666.94.03
W429h
03691

SEMINARIO EDIFICACION

HORMIGON ARMADO ANTE EL FUEGO

FACULTAD DE ARTE Y TECNOLOGIA
DE
CHILE
BIBLIOTECA

PROFESOR GUIA
CARLOS MARTINEZ

ALUMNO
PETER WEISSER

VALPARAISO, 15 DE AGOSTO DE 1966.

15.11.72 Donación del autor

I N T R O D U C C I O N

Como alumno del último año de la Escuela de Arquitectura me permito afirmar que el conocimiento tecnológico de los materiales de construcción, permite la formación del arquitecto integral. Es indispensable para el profesional conocer cada uno de los materiales, obteniendo así una buena expresión formal, un criterio constructivo y estructural correcto, un afinamiento económico y un resultado general de calidad arquitectónica.

Entre los materiales básicos en la Arquitectura está el hormigón armado, el acero y la madera. Por ser entonces el hormigón armado un material de gran trascendencia, he elegido el tema " EL HORMIGON ARMADO ANTE EL FUEGO ", que además de la especialización, me da la oportunidad de un conocimiento general de él.

Respecto a la resistencia del hormigón armado ante el fuego, he escuchado generalmente como primera respuesta : " El hormigón armado es incombustible, por lo tanto, no

hay ningún peligro de su destrucción por incendios ".

Esto constituye un profundo error, ya que por cierto el hormigón armado no arde y es muy superior en resistencia al fuego que el acero y la madera, pero experimenta serias transformaciones en sus propiedades, con el aumento de las temperaturas.

P R O G R A M A S E M I N A R I O

H O R M I G O N A R M A D O A N T E E L F U E G O

A) INTRODUCCION

B) PROGRAMA

C) INCENDIOS : Consideraciones generales, causas, condiciones, riesgos, combustibilidad e incombustibilidad, temperaturas, clasificaciones y protecciones.

D) ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON ANTE EL FUEGO Y ALTAS TEMPERATURAS :

1) Examen analítico
2) Cemento
3) Agregados
4) Agua
5) Tensiones internas
6) Conductibilidad
7) Resistencia mecánica
8) Humos
9) Hormigones corrientes
   aislantes
   refractarios
10) Métodos de medición de daños causados por el fuego.

E) HORMIGON ARMADO

1) Hormigón armado corriente (aceros)
2) Hormigón liviano
3) Hormigón preesforzado
4) Ferrocemento.

F) EXPERIENCIAS

1) Incendio en Usina de Sorvirel (Francia)
2) Incendio en puente Bronte (Canadá).

G) ENSAYOS DE LABORATORIO

1) Pilares
2) Losas

H) ENSAYOS PROPIOS

I) CONCLUSIONES

J) FUENTES DE INFORMACION

I N C E N D I O S

CONSIDERACIONES GENERALES.

El problema de seguridad contra incendios es bastante complejo. Las causas de los incendios son numerosas, siendo difícil tomar protección contra todas ellas, debido esencialmente al imperativo económico. Es por ésto que se ha llegado a fijar un límite de riesgo del edificio, según sea su utilización. Es responsabilidad exclusiva del arquitecto planificar y proyectar con un criterio de protección ante el fuego, determinando sólo él si es necesario incurrir en gastos especiales para tal rubro.

Todo incendio tiene siempre sus características propias de tiempo y temperatura. La temperatura es determinada por las características de los materiales, muebles e inmuebles que lo componen. Las observaciones hechas en incendios reales indican como temperaturas medias una mínima de 815ºC y una máxima de 1400ºC durante el calor más intenso, que tiene un período aproximado de 80 minutos en la mayoría de los casos. Respecto al aumento de la temperatura en el tiempo, se ha llegado también a un

promedio, obtenido gracias a ensayos con termopares.

En ensayos efectuados en cámaras resistentes al fuego, se ha tratado de establecer la cantidad necesaria de combustible por m^2 de superficie de piso o tabique para mantener una combustión. En un ensayo* de 1 hora se consumieron de 98 a 146 Kg de combustible por m^2 y en 4 horas, el consumo fue de 293 Kg/m^2. Gran parte del calor desprendido se pierde, por la conductibilidad de muros y tabiques y por evaporación del agua libre de los materiales.

H. Ingberg hizo un estudio sobre la cantidad de combustible disponible, en caso de incendio, para diferentes utilizaciones de oficinas. Se provocaron incendios de distintos modos para estudiar la combustión lenta, la rápida y la propagación del fuego con pisos acabados combustibles e incombustibles, siendo una oficina igual a 5 Kg de combustible y los archivos igual a 30 Kg de combustible por m^2.

CAUSAS DE INCENDIO.

Si observamos el camino que recorre un

* Columbia University Testing Laboratory

incendio en forma analítica, vemos que en un principio aparece la causa del incendio, que es muy diferente al medio que lo extiende y, finalmente, el efecto o daño sobre el total afectado.

Se forma así : motivo
medio
efecto

Las causas o motivos son definidos como los elementos que originan una combustión. El medio son las substancias, que en presencia de los motivos, actúan respecto a su energía latente o combustibilidad. Los efectos son definidos como la susceptibilidad relativa del medio para producir perjuicios directos e indirectos del incendio.

" Centre Scientifique e Technique du Batiment " hizo un estudio de los orígenes de incendios recopilando 3.011 casos.

ORIGEN	Nº de casos totales 3.011		
no determinado	290	ORIGEN NO DETERMINADO	290
mechas mal apagadas	284		
cigarrillos mal apagados	284		
materias calientes en ignición	180		

ORIGEN	Nº de casos totales 3.011		
chimenea o conducto de humos	131		
estufa de calefacción central	52		
brasero de fuego	56		
horno de cocina	53		
radiador de gas	208	ORIGEN TERMICO	1623
fuego de herrería	3		
sorbonne	3		
horno industrial	21		
tostadores	4		
estufa o secados	9		
generadores	12		
locomotora a vapor	2		
motores o combustión interna	81		
mechero lámpara a soldar	78		
fuente luminosa de proyectoras	3	ORIGEN QUIMICO O BIOLOGICO	73 ~~63~~
calor solar	7		
oxidaciones diversas	63		
electricidad estática	6		
canalización eléctrica en Cu	348		
canalización eléctrica en Al	40	ORIGEN ELECTRICO	848
transformadores estáticos	23		
máquinas eléctricas rotativas	47		
aparatos eléct. y órganos divers.	384		
calentamiento por falta engrase	3		

ORIGEN Nº de casos totales 3.011

calentamiento por roce o frotamiento	11	ORIGEN MECANICO	56
chispas por roce o frotamiento	28		
explosiones de sobrepresión	14		
orígenes no clasificados	131	ORIG. NO CLASIF.	131

De acuerdo con el análisis anterior, tanto los motivos (que posteriormente entregan al medio la energía térmica), como los medios, van acompañados de otras condiciones que pueden acelerar o retardar la combustión.

