temperatura en la densidad del hormigón con diferentes tipos de agregado**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 55.

3.1.4. Calor específico

La FIB define el calor específico como la capacidad del hormigón por unidad de masa y temperatura; en otras palabras, es la cantidad de calor que se debe aplicar a una masa de hormigón para elevar su temperatura. Es también definido en términos de la entalpia H y la constante de presión P como:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial P} \right) P \quad \text{Ecuación 3}$$

Resulta que si la curva de entalpia está en función de la temperatura, el calor específico puede ser estimado de la pendiente de cualquier temperatura dada. La FIB determinó que la evaluación de la capacidad del calor específico

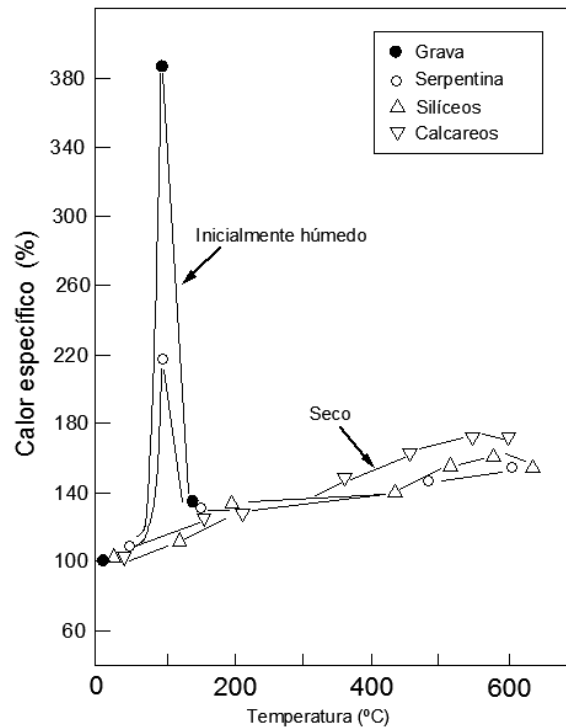
es sustancialmente complicada porque existen transformaciones endotérmicas en el hormigón caliente que se dan en función del tiempo.

El calor específico es sensible a varias transformaciones que ocurren en el hormigón a elevadas temperaturas. La FIB establece que las transformaciones son la evaporación del agua a los 100 °C, la descomposición del hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) en óxido de calcio (CaO) y agua (H_2O) a 400 °C y la transformación del cuarzo en algunos agregados. Estos cambios dependen del tiempo y de la absorción del calor latente indicado por un aparente incremento transitorio en el calor específico. El calor específico en ocasiones es separado en calor sensitivo y calor latente basado en los grados de las transformaciones físico-químicas.

La FIB establece que la capacidad del calor específico del hormigón no es afectada por la mineralogía de los agregados, tampoco, por la proporción utilizada, siempre y cuando el calor específico de los agregados sea similar al de la pasta de cemento; esto es muy lógico ya que si los agregados utilizados en la concepción del hormigón tiene características similares, el hormigón trabajará como un material homogéneo a pesar de que es evidente que los agregados no se encuentran diluidos en la mezcla de hormigón sino que son cubiertos por la misma.

La FIB descubrió que el calor específico del hormigón incrementa considerablemente con un incremento en la humedad contenida, esto se debe al elevado calor específico del agua (4,29 kJ/kgC). Un valor típico para el hormigón saturado a 20 °C es 1 kJ/kgC. El valor, sin embargo, puede variar entre 0,70 kJ/kgC y 1,50 kJ/kgC. Los efectos del calor latente en el hormigón no son tan importantes debido a la presencia del agregado que normalmente posee mayor estabilidad que la pasta de cemento.

Figura 7. Efecto de la temperatura en el calor específico del hormigón



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 56.

La FIB descubrió que el calentamiento inicial del hormigón saturado causa un rápido pero transitorio aumento en el calor específico aproximadamente a 90 °C arriba de 380 % debido a la rápida evaporación del agua que está en el hormigón y la absorción del calor latente. El calentamiento permanente del hormigón saturado aparentemente muestra variaciones similares en el calor específico al hormigón presecado. El aumento a los 90 °C no se espera que vuelva a ocurrir.

3.2. Propiedades mecánicas

3.2.1. Módulo de elasticidad

El comportamiento elástico estructural a altas temperaturas depende del módulo de elasticidad del hormigón. La FIB concluyó que el módulo tangente inicial en la curva esfuerzo–deformación es de poca importancia práctica y el módulo tangente en cualquier punto es válido solo para una pequeña porción de la curva.

El módulo secante, por otro lado, satisface la distinción arbitraria que la deformación durante la carga es considerada elástica y cualquier incremento subsecuente en el esfuerzo es considerado como fluencia. Por lo tanto, es recomendable que el módulo secante de elasticidad sea determinado por el rango de esfuerzo entre 15 % y 30 % de la referencia de esfuerzo a temperatura caliente o después de enfriarse de manera residual.

Es claro que el módulo de elasticidad dinámico determinado por técnicas ultrasónicas no es un procedimiento estándar para aplicarlo a altas temperaturas. Este es supuesto para referirse a efectos puramente elásticos y es poco afectado por la fluencia desde que solo le aplique un esfuerzo insignificante.

Por esta razón, el módulo dinámico tiene mayor consideración que el módulo estático (recta secante) y es aproximadamente igual al módulo tangente inicial; sin embargo, no existe ninguna relación entre los dos módulos basado en el comportamiento físico. El módulo dinámico de elasticidad a veces es enfocado como la más significativa medida de los efectos de la temperatura en

el propósito elástico del hormigón debido al componente insignificante de fluencia.

3.2.1.1. Módulo de elasticidad y esfuerzo

La FIB descubrió que el módulo de elasticidad está relacionado con el esfuerzo a compresión de manera proporcional; es decir, si la compresión aumenta, el módulo de elasticidad también lo hace, esto sucede a temperatura ambiente pero a altas temperaturas el comportamiento es diferente. Una manera que la FIB descubrió para disminuir esta relación es el uso de fibras de acero en el hormigón.

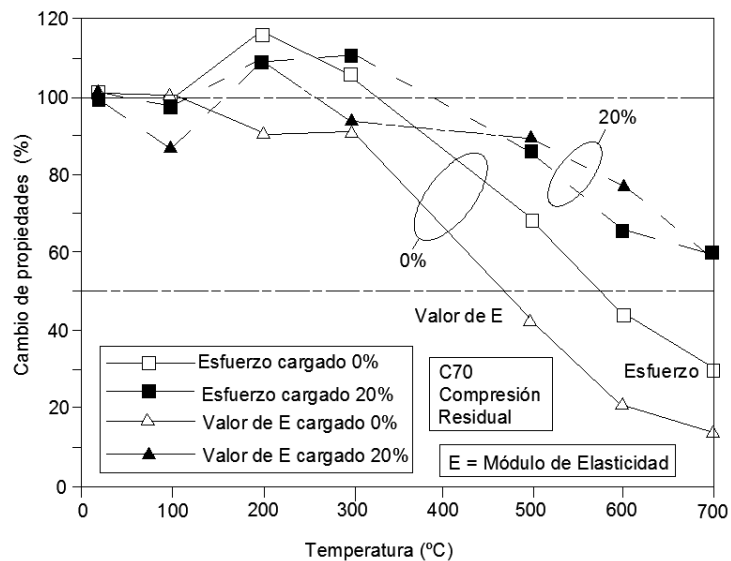
El módulo de elasticidad del hormigón está estrechamente ligado con los materiales constituyentes, razonamiento lógico ya que los agregados forman el mayor porcentaje en volumen del hormigón. Esto lo confirmó la FIB reportando que el módulo de elasticidad del hormigón es afectado por el módulo de elasticidad de los agregados que lo constituyen.

El módulo de elasticidad de los agregados es normalmente mayor que el de la pasta de cemento pero si se usa agregados de peso liviano la diferencia entre ambos módulos de elasticidad no difiere en gran manera. Un hormigón pobre experimenta una pérdida considerada de su módulo de elasticidad cuando la temperatura incrementa.

La FIB desarrolló un método de ensayo para determinar la pérdida de módulo de elasticidad y esfuerzo compresivo bajo ciclos de calentamiento, de este método creó la curva plasmada en la figura 8, en la cual se observa que el hormigón que se ensayó bajo 20 % de carga, sufrió menos pérdidas en sus propiedades que el hormigón que se ensayó sin carga.

Lo anterior tiene una explicación muy interesante, ya que el hormigón que soporta carga contiene a sus agregados confinados y esto hace que de alguna manera mantenga por más tiempo sus propiedades resistivas, esto se explicará en secciones subsecuentes con más detalle.

Figura 8. **Reducción relativa del esfuerzo y módulo de elasticidad del hormigón bajo ciclos de calentamiento sin carga y con 20 % de carga**

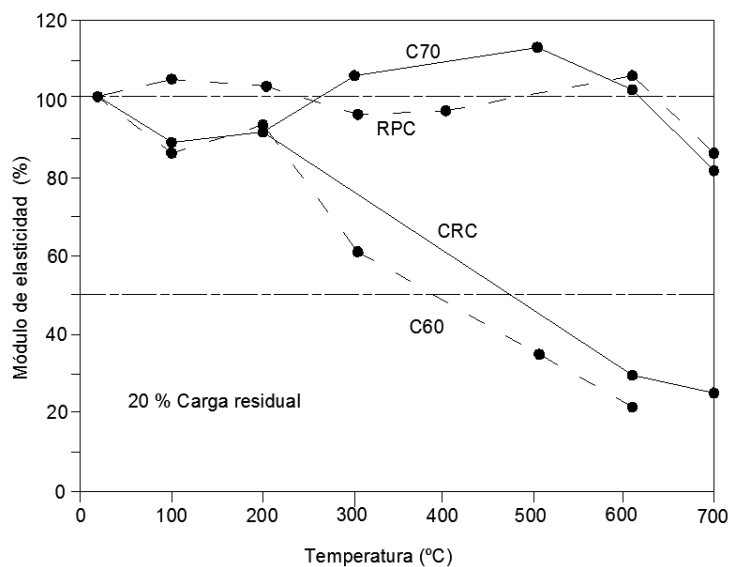


Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 82.

La FIB, además, evaluó el comportamiento del hormigón de alta resistencia con fibras metálicas; de esta evaluación creó una curva muy interesante que se puede observar en la figura 9. Se observa que el hormigón de alta resistencia C70 mantiene un comportamiento contradictorio con el hormigón con fibras metálicas CRP hasta los 600 °C donde comienza el declive hasta perder aproximadamente 20 % de sus propiedades elásticas.

Por el contrario, el hormigón de alta resistencia C60 y el hormigón con fibras metálicas CRC tuvieron comportamientos muy parecidos. En los dos casos es evidente que las fibras metálicas asisten favorablemente en las propiedades resistivas del hormigón a temperaturas moderadas, de 0 °C a 250 °C aproximadamente; luego de esa temperatura, el comportamiento es diverso ya que dependerá mucho del nivel de hidratación en que se encuentre el concreto, como se verá más adelante.

Figura 9. **Módulo de elasticidad de dos hormigones de alta resistencia (C60 y C70) y dos hormigones de alta resistencia con fibras metálicas (CRC y CPC) medido después de un ciclo de calentamiento bajo un 20 % de carga**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 82.

La FIB determinó que las pendientes tan pronunciadas que muestran las curvas, se deben a la pérdida de humedad que hacen que el módulo de

elasticidad disminuya a medida que la temperatura aumenta. Arriba de 100 °C la temperatura afecta la elasticidad y la resistencia a la compresión de manera continua, por lo tanto, la relación esfuerzo-módulo de elasticidad permanece constante.

3.2.1.2. Efectos de la temperatura en el módulo de elasticidad

El incremento de la temperatura, generalmente, es acompañado con un continuo declive en el módulo de elasticidad; asimismo, está en función del tiempo ya que conforme el tiempo pase el declive aumenta. Como se razonó en la sección anterior, los valores de elasticidad dependen si el hormigón está resistiendo carga durante la exposición al fuego o si los valores son tomados después del enfriado del hormigón. Razonamientos imposibles de concluir sin el apoyo de la investigación realizada por la FIB.

La FIB determinó que la amplia variación en la magnitud del porcentaje de reducción en el módulo de elasticidad a 80 °C de diferentes tipos de hormigones ensayados en condiciones similares, es causada por los diferentes agregados usados. Debido a la incompatibilidad térmica de la pasta de cemento y los agregados, hormigones con agregados de baja expansión térmica como los agregados derivados de la caliza experimentan una gran reducción en el módulo de elasticidad que los que tienen alta expansión térmica como las gravas y el basalto.

Los resultado obtenidos por la FIB muestran una reducción del módulo de elasticidad arriba de 80 °C. Arriba de 100 °C, la reducción generalmente tiende a hacer menos pronunciada y aproximadamente lineal; aparentemente muestra

ser similar para diferentes tipos de hormigón como se puede observar en la figura 8.

En el rango crítico, que está entre 400 °C y 600 °C, el hormigón presenta una severa deterioración sumándole la dilatación de sus agregados que lo constituyen.

La severidad de la disminución del módulo de elasticidad es atribuida a las reacciones hidrotermales que normalmente resultan en una pérdida de humedad. Otro parámetro es la duración de la exposición al fuego, ya que esta no es significativa en el hormigón una vez la humedad se haya perdido por completo.

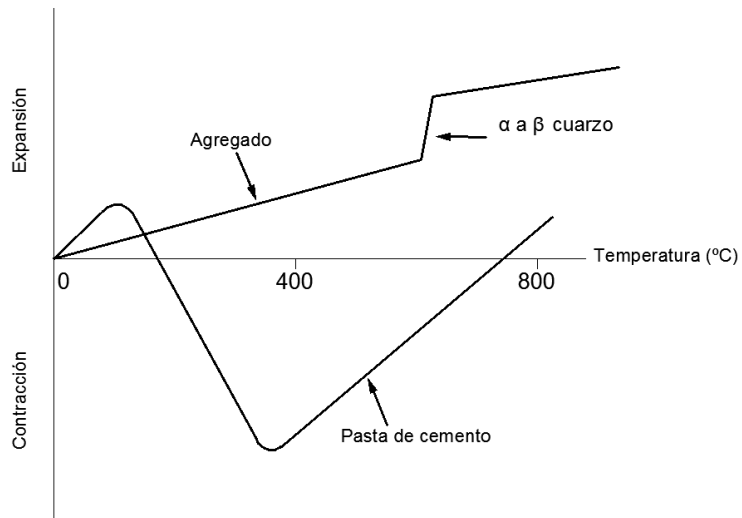
3.2.2. Resistencia a la compresión

La FIB determinó que a temperaturas arriba de 100 °C, el hormigón no colapsaba, esto debido al esfuerzo diferencial resultado de la expansión del agregado y la contracción de la pasta de cemento (figura 10).

Lo descrito anteriormente da como resultado una carga inducida por las deformaciones térmicas conocida como LITS por sus siglas en inglés, (*load induced thermal strain*). Esta carga es mucho mayor que las deformaciones elásticas, y contribuyen a la distribución de los esfuerzos térmicos en el hormigón estructural.

Este fenómeno aun no es apreciado por los ingenieros estructurales y debería ser incorporado en los estándares y códigos de diseño. Cabe mencionar que la carga inducida por las deformaciones térmicas aparece solo en el concreto que está sometido a compresión no a tensión.

Figura 10. **Incompatibilidad térmica entre el agregado y la pasta de cemento**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 86.

La figura 10 muestra que el comportamiento del hormigón expuesto a más de 100 °C, relacionando el esfuerzo diferencial y la contracción de la pasta de cemento.

3.2.2.1. **Influencia de la carga durante el calentamiento**

La FIB menciona un aspecto positivo del hormigón que está bajo cargas de compresión durante un incremento de temperatura: dicha carga está constantemente compactando la microestructura del hormigón y evita la formación de fisuras, sin embargo, no evita el desprendimiento que existe entre la pasta de cemento y el agregado grueso debido a lo que se mencionó en el párrafo anterior.

La influencia de la temperatura disminuye cuando el hormigón está sometido bajo un esfuerzo de compresión continuo.

Tanto el módulo de elasticidad como el esfuerzo a compresión se reducen menos cuando hay un incremento en la temperatura si el hormigón se encuentra cargado. Sin embargo, para el hormigón no cargado pero expuesto a temperaturas altas el módulo de elástica se reduce más rápidamente que el esfuerzo a compresión.

3.2.2.2. Influencia de la temperatura en la resistencia a la compresión

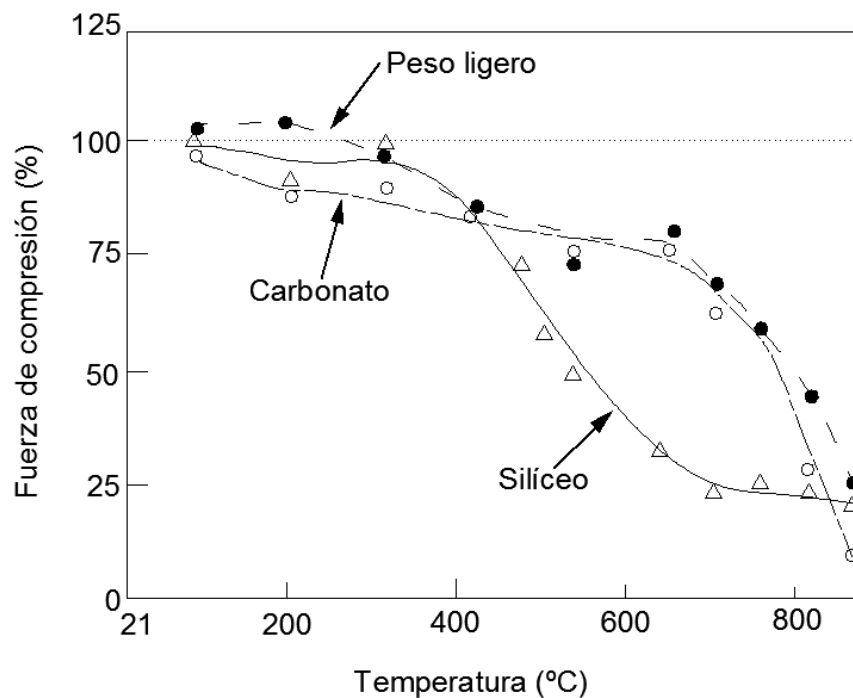
La resistencia a la compresión empieza a tener pérdidas a la temperatura mínima de 80 °C, es una pérdida aparente ya que es reversible cuando el hormigón se enfría; este fenómeno es atribuido a las fuerzas intermoleculares entre los constituyentes del hormigón con la expansión del agua. La FIB también expresa que la mayoría de hormigones experimenta una reducción cerca de los 300 °C, pero esto depende del tipo de agregado y cemento empleados (figura 11).