Las condiciones o causas que participan en la combustión son :

1) Mala planificación. Tanto el arquitecto urbanista como el arquitecto proyectista de viviendas, deben considerar siempre el aspecto de riesgos de incendio.

2) Cambio de destino del recinto. Un edificio que ha sido construído de acuerdo a un determinado uso, para luego emplearse en otro, con presencia de materiales altamente combustibles, aumenta enormemente el riesgo.

3) Materiales del edificio muy combustibles. De acuerdo a la naturaleza de los materiales, dimensiones, proporciones y ubicación dentro del edificio, pueden fijarse valores cuantitativos del poder calorífico.

4) Presiones de aire. Por el desprendimiento de gases durante la combustión, se produce un aumento de presión en los recintos cerrados. El exceso de presión, rompe los cristales, dejando entrar aire fresco que aviva la combustión. Es posible construír conductos para solucionar tal problema.

5) Libre acceso de oxígeno. En el caso que haya libre acceso de aire, la combustión se hará más viva, ya que tiene mayor cantidad de oxígeno a su disposición. Se ha evaluado que un metro cúbico de aire contiene 0,216 m^3 de oxígeno, de los cuales participan 0,06 en la combustión. Esta cantidad de oxígeno mantiene la combustión de solo 40 gr de madera.

6) La mala protección o falta de ella. Aumenta el riesgo y la propagación rápida del incendio.

7) La mala protección automática o falta de ella. Constituye un aumento de riesgo.

RIESGOS DE INCENDIO.

Junto con las "causas de incendio" existe otro factor importante que son los "riesgos de incendio". En este último influye la función o destino del edificio.

CLASIFICACION DE LOS RIESGOS DE INCENDIO *

Clase General	Sub Clase	Observaciones
RIESGOS HUMANOS	RIESGO DE PANICO	En los locales que tienen más de 40 a 50 personas hay riesgo manifiesto de pánico.
	RIESGO DE APRISIONAMIENTO	En el caso de personas imposibilitadas, niños pequeños, presos y enfermos hay riesgo de que los ocupantes no puedan abandonar el local, en caso de incendio.
	RIESGO INDUSTRIAL	En algunos locales, el riesgo de incendio es grave a consecuencia de las características de trabajo.
	RIESGO NORMAL	Ocupantes normales y en poco número. Ningún riesgo de propagación rápida.

* Cadiergues " Aislamiento y Protección de las Construcciones "

INCOMBUSTIBILIDAD - COMBUSTIBILIDAD.

Sabemos que todos los materiales resisten al fuego dentro de ciertos límites, por lo que, en general, se adopta en lugar de incombustibilidad el término resistencia al fuego, la que puede ser en un mayor o menor grado.

Podría definirse la incombustibilidad como el grado retardatario del fuego.

El término incombustibilidad se aplica a los materiales que ni arden, ni sufren combustión, o que no se descomponen emitiendo gases combustibles hasta alcanzar los 1200ºC. El desprendimiento de calor del material no debe alcanzar a una potencia calorífica mayor a 500 Kcal/Kg. Son incombustibles las piedras naturales o artificiales, cemento, ladrillos, cerámica, pizarra, metales pesados y hormigón.

Se entiende por combustión, la combinación de substancias oxidables con un agente oxidante o cualquier cambio químico acompañado de producción de calor y luz.

Es importante recalcar, por lo tanto, que el hormigón no es un material combustible, de mo-

do que el estudio estará dirigido desde el punto de vista de los efectos producidos por los motivos y medios, sobre éste.

Para la mayor o menor ~~conductibilidad~~ combustibilidad de los materiales deben considerarse :

la facilidad con que la materia se enciende o arde

la rapidez de la combustión

la intensidad de la combustión

los efectos

Según estos requisitos hay un mayor o menor grado de combustibilidad, que permite clasificar los materiales combustibles en 3 categorías*:

a) Materiales no inflamables. Son los que, presentados en las condiciones en que se utilizan, desnudos o revestidos, sueltos o mezclados, y sometidos a la acción de determinadas fuentes de calor, definidas en un orden posterior, no se modifican, o cuya descomposición se efectúa sin producción de llamas o de gases inflamables y sin desprendimiento apreciable de calor, y cesa desde el momento que se suprime la fuente de calor.

* Cadiergues "Aislación y Protección de Construcciones"

b) Materiales inflamables. No cumplen con las condiciones anteriores y se clasifican en 3 categorías :

Difícilmente inflamables: la combustión cesa al suprimir la fuente de calor.

Medianamente inflamables: la combustión persiste por algún tiempo al suprimir la fuente de calor.

Fácilmente inflamables: la combustión persiste, se propaga en varias direcciones y llega a la destrucción total.

c) Materiales de descomposición peligrosa.

Son aquellos que, independientemente de las manifestaciones anteriores, emiten humos con gases nocivos.

POTENCIA CALORIFICA.

Existen materiales, que al arder, desprenden más calor que otros. Esta propiedad de mayor o menor desprendimiento de calor se llama potencia calorífica y se puede definir como el número de calorías desprendidas en la combustión de un kilógramo de material.

Se dan a continuación algunos valores de potencia calorífica de distintos materiales :

	Kcal/Kg
Alcohol	13.000
Algodón	7.000
Caucho	15.000
Madera	8.000
Papel, celulosa	7.000
Productos bitumosos y asfálticos	17.000

El hormigón y el hormigón armado tienen una potencia calorífica de 0, ya que son e incombustibles.

Sería equivocado medir el riesgo de un incendio por la potencia calorífica global de un edificio. Es necesario agregar para ello, otros factores que son:

S = superficie m^2 y

P = peso del material

C = potencia calorífica

se obtiene así el potencial calorífico del edificio

$$\frac{P \cdot C}{S} \quad \left[Kcal/m^2 \right]$$

CONDICIONES DE ENSAYOS.

Una de las características importantes que hay que considerar en la resistencia al fuego, es su resistencia mecánica. No es suficiente que el material resista bien ante la combustión, sino que además debe mantener la resistencia mecánica.

Para el análisis de los materiales ante el fuego, bajo igualdad de condiciones, se ha normalizado el método de ensayo. Este ensayo consiste en ir aumentando la temperatura con el tiempo, obteniendo gráficamente una curva, que se aproxima a un promedio de incendio corriente. Ver figura Nº 1.

Con este sistema se determinan grados A, B, C, D y E que corresponden al máximo de temperatura y tiempo que un material resiste, sin perder sus cualidades físicas y químicas. El ensayo es completado, finalmente, con un enfriamiento brusco de agua fría a presión.

Para el hormigón y hormigón armado se ha elaborado al respecto el siguiente cuadro*:

*Cadiergues "Aislación y Protección de Construcciones"

GRADO DE RESIST.

AL FUEGO

	A	B	C	D	E
	cm	cm	cm	cm	cm
Hormigón armado en estructura sustentante (espesor de protección de armaduras).	10	6	4	3	2
Hormigones en paredes y tabiques (espesor del muro).	20	15	10	8	7
Hormigón normal en paredes sin revoques (espesor muros)	-	-	10	8	6
Hormigón normal en paredes con revoque en las 2 caras (espesor muros).	-	-	10	6	5
Hormigón de escorias en paredes sin revoques.	-	-	10	8	6
Hormigón de escorias en paredes con revoque en 2 caras.	-	10	8	6	5
Hormigones huecos en paredes con revoques (espesor muro).	-	22	11	8	6
Hormigón hueco de escoria en paredes con revoques.	-	20	10	6	-
Hormigón armado en losas (espesor mínimo losa).	18	15	12	10	9
Hormigón armado en losas (protección mínima de acero).	-	2,5	2	1,5	1

CLASIFICACION DE LOS EDIFICIOS.

En un edificio el potencial calorífico global puede ser bajo, medio o alto.*

*Cadiergues " Aislamiento y Protección de Construcciones "

a) El potencial calorífico bajo es el que no excede en término medio de 250.000 Kcal/m^2 en cada compartimento, pudiendo alcanzar en algunos locales hasta 500.000 Kcal/m^2, a condición de que estos locales estén aislados.

b) El potencial calorífico medio es el que, en término medio, vale de 250.000 a 500.000 Kcal/m^2 en cada compartimento, no excediendo en algunos locales a proteger, de 1.000.000 Kcal/m^2.

c) El potencial calorífico alto es el que en término medio vale 500.000 a 1.000.000 Kcal/m^2, no excediendo en algunos locales a proteger, de 2.000.000 Kcal/m^2

Junto con el factor potencial calorífico del edificio, debe considerarse el riesgo humano.

En base al grado de resistencia y al potencial calorífico global, se ha obtenido el siguiente cuadro sobre clasificaciones de materiales y grados de resistencia al fuego.

CUADRO SOBRE CLASIFICACIONES DE MATERIALES Y GRADO DE RESISTENCIA AL FUEGO

CATEGORIA DEL EDIFICIO	GRADO DE RESIST.								CLASE DEL EDIFICIO		VARIOS PISOS	
	PAREDES				LOSAS ESCALERAS	CONDUCTOS		CUBIERTAS	POTENCIAL CALORIFICO	RIESGO	SUP. MAXIMA CON SPRINKLER m^2	SUP. MAXIMA SIN SPRINKLER m^2
	MEDIANERA	EXTERIOR	DIVISORIA	DE OTRA CLASE		$> 10\ m^3$	$< 10\ m^3$					
1	B	B	B	B	B	B	C	B	ELEVADO	NORMAL	4000	1000
										ANORMAL	6000	1000
											4000	1000
											6000	1000
									MEDIO	NORMAL	4000	1000
											6000	1000
										ANORMAL	4000	1000
											6000	1000
									BAJO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	4000	1000
											6000	1000
2	B	C	C	C	C	C	D	C	ELEVADO	NORMAL	—	750
										ANORMAL	—	750
									MEDIO	NORMAL	4000	1000
											6000	1000
										ANORMAL	4000	1000
											6000	1000
		B	B	B	B	B	C	B	BAJO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	4000	1000
											6000	1000
3	B	C	C	D	D	D	D	D cub. incombus.	ELEVADO	NORMAL	—	700
										ANORMAL	—	—
									MEDIO	NORMAL	—	700
										ANORMAL	—	700
		B	B	C	C	C		est.	BAJO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	4000	1000
											6000	1000
4	B	C	C	D	E	E	E	est. madera	ELEVADO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—
									MEDIO	NORMAL	—	700
										ANORMAL	—	—
		B	B	C	C	C	D		BAJO	NORMAL	—	700
										ANORMAL	—	700
5	B	C	C	B	—	—	—	cubierta madera	ELEVADO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—
									MEDIO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—
		B	B						BAJO	NORMAL	—	700
										ANORMAL	—	700
6	B	—	C	—	—	—	—	cubierta metalica	ELEVADO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—
			B						MEDIO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—
									BAJO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—
7	B	—	C	—	—	—	—		ELEVADO	NORMAL	—	—
			B							ANORMAL	—	—
									MEDIO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—
									BAJO	NORMAL	—	—
										ANORMAL	—	—

P R O T E C C I O N D E L A S E S T R U C T U R A S D E H O R M I G O N A R M A D O C O N T R A E L F U E G O .

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo Incendios, para lograr una mayor resistencia al fuego en las estructuras de hormigón armado, es necesario :

1) Proteger las armaduras del hormigón armado. Según sea el espesor de protección obtenemos diferentes grados de resistencias.

	A	B	C	D	E	
Hormigón armado	10	6	4	3	2	cm

2) Si se requiere de hormigones de alta resistencia al fuego (sobre 600ºC), es necesario el uso de cementos aluminosos y áridos con contenido elevado de alúminas y una granulometría determinada.

Al referirse sobre la resistencia de los hormigones armados ante el fuego debe tratarse siempre el elemento que éste forma sea losa, pilar, viga o muro, para conocer así sus dimensiones.

Existen, paralelamente a estos factores de protección, otros externos al material mismo, que por tratarse de una especialidad fuera del tema, sólo se enumerarán.

En primer lugar existe una protección pública o municipal que está formada por bomberos, alarmas, grifos, policías y reglamentos.

En segundo lugar encontramos la protección propia o individual, que consiste en instalaciones de mecanismos automáticos. Entre éstos tenemos la alarma automática, sistemas rociadores o irrigadores automáticos, los tubos verticales de alimentación de agua, las bombas de agua y los extinguidores.