Un incremento marcado en la fluencia de la pasta de cemento y el agregado ocurre cerca de 550 °C– 600 °C indicando que esta temperatura es crítica, en donde el hormigón ya no es estructuralmente utilizable. Afortunadamente, solo la zona cercana al fuego experimenta temperaturas mayores a 300 °C debido a la baja difusión térmica del hormigón.

Una práctica común después del fuego es remover y reemplazar las capas sobrecalentadas. Siempre y cuando el hormigón no se descascare durante el

fuego, esta capa continúa siendo la protección térmica para el acero y el interior del hormigón, sin embargo su capacidad estructural comenzará a disminuir.

Figura 11. **Influencia del tipo de agregado en la resistencia a la compresión del hormigón calentado sin cargas**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 87.

3.3. Microestructura

Los cambios en la microestructura del hormigón durante su exposición al fuego resultan ser cambios en sus propiedades. Una relación directa entre los cambios físicoquímicos a un nivel microestructural del hormigón expuesto al fuego y el comportamiento termohidromecánico de los materiales no es fácil de

establecer, debido a la complejidad de la ciencia involucrada y la diversidad de los tipos de hormigón disponibles.

La FBI expresa que entender el comportamiento microestructural del hormigón durante una exposición al fuego ayuda a explicar las relaciones antes mencionadas.

El punto de inicio para entender el comportamiento de la pasta de cemento está en sus constituyentes (figura 12) y el proceso físicoquímico que ocurre en la hidratación. Uno de los compuestos principales que es de mayor influencia el comportamiento a altas temperaturas es el hidrato de silicato de calcio. Entre otros productos de la hidratación como el hidróxido de calcio cristalino.

El hormigón a altas temperaturas sufre cambios físicoquímicos durante todo el proceso de su exposición al fuego. Estos cambios ocurren principalmente en la pasta endurecida de cemento, pero puede extenderse en el agregado dependiendo del tipo utilizado.

Cambios que ocurren en el rango bajo de temperatura (20 °C – 300 °C) muestran cambios principalmente en la pasta de cemento siempre y cuando el agregado se mantenga estable arriba de 300 °C. También, se tiene que tomar en cuenta la interacción física y química entre el agregado y la pasta de cemento.

El proceso de enfriamiento también resulta en cambios físicoquímicos en el hormigón como el agrietamiento, absorción de humedad también conocida como la rehidratación. Por lo tanto, el comportamiento del hormigón durante

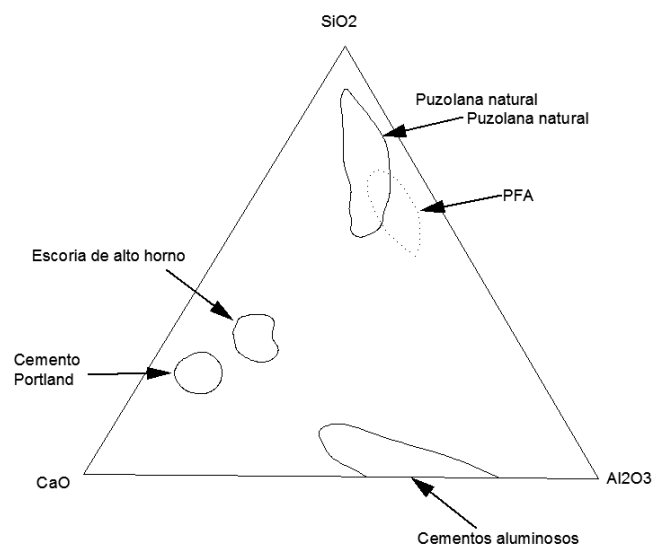
ambos procesos, calentamiento y enfriamiento, depende de los siguientes factores:

- Tipo de pasta de cemento
- Tipo de agregado
- Zona de conexión entre el agregado y la pasta de cemento
- Interacción entre los factores descritos anteriormente

3.3.1. Pasta de cemento

Los ingredientes químicos de la pasta de cemento hidratada son los que se muestran en la figura 12. La pasta de cemento por si sola es influenciada por las proporciones de mezcla de estos ingredientes.

Figura 12. **Constituyentes de la pasta de cemento**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 30.

La FIB explica que con la adición de agua, la pasta de cemento reacciona químicamente y empieza la etapa del fraguado, esta etapa es esencial en el hormigón y depende de la temperatura y el método que se utiliza para el curado.

El comportamiento a altas temperaturas depende de parámetros como la relación agua / cemento, la cantidad de componentes químicos que pueden variar según la materia prima utilizada y el nivel de hidratación del elemento expuesto.

El objetivo de mencionar esto es resaltar que la pasta de cemento posee variaciones en su concepción que dan como resultado diferentes pastas de cemento que pueden comportarse diferente en el fuego.

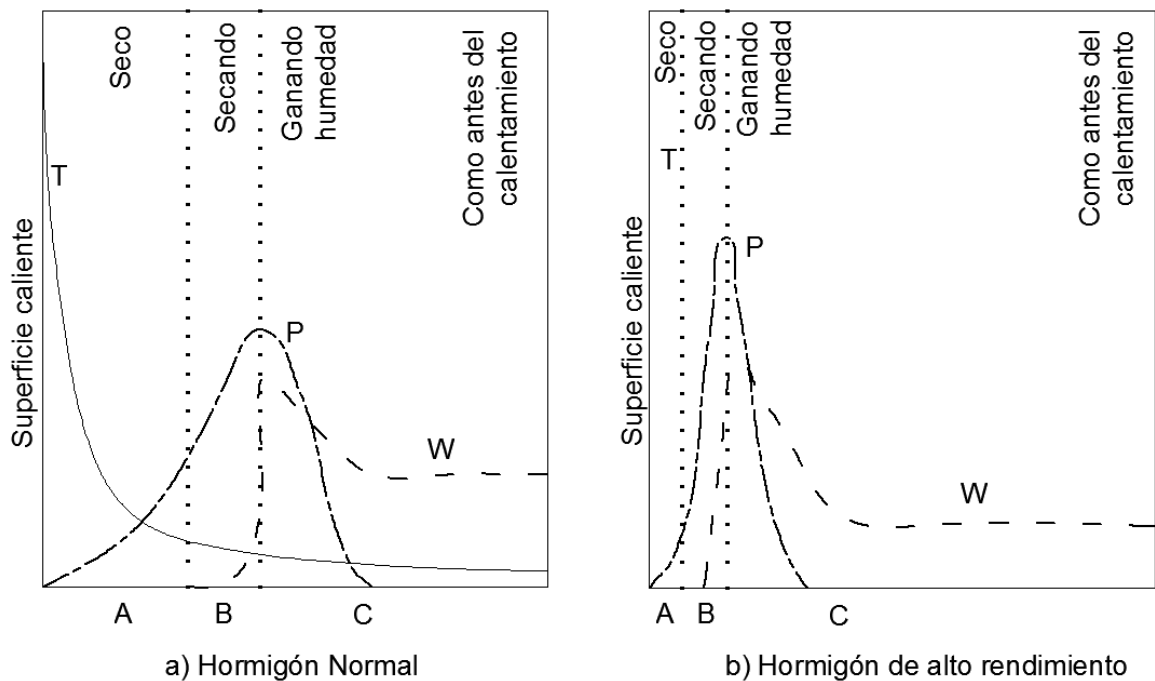
En el fuego, la superficie expuesta del hormigón pierde humedad por evaporación y por la migración de la humedad hacia el interior de la masa de hormigón conducido por el gradiente de temperatura (figura 13).

Es importante notar que en las aplicaciones del hormigón con humedades relativamente menores a 50 % expuestas al fuego, las condiciones hidrotérmicas no son relevantes como sucedería, por ejemplo, en túneles con humedades menores a 75 % expuestas al fuego.

Por lo tanto, se debe tomar precaución con los efectos de la humedad y los poros presurizados del hormigón cuando posea altos niveles de humedad. La FIB confirma que al final ambas situaciones resultaran en desprendimientos explosivos pero en mayor cantidad en túneles húmedos.

La pasta de cemento es muy inestable durante su primer calentamiento donde sufre las mayores transformaciones físicas y químicas. Entre el rango de 4 °C – 80°C los productos de hidratación del cemento portland permanecen químicamente inalterados. Cambios en las propiedades entre este rango de temperatura puede ser atribuido por efectos físicos como los desprendimientos, porosidad y cambios en las fuerzas cohesivas. Un diagrama en la figura 14 muestra la disociación de los componentes de la pasta de cemento y sus reacciones al enfriarse.

Figura 13. **Diagrama esquemático que muestra la temperatura (T), humedad (W) y la presión en los poros (P) en función del calentamiento en hormigón normal y de alto rendimiento**



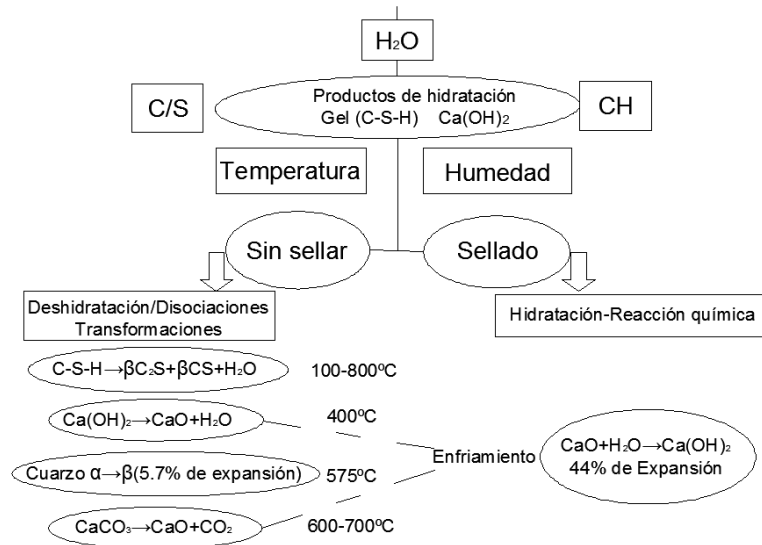
Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 32.

El calor incrementa la movilidad del agua y la difusividad de la humedad de la pasta de cemento que acelera el secado y la pérdida de agua libre (capilaridad) y enlaces físicos (absorción entre capas). Las transformaciones químicas que ocurren en la pasta de cemento son esencialmente la hidratación debajo de 100 °C y la deshidratación arriba de 100 °C, excepto cuando las condiciones hidrotermales ocurren temporalmente en regiones internas de grandes miembros cuando transformaciones químicas pueden llevarse a cabo.

Los cambios más significantes que marca la FIB son los que ocurren durante el calentamiento de la pasta de cemento (enlaces químicos primarios, fuerzas cohesivas secundarias, porosidad, distribución de tamaño de poro, microfisuración) están asociados con la pérdida física y química de agua. Eso es evidente en regiones expuestas a 800 °C dentro de la cual la pasta de cemento se mantiene unida por enlaces hidráulicos.

En términos del diseño y análisis debe tomarse en cuenta la dilatación física del agua caliente, pérdida física de agua a través de poros capilares. Añadido a este efecto físico está el proceso químico de la hidratación acelerada.

Figura 14. **Influencia de la temperatura y la humedad en las transformaciones químicas de los productos hidratados**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 33.

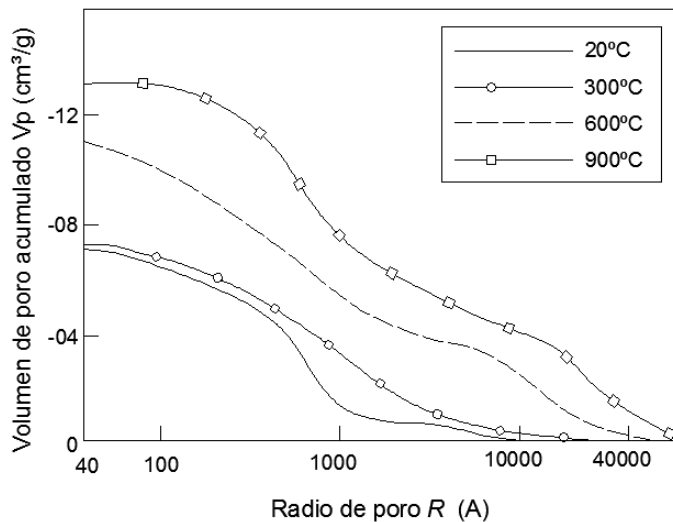
La porosidad total y especialmente la distribución estructural de los poros la FIB considera que es una característica importante que tiene efecto directo en la permeabilidad de hormigón. La porosidad total de la pasta de cemento se compone del espectro completo de poros que se extiende desde los poros capilares relativamente grandes hasta los poros finos de la pasta.

La porosidad total de la pasta de cemento aumenta de forma no lineal con la temperatura debido a la ruptura de la microestructura generada por el proceso de deshidratación que sufre la pasta de cemento. Sin embargo, poros de varios tamaños no necesariamente aumentan en la misma proporción y algunos pueden disminuir con el incremento de la temperatura.

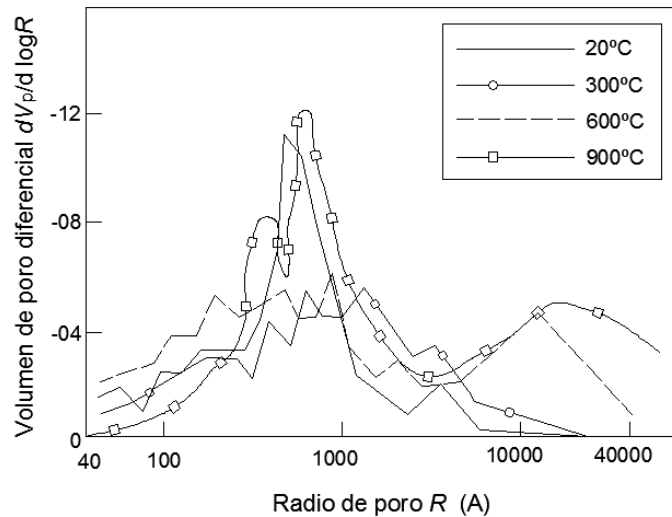
Generalmente, el aumento del volumen total de la porosidad después de calentar la pasta de cemento de 20 °C a 300 °C es pequeño del esperado debido a las pérdidas de peso. Aunque el aumento del volumen total de los poros de 20 °C a 300 °C permanece pequeño, un cambio significativo es visible en la distribución diferencial (figura 15).

Temperaturas de 300 °C a 600 °C tienden a incrementar el total volumen de los poros, adicionando la pérdida de peso arriba de 300 °C. Resultados de microscopios electrónicos muestran que la microfisuración aumenta arriba de 300 °C, primero alrededor del hidróxido cristalino de calcio y después alrededor de granos deshidratados de cemento, particularmente, alrededor de los granos más grandes. Tratamiento con altas temperaturas arriba de 900 °C resulta en un gran incremento en el volumen de los poros.

Figura 15. **Efectos del calor en la acumulación de volumen de poros y la distribución del tamaño de poros de la pasta de cemento**



Continuación de la figura 15.



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 36.

La FIB señala que los materiales expuestos a altas temperaturas incrementan su agitación térmica molecular y reducen su energía superficial que resulta en una reducción de la resistencia y conduce finalmente a la fusión.

Sin embargo, estos efectos son despreciables en la pasta de cemento en rangos bajos de temperatura, llegan a ser significativos por encima de 550°C causando un debilitamiento en la fluencia; este debilitamiento es causado por un fenómeno de difusión viscosa o molecular similar al observado en otros materiales como el plástico, cerámico y metales.

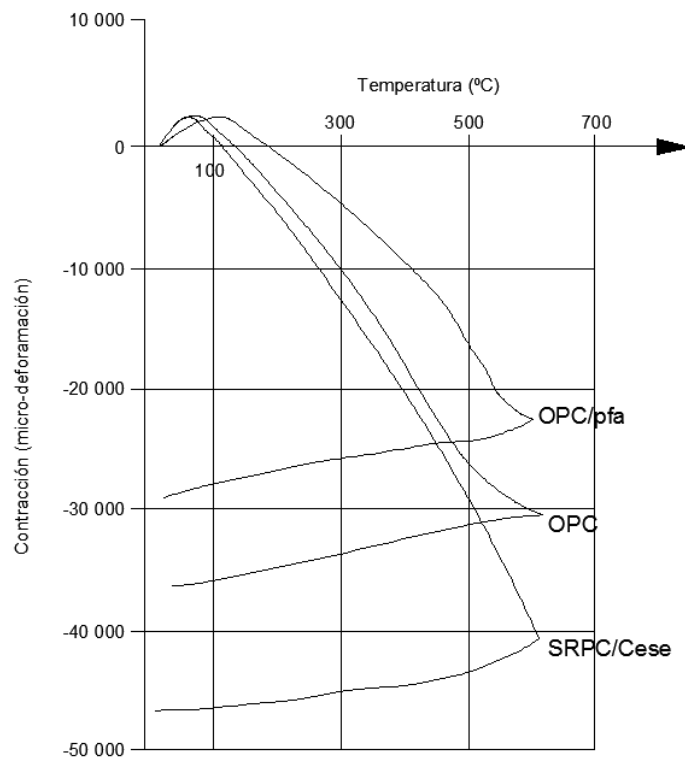
Enlaces cerámicos ocurren en la pasta de cemento aproximadamente a 800°C en donde se habría perdido toda el agua químicamente contenida. Estos enlaces causan un aumento residual en la resistencia cuando el hormigón se encuentre frío.