Junto con todo este equipo de seguridades contra incendios, tiene también mucha importancia el criterio del arquitecto que efectúa el proyecto, pudiendo incorporar vías de escape, muros pantallas o cortafuegos, puertas cortafuegos, etc., en el caso que fuese necesario.

E X A M E N A N A L I T I C O D E L A E S - T R U C T U R A I N T E R N A D E L H O R - M I G O N .

Para facilitar el estudio de los hormigones ante el fuego, es necesario un análisis previo sobre la constitución y composición estructural del hormigón y luego una investigación de los efectos térmicos sobre éste.

Al respecto recientemente Baker* ha elaborado una interesante hipótesis, que ha sido aceptada por los institutos de investigaciones correspondientes como valedera, desde el punto de vista cualitativo.

Baker sugirió que la estructura de un hormigón bien compactado puede representarse por medio de una estructura de barras articuladas, que representan la acción soldadora del mortero, y cuyo agregado grueso serían los puntos de enlace articulados de las barras. Este concepto de enrejado se basa en la hipótesis que la carga se transmite en el concreto por la interacción de las partículas de agregados, por empuje directo en el mortero existente entre ellas. El empuje de los agregados forma un anillo de empuje que se estabiliza por la tensión

*"Magazine of Concrete Research"

fig – 1

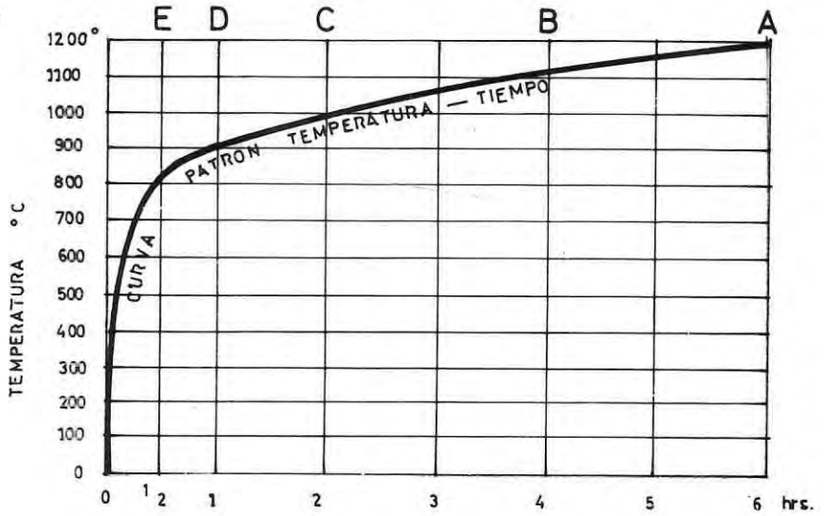


GRAFICO SISTEMA ENSAYO DE MATERIALES ANTE EL FUEGO

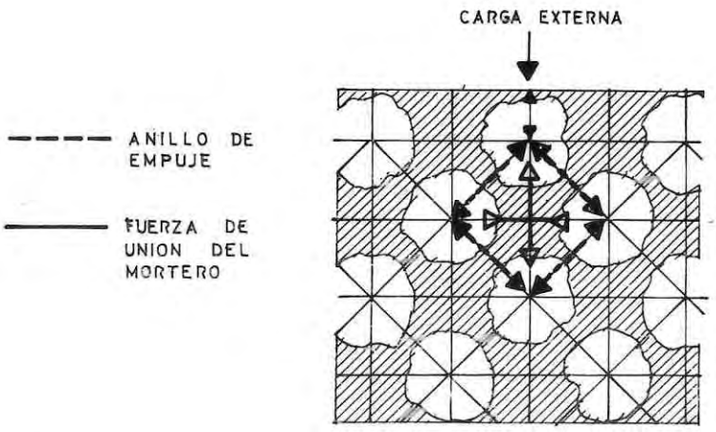


fig – 2

CUADRO REPRESENTA= CION IDEALIZADA DEL HORMIGON

del mortero.

En la figura 2 las líneas inclinadas representan los empujes del agregado, mientras que las horizontales y verticales representan la unión del mortero.

Este sistema de enrejado se puede representar en formas similares que simulan las diferentes características de los hormigones.

En la figura Nº 3 se representa un trozo de concreto por un gran número de barras, que forman el enrejado o unión del agregado grueso.

El criterio de ruptura bajo carga se explica aquí por tensiones excesivas en algunas uniones de mortero. Puede también ocurrir lo contrario, es decir, que falle el agregado por ser débil. Esto se representa en el enrejado por falla en los puntos de unión en las barras. Otra posibilidad sería que el concreto falle por ruptura o pulverización del mortero, si el agregado es excesivamente resistente y la muestra se ha ensayado en una compresión triaxial.

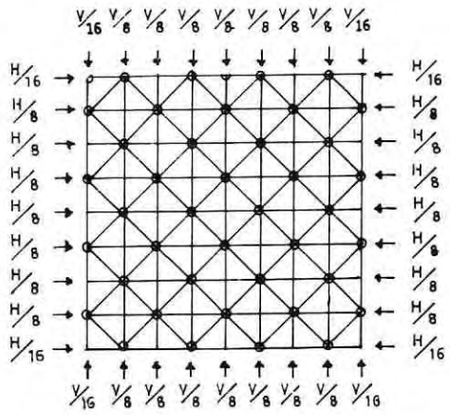
EFECTOS TERMICOS

Cuando una pasta de cemento es calentada, primero se expande hasta eliminar la humedad capilar (agua libre). Al continuar aún el calentamiento se produce contracción y hay pérdida de agua de los compuestos hidratados (ver capítulo agua ante temperaturas), llegando la fuerza de tensión a 0. Esto se explica claramente en el gráfico Nº 4, en el cual, para la pasta de cemento hay en un comienzo tensiones internas causadas por la expansión, que con el gradual aumento de la temperatura se transforma en contracción. Esta contracción contrarresta la expansión hasta anularla, resultando la tensión interna igual a 0, para transformarse posteriormente en una tensión interna negativa. La contracción continúa hasta que la deshidratación se haga completa, es entonces cuando la pasta de cemento comienza nuevamente a expandirse.