Por último, la pasta de cemento se derrite aproximadamente a temperaturas excesivas de 1 100 °C dependiendo de su composición química. En general, una pasta de cemento portland se derrite aproximadamente a 1 350 °C.

La pérdida de combinaciones químicas y agua resulta en una reducción no lineal de peso arriba de 100 °C. Una reducción marginal del peso ocurre arriba de 850 °C como resultado de la deshidratación de la pasta de cemento.

Durante el primer calentamiento, la pasta de cemento experimenta una pequeña expansión arriba de 100 °C por la pérdida de agua, seguido de una significativa contracción arriba de esta temperatura (figura 16) a medida que el agua físicamente y químicamente escape; después, la pasta de cemento pasa por un periodo donde no experimenta cambios entre 500 °C y 800 °C o puede que se expanda otra vez pero eso depende del nivel de hidratación de los granos de cemento presentes en la pasta.

Figura 16. **Deformaciones térmicas de tres pastas de cemento durante su primer calentamiento a 2 °C/min hasta 600 °C y durante su enfriamiento**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 39.

El comportamiento de la pasta de cemento durante y después de enfriarse es dominado por la absorción de humedad del ambiente donde se encuentre.

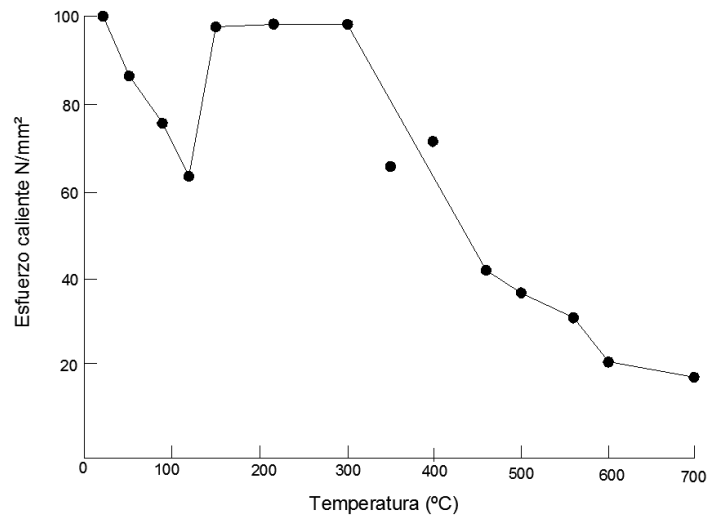
Los cambios que ocurran durante el calentamiento son hasta cierto grado irreversibles, sin embargo, la rehidratación de la pasta de cemento después de enfriarse puede restaurar parcialmente algunos enlaces.

No obstante, el óxido de calcio (CaO) producido previo al calentamiento de la deshidratación del hidróxido de calcio Ca(OH)_2 (aproximadamente a 400 °C) y la descarbonatación del carbonato de calcio CaCO_3 (aproximadamente a 700 °C) absorbe agua en el enfriamiento y se rehidrata en hidróxido de calcio Ca(OH)_2 con un 44 % de aumento en el volumen.

Esta expansión causa el desarrollo de grietas y debilita la pasta de cemento. Aunque este es un efecto indeseado, después del fuego cualquier hormigón que se haya sometido a temperaturas mayores a 300 °C es normalmente removido y reemplazado.

La pérdida de resistencia arriba de 100 °C (figura 17) se debe a la dilatación de la humedad y la reducción de los enlaces químicos. La reducción marcada de la resistencia a la compresión en la pasta de cemento (figura 17) arriba de 300°C podría ser en parte por el incremento del tamaño de los poros y la microfisuración.

Figura 17. **Efecto de la temperatura en la resistencia a la compresión de la pasta de cemento**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 37.

3.3.2. Agregados

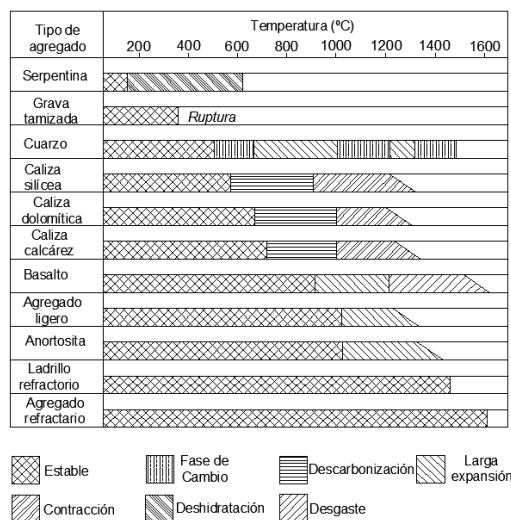
El agregado toma un papel importante en el hormigón ya que ocupa del 60 % al 80 % del volumen del hormigón. Variaciones en las propiedades del agregado a elevadas temperaturas puede tener efectos significantes en el comportamiento del hormigón expuesto al fuego.

La FIB declara que las deformaciones térmicas y la conductividad térmica del hormigón son dos parámetros que son gobernados por el agregado. Además, diferentes cambios físicos y químicos ocurren en el agregado dependiendo del tipo de agregado usado; es importante saber que cada tipo de agregado responde de manera diferente al fuego.

Un factor importante en el comportamiento del hormigón a altas temperaturas es la estabilidad química y física del agregado. La selección del agregado es, por lo tanto, un importante factor que determina las propiedades térmicas y la estabilidad del hormigón en el fuego. El agregado puede refrenar la fluencia y la contracción de la pasta de cemento. Cada tipo de agregado posee diferencias en su estabilidad térmica (figura 18).

La estabilidad térmica del agregado se puede medir a través de la prueba termogravimétrica (pérdida de peso), análisis diferencial térmico revelando reacciones térmicas (figura 19), dilatometría (figura 20). Los agregados que son térmicamente estables a una temperatura dada no muestran pérdida de peso, reacciones térmicas y el esfuerzo residual es despreciable.

Figura 18. **Ejemplo de la estabilidad y los procesos de algunos agregados que toman lugar en ellos durante su calentamiento**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 41.

Agregados de peso ligero, particularmente manufacturados, como escorias y cenizas expandidas, exhiben una alta estabilidad química y térmica a temperaturas incluso excediendo 800 °C puesto que normalmente son manufacturados alrededor de 1 300 °C, manifestándolo así el reporte técnico 38, presentado por la FIB.

Estos agregados poseen un bajo coeficiente de expansión térmica y una baja conductividad, se deberían de clasificar entre los mejores agregados en términos de resistencia a la temperatura.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el agua presente en los poros del agregado de peso ligero (50 % – 60 % de porosidad) en ambientes muy húmedos (como túneles) aumentaría el riesgo de desprendimientos explosivos en el hormigón.

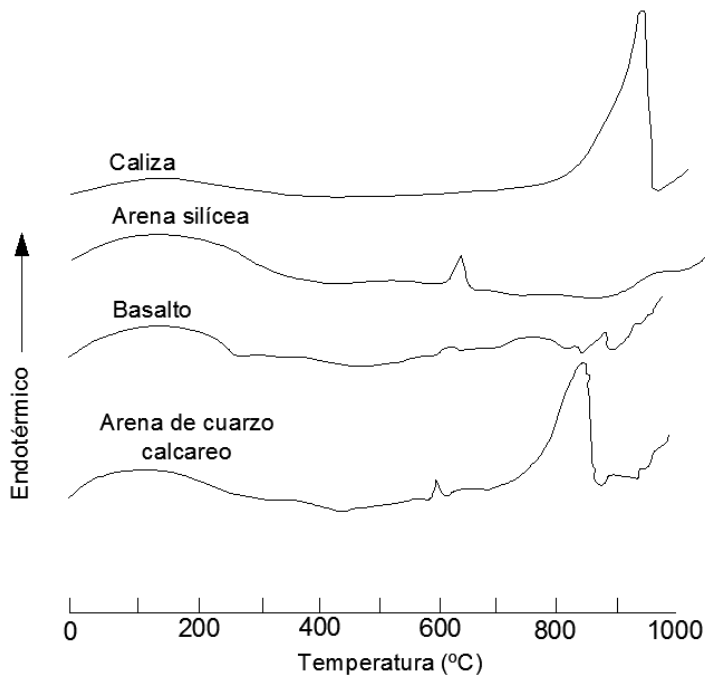
Lo opuesto sucedería en ambientes secos donde el hormigón con agregado de peso ligero tendría bajo riesgo de desprendimientos explosivos que el hormigón de agregados de peso normal debido a la baja expansión térmica del agregado.

Los agregados de peso ligero son recomendados para usarlos en contra del desprendimiento explosivo pero las condiciones de humedad deben de tenerse en cuenta.

El cuarzo (SiO_2), presente en los agregados silíceos y arenas, está sujeto a un número de cambios físicos a elevadas temperaturas (figura 19). Lo más importante es la transformación reversible cristalina endotérmica del cuarzo que tiene un punto máximo de 575 °C acompañada de una repentina expansión volumétrica de aproximadamente 5,7 %.

Estos cambios volumétricos podrían tener efectos dañinos en hormigones hechos con este material cuando sea expuesto a altas temperaturas. Los agregados con cuarzo son la arena de río y areniscas.

Figura 19. Transformaciones físicoquímicas en 4 diferentes agregados



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 42.

Agregados de carbono como la roca caliza y dolomitas son estables hasta aproximadamente 700 °C cuando el carbonato de calcio (CaCO_3) comienza a descomponerse en cal (CaO) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso expulsa una cantidad considerable de dióxido de carbono y tiene su punto máximo aproximadamente a 800 °C y es completo a una atmosfera de presión a 898 °C.

La velocidad en que ocurre la reacción depende no solamente en la temperatura y presión si no de la cantidad de sílice presente. La disociación del carbonato de calcio a altas temperaturas es endotérmica y tiende a retardar que la temperatura ascienda en el hormigón compuestos de estos materiales cuando se expone al fuego.

Extiende el periodo de duración contra el fuego pero el deterioro ocurre en el enfriamiento cuando la cal libre se combina con la humedad atmosférica para formar hidróxido de calcio cristalino ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

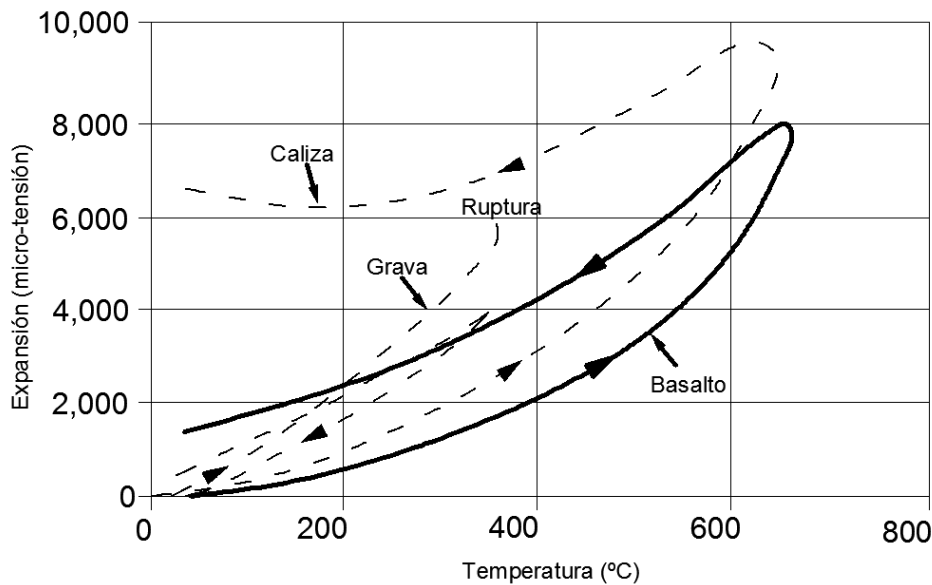
Agregados de carbono de magnesio se descomponen de manera similar entre $740\text{ }^\circ\text{C}$ y $840\text{ }^\circ\text{C}$ liberando dióxido de carbono y absorbiendo calor en el proceso. En ambos casos el material pierde densidad, por lo tanto, se convierte en un mejor aislante. Además, el dióxido de carbono escapa de la superficie del hormigón en un volumen considerable, formando una capa aislante inerte retardando el aumento de la temperatura en el hormigón. Estos agregados son conocidos como agregado calcáreos.

Agregado producidos de rocas cristalinas pueden causar una desintegración progresiva a altas temperaturas debido a la incompatibilidad térmica entre el mismo agregado, también, por la posibilidad de la deshidratación de cualquier compuesto químico presente.

La FIB especifica que la materia prima puede estar compuesta de una gran variedad de minerales cuyas diferencias en expansión térmica puede causar esfuerzos entre cristales y la falla. La falla en estos agregados aproximadamente ocurre a $350\text{ }^\circ\text{C}$ (figura 20) a diferencia del basalto que muestra ser más estable; por otro lado, la caliza es más expandible y tiene un

comportamiento más plástico por ser la roca con más expansión en el enfriamiento.

Figura 20. **Deformaciones térmicas durante el primer calentamiento a 2 °C/min del basalto, caliza y grava**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 43.

La porosidad del agregado varía de 0 % a 50 % o más para algunos agregados de peso ligero. El agua presente en los poros del agregado es evaporada y puede ser expulsada al calentarse, contribuyendo así a la formación de presión en los poros del hormigón.

Agregados hidratados (serpentina, limonita y goethita) que contienen agua en los enlaces químicos de cristalización (4 % – 12 % del peso) algunas veces usados en hormigón blindaje contra la radiación, tienen temperaturas de

deshidratación que oscilan de 175 °C a 500 °C dependiendo del tipo de agregado. Deshidratación moderada ocurre en algunos agregados silíceos o calcáreos que retienen agua que causa contracciones.

Las temperaturas de fusión de algunos agregados son los siguientes: basalto a 1 060 °C, dolerita a 1 070 °C, granito a 1 210 °C – 1 260 °C, cuarzo a 1 700 °C.

Durante la fusión algunos agregados de origen ígneo (basalto) se expanden y liberan gases que quedaron atrapados durante su formación.

En términos de resistencia, ladrillo refractario triturado y el óxido de aluminio fundido y otros agregados especiales se encuentran entre los mejores.

En orden descendente de resistencia contra el fuego están las escorias expandidas, esquistos, pizarras y arcillas; finalmente rocas ígneas granuladas como el basalto, agregados calcáreos, silíceo y el pedernal.

3.3.3. Interacción entre el agregado y la pasta de cemento

La interacción entre el agregado y la pasta de cemento puede ser física o química.

3.3.3.1. Interacción física

La Interacción física toma la forma de una expansión térmica diferencial entre el agregado y la pasta de cemento (figura 21) resultando en la formación de esfuerzos parásitos que provocan el debilitamiento y fisuración del hormigón a elevadas temperaturas.

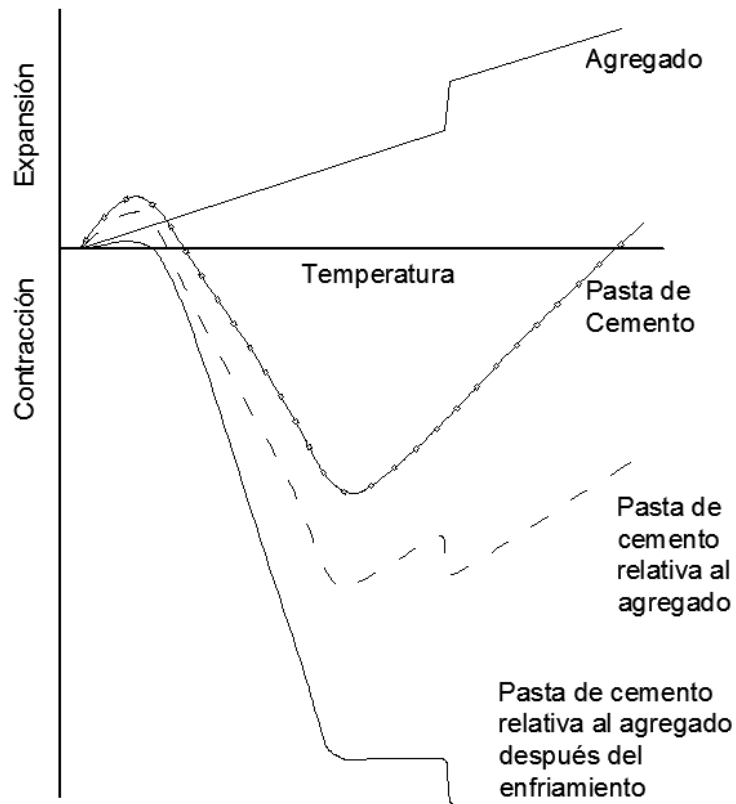
Durante el primer calentamiento, la pasta de cemento experimenta una expansión leve entre 80 °C y 100 °C mientras que el agua se libera. Esto es seguido por una contracción significativa a medida que el agua es liberada por el aumento de la temperatura. Por el contrario, los agregados comunes continúan expandiéndose arriba de 100 °C mientras que la pasta sufre contracción.

Se desarrolla un esfuerzo térmico diferencial que no puede ser soportado por las deformaciones elásticas ni la fluencia de los materiales. Por lo tanto, el hormigón debería de empezar a fisurarse aproximadamente a los 100 °C.

Aunque la amenaza no parece materializarse incluso en algunas muestras de hormigón calentadas a 600 °C, en gran parte debido a la considerable componente de deformación térmica inducida por la carga que aparece durante el primer calentamiento de la pasta de cemento bajo carga de compresión y que soporta en gran medida la deformación térmica diferencial entre el agregado en expansión y la pasta de cemento que está en contracción.

La FIB en su reporte técnico 38 explica que las fisuras observadas en el hormigón después de enfriarse difieren dependiendo de los materiales usados, condiciones de carga y la velocidad de enfriado; además, es posible observar microfisuración en la pasta de cemento después de enfriarse a temperaturas bajas como 40 °C, pero el daño podría ser mayor en hormigones calentados arriba de 100 °C cuando la carga inducida por las deformaciones térmicas aún no existe.

Figura 21. **Diagrama esquemático que muestra la incompatibilidad térmica entre el agregado y la pasta de cemento durante su primer calentamiento**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 45.