Si esta pasta de cemento es calentada a temperaturas sobre los 800ºC y luego es enfriada, repitiéndose este proceso sucesivamente, podemos obtener una conclusión importante. En sucesivos calentamientos y enfriamientos el valor de tensión de expansión durante el calen-

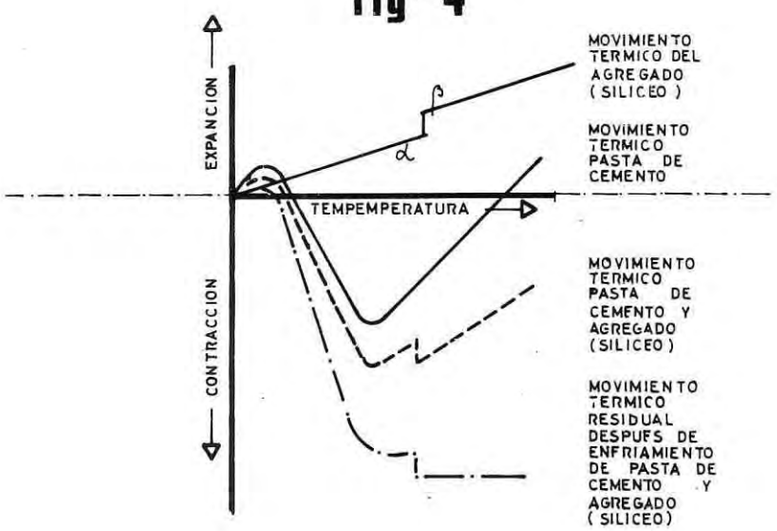
2

fig-3



CUADRO DE REPRESENTACION IDEALIZADA DE LA ESTRUCTURA DEL HORMIGON

fig-4



MOVIMIENTO TERMICO DURANTE CALENTAMIENTO CONTINUO

tamiento, es menor que el valor de tensión de contracción del último enfriamiento.

Esto implica que una pasta de cemento que es calentada por encima de cierta temperatura, tendrá en la etapa de enfriamiento una tensión mayor que cualquiera que se presente durante el calentamiento. Este fenómeno de tensión, una vez retirado el calor, es más peligroso que el anterior y se denomina tensión residual. (Ver figura 4).

El gráfico 4 representa en el agregado, un salto en el cambio de volumen que se debe a la transformación del cuarzo α en β. La figura nos indica, además, que a mayor cantidad de cemento hay mayor contracción, resultando mayor la pérdida de resistencia. Respecto a la temperatura, mientras más alta sea, es mayor la contracción y resulta mayor la pérdida de resistencia. El movimiento térmico reversible de la pasta de cemento es mayor que la del agregado, produciéndose por lo tanto siempre diferencias de tensiones, que causan también en el enfriamiento reducciones de resistencias adicionales o residuales.

El efecto térmico de variar las condiciones de volumen de los constituyentes del concre-

to y el comportamiento distinto para cada uno de ellos, nos hace ver que hay una incompatibilidad entre temperatura y resistencia mecánica. El problema es entonces buscar constituyentes del concreto que permanezcan estables con las diferentes temperaturas.

Hasta ahora las tensiones de contracción en el mortero se han supuesto iguales en cualquier punto del concreto. En la práctica, estas condiciones se presentan después que el concreto haya sido mantenido bajo una temperatura constante por un período largo de tiempo. Esta particularidad del hormigón, de ir calentándose a partir del punto de aplicación de la temperatura, se llama gradiente.

La existencia del gradiente involucra diferencias de temperatura que producen una distribución de contracciones bien determinada graficada en la figura 5.ª Cuando la temperatura es finalmente mantenida constante, los valores de tensión de contracción se igualan en toda la muestra, desapareciendo el gradiente térmico. (Ver capítulo de conductibilidad térmica).

Si empleamos nuevamente el gráfico de la

REF. MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH. Nº 43

fig – 5

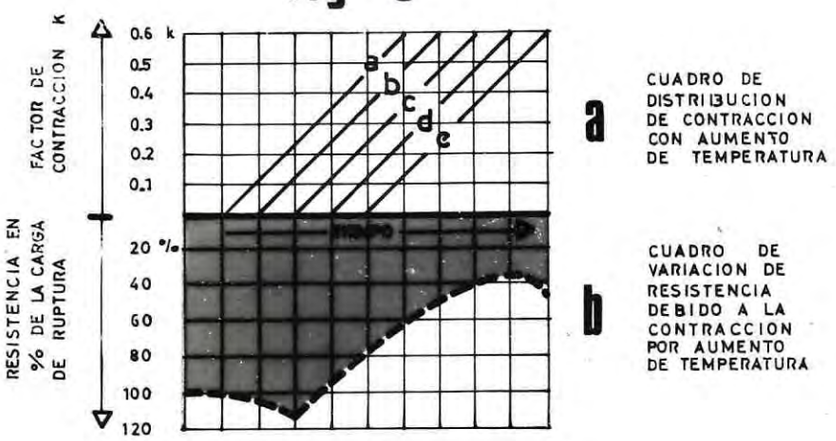
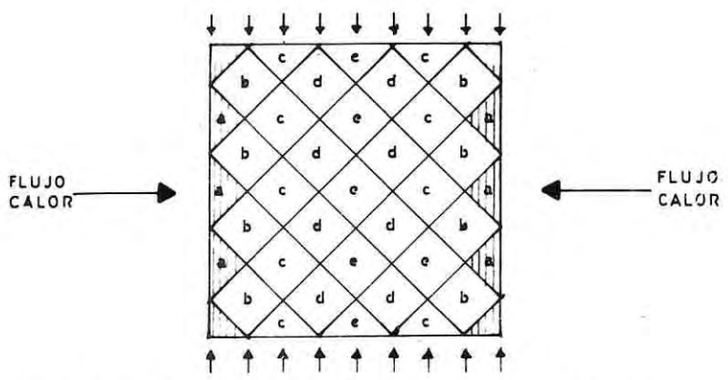


fig – 5c



CUADRO PENETRACION DE CONTRACCION
SEGUN FIG. 5a

figura 2, y se le somete a una carga idealizada (figura 5c), observamos que la resistencia final con el aumento de la temperatura es inicialmente aumentada por la contracción de las uniones de mortero de la superficie, y que finalmente se reducirá a medida que la contracción se extienda a todo el concreto (figura 5b).

Sabemos que un horrigón calentado a altas temperaturas pierde resistencia. También sabemos que si éste es enfriado bruscamente la pérdida de resistencia es aún mayor. Pero ¿qué sucede con el hormigón si se deja después, por un tiempo, en un ambiente húmedo?

En estas condiciones la pasta de cemento se expandirá penetrando el agua por capilaridad la que formará nuevamente la hidratación del cemento. Esta vuelta de formación del poder aglomerante es en la práctica mínima, cumpliéndose sólo en la superficie.