Suponiendo que el hormigón es calentado uniformemente de modo que los esfuerzos térmicos tradicionales sean cero, los esfuerzos entre partículas estarían entonces en función de la diferencia entre los movimientos térmicos libres entre el agregado y la pasta de cemento.

Los esfuerzos parásitos pueden ser de tensión en la pasta de cemento si se está contrayendo respecto al agregado. Su magnitud varía con el tipo de agregado. En el primer calentamiento el diferencial de deformaciones puede iniciar induciendo pequeños esfuerzo compresivos en la pasta de cemento pero a medida que la temperatura aumenta son disminuidos por la carga inducida por las deformaciones térmicas en compresión; sin embargo, la carga inducida por las deformaciones térmicas no aparece en tensión.

Durante el enfriamiento, la incompatibilidad térmica podría ser soportada por las deformaciones elásticas y fluencia de los materiales siempre y cuando la carga inducida por las deformaciones térmicas no aparezca durante el enfriamiento. Consecuentemente, el problema de incompatibilidad térmica durante el enfriamiento puede ser más serio que durante el primer calentamiento.

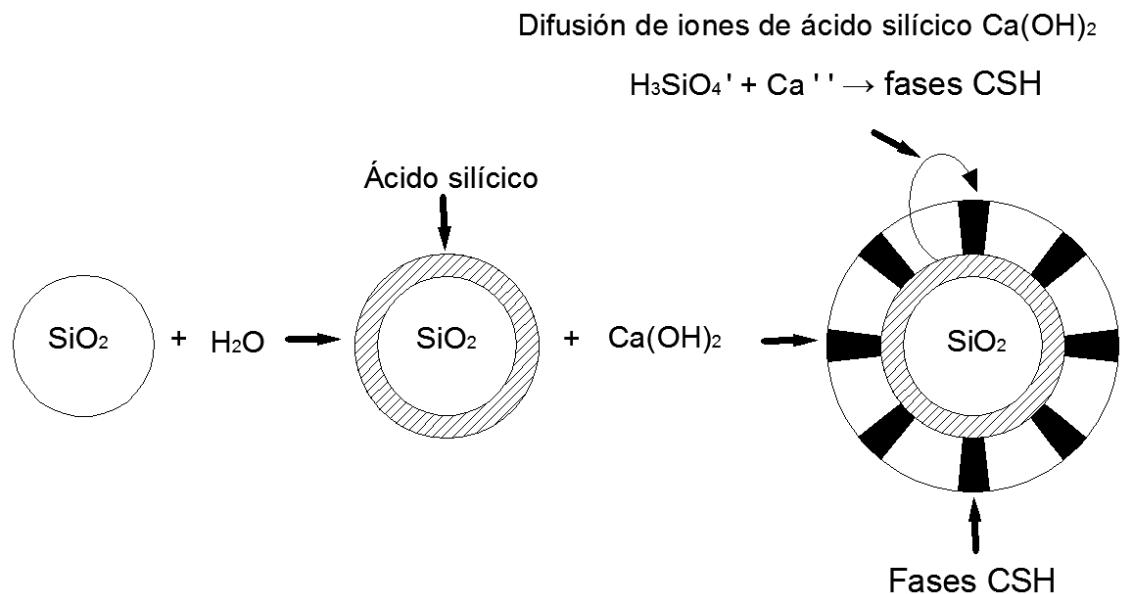
Los esfuerzos parásitos son contrarrestados por la carga inducida por las deformaciones térmicas en el primer calentamiento. Este mismo efecto podría aparecer en el enfriamiento dependiendo de la contracción del agregado y de la pasta de cemento y del ritmo de enfriamiento.

3.3.3.2. Interacción química

Un ejemplo que expresa la FIB de la interacción química influenciada por la temperatura es la reacción que ocurre entre los cristales del hidróxido de calcio (cal muerta) Ca(OH)_2 liberados por la hidratación del cemento portland ordinario y el carbonato de magnesio, componente de varios agregado calcáreos.

Esta reacción es expansiva y causa el debilitamiento y la figuración del hormigón. Esto puede ser prevenido con la adición de puzolanas. Una reacción no dañina es la del hidróxido de calcio con sílice en la ceniza ya que deja al agregado ileso y se forma una cantidad adicional de silicato de calcio, el constituyente de unión del cemento.

Figura 22. **Representación esquemática de la reacción hidrotérmica entre óxido (SiO₂) de silicio y el hidróxido de calcio Ca(OH)₂**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 46.

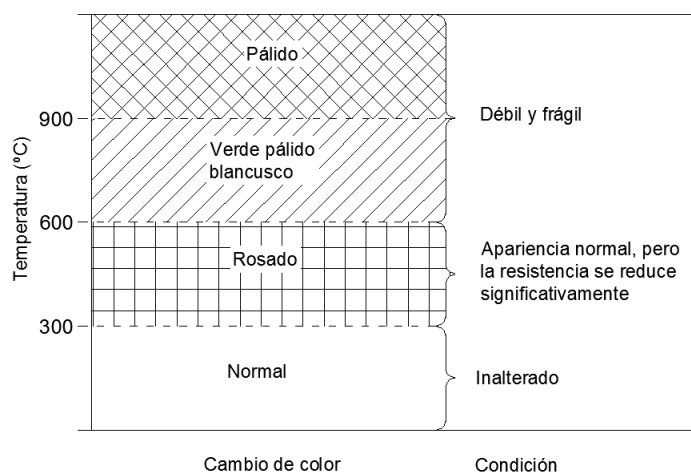
El hormigón expuesto al fuego puede tener cambios positivos en su estructura y no solo cambios de degradación. Se asume que la deshidratación que ocurre arriba de 80 °C causa solamente degradación en el hormigón pero no es totalmente cierto. Cambios positivos ocurren en el hormigón en ciertos rangos de temperatura y bajo ciertas condiciones de humedad.

Agregados termalmente estables son usados para alcanzar una buena estabilidad en el hormigón. Fibras de polipropileno son usadas en el hormigón para reducir la acumulación de presión en los poros durante el calentamiento, esto reduce el riesgo del desprendimiento explosivo. Este y otros métodos son utilizados para mejorar el comportamiento del hormigón en el fuego.

Si se analiza la reducción aparente de resistencia de la pasta de cemento en 80 °C – 100 °C. Este fenómeno físico es reversible. La reducción de la resistencia es el resultado de la dilatación del agua absorbida y consecuentemente el debilitamiento de las fuerzas cohesivas y la reducción de la resistencia a tensión. Un aumento en la resistencia ocurre cuando este fenómeno se revierte.

Una buena técnica es la de examinar los cambios de color en el hormigón que se expuso al fuego y que luego se dejó enfriar (figura 23).

Figura 23. **Cambios de color en el hormigón después de enfriarse**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 48.

La siguiente figura muestra un resumen de los procesos que ocurren en el hormigón a medida que la temperatura sube.

Figura 24. **Representación esquemática de los procesos físicoquímicos en el hormigón durante el calentamiento en un termómetro como analogía**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 49.

Los procesos que describe la figura anterior se desarrollan con más detalle en la siguiente tabla:

Tabla X. **Breve descripción de las transformaciones del hormigón durante el calentamiento**

Temperatura (°C)	Transformaciones
20 – 80	Aumento de la hidratación, pérdida lenta de agua capilar y reducción en las fuerzas cohesivas a medida que el agua se expande.
100	Incremento en la permeabilidad al agua.
80 – 200	Aumento en el ritmo, pérdida de agua capilar y enlaces físicos de agua.
80 – 850	Pérdida de los enlaces químicos de agua.
150	Punto máximo en la primera etapa de descomposición del hidrato de silicato cálcico.
300 +	Aumento marcado en la porosidad y microfisuramiento.
350	Ruptura de algunos agregados de grava de río.
374	Punto crítico del agua en donde posiblemente ya no exista agua libre.
400 – 600	Descomposición de hidrato de calcio Ca(OH)_2 en óxido de calcio (CaO).
573	Transformación del cuarzo en áridos y arenas.
550 – 600 +	Marcado aumento en los efectos térmicos.
700 +	Des carbonización del carbonato de calcio CaCO_3 en óxido de calcio CaO y dióxido de carbono CO_2 en la pasta de cemento y en los agregados.
720	Segundo punto máximo de descomposición del hidrato de silicato cálcico.
800	Formación de enlaces cerámicos que reemplazan los enlaces hidráulicos.
1 060	Punto de fusión de algunos constituyentes.

Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 50.

3.4. Deformaciones durante el calentamiento

Se puede considerar que las deformaciones térmicas que se desarrollan durante el primer calentamiento bajo carga se pueden considerar en componentes sin carga e inducidos por carga que tienen propiedades diferentes.

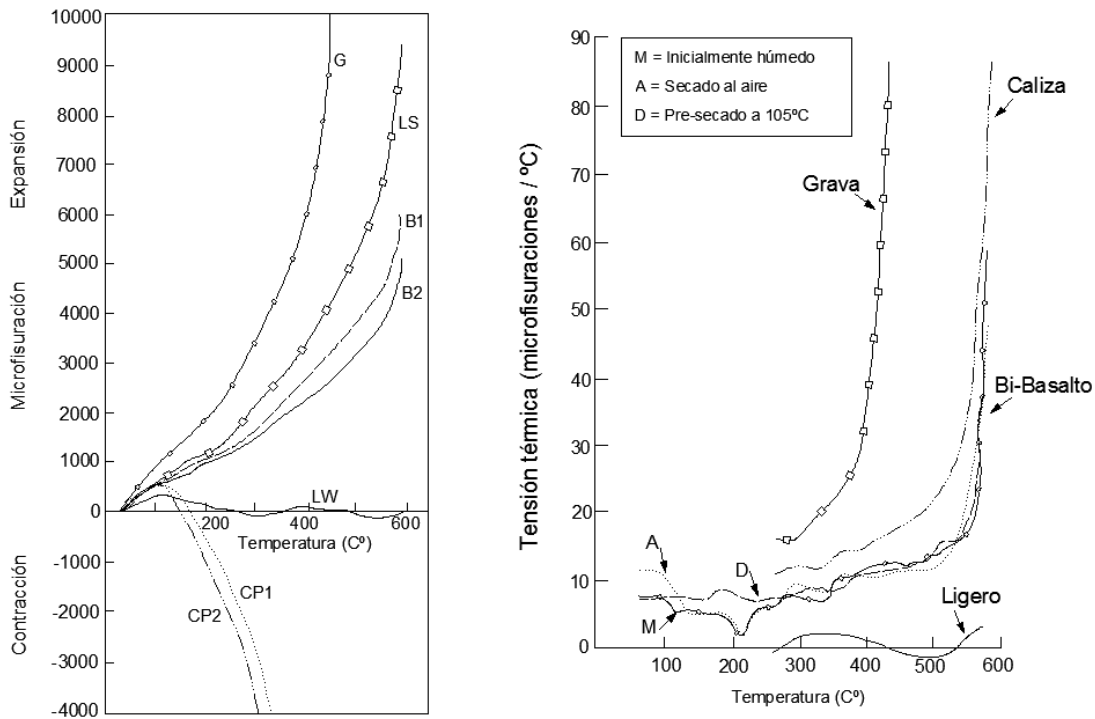
3.4.1. Deformaciones térmicas

La FIB explica que las deformaciones térmicas son estrictamente las deformaciones del hormigón que no ha pasado por ningún proceso de secado, es decir, no se toma en cuenta la contracción por el secado. Las deformaciones térmicas son medidas cuando el hormigón está caliente y sin carga aplicada.

En la práctica, para el hormigón seco, las deformaciones térmicas y la contracción por el secado son determinadas juntas, normalmente no son consideradas por separado. Por esta razón, la deformación total del hormigón seco sin carga aplicada medidas durante el primer calentamiento son erróneamente llamadas deformaciones térmicas.

Las deformaciones térmicas para el hormigón seco no son directamente proporcionales con la temperatura, dominadas por el tipo de agregado (figura 25)

Figura 25. **Deformaciones térmicas (a) y coeficiente de deformación térmica (b) durante el primer calentamiento a 1°C/min en cinco hormigones diferentes: caliza (L), basalto (B1 y B2), agregado de peso ligero (LW), Grava (G)**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 58.

Para los hormigones ensayados, la deformación térmica es más expansiva para la caliza que para el basalto, es lo que explica la FIB en el reporte técnico 38. También, expresa que los hormigones con cuarzo (en la arena o agregado grueso) se expanden marcadamente aproximadamente a 573 °C debido a las reacciones químicas que sufre.

El efecto que tienen los diferentes cementos en las deformaciones térmicas, es pequeño comparado con el efecto de los agregados, pero no es despreciable (figura 25a). El punto mínimo en el coeficiente de deformación térmica ocurre a 150 °C – 220 °C que corresponde al punto máximo en el ritmo de pérdida de humedad (figura 25b).

La temperatura en donde este punto mínimo ocurre depende de la velocidad de calentamiento y de las dimensiones de la muestra. Un resumen de la influencia del material y factores ambientales sobre las deformaciones térmicas esta dado en la tabla XI.

Tabla XI. **Orden de influencia de los materiales y el medio ambiente en las deformaciones térmicas del hormigón durante su primer calentamiento**

Influencia	Factor
Primer orden	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel de temperatura • Tipo de agregado • Contenido de agregado en volumen
Segundo orden	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad inicial (65 % – 85 %) • Tipo de mezcla (65 % – 75 % de agregado) • Velocidad de calentamiento (0 – 1 °C/min)
Despreciable	<ul style="list-style-type: none"> • Edad después de 3 meses de fundición

Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 59.

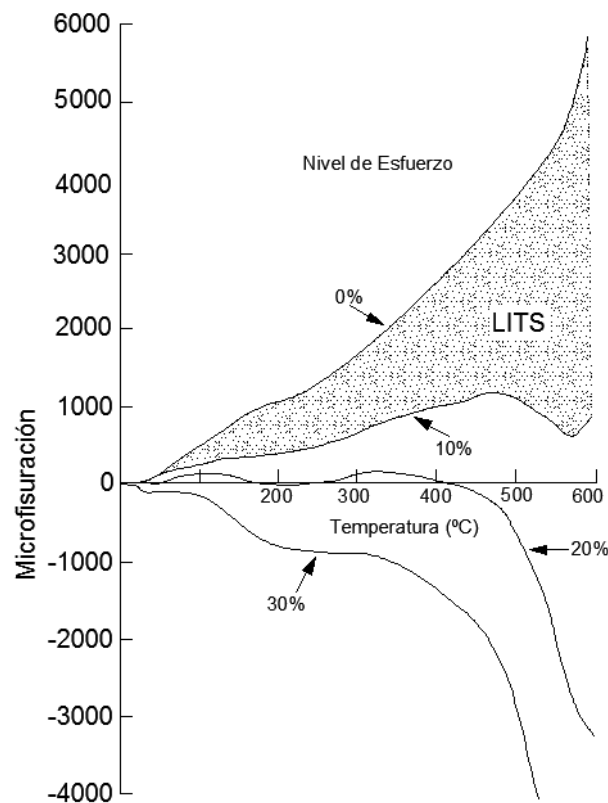
3.4.2. Carga inducida por deformaciones térmicas

La carga inducida por las deformaciones térmicas es el resultado de la diferencia entre la deformación térmica del hormigón sin carga y la de deformación bajo carga constante aplicada previa al calentamiento y mantenida

constante durante el calentamiento (figura 26); a esta deformación se le restar la deformación elástica inicial.

Los materiales del hormigón, tamaño de la muestra, contenido inicial de humedad, condiciones de humedad y condiciones térmicas fueron las mismas en los dos ensayos que realizó la Federación Internacional del Concreto.

Figura 26. **Carga inducida por las deformaciones térmicas (LITS) para un hormigón con agregado de basalto en su primer calentamiento a 1 °C/min determinado entre 0 % y 10 % de carga; también, bajo 20 % y 30 % de carga**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 60.

La carga inducida por deformaciones térmicas es relativamente insensible al agregado y el cemento utilizado.

La Federación Internacional de Concreto idealizó una curva de la carga inducida por las deformaciones térmicas y esta sugiere que, para un esfuerzo dado, la capacidad de diferentes tipos de hormigones de disipar los esfuerzos es similar y que los esfuerzos térmicos desarrollados en estructuras calentadas todavía son proporcionales a la expansión de los constituyentes incluso después de la relajación.

Sin embargo, aunque la carga inducida por las deformaciones térmicas no es influenciada por el tipo de agregado, pero si tiene una fuerte dependencia del contenido de agregado en volumen ya que restringe su comportamiento.

La carga inducida por las deformaciones térmicas no es directamente proporcional a la temperatura. El punto mínimo en el coeficiente de la carga inducida por las deformaciones térmicas ocurre aproximadamente 110 % – 180°C que corresponde al punto máximo en el ritmo de la pérdida de humedad.

La carga inducida por las deformaciones térmicas está relacionada linealmente con el esfuerzo en el rango de carga arriba de 30 % del esfuerzo inicial. Generalmente, los siguientes factores tienen influencias pequeñas pero no son despreciables: edad del hormigón y contenido inicial de humedad.

3.5. Desprendimiento del concreto

3.5.1. Definición y tipos de desprendimientos

El desprendimiento es la ruptura de las capas del hormigón de la superficie de un elemento estructural cuando es expuesto a temperaturas que aumentan rápidamente como en el fuego. Puede ser que el desprendimiento sea explosivo o no; eso dependerá de las condiciones en que se encuentra el hormigón y la velocidad de aumento de la temperatura.

Casi toda la información recabada del desprendimiento del hormigón procede de experiencias en estructuras que fueron expuestas al fuego. Información reciente está emergiendo del desprendimiento en túneles que experimentan curvas más severas (temperatura – tiempo) y donde la humedad inicial del hormigón es normalmente mayor que lo normal.

El ritmo del calentamiento de la superficie del hormigón en edificios expuesto al fuego es aproximadamente de 20 °C – 30 °C por minuto, en los túneles puede llegar aproximadamente 250 °C por minuto.

El desprendimiento del hormigón se puede agrupar en las siguientes categorías:

- Desprendimiento del agregado
- Desprendimiento explosivo
- Desprendimiento de la superficie
- Desprendimiento en las esquinas
- Desprendimiento después de enfriarse

Los primeros tres normalmente ocurren primero mientras que los últimos dos ocurren en las últimas etapas de fuego. El desprendimiento en la superficie y el desprendimiento explosivo regularmente son violentos.

El grado, la severidad y la naturaleza de la ocurrencia del desprendimiento son variados.

El desprendimiento en el hormigón puede ser insignificante en cantidad y consecuencias, como cuando se produce picaduras superficiales. Alternativamente, puede tener serios efectos en la resistencia contra el fuego en los elementos estructurales porque queda expuesto el núcleo de la sección y el acero de refuerzo que incrementa con más rapidez su temperatura. Todo esto reduce la capacidad de carga de la sección transversal.

El daño inesperado causado a una construcción de hormigón por el desprendimiento puede hacer que los niveles de seguridad tomados para una estructura desaparezcan.

3.5.1.1. Desprendimientos explosivos

El desprendimiento explosivo es considerado el más serio de todas las categorías del desprendimiento en el hormigón, esto es determinado por la FIB. Este tipo de desprendimiento podría resultar en el desprendimiento explosivo de una capa de hormigón de aproximadamente 25 mm – 100 mm de espesor.

Múltiple desprendimiento puede ocurrir en hormigones con alto contenido de sílice. Algunos factores han sido identificados que influyen el desprendimiento explosivo del hormigón. Estos factores son la resistencia, edad y permeabilidad, ritmo de calentamiento, tamaño de la sección y forma, pito y

tamaño del agregado, contenido de humedad, presencia de fisuras, el acero de refuerzo, fibras de polipropileno y la carga aplicada.

Existen dos formas del desprendimiento explosivo que están en función de la carga externa aplicada: desprendimiento por presión en los poros y desprendimiento por los esfuerzos térmicos. Estas dos formas actúan solas o combinadas dependiendo del tamaño de la sección y de la cantidad de humedad contenida.

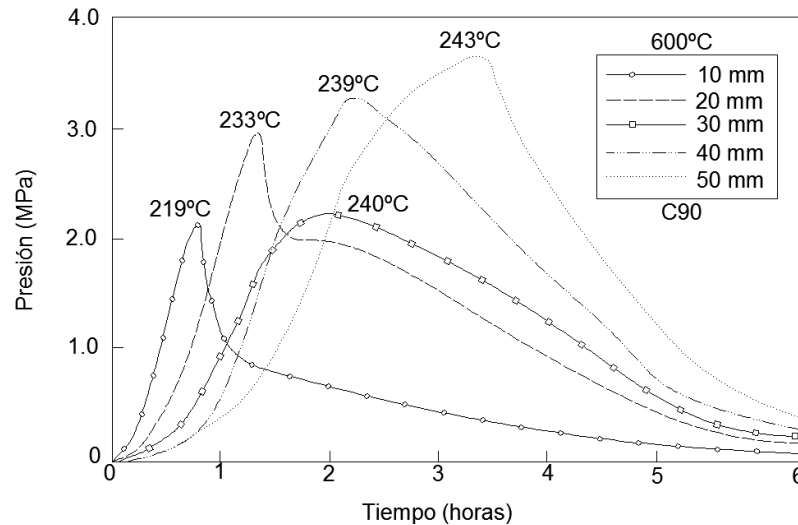
3.5.1.2. Factores de influencia el desprendimiento explosivo

3.5.1.2.1. Permeabilidad

La permeabilidad es un factor importante que influencia el nivel de presión en el hormigón ya que afecta el ritmo de vapor que se libera. El desprendimiento es improbable que ocurra si la permeabilidad del hormigón es mayor de $5 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$.

La FIB establece que el hormigón de alta calidad generalmente posee densidad alta y poros finos en su estructura, por lo tanto, ofrece una mayor resistencia en el flujo de la humedad.

Figura 27. **Distribución de la presión del hormigón expuesto al calor de 600 °C**



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 68.

3.5.1.2.2. Edad del hormigón

La probabilidad de desprendiendo reduce a medida que la edad aumenta, esto puede ser debido a los niveles bajos de humedad en hormigones viejos.

3.5.1.2.3. Resistencia del hormigón

Irónicamente, hormigones de baja resistencia tienen menor probabilidad de desprendimientos explosivos. Hormigones de alta resistencia poseen una baja permeabilidad y consecuentemente buena durabilidad pero presentan un bajo rendimiento si se exponen a altas temperaturas porque sufren de mayor desprendimiento.

Las altas resistencias son alcanzadas reduciendo la relación agua / cemento. Reduciendo esta relación se puede mejorar el desprendimiento causado por la presión en los poros, pero se aumenta el desprendimiento causado por los esfuerzos térmicos.

3.5.1.2.4. Esfuerzo de compresión

Un aumento en el esfuerzo a compresión ya sea por una reducción del tamaño de la sección o un incremento en la carga que soporta el elemento, aumenta el desprendimiento explosivo.

El esfuerzo inicial de compresión en la capa expuesta del hormigón no ocasiona desprendimiento por sí solo. Sin embargo, esfuerzos de compresión excesivos causados por la restricción a la expansión térmica se desarrollan cuando el ritmo de calor es tal que los esfuerzos no pueden ser absorbidos por la fluencia del hormigón lo suficientemente rápido.

3.5.1.2.5. Tipo de agregado

Es probable que el desprendimiento explosivo causado por esfuerzos térmicos disminuya para el hormigón con agregados con baja expansión térmica. El riesgo de desprendimiento explosivo aumenta la siguiente lista de agregados: agregados de peso ligero, basalto, caliza y silíceos.

Sin embargo, esto solo aplica para agregados relativamente secos, ya que si el agregado está saturado al momento de realizar la mezcla, aumenta la probabilidad del desprendimiento explosivo.

3.5.1.2.6. Tamaño del agregado

El tamaño del agregado es importante ya que ocupa más de 60 % del hormigón y mientras mayor sea el tamaño del agregado el hormigón experimenta más desprendimientos explosivos.

3.5.1.2.7. Agrietamiento

El agrietamiento interno tiene un efecto doble y opuesto al desprendimiento explosivo. Mientras que el agrietamiento facilite el escape de humedad durante el calentamiento y libere la presión en los poros del hormigón, también, facilitan el proceso de desprendimiento proporcionando sitios para la propagación de grietas.

3.5.1.2.8. Acero de refuerzo

La presencia, ausencia y cantidad de acero de refuerzo es un factor muy importante en el desprendimiento del hormigón. La congestión de barras de acero con pequeños espacios entre estos ocasiona formación de grietas y consecuentemente el desprendimiento explosivo.

3.5.1.2.9. Recubrimiento del acero de refuerzo

La Federación Internacional de Concreto Internacional justifica que si el recubrimiento excede de 4 cm en el caso de un hormigón denso o de 50 mm en el caso de un hormigón de peso ligero, existe el peligro de que se produzcan desprendiendo del hormigón. Espesores de 1,5 cm o menos, parecen menos

propensos al desprendimiento grave, probablemente porque la masa de concreto no soportado no es grande.

3.5.1.2.10. Fibras de acero

La adición de fibra de acero no elimina los desprendimientos explosivos. Estas fibras restringen los esfuerzos de tensión producidos por la expansión térmica. De hecho, el aumento de la resistencia a la tensión produce una explosión más violenta debido a la liberación repentina de una mayor cantidad de energía.

3.5.1.2.11. Fibras de polipropileno

La adición de 0,05 % – 0,1 % del peso de las fibras de polipropileno en la mezcla de hormigón elimina el desprendimiento explosivo incluso en hormigones de alta resistencia.

3.5.1.3. Mecanismo del desprendimiento explosivo

Cada forma de desprendimiento tiene sus propios mecanismos de ocurrencia. A continuación solo se desarrollan los mecanismos del desprendimiento explosivo que se considera como el más importante para esta investigación.

3.5.1.3.1. Desprendimiento por presión en los poros

Los principales factores que influyen el desprendimiento por presión en los poros del hormigón, según la FIB, son la permeabilidad del hormigón, el nivel de saturación inicial y el ritmo del calentamiento.

El desprendimiento por presión en los poros puede aplicarse por sí solo a especímenes pequeños descargados. Para los especímenes grandes, la presión de los poros tendrá que ser considerada junto con las tensiones térmicas y de carga antes de que se pueda evaluar la probabilidad de desprendimiento explosivo.

3.5.1.3.2. Desprendimiento por esfuerzos térmicos

A un ritmo alto de calentamiento el hormigón experimenta desprendimientos explosivos. Esto es atribuido a los esfuerzos térmicos generados por el incremento rápido en la temperatura y por los poros que liberan presión.

El hormigón caliente genera gradientes de presión que induce esfuerzos de compresión en la región interior más fría. La compresión superficial puede ser aumentada por la carga o el pretensado, que se superponen a las tensiones térmicas. Sin embargo, se cargan muy pocas estructuras de hormigón a niveles en los que se alcanza el estado de tensión de fallo necesario. Esto hace que los esfuerzos térmicos se conviertan por sí solos en una ocurrencia relativamente rara.

3.5.1.3.3. Combinación de ambos mecanismo de desprendimiento

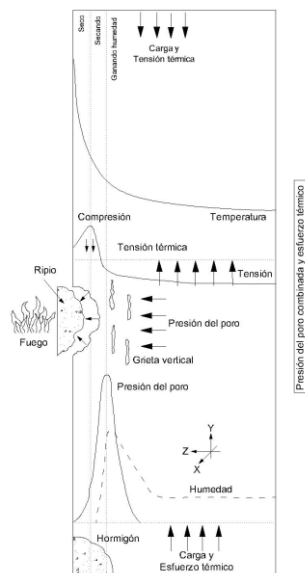
La combinación de ambos mecanismos de desprendimiento generalmente ocurre bajo la acción combinada del desprendimiento por presión en los poros y compresión en la superficie de la región expuesta y fisuramiento interno.

Las fisuras se desarrollan paralelamente a la superficie cuando la suma de los esfuerzos excede la resistencia a tensión del material. Esto es acompañado por una liberación repentina de energía y falla violenta de la superficie de esa región.

Los métodos más efectivos de reducir el riesgo del desprendimiento explosivo son: el uso de barreras térmicas, emplear fibras de polipropileno, uso de agregado de baja expansión térmica.

El uso apropiado del acero de refuerzo podría limitar que el desprendimiento se extienda, aunque no prevenir el fenómeno. El riesgo del desprendimiento es reducido si el contenido de humedad es bajo y la permeabilidad del hormigón es alta.

Figura 28. Diagrama esquemático del desprendimiento explosivo



Fuente: Federación Internacional del Concreto Estructural. *Diseño de concreto estructural expuesto al fuego, materiales y modelado*. p. 72.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo experimental de esta investigación se evaluó de qué forma era factible determinar la resistencia a la compresión del hormigón después de exponerlo al fuego. Como ya existen normativos que especifican los lineamientos a seguir para la elaboración, curado y ensayo de resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de hormigón, estas normas se tomaron como herramienta fundamental para la parte experimental de esta investigación; únicamente, se le agregó al proceso de la exposición al fuego para luego ensayar su resistencia a la compresión.

Además de evaluar la resistencia a la compresión del hormigón, otro objetivo fundamental de esta investigación fue realizar una comparación del comportamiento del hormigón con dos tipos de agregado grueso diferentes, el basalto y la caliza. Como se describe en el marco teórico el agregado grueso conforma 80 % el volumen total del hormigón; por esta razón, las reacciones que tengan ante el fuego, afectan directamente las propiedades resistivas del hormigón.

La norma ASTM C 192 especifica en el inciso 5.5 que para tener un dato representativo se tienen que elaborar 3 cilindros para cada tipo de condiciones de ensayo; por esta razón se realizaron 12 cilindros para obtener 4 grupos de 3 cilindros por cada agregado evaluado. De los 4 grupos realizados, un grupo se dejó como patrón base y los otros 3 grupos se expusieron al fuego una hora, respectivamente, hasta llegar el tiempo máximo de 3 horas.

4.1. Equipo y materiales utilizados

4.1.1. Equipo utilizado

4.1.1.1. Mezcladora manual

Máquina mecánica que elaboró la mezcla homogénea de hormigón entre el agua, cemento y agregados. La mezcladora utilizada para la elaboración del hormigón con caliza y basalto para este trabajo de graduación posee un tambor giratorio con palas, conectado a una manivela que permitió obtener una mezcla homogénea y lograr así el resultado esperado.

Figura 29. Mezcladora manual



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.2. Moldes metálicos

Moldes cilíndricos de acero con dimensiones internas de 15,00 cm por 30,00 cm los cuales cumplen los parámetros que especifican las normas ASTM C192 y C192M-02. Previo a verterles la mezcla de hormigón a los cilindros, se les aplicó diésel para evitar la adherencia entre el molde y el hormigón.

Figura 30. **Moldes de acero**



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.3. Horno de concreto

Horno de leña que se adecuó para colocar en parrillas de acero los cilindros de hormigón. El horno permitió conservar la energía calorífica en su interior y lograr la deshidratación de los cilindros ensayados.

Figura 31. **Horno de concreto**



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.4. Termómetro de infrarrojos

Pirómetro de infrarrojos, utilizado para medir la temperatura a distancia del interior del horno en que se deshidrataron los cilindros de hormigón.

Figura 32. **Termómetro de infrarrojos**



Fuente: elaboración propia.

4.1.1.5. Barra apisonadora

Barras alargadas de acero de 60,00 cm, con extremos de punta redondeadas con diámetros de 1,60 cm, que realizó el apisonado en cada capa de hormigón vertido en el cilindro.

4.1.1.6. Mazos

Mazo con cabeza de hule o cuero que pesa alrededor de 0,20 kg que se utilizó para golpear los lados del molde de a 10 a 15 veces con el objetivo de cerrar los vacíos dejados por la barra apisonadora.

4.1.2. Materiales utilizados

Los agregados utilizados fueron proporcionados por AGRECA, empresa reconocida por sus altos estándares de calidad en fabricación y distribución de agregados en Guatemala y Centro América.

4.1.2.1. Agregado grueso basáltico de ½"

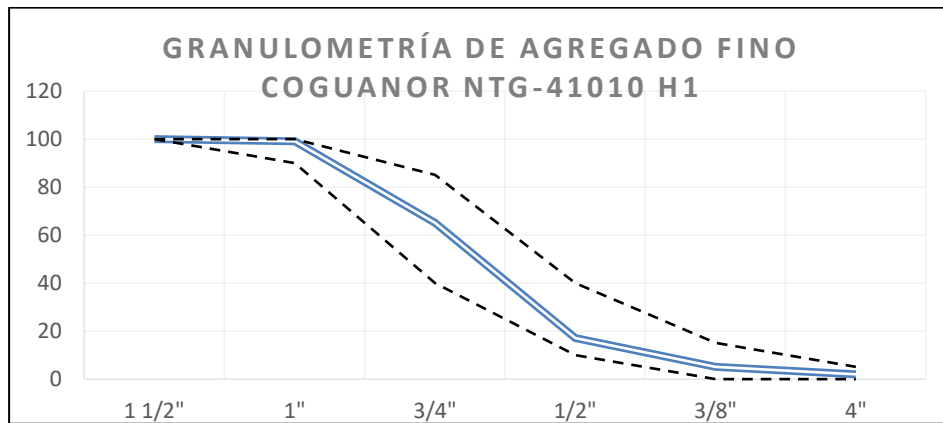
Las características del agregado basáltico utilizado se describen en la siguiente tabla:

Tabla XII. **Características, agregado grueso basáltico**

Densidad relativa (sss) COGUANOR NTG41010 h08	2,66
Absorción (%) COGUANOR NTG41010 h08	1,00
Módulo de finura (MF) COGUANOR NTG41010 h1	7,15
Pas tamiz 0,075 mm (%) COGUANOR NTG41010 h3	1,2
Humedad (%) COGUANOR NTG41010 h9	0,70
Densidad aparente compactada ($\frac{kg}{m^3}$) COGUANOR NTG41010	1 514
Densidad aparente suelta ($\frac{kg}{m^3}$) COGUANOR NTG41010 h2	1 389
Partículas planas y alargadas (%) COGUANOR NTG 41010 h12	21
Desgaste por abrasión en máquina de los Ángeles ASTM c121	16

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Gráfica granulométrica del agregado basáltico**



Estándar (mm)	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
Nominal (pulg)	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4"
% Pasa acumulado	100	99	65	17	5	2

Fuente: elaboración propia.

4.1.2.2. Agregado grueso calizo de 1”.

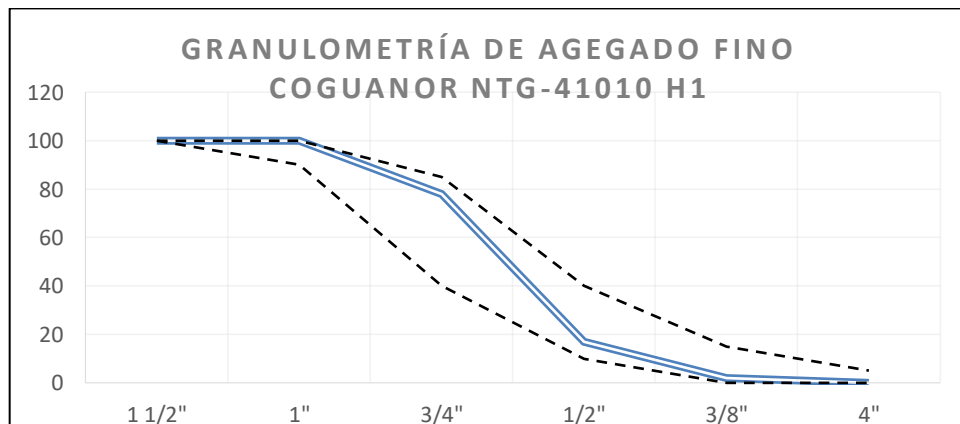
Las características del agregado calizo utilizado se describen en la siguiente tabla:

Tabla XIII. **Características, agregado grueso calizo**

Densidad relativa (sss) COGUANOR NTG41010 h08	2,70
Absorción (%) COGUANOR NTG41010 h08	0,9
Módulo de finura (MF) COGUANOR NTG41010 h1	7,17
Pas tamiz 0,075 mm (%) COGUANOR NTG41010 h3	0,2
Humedad (%) COGUANOR NTG41010 h9	0,4
Densidad aparente compactada ($\frac{kg}{m^3}$) COGUANOR NTG41010	1 568
Densidad aparente suelta ($\frac{kg}{m^3}$) COGUANOR NTG41010 h2	1 413
Partículas planas y alargadas (%) COGUANOR NTG41010 h12	11
Desgaste por abrasión en máquinas de los Ángeles ASTM C313	25

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Gráfica granulométrica del agregado calizo**



Estándar (mm)	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
Nominal (pulg)	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4"
% Pasa acumulado	100	100	78	17	2	0

Fuente: elaboración propia.