En la figura 5a se explica el factor de contracción que es decreciente hacia el interior, siendo "a" la fila vertical superficial de la figura 5c y "e" la fila más interna. Si, por ejemplo, "a" tiene un factor de

contracción K= 0,5; "b" tendrá 0,35; "c" 0,2; "d" 0,1 y "e" 0.

C E M E N T O D E L H O R M I G O N
F R E N T E A L A S T E M P E R A T U R A S

En los hormigones sometidos a fuertes temperaturas, el cemento sufre una gradual pérdida de su poder aglomerante. Se efectúa en él el proceso inverso de adherencia hidráulica, que es la deshidratación (pérdida de agua por calor), destruyéndose la cohesión de los hormigones, quedando un hormigón disgregado.

En general todas las diferencias de comportamiento ante las temperaturas de los distintos cementos, se deben a sus diferentes constituciones mineralógicas. En el cuadro a continuación se describen los principales componentes para cementos Portland y Aluminosos. En él se aprecia la gran cantidad de CaO que posee el cemento Portland, factor que es importante para la hidratación. En el cemento aluminoso hay poca cantidad de CaO, siendo reemplazada su función aglomerante por la alúmina.

CUADRO ANALITICO DE CEMENTOS *

	Cemento Portland Corriente	Cemento Portland Super	Cemento Aluminoso
Sílica SiO2	21,20	20,67	5,04
Oxido férrico Fe2O3	1,75	1,67	16,18
Alúmina Al2O3	5,46	5,79	41,55
Oxido calcio CaO	64,30	64,56	37,47
Oxido magnesio MgO	1,07	1,07	0,49
Sulfatos trióxidos SO3	2,39	2,25	0,03
Pérdida en ignición 0 - 105ºC	0,36	0,45	0,05
Pérdida en ignición 105 - 1000ºC	2,38	1,93	0,46
Oxido sodio Na2O	0,14	0,21	0,07
Oxido potasio K2O	0,55	0,70	0,13
T O T A L	99,60	99,40	---
Carbonatos libres CaO	2,21	2,02	0,10

El fenómeno químico de hidratación del cemento Portland y aluminoso, y luego el proceso termo-químico de deshidratación se explican por lo siguiente:

CEMENTO PORTLAND.

Hidratación. Este cemento está formado

* " Magazine of Concrete Research "

por un gran número de componentes los cuales, en contacto con el agua, se endurecen.

Todos los componentes del cemento Portland están deshidratados (anhidros) pero, al entrar en contacto con el agua, son atacados por ésta formando los compuestos hidratados. Se forman temporalmente soluciones inestables y sobresaturadas que gradualmente depositan su exceso en sólido, llegando al equilibrio. La velocidad de ataque y el tiempo en que permanece la solución sobresaturada depende tanto del estado físico del cemento, como de su composición química.

La naturaleza de la acción química del agua se puede ilustrar mejor se consideramos la hidratación del $3CaO \cdot SiO2$

$$3CaO \cdot SiO2 + \text{agua} \longrightarrow Ca(OH)2 + xCaO \cdot ySiO2 \cdot \text{agua}$$

Cuando la solución está saturada de $Ca(OH)2$, continúa aún la hidratación que forma luego los cristales de hidróxido de calcio.

Deshidratación. Calentando el cemento Portland primero se expande, por la dilatación normal, enseguida se contrae por la salida del agua libre del cemento a los 100º - 150ºC

de temperatura.

El cemento Portland hidratado, que contiene gran cantidad de $Ca(OH)_2$, pierde el agua químicamente combinada a los 400ºC produciéndose CaO. Este CaO, en contacto con el agua o aire húmedo, una vez enfriado, vuelve a formar $Ca(OH)_2$ acompañado de expansión de volumen.

CEMENTO ALUMINOSO.

Hidratación. Sus componentes se hallan deshidratados (anhidros), al combinarse con el agua forman una solución inestable sobresaturada de $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$ que se transforma gradualmente en una fase estable:

$$CaO \cdot Al_2O_3 \longrightarrow CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$$

$$\downarrow$$

$$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O + Al_2O_3 \cdot agua$$

$$\downarrow$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + Al_2O_3 \cdot agua$$

Deshidratación. El agua libre es eliminada entre los 100 a 150ºC. A partir de los 300ºC es eliminada el agua químicamente combinada, proceso que se concluye recién a los 1000ºC. En esta fase la deshidratación, a diferencia del cemento Portland, no deja CaO libre.

Cuando el poder aglomerante del cemento aluminoso ha sido debilitado considerablemente por la temperatura (1000ºC), nace una ADHERENCIA CERAMICA, produciéndose un nuevo compuesto entre el cemento y la arena fina con un contenido de alúmina más elevado.

Los cementos aluminosos sufren dilatación hasta los 200ºC. Después, hasta los 500ºC se produce una retracción, fenómeno que se explica ya que ha habido una deshidratación. De los 500ºC a los 800ºC experimentan dilatación y finalmente, debido a la combinación química del aluminato del cemento con el árido fino, se produce una retracción.

El punto de fusión de sus componentes químicos es el siguiente:*

	FUSION
$3CaO \cdot 5Al_2O_3$	1720ºC
$CaO \cdot Al_2O_3$	1600ºC
$5CaO \cdot 3Al_2O_3$	1455ºC
$3CaO \cdot Al_2O_3$	1535ºC
$SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2CaO$	1590ºC
$Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 4CaO$	1415ºC

En el gráfico 5d se puede observar que durante el período de deshidratación, el ce-

* "Acción del calor sobre los hormigones" R. Mallol F.

mento aluminoso sufre una pérdida de su resistencia mecánica, que luego la recupera, para volver a perderla lentamente a partir de los 800ºC.

En el mortero con cemento Portland y agregados silíceos se registra, en cambio, una pérdida de resistencia que forma una curva descendiente continua.

L O S A G R E G A D O S F R E N T E A L A S T E M P E R A T U R A S

Los agregados son uno de los factores determinantes para una mayor o menor resistencia térmica del hormigón.

Con el objeto de llegar a conclusiones prácticas analizaremos los siguientes agregados:

Caliza : ($CaCO_3$) Roca sedimentaria que contiene carbonato de calcio y magnesio en la proporción de un 50% del conjunto. Si el carbonato es de calcita se llama caliza calcítica; si también contiene dolomita: caliza dolomítica; o roca dolomítica si se halla ausente la calcita. Se encuentran, además, las calizas arcillosas y silíceas.

Granito : Su origen es la roca ígnea y tiene una estructura cristalina compuesta de cuarzo megascópico en un 25%, feldespatos, mica y hornablenda. Con las temperaturas sobre los 500ºC tiene tendencia a quebrarse, agrietarse y exfoliarse.

Basalto : Es de origen ígneo, su estructura de grano es más fina que el granito y su composición mineralógica es: feldespatos y piroxenos pudiendo o no contener olivino. Presenta una textura porfírica, es decir, contiene cristales aislados más grandes que los constituyentes de la masa fundamental en que se hallan empotrados.

Silíceos : Su origen es la roca arenisca. Son duros y están compuestos principalmente por cuarzo cementado y sílica amorfa. Con las temperaturas sobre los 500ºC tienen tendencia a quebrarse y presentar roturas en el hormigón. Es una piedra de silicato de calcio y alúmina expansionada en aproximadamente cuarenta veces su volumen primitivo. Su temperatura de fusión se encuentra, sin embargo, fuera de las temperaturas de incendios.

Escoria : Agregado artificial obtenido del alto horno durante la producción de fierro colado. Su composición mineralógica es primordialmente silicatos de aluminio y calcio. Deben rechazarse las escorias fácilmente de-

sintegrables y aquellas que contengan más de un 0,5% de sulfatos.

En los agregados, para obtener una buena resistencia al fuego, en especial a las altas temperaturas, debe considerarse su dilatación térmica.

En el gráfico Nº 6 podemos observar las diferentes dilataciones según el tipo de agregado.

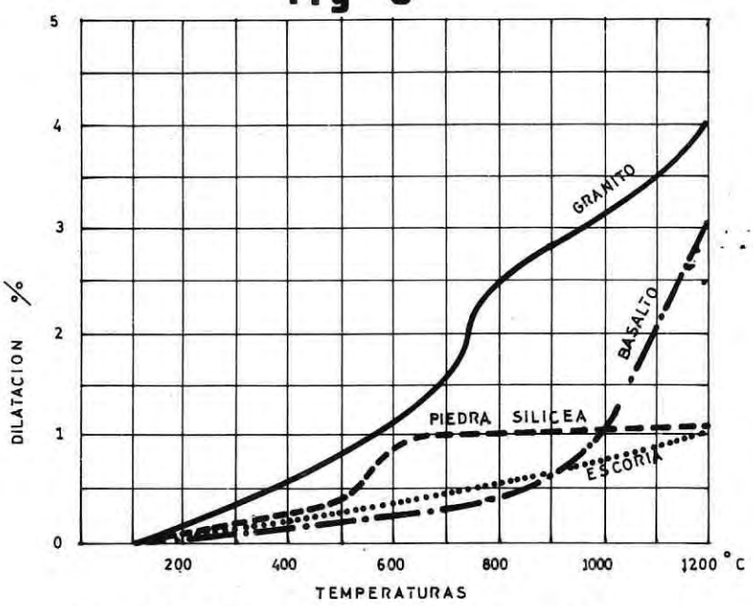
Deduciendo del mismo gráfico vemos que la menor diferencia de dilatación entre los 100ºC a 1200ºC la ha obtenido la escoria, que es de un 1%. Este hecho es de importancia ya que a menor diferencia de dilatación o simplemente a menor dilatación por aumento de temperatura se obtiene una composición interna de la masa del hormigón mucho más homogénea. A menor dilatación hay menor cantidad de tensiones internas.

Se observa también que la dilatación no es constante al subir la temperatura: a mayor temperatura mayor porcentaje de dilatación.

Sin embargo, en algunos casos el calor

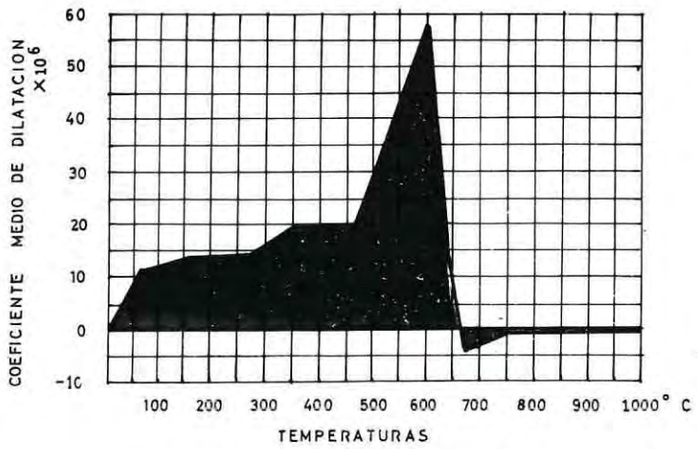
REF. ACCION DEL CALOR SOBRE LOS HORMIGONES
" R. MALLOL "

fig-6



DILATACION TERMICA DE LOS AGREGADOS

fig-7



CUADRO DILATACION DEL CUARZO

puede originar transformaciones alotrópicas, que intervienen directamente en la dilatación del árido. Se entiende por transformación alotrópica la característica de un elemento de presentar en dos o más formas su ordenación interna, sea en estado sólido, líquido o gaseoso. En los áridos silíceos existe el cuarzo que presenta este fenómeno. Su dilatación no se mantiene proporcional a la temperatura, convirtiéndose inclusive en contracción.

En el gráfico Nº 7 se observa que a partir de los 600º grados hay una total reducción de dilatación que llega a la contracción. Este fenómeno térmico es de mucha importancia para el comportamiento homogéneo del hormigón, que en este caso es totalmente perjudicial.

El árido presenta una temperatura límite para su resistencia, que anotamos en el gráfico Nº 8. En este caso la resistencia no es mecánica; se refiere a la resistencia de disgregación o fusión del árido ante temperatura.

Se han incluído junto al gráfico Nº 8 los pesos específicos de los agregados. Observamos que a menor peso específico hay una mayor resistencia al fuego, lo que significa una rela-

ción inversa, pero que no es proporcional ya que las líneas "1" deberían ser paralelas entre sí o convergentes a un mismo punto.