4.1.2.3. Agregado fino

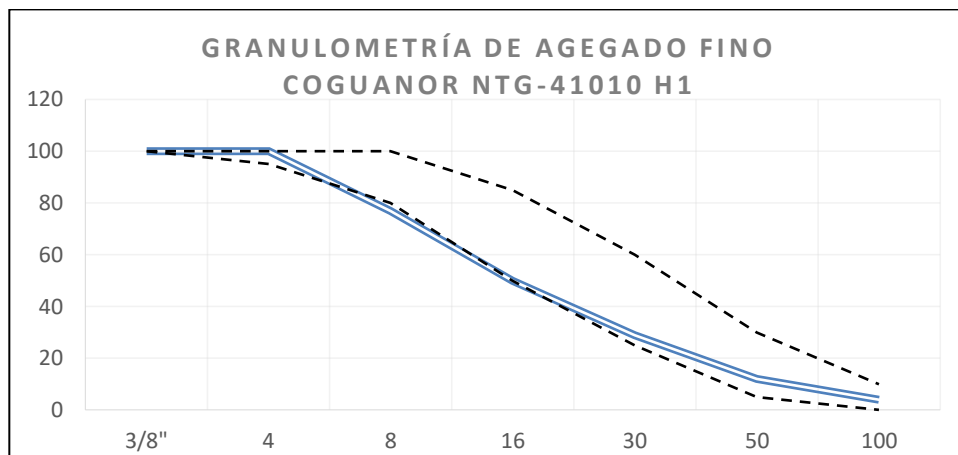
Las características del agregado fino utilizado se describen en la siguiente tabla:

Tabla XIV. Características agregado fino

Densidad relativa (sss) COGUANOR NTG41010 h09	2,59
Absorción (%) COGUANOR NTG41010 h09	2,10
Módulo de finura (MF) COGUANOR NTG41010 h1	3,27
Pas tamiz 0,075 mm (%) COGUANOR NTG41010 h3	1,7
Humedad (%) COGUANOR NTG41010 h9	7,4
Densidad aparente compactada ($\frac{kg}{m^3}$) COGUANOR NTG41010	1 592
Densidad aparente suelta ($\frac{kg}{m^3}$) COGUANOR NTG41010 h2	1 445
Materia orgánica (No. Color) COGUANOR NTG41010 h4	0

Fuente: elaboración propia.

Figura 35. Gráfica granulométrica del agregado fino



Estándar (mm)	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15
Nominal (pulg)	3/8"	4	8	16	30	50	100
% Pasa acumulado	100	100	77	50	29	12	4

Fuente: elaboración propia.

4.1.2.4. Cemento tipo I PM (UGC)

El cemento empleado en la parte experimental fue el tipo I PM, un cemento compuesto de una mezcla de materiales calcáreos (caliza y marga), materiales arcillosos (pizarra, arcilla y esquistos), material arcilloso – calcáreo (caliza arcillosa) y puzolanas (rocas con alto contenido de sílice y aluminio).

4.1.2.5. Combustible biomasa, madera de ciprés.

El combustible utilizado fue leña de ciprés que posee un grano fino y compacto que hace que su poder calorífico sea mayor que otras leñas.

Figura 36. Materiales utilizados



Fuente: elaboración propia.

4.2. Metodología

Se utilizaron cilindros de hormigón para realizar la parte experimental de esta investigación. Se elaboraron 24 cilindros de hormigón bajo los lineamientos de la norma ASTM 192; de los cuales 12 cilindros estaban integrados de basalto y los otros 12 por agregado de caliza.

Dentro de ambas agrupaciones de 12 unidades de cilindros de cada agregado, se subdividieron en grupos de 3 unidades para obtener nuevamente 4 grupos, de los cuales un grupo no se expuso al fuego para conservar el patrón de comparación. Mientras que para los otros tres grupos, cada uno fue expuesto con una hora de diferencia para obtener el grupo con mayor tiempo de exposición de 3 horas. Luego de la exposición al fuego, los cilindros se dejaron al aire libre para que se enfriaran al ritmo no forzado.

Luego de su exposición al fuego y enfriamiento, se realizó el ensayo a compresión de los 24 cilindros (norma ASTM C39). Debido a los desprendimientos explosivos que presentaron algunos cilindros, también, se efectuaron extracciones de núcleos (norma ASTM C 42) para determinar su resistencia a la compresión.

Luego de lo descrito anteriormente se obtuvieron los datos que se utilizaron para la comparación de los dos agregados utilizados; se realizó la comparación del tipo de falla, características visuales que presentaron los agregados y principalmente su resistencia a la compresión.

Es importante mencionar que la parte experimental de esta investigación se desarrolló en las instalaciones y utilizando el equipo del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.3. Diseño de mezcla

El diseño de mezcla se realizó bajo el reglamento ACI 2011. Es sustancial mencionar que este método es para utilizar cemento portland y no para cementos mezclados como el tipo 1 PM. En la actualidad, no se ha desarrollado un método que tome en cuenta el tipo de cemento a utilizar; es por eso que no se tienen exactitud en cuanto a la resistencia requerida a los 28 días. Las proporciones utilizadas para esta investigación son las siguientes:

4.3.1. Procedimiento para determinar el diseño de mezcla para el agregado basalto y caliza

Se muestra el procedimiento utilizado para el diseño de mezcla con basalto y caliza.

4.3.1.1. Elección del revenimiento

En la tabla XV, de acuerdo al tipo de construcción, se obtuvieron los límites de revenimiento que la mezcla debe presentar, para estos ensayos se tomó el diseño de mezcla para vigas y columnas.

Tabla XV. **Revenimiento recomendado para varios tipos de construcción**

TIPOS DE CONSTRUCCIÓN	Revenimiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7,5	2,5
Zapatas simples, compuertas y muros de subestructura	7,5	2,5
Vigas y muros reforzados	10	2,5
Columnas de edificio	10	2,5
Pavimentos y losas	7,5	2,5
Concreto macizo	7,5	2,5

Fuente: Instituto Americano del Concreto, (ACI-211.1-91). *Práctica estándar para seleccionar las proporciones para hormigón normal y pesado*. p. 211.

Bajo el criterio de que los elementos estructurales más vulnerables a ser expuestos al fuego son las vigas, muros reforzados y columnas, se determinó que para el diseño experimental de esta tesis el revenimiento del hormigón estaría entre 2,5 cm el mínimo y 10 cm el máximo.

4.3.1.2. Elección del tamaño máximo de agregado

De acuerdo a las gráficas granulometrías expuestas en las figuras 33 y 34, se determinó el tamaño máximo del agregado que corresponde a ½ pulgada para el agregado basáltico y 1 pulgada para el agregado calizo.

4.3.1.3. Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire

Conociendo el revenimiento máximo y mínimo de la mezcla, el agregado a utilizar, con el apoyo de la tabla núm. XVI se determinó que la cantidad necesaria de agua para la mezcla es de 216 kg/m³ y 193 kg/m³ para el agregado basáltico y calizo, respectivamente.

Tabla XVI. **Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños nominales recomendados**

Revenimiento		Agua kg/m ³ de concreto para los tamaños máximos nominales de agregado indicados							
cm	pulg	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6" ++
Concreto sin aire incluido									
2,5 a 5	1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113
7,5 a 10	3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17,5	6 a 7	243	228	216	202	190	178	160	
Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire incluido, %		3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido									
2,5 a 5	1 a 2	181	175	168	160	150	142	122	107
7,5 a 10	3 a 4	202	193	184	175	165	157	133	119
15 a 17,5	6 a 7	216	205	197	184	174	166	154	
Contenido promedio total de aire, para el nivel de exposición, %									
Exposición	Baja	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5**xx	1**xx
	Media	6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5**xx	3**xx
	Extrema	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5**xx	4**xx

Fuente: Instituto Americano del Concreto, (ACI-211.1-91). *Práctica estándar para seleccionar las proporciones para hormigón normal y pesado*. p. 211.

4.3.1.4. Selección de la relación agua-cemento A/C

Se determinó que la resistencia a la compresión a los 28 días sería de 280 kgf/cm², por lo cual la tabla XVII indica una relación A/C de 0,57. Los profesionales que asesoraron este trabajo sugirieron utilizar 0,49, justificando que el método de diseño de mezcla ACI211.1-91 es para cemento portland y en realidad el cemento que se utilizó fue un cemento puzolánico que no es íntegramente portland.

Tabla XVII. **Relación agua-cemento y esfuerzo a compresión del hormigón**

Esfuerzo a compresión a 28 días		Relación A/C, por peso	
		Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
kgf/cm ²	PSI		
420	6 000	0,41	-----
350	5 000	0,48	0,4
280	4 000	0,57	0,48
210	3 000	0,68	0,59
140	2 000	0,82	0,74

Fuente: Instituto Americano del Concreto, (ACI-211.1-91). *Práctica estándar para seleccionar las proporciones para hormigón normal y pesado*. p. 211.

4.3.1.5. Cálculo del contenido de cemento

Con la relación $\frac{A}{C}$ obtenido del inciso anterior, y con el valor de la cantidad necesaria de agua para la mezcla de 216 kg/m³ y 193 kg/m³ para el agregado basáltico y calizo, respectivamente, se procede a realizar la sustitución y el despeje de la ecuación anterior y con ello se determina la cantidad de cemento necesaria para cada mezcla.

Para la mezcla con agregado grueso basáltico:

$$C = \frac{A}{0,49} \rightarrow C = \frac{216 \text{ kg/m}^3}{0,49} \rightarrow C = 440,82 \text{ kg/m}^3$$

Para la mezcla con agregado grueso calizo:

$$C = \frac{A}{0,49} \rightarrow C = \frac{193 \text{ kg/m}^3}{0,49} \rightarrow C = 393,88 \text{ kg/m}^3$$

4.3.1.6. Estimación del contenido de agregado grueso

El módulo de finura del agregado fino fue proporcionado por AGRECA tras los respectivos ensayos granulométricos; su valor es de 3,27.

Tabla XVIII. Cantidad de agregado grueso por unidad de volumen del hormigón

Tamaño máximo nominal del agregado grueso		Volumen de AG varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del AF			
mm	pulg	2,4	2,6	2,8	3
9,5	3/8"	0,5	0,48	0,46	0,44
12,5	1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
19	3/4"	0,66	0,64	0,62	0,6
25	1"	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	1 1/2"	0,75	0,73	0,71	0,69
50	2"	0,78	0,76	0,74	0,72
75	3"	0,82	0,8	0,78	0,76
150	6"	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: Instituto Americano del Concreto, (ACI-211.1-91). *Práctica estándar para seleccionar las proporciones para hormigón normal y pesado*. p. 211.

Se determinó con la tabla XVIII que el volumen del agregado grueso porcentual es de 53 % y 65 % para la mezcla con agregado grueso basáltico y para la mezcla con agregado grueso calizo, respectivamente. Con los valores de peso volumétrico de cada agregado y la cantidad de volumen determinada anteriormente se procede a calcular el contenido de agregado grueso:

Agregado basáltico

$$0,53 * 1\,514 \frac{kg}{m^3} = 802,42 \frac{kg}{m^3}$$

Agregado de caliza

$$0,65 * 1\,568 \frac{kg}{m^3} = 1\,019,20 \frac{kg}{m^3}$$

4.3.1.7. Estimación del contenido de agregado fino

La tabla XIX relaciona el tamaño máximo nominal del agregado grueso con la estimación del peso unitario del concreto (kg/m³).

Tabla XIX. **Primera estimación del peso unitario del hormigón**

Tamaño máximo nominal del agregado		Primer estimado del peso unitario de concreto kgf/m ³	
mm	pulgadas	Concreto sin inclusión de aire	Concreto con aire incluido
9,5	3/8"	2 280	2 200
12,5	1/2"	2 310	2 230
19	3/4"	2 345	2 275
25	1"	2 380	2 290
37,5	1 1/2"	2 410	2 350
50	2"	2 445	2 345
75	3"	2 490	2 405
150	6"	2 530	2 435

Fuente: Instituto Americano del Concreto, (ACI-211.1-91). *Práctica estándar para seleccionar las proporciones para hormigón normal y pesado.* p. 211.

Con el valor del peso unitario de la mezcla diseñada, 2,310 kg/m³ y 2,380 kg/m³ para la mezcla con agregado basáltico y para la mezcla con agregado calizo, respectivamente, se despeja el contenido de los agregados con la siguiente ecuación:

$$\text{Peso unitario (kg/m}^3\text{)} = \text{agua} + \text{cemento} + \text{total de agregados}$$

Total agregados (kg/m³) = peso unitario - agua – cemento

Para la mezcla con agregado grueso basáltico:

$$\text{Total agregados (kg/m}^3\text{)} = 2,310 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 216 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 440.82 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Total agregados (kg/m}^3\text{)} = 1653.18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para la mezcla con agregado grueso basáltico:

$$\text{Total agregados (kg/m}^3\text{)} = 2,380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 193 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 393.88 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Total agregados (kg/m}^3\text{)} = 1793.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Se determinó en el inciso 4.3.1.6 la cantidad de agregado grueso para cada mezcla, por lo tanto:

$$\text{Total Agregados (kg/m}^3\text{)} = \text{agregado fino} + \text{agregado grueso}$$

$$\text{Agregado fino (kg/m}^3\text{)} = \text{total agregados} - \text{agregado grueso}$$

Para la mezcla con agregado grueso basáltico la cantidad de agregado fino se calcula a continuación:

$$\text{Agregado fino (kg/m}^3\text{)} = 1\,653,18 - 802,42$$

$$\text{Agregado fino (kg/m}^3\text{)} = 850,76$$

Para la mezcla con agregado grueso calizo la cantidad de agregado fino se calcula a continuación:

$$\text{Agregado fino (kg/m}^3\text{)} = 1\,793,12 - 1\,019,20$$

$$\text{Agregado fino (kg/m}^3\text{)} = 773,92$$

El resumen de las cantidades de material para la mezcla con agregado grueso basáltico se muestra a continuación:

Agua =	216,00 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Cemento =	440,82 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Agregado fino =	850,76 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Agregado grueso =	802,42 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Peso unitario=	2 310,00 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

El cálculo de las proporciones para la mezcla con agregado grueso basáltico se describe a continuación:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{216 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{440,82 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,49$$

$$\frac{\text{Cemento}}{\text{Cemento}} = \frac{440,82 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{440,82 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,00$$

$$\frac{\text{Agregado fino}}{\text{Cemento}} = \frac{850,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{440,82 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,93$$

$$\frac{\text{Agregado grueso}}{\text{Cemento}} = \frac{802,42 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{440,82 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,82$$

El resumen de las proporciones para la mezcla con agregado grueso de caliza se describe en el siguiente esquema:

cemento	:	Agregado fino	:	Agregado grueso (1/2")	:	Agua
1,00	:	1,93	:	1,82	:	0,49

El resumen de las cantidades de material para la mezcla con agregado grueso calizo se muestra a continuación:

Agua =	193,00 $\frac{kg}{m^3}$
Cemento =	393,88 $\frac{kg}{m^3}$
Agregado fino =	773,92 $\frac{kg}{m^3}$
Agregado grueso =	1 019,20 $\frac{kg}{m^3}$
Peso unitario=	2 380,00 $\frac{kg}{m^3}$

El cálculo de las proporciones para la mezcla con agregado grueso calizo se describe a continuación:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{193 \frac{kg}{m^3}}{393,88 \frac{kg}{m^3}} = 0,49$$

$$\frac{\text{Cemento}}{\text{Cemento}} = \frac{393,88 \frac{kg}{m^3}}{393,88 \frac{kg}{m^3}} = 1,00$$

$$\frac{\text{Agregado fino}}{\text{Cemento}} = \frac{773,92 \frac{kg}{m^3}}{393,88 \frac{kg}{m^3}} = 1,96$$

$$\frac{\text{Agregado grueso}}{\text{Cemento}} = \frac{1 019,20 \frac{kg}{m^3}}{393,88 \frac{kg}{m^3}} = 2,59$$

El resumen de las proporciones para la mezcla con agregado grueso de caliza se describe en el siguiente esquema:

cemento	:	Agregado fino	:	Agregado grueso (1/2")	:	Agua
1,00	:	1,96	:	2,59	:	0,49

4.4. Elaboración de cilindros de hormigón (ASTM C192)

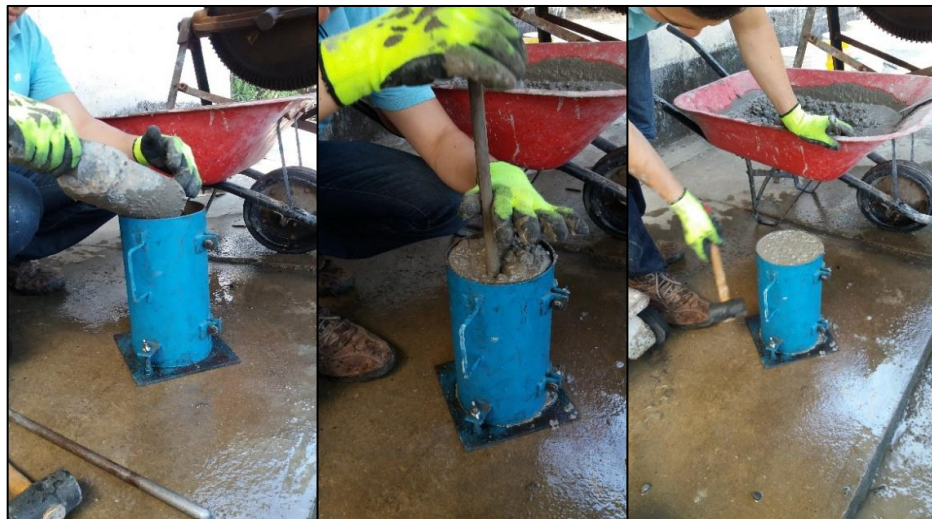
Se realizaron 24 cilindros de hormigón bajo los lineamientos de la *Norma ASTM C 92. Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de hormigón para ensayo*. Esta norma brinda los lineamientos necesarios que se tienen que cumplir para obtener muestras con características que darán un buen resultado. Entre los lineamientos que vale la pena mencionar están el mezclado (figura 29), colocación (figura 34) y curado del hormigón (figura 35). También, especifica el número de nuestras necesarias para obtener datos representativos y especifica las características que se deben cumplir en cuanto a herramienta y moldes. En general, esta norma describe el procedimiento y la metodología para obtener muestras representativas.

Figura 37. **Mezclado del hormigón**



Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Colocación del hormigón**



Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Desencofrado de la muestras cilíndricas**



Fuente: elaboración propia.

Las muestras cilíndricas pasaron por un periodo de 28 días sumergidos en agua para su curado; luego, se colocaron en estanterías a temperatura ambiente hasta su exposición al fuego.

Figura 40. **Curado de las muestras cilíndricas**



Fuente: elaboración propia.

4.5. Exposición al fuego de cilindros de hormigón

Existen procedimientos normalizados para evaluar la resistencia al fuego de los materiales de construcción, y de elementos estructurales como la norma ASTM E119 o la norma ASTM E84; pero para cumplir con los lineamientos de estas normas se necesitan herramientas y dispositivos específicos que no posee el Centro de Investigaciones de Ingeniería. Por esa razón, el procedimiento descrito a continuación no se rige de una norma específica; sin embargo, las normas mencionadas al inicio de este párrafo influyen en el proceso experimental de esta investigación.

Para este proceso se utilizó un horno de hormigón con la finalidad de no tener variaciones marcadas en la temperatura en el interior del horno, en donde el calor de las llamas se mantuviera concentrado en un solo lugar. Este horno constaba de una puerta de acero y una abertura en la parte superior para la expulsión del humo.

Figura 41. Horno de hormigón



Fuente: elaboración propia.

Para que los cilindros no tuvieran contacto directo con las brasas se construyó una rejilla de barras de acero (figura 42); de una pulgada de diámetro. Como material combustible se utilizó leña de ciprés.

Figura 42. **Rejilla de barras de acero**



Fuente: elaboración propia.

Se procedió a colocar los cilindros sobre la rejilla separados entre sí, como lo muestra la figura 40; para ese entonces los cilindros con agregado de basalto tenían 107 días de edad y los cilindros con agregado de caliza tenían 91 días de edad. A esa edad, el hormigón ya había alcanzado y sobrepasado su resistencia de diseño.

Figura 43. **Colocación de las muestras cilíndricas en el horno**



Fuente: elaboración propia.

De los 24 cilindros, 12 cilindros tenían agregado grueso de caliza y 12 agregado grueso de basalto. Dentro del grupo de 12 cilindros de cada agregado, 3 de ellos no fueron expuestos al fuego para tener un patrón y comparar. De los 9 restantes 3 se expusieron a 1 hora, otros 3 se expusieron a 2 horas y los últimos 3 se expusieron a 3 horas. Se tomó la temperatura a cada 15 minutos en cada cilindro de hormigón, para esto se utilizó un termómetro láser que medía la temperatura en grados centígrados.

Figura 44. **Exposición al fuego de los cilindros**



Fuente: elaboración propia.

Los cilindros que cumplían su tiempo de exposición se fueron retirando periódicamente del horno hasta retirar los cilindros con mayor tiempo de exposición (figura 42).

Figura 45. **Extracción de los cilindros del horno**



Fuente: elaboración propia.

Luego de que fueran extraídos del horno, se colocaron en el suelo a temperatura ambiente hasta que se enfriaran por completo. Después del proceso de enfriamiento se colocaron en estanterías en espera del ensayo a compresión.

Figura 46. **Enfriamiento**



Fuente: elaboración propia.

4.6. Extracción y ensayo de resistencia a la compresión de núcleos perforados (ASTM C42)

Algunos cilindros presentaron desprendimientos explosivos, que inhabilitan el ensayo a compresión de la norma ASTM C39. Por esta razón, se procedió a la extracción y ensayo de núcleos de los cilindros que presentaron desprendimientos y no tenían sus caras de apoyo completas.

Figura 47. **Desprendimientos explosivos**



Fuente: elaboración propia.

Se procedió a la extracción, medición, pesado, nivelación y ensayo de los núcleos de hormigón bajo los lineamientos de la norma ASTM C42. Esta parte del proceso experimental fue realizada por la Sección de Concretos del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 48. **Extracción, nivelación y ensayo de núcleos**



Fuente: elaboración propia.

4.7. Ensayo de resistencia a compresión de cilindros (ASTM C39)

Los cilindros que no presentaron desprendimientos en sus caras de apoyo se ensayaron con los lineamientos de la norma ASTM C39, dicho ensayo se realiza en la Sección de Concretos del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Figura 49. Nivelación y ensayo de cilindros



Fuente: elaboración propia.

4.8. Datos obtenidos

Las muestras se identifican con la literal B para los cilindros con agregado grueso de basalto y con la literal C para los cilindros con agregado grueso de caliza. Los números que proceden a las literales se designaron por el orden en que fueron colocadas las muestras, por tanto, no poseen ninguna relevancia. De la exposición al fuego de los cilindros de hormigón se tomaron las temperaturas en intervalos de 15 minutos para monitorear las temperaturas alcanzadas.

En la tabla XVII figuran estos datos así mismo se encuentra resaltada la temperatura máxima alcanzada en cada hora de exposición de las muestras.

Tabla XX. **Temperaturas alcanzadas en cada muestra cilíndrica**

	Muestra	Tiempo de exposición	Muestra	Tiempo de exposición		Muestra	Tiempo de exposición		
		1 hr.		2 hrs.	1 hr.		2 hrs.	3 hrs.	
		Temperatura °C		Temperatura °C					
CALIZA	C21	113	C23	139	198	C27	143	226	271
		143		172	226		134	222	252
		215		196	258		150	275	253
		315		233	265		158	305	266
	C24	200	C22	286	245	C17	154	224	278
		171		165	260		166	217	232
		228		199	283		155	232	254
		294		244	286		169	245	235
	C11	186,2	C14	224	211	C12	191	313	262
		178		157	214		198	312	234
		278		156	253		209	262	222
		295		189	240		188	235	233
BASALTO	B42	109,7	B32	137	180	B43	117	213	427
		107		124	187		168	271	367
		116		131	217		140	393	412
		142		134	216		198	420	394
	B41	105,6	B33	154	172	B22	148	240	380
		106		129	182		154	391	333
		117		133	237		173	449	436
		134		136	213		281	446	443
	B31	101,7	B21	228	233	B11	182	235	311
		111		153	249		140	272	290
		120		148	240		167	295	302
		122		140	231		215	319	300

Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos de los ensayos realizados por la Sección de Concretos del Centro de Investigaciones de Ingeniería, figuran en las tablas núm. XXI y XXII, los cuales se utilizarán en la siguiente sección para realizar las relaciones porcentuales y determinar el efecto que tiene la exposición al fuego de las muestras cilíndricas de hormigón. Un parámetro importante que recalcar es que en dichas tablas se indica el tipo de ensayo que se realizó para obtener los datos que allí figuran.

Tabla XXI. **Datos obtenidos de los ensayos con muestras de agregado grueso de caliza**

Hrs.	Tipo de ensayo	Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Área sección transversal cm ²	Resistencia Mpa	Resistencia PSI
0	CILINDRO	C25	13,040	15,210	30,695	180 500,00	181,70	44,20	6 410,00
	CILINDRO	C15	12,395	15,010	30,030	186 000,00	176,95	46,70	6 780,00
	CILINDRO	C26	12,220	14,935	29,808	179 000,00	175,19	45,40	6 590,00
1	NÚCLEO	C11	0,3324	4,58	8,87	10 600,00	16,48	18,60	4 150,00
	CILINDRO	C24	11,815	14,995	30,191	146 000,00	176,60	35,60	5 170,00
	NÚCLEO	C21	0,3375	4,58	8,88	11 100,00	16.475,00	30,00	4 350,00
2	CILINDRO	C14	11,46	14,9	30,16	120 000,00	174,37	30,60	4 440,00
	NÚCLEO	C22	0,3097	4,59	8,66	8 300,00	16,55	22,30	3 240,00
	NÚCLEO	C23	0,3237	4,58	8,83	9 400,00	16,48	25,40	3 690,00
3	NÚCLEO	C12	0,3134	4,58	8,81	9 100,00	16,48	24,60	3 570,00
	CILINDRO	C17	11,625	15,03	30,183	12 000,00	177,42	30,10	4 370,00
	CILINDRO	C27	11,605	15,135	30,077	87 500,00	179,91	21,60	3 130,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Datos obtenidos de los ensayos con muestras de agregado grueso de basalto**

Hrs.	Tipo de ensayo	Muestra	Peso (kg)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (lb)	Área sección transversal cm ²	Resistencia Mpa	Resistencia PSI
0	CILINDRO	B12	12,380	14,955	29,788	130 000,00	175,66	32,90	4 770,00
	CILINDRO	B13	13,085	15,240	30,480	135 500,00	182,41	33,00	4 790,00
	CILINDRO	B23	13,230	15,240	30,550	192 000,00	182,41	46,80	6 790,00
1	CILINDRO	B31	12,370	15,095	30,050	160 000,00	178,96	39,80	5 770,00
	NÚCLEO	B41	0,351	4,560	8,890	6 200,00	16,33	16,90	2 450,00
	NÚCLEO	B42	0,334	4,590	8,620	9 400,00	16,55	25,30	3 670,00
2	NÚCLEO	B21	0,281	4,590	7,300	9 400,00	16,55	24,60	3 570,00
	NÚCLEO	B33	0,342	4,590	8,930	12 000,00	16,55	32,30	4 690,00
	CILINDRO	B32	12,040	15,245	30,170	146 000,00	182,53	35,60	5 170,00
3	NÚCLEO	B11	0,331	4,590	8,690	5 600,00	16,55	15,10	2 190,00
	NÚCLEO	B22	0,324	4,600	8,660	10 100,00	16,62	27,00	3 920,00
	NÚCLEO	B43	0,325	4,580	8,790	13 000,00	16,48	35,10	5 090,00

Fuente: elaboración propia.

4.9. Cálculos efectuados

Se procedió a realizar el promedio de cada corrida, las cuales estaban formadas por 3 muestras cilíndricas. Dicho promedios figuran en las tablas XXIII y XXIV que corresponden a los promedios de las muestras con agregado basáltico y calizo, respectivamente. Posteriormente, se realizó una relación porcentual donde se tomó como 100 % los promedios de las corridas que no fueron expuestas al fuego. Se realizará el análisis de dichos promedios en la sección siguiente.

Tabla XXIII. **Promedio de las muestra cilíndricas con agregado grueso calizo**

Hrs. de exposición	Muestra	Resistencia PSI	Promedio PSI
0	C25	6 410,00	6 93,33
	C15	6 780,00	
	C26	6 590,00	
1	C11	4 150,00	4 556,67
	C24	5 170,00	
	C21	4 350,00	
2	C14	4 440,00	3 790,00
	C22	3 240,00	
	C23	3 690,00	
3	C12	3 570,00	3 690,00
	C17	4 370,00	
	C27	3 130,00	

Fuente: elaboración propia

Tabla XXIV. **Promedio de las muestra cilíndricas con agregado grueso basáltico**

Hrs. de exposición	Muestra	Resistencia PSI	Promedio PSI
0	B12	4.770,00	5.450,00
	B13	4.790,00	
	B23	6.790,00	
1	B31	5.770,00	3.963,33
	B41	2.450,00	
	B42	3.670,00	
2	B21	3.570,00	4.476,67
	B33	4.690,00	
	B32	5.170,00	
3	B11	2.190,00	3.733,33
	B22	3.920,00	
	B43	5.090,00	

Fuente: elaboración propia.

De los datos obtenidos de los ensayos descritos en la sección anterior, figuran datos geométricos: diámetro, altura, y peso. Por lo tanto, fue posible determinar el peso específico de cada muestra de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{\text{peso (kg)}}{\text{volumen (m}^3\text{)}}$$

Luego de determinar el peso específico de cada muestra, se procedió a realizar el promedio de cada corrida de pesos específicos, la cual como ya se definió en secciones anteriores constaba de tres muestras.

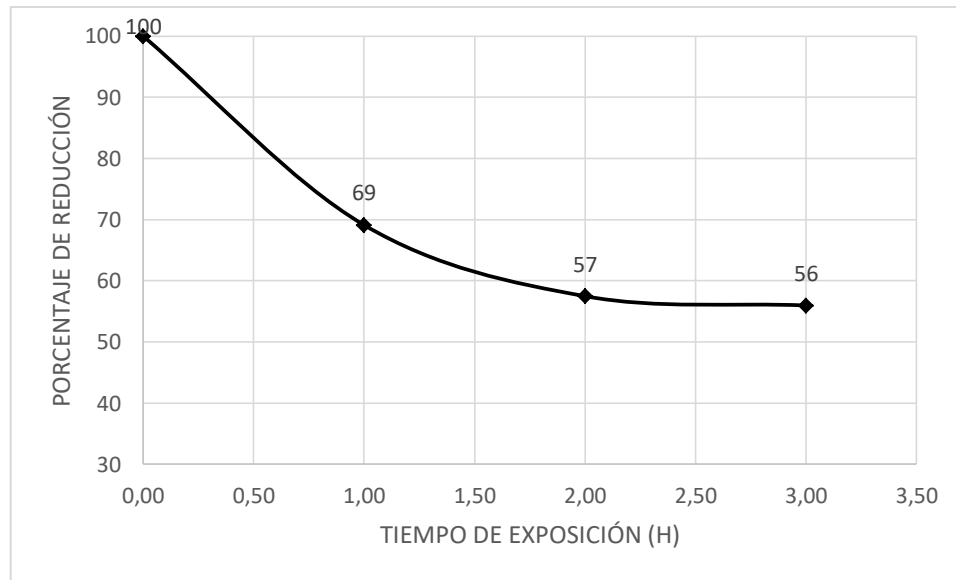
4.10. Resultados

Los resultados derivados de los promedios y relaciones porcentuales tanto de la resistencia a la compresión como los pesos específicos se graficaron de la siguiente manera: en el eje coordenado x el tiempo de exposición y en eje coordenado y el porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión y del peso específico.

4.10.1. Gráficas

La siguiente gráfica muestra los resultados de las muestras con agregado grueso de caliza.

Figura 50. **Porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión del hormigón con agregado grueso de caliza**

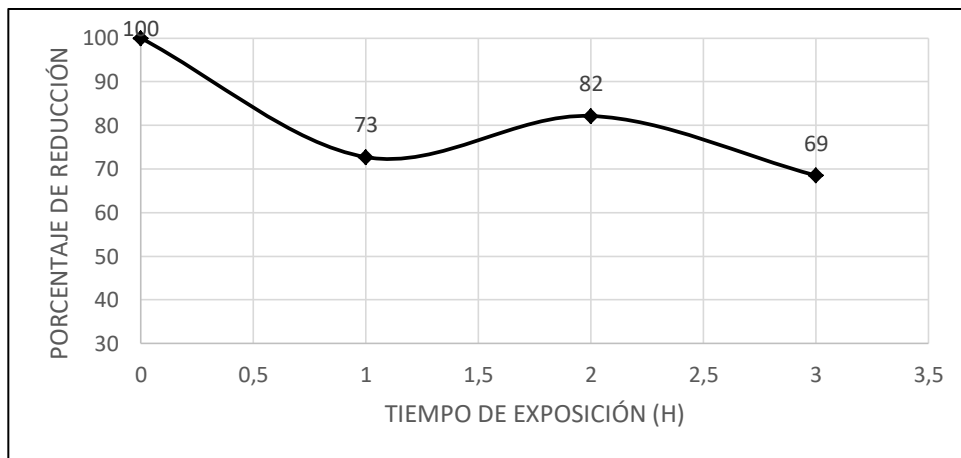


Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de la gráfica 50 indica que la mayor pérdida de resistencia a la compresión ocurre en la primera hora; en el período complementario de la última hora, la pérdida de resistencia se ha mantenido constante y a pesar de que la pérdida continúa no hay mayor cambio en esos tiempos.

La siguiente gráfica muestra los resultados de las muestras con agregado grueso basáltico.

Figura 51. **Porcentaje de reducción de la resistencia a la compresión del hormigón con agregado grueso de basalto**



Fuente: elaboración propia.

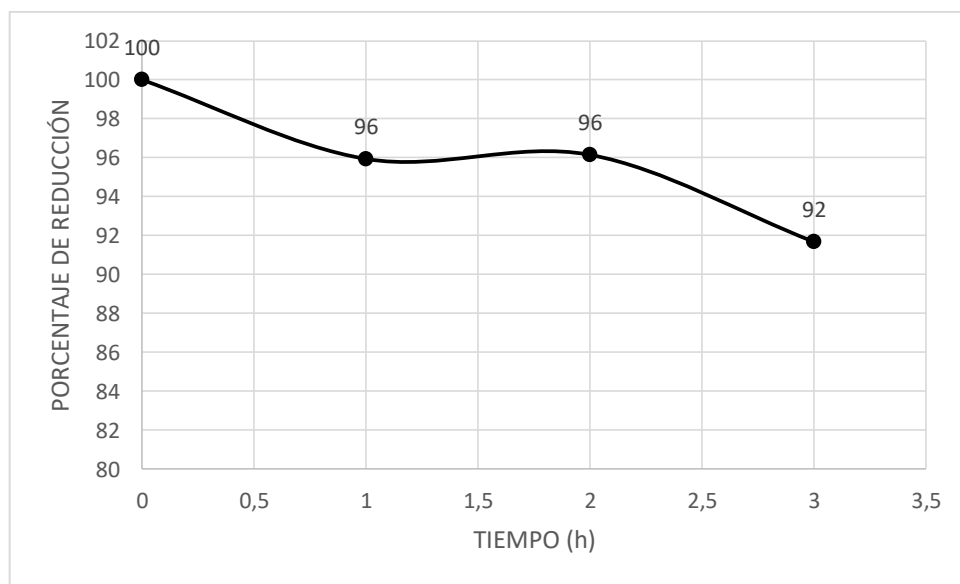
La grafica 48 muestra un comportamiento interesante; se observa que la mayor pérdida de resistencia a la compresión ocurre en la primera hora pero lo que ocurrió en la siguiente hora es curioso ya que las muestras ensayadas con dos horas de exposición presentan una recuperación de aproximadamente 10 %. A la tercera hora la resistencia vuelve a disminuir al porcentaje de perdida de una hora.

De los resultados anteriores se puede afirmar que el agregado grueso de caliza es más susceptible a perder sus propiedades resistivas al ser expuesta al fuego.

Los resultados obtenidos al evaluar el peso específico hacen evidente que las dos rocas evaluadas son de orígenes distintos, ya que por su formación la roca caliza posee una estructura menos porosa y más densa, resultado de procesos de compactación que hacen que la humedad no pueda albergarse en

gran cantidad en su estructura. Por otro lado la roca basáltica posee más poros donde la humedad puede ser contenida en mayor cantidad. Lo antes descrito es reflejado en las siguientes gráficas.

Figura 52. **Porcentaje de reducción del peso específico del hormigón con agregado grueso de caliza**

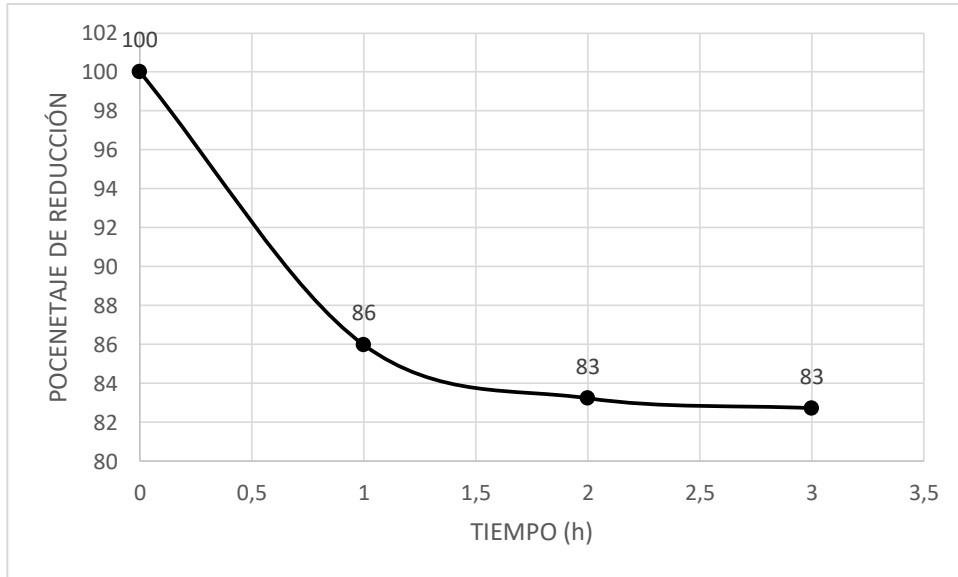


Fuente: elaboración propia.

Se observa que a pesar de que la roca caliza es más susceptible a perder sus propiedades resistivas, por su estructura aparenta ser más estable en cuanto al peso específico se refiere.

Las muestras con agregado grueso basáltico experimentaron una mayor pérdida de peso específico a pesar de que tuvieron una mayor tenacidad en cuanto a la resistencia a compresión se refiere, resultados que se pueden observar en el siguiente gráfico.

Figura 53. **Porcentaje de reducción del peso específico del hormigón con agregado grueso de basalto**



Fuente: elaboración propia.

4.11. **Análisis de resultados**

El hormigón expuesto al fuego sufre de cambios físicos y químicos durante todo el proceso de su exposición. Estos cambios ocurren principalmente en la pasta endurecida de cemento, pero pueden extenderse en el agregado a medida que el tiempo pasa y el hormigón permanece expuesto al fuego. Por eso el agregado toma un papel muy importante ya que determina la estabilidad térmica del hormigón.

Las figuras 50 y 51 muestran que el hormigón pierde resistencia a la compresión a medida que el tiempo pasa y este permanece expuesto al fuego. Estos resultados concuerdan con investigaciones realizadas en Guatemala

como los trabajos de graduación de Omar Flores, Pamela Chang y Julio Reinoso descritos en los antecedentes de esta investigación.

Pero no solo concuerdan con investigaciones nacionales, también, con internacionales como lo publicado en el boletín 38 de la Federación Internacional del Concreto Estructural en Europa donde han realizado estudios más avanzados de los cuales se fundamenta esta investigación en el capítulo 3.

Tabla XXV. **Variación absoluta y relativa de la resistencia a la compresión de hormigón con agregado grueso basáltico**

PROMEDIO (PSI)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN (PSI)	
0 hrs.	1 hrs.	ABSOLUTA	RELATIVA %
5 450,00	3 963,33	1 487	27
	2 hrs.	ABSOLUTA	RELATIVA %
	4 476,67	973	18
	3 hrs.	ABSOLUTA	RELATIVA %
	3 733,33	1 717	31

Fuente: elaboración propia.

En la figura 51 se puede observar que el hormigón con agregado grueso basáltico ha experimentado pérdida de resistencia a la compresión desde la primera hora de exposición; llegan hasta a una pérdida relativa del 31 % a la tercera hora completada de exposición, que fue el mayor tiempo tomado en esta investigación. En la tabla XXV figuran las variaciones absolutas y relativas del hormigón con agregado grueso basáltico.

La figura 50 muestra los resultados del hormigón con agregado grueso calizo, que también experimento pérdida de resistencia desde la primera hora expuesto, llegando a una pérdida relativa de 44 % a la tercera hora de exposición. En la tabla XXVI figuran las variaciones relativas y absolutas del hormigón con agregado grueso calizo.

Tabla XXVI. **Variación absoluta y relativa de la resistencia a la compresión de hormigón con agregado grueso calizo**

PROMEDIO (PSI)		VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGÓN (PSI)	
0 hrs.	1 hr.	ABSOLUTA	RELATIVA %
6 593,33	4 557	2 037	31
	2 hr.	ABSOLUTA	RELATIVA %
	3 790	2 803	43
	3 hr.	ABSOLUTA	RELATIVA %
	3 690	2 903	44

Fuente: elaboración propia.

Los resultados antes mencionados se deben a que los agregados utilizados poseen características diferentes por su proceso de formación en donde adquieren diferentes tipos de minerales. La caliza es una roca formada por carbonatos de calcio y otros minerales como el magnesio, sílice y fosfato; estos minerales tienen reacciones diferentes a los minerales de los cuales está formando el basalto como el hierro, magnesio, calcio, sílice y minerales ferromagnéticos.

La composición mineralógica de cada roca hace que tenga reacciones diferentes al ser expuesta a altas temperaturas. Como lo muestran los

resultados en las gráficas 50 y 51, el hormigón con agregado grueso calizo es el que experimenta mayor reducción que el hormigón con agregado basáltico. Los resultados concuerdan con lo expuesto en el capítulo 3 ya que allí se describe que el basalto es una roca con mayor estabilidad térmica que la caliza.

Los cambios en el peso específico del hormigón están relacionados con los cambios de peso, dilatación térmica y cambios en la porosidad. Un factor muy importante es el nivel de hidratación que tiene el hormigón previo a su exposición al fuego ya que a media que el hormigón pierde agua por evaporación se torna menos densa pero más frágil. La porosidad incrementa de forma no lineal con la temperatura debido a la ruptura de la microestructura generada por la deshidratación. Lo descrito en este párrafo es parte de los fundamentos teóricos en el capítulo 3.

La figura 53 muestra que el hormigón con agregado grueso basáltico ha perdido 14 % del peso específico desde la primera hora de exposición; para la tercera hora la pérdida ha sido constante. Este comportamiento merece atención, pues esto quiere decir que para ese tiempo el hormigón ya había liberado toda la humedad contenida.

En la figura 52 se pudo observar que el hormigón con agregado grueso calizo también experimentó pérdida de peso específico pero de menor magnitud, 4 % aproximadamente. Esta pérdida se mantuvo en la segunda hora pero en la tercera hora aumento 2 %. Este comportamiento al igual que el del agregado grueso basáltico también merece atención ya que evidencia que las rocas son de orígenes distintos.

La razón por la cual se ha mantenido una pérdida relativa del 4 % en la primera y segunda hora es debida a la estructura de formación de la roca caliza,

ya que por ser una roca que se formó por procesos de compactación, su porosidad no es considerable y eso hace que sea difícil que libere el agua contenida.

La diferencia que existe entre los dos agregados utilizados se debe a la porosidad de cada roca, ya que a más porosidad, mayor cantidad de agua se puede albergar en los poros; por lo tanto, el hormigón con agregado grueso basáltico que posee una mayor porosidad por su formación, tenía una mayor cantidad de agua a la hora de su exposición; en consecuencia, el peso específico disminuyó más que el hormigón con agregado grueso de caliza.

Un resultado cualitativo a analizar es la interacción entre el agregado y la pasta endurecida de cemento. En los tipos de fallas presentadas en todas las muestras se observó que del 100 % aproximadamente de los agregados que quedaban expuestos en la falla; el 75 % no presentaban un desprendimiento entre ellos y la pasta endurecida de cemento. Esto se debe a que durante el primer calentamiento, la pasta de cemento experimentó una expansión leve entre 80 °C y 100 °C mientras que el agua se liberaba. Esto es seguido por una contracción significativa a medida que el agua es liberada por el aumento de la temperatura. Por el contrario, los agregados comunes continúan expandiéndose arriba de 100 °C mientras que la pasta sufre contracción.

Se desarrolla un esfuerzo térmico diferencial que no puede ser soportado por las deformaciones elásticas ni la fluencia de los materiales. Por lo tanto, la pasta endurecida de cemento debería de empezar a fisurarse y a desprenderse del agregado aproximadamente a 100 °C. Efecto que sin duda ocurrió en las muestras de esta investigación ya que las temperaturas máximas alcanzadas estaban entre el rango de 400 °C – 450 °C. En el capítulo 3 de esta investigación describe que para los hormigones ensayados en la Federación

Internacional del Concreto en Europa, la deformación térmica es más expansiva para la caliza que para el basalto.

Otro efecto que se presentó fue el desprendimiento explosivo que llevó a la extracción de núcleos de los cilindros para determinar la resistencia a la compresión. El agua presente en los poros del agregado es evaporada y puede ser expulsada al calentarse, contribuyendo así a la formación de presión en los poros del hormigón. Esta presión es liberada de forma explosiva y es por eso que el hormigón expuesto al fuego lanza proyectiles de las capas superficiales de su misma estructura para liberar la presión en los poros. Agregados con alta porosidad como el basalto tienen a aumentar los desprendimientos explosivos ya que albergan mayor cantidad de agua en sus poros. Por otro lado, la caliza es una roca formada por procesos de compactación y sedimentación que la hace una roca poco porosa comparada con el basalto.

El tamaño del agregado es importante ya que ocupa más de 60 % del hormigón y mientras mayor sea el tamaño del agregado, el hormigón experimenta más desprendimientos explosivos.

CONCLUSIONES

1. Sin ninguna duda el hormigón experimenta pérdida de la resistencia a la compresión al ser expuesto al fuego, pero no se puede generalizar la proporción de esta pérdida ya que depende de varios factores como el tipo de agregado, el tipo de cemento y el nivel de hidratación del hormigón previo a la exposición. Un ejemplo claro de lo descrito en esta conclusión es el trabajo experimental de esta investigación ya que el hormigón presentó diferente magnitud de pérdida en los dos agregados evaluados. El objetivo de mencionar esto es que el hormigón posee variaciones en su concepción que dan como resultado diferentes hormigones que se comportan diferente ante la exposición al fuego.
2. La reducción de la resistencia a la compresión del hormigón se debe a cambios físicos y químicos que experimentan los agregados y la pasta endurecida de cemento a medida que la temperatura y el tiempo aumenten. Uno de los cambios físicos que experimenta es la pérdida de agua que conlleva a que el material se vuelva menos denso. Entre los cambios químicos se puede mencionar la transformación de encales hidráulicos en enlaces cerámicos que tornan el material más frágil. En general, los cambios físicos y químicos están en función del tipo de materia prima utilizada para elaborar el hormigón.
3. La falla presentada en la mayoría de cilindros fue de tipo columnar. Esto se debe a que las paredes expuestas de los cilindros fueron perdiendo sus capacidades resistivas. A medida que el tiempo pasaba el diámetro resistivo de los cilindros disminuía ya que las paredes perdían humedad

y su porosidad incrementaba, por eso los cilindros con mayor tiempo de exposición presentaron pérdidas de resistencia ya que el área que soportaba la carga era menor que el diámetro de los cilindros no expuestos.

4. A medida que el tiempo y la temperatura se incrementa, la pasta de cemento endurecida se expande hasta que el agua sea eliminada por completo; luego, se contrae mientras que el agregado dependiendo del tipo utilizado se expande. Esto da como resultado el desprendimiento del agregado de la pasta de cemento. Por inspección visual, se determinó que los agregados que quedaban expuestos en la falla de los cilindros ensayados, un 75 % no presentaba fracturas ya que por la diferencia de deformaciones térmicas entre el agregado y la pasta de cemento endurecida, los agregados se desprendían de la pasta de cemento deshidratada. Esto tuvo efecto cuando los cilindros se sometieron a esfuerzos de compresión donde el agregado y la pasta endurecida de cemento no trabajaron como uno solo.
5. De los agregados evaluados, el basalto fue el que desarrolló menos pérdida en la resistencia a la compresión. Esto sin duda, se debe a que el basalto es una roca con más estabilidad térmica. Como lo respalda el capítulo 3 de esta investigación. En cambio, la caliza por su contenido mineralógico presenta más reacciones químicas que debilita la resistencia a la compresión del hormigón.
6. En cuanto a resistencia a la compresión, se refiere el basalto presenta mejores resultados que la caliza pero sí se evalúa de una manera más integral la caliza tiende a ser más estable en cuando a la densidad y los desprendimiento explosivos. Esto se debe a la porosidad de ambas

rocas; el basalto por ser una roca con alto contenido de poros en su estructura puede albergar más agua que la caliza, por consiguiente, pierde más contenido de agua por evaporación y aumenta los desprendimientos explosivos ya que un hormigón con agregados de basalto presenta un nivel más alto de hidratación. Por otro lado, la caliza es una roca formada por la compactación de sedimentos y eso hace que su contenido de poros en su estructura sea mínimo y como resultado hace que el hormigón posea un nivel menor de hidratación.

RECOMENDACIONES

1. En esta investigación el hormigón no fue expuesto al fuego sosteniendo cargas y, según los fundamentos teóricos, el hormigón que sostiene cargas cuando es expuesto al fuego presenta un mejor comportamiento ya que las cargas mantienen presionada la microestructura del hormigón y evitan la formación de fisuras y el incremento de la porosidad.
2. El cemento utilizado en esta investigación fue del tipo 1 P. M., un cemento hidráulico mezclado con contenido de puzolanas que según la Federación Internacional del Concreto Estructural en Europa contrarresta los efectos causados en el hormigón por la temperatura. Otro punto que queda abierto es el comportamiento de los diferentes tipos de cemento bajo influencia de la temperatura.
3. Las muestras que se evaluaron fueron cilindros de hormigón pero, ¿qué pasaría si se evalúan elementos estructurales como columnas y vigas?, ya que estos elementos estructurales serían más representativos.
4. El hormigón utilizado no contenía ningún tipo de aditivo acelerante, retardante o fluidificante que pudiera tener otro tipo de reacción con la temperatura.
5. En cuanto a los métodos para estabilizar las reacciones negativas del hormigón con la temperatura se menciona la adición de fibras de polipropileno pero ¿qué pasaría si agregan fibras de acero?.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM. *Compressive strength of cylindrical concrete specimens*. USA: C 39 Annual Book, 1990. 270 p.
2. _____. *Making and curing concrete test specimens in the laboratory*. USA: C 192 Annual Book, 1990. 285 p.
3. Fédération Internationale du Béton (fib). *Fire desing of cocrete strutures – materials, structures and modelling*. Emiratos Arabes Unidos: Prentice Hall, 2007. 106 p.
4. FELIPE GUARÁ, Juan Francisco. *Evaluación del uso y desempeño de cementos mezclados UGC y de mampostería en morteros de levantado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 141 p.
5. FLORES, Omar. *Consideraciones sobre la resistencia al fuego en elementos de concreto*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 189 p.
6. GUZMÁN, Manuel. *Cálculo y comportamiento de estructuras de concreto y acero sometidas a incendios*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 159 p.

7. HERRERA VILLATORO, Ludwyg Cristóbal E. *Caracterización e investigación geológica de los materiales utilizados en la construcción civil en Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 221 p.
8. HOWEL, Williams; TURNER, Francis; GILBERT, Charles. *Petrografía, introducción al estudio de las rocas en secciones delgadas*. México: Centro Regional de Ayuda Técnica, 1968. 430 p
9. HUANG, Warter T.; GARCÍA DÍAZ, Rafael; ORELLANA ROMERO, Salvador. *Petrología*. México: Centro Regional de Ayuda Técnica, 1968. 546 p.
10. MOLINA HIGUEROS, Marco Antonio. *Materiales de construcción de ingeniería civil*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 143 p.
11. OATES, Joseph. *Lime and limestone chemistry and technology, production and uses*. Germany: Wiley – VCH, 1998. 455 p.
12. RUBIO, Ana María; POZO RODRÍGUEZ, Manuel; GONZÁLES CASADO, José Manuel. *Ciencias de la tierra, una introducción a la geología física*. 6a ed. Madrid, España: Prentice Hall, 1999. 616 p.