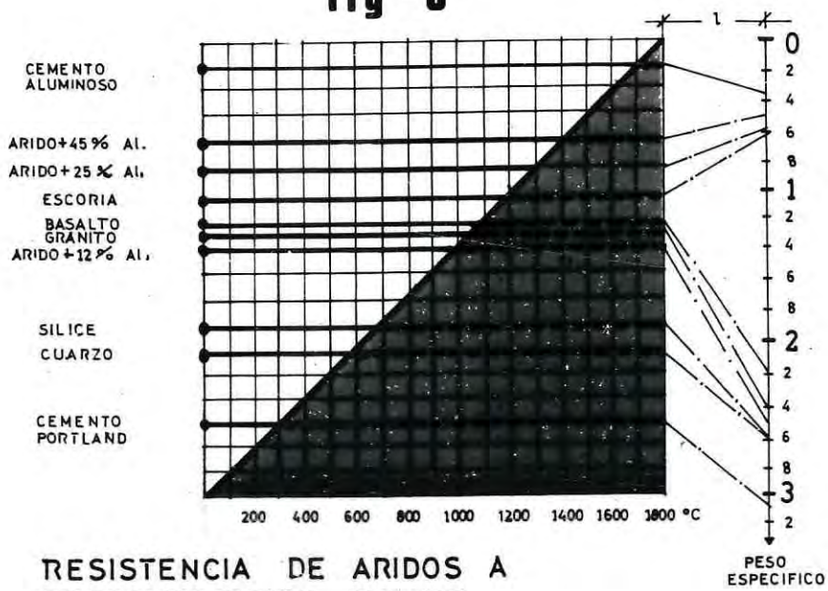
Al tratar más adelante la resistencia mecánica de los hormigones ante el calor, veremos que es inversa al peso específico y al aumento de temperatura.

Los agregados, de acuerdo a lo expuesto en los cementos aluminosos, con una temperatura de 800ºC forman una combinación nueva perdiendo la adherencia hidráulica. Esta nueva adherencia, que es cerámica, se hace posible con la presencia del agregado, que requiere de dos condiciones fundamentales:

1) Condición química. El agregado debe contener los elementos necesarios para la adherencia cerámica, que son las alúminas. Entre los 1000ºC a 1300ºC se requiere de un 12% a 44% de alúmina, de los 1300ºC en adelante se necesita un porcentaje todavía mayor.

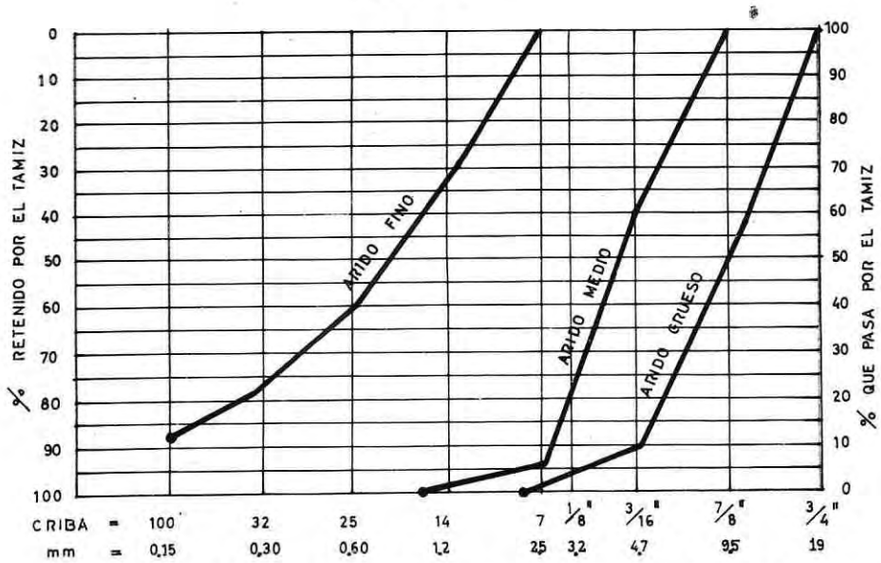
2) Condición granulométrica. Para la adherencia cerámica debe existir el agregado fino registrado en el cuadro Nº 9, que es el que se combina con el cemento aluminoso formando la nueva adherencia a los 1000ºC.

fig-8



RESISTENCIA DE ARIDOS A DESCOMPOSICION QUIMICA

fig-9



GRANULOMETRIA DE ARIDOS PARA HORMIGONES REFRACTARIOS

CONDUCTIBILIDAD TERMICA. Con una buena conductibilidad térmica de los áridos, resultará un hormigón de buena conductibilidad térmica. La conductibilidad en los áridos es directa a la resistencia mecánica y al peso específico. Para un hormigón de mejor resistencia al fuego se necesita una mala conductibilidad. Se darán mayores detalles al tratar conductibilidad térmica y gradiente de los hormigones.

AGUA DEL ARIDO. En el árido no se produce deshidratación, solamente hay pérdida del agua físicamente combinada según sea la tensión superficial del árido. El agua absorbida, que se encuentra en el interior del árido (saturación), y el agua físicamente combinada, son perdidas por el agregado a los 100ºC. A menor cantidad de agua, es menor la conductibilidad térmica.

Breve resumen de las condiciones que deben presentar los áridos de hormigones sometidos al fuego:

Dilatación: debe ser lo más pequeña y horogénea posible para las diferentes temperaturas.

Granulometría: es importante la presencia del árido fino para el proceso de adhe-

rencia cerámica.

Composición química: Los agregados deben contener alúmina para que se efectúe la adherencia cerámica. De los agregados empleados en hormigones corrientes, los más apropiados son la dolerita y el basalto. En cambio, los agregados calizos son desfavorables ya que se expanden continuamente hasta los 900ºC, produciéndose la descomposición y liberación de dióxido de carbono. El cuarzo se presenta también desfavorable por su permanente expansión, que al llegar a los 573ºC se hace violenta por el cambio alotrópico de cuarzo α en β.

Entre los agregados livianos encontramos corindón, cromita, silimanita, magnesita, bauxita y vermiculita que resisten perfectamente hasta los 1700ºC. La escoria es de excelente resistencia al fuego pero no forma la adherencia cerámica por falta de alúmina. Los hormigones formados con estos agregados constituyen los hormigones refractarios.

Resistencia al fuego: Su resistencia al fuego y temperaturas debe ser lo más alta

posible. Mientras más alto el punto de fusión o disgregación, es más resistente.

Peso específico: Debe ser lo más bajo posible.

Conductibilidad térmica: Debe ser la más baja posible.

Resistencia mecánica: Debe ser la más alta posible. Es difícil de lograr ya que una mayor resistencia mecánica va acompañada de una mayor conductibilidad térmica y mayor peso específico del agregado, lo que determina una mala resistencia al fuego y temperatura.

Agua del agregado: El agregado debe tener poca agua de constitución para obtener una conductibilidad térmica más baja.

Refractariedad: Los agregados deben ser lo más refractarios posibles. Se entiende por material refractario el que resiste las altas temperaturas (1700ºC) y los cambios de éstas sin sufrir alteraciones y pérdida notoria de resistencia.

A G U A D E L H O R M I G O N F R E N T E A L A S T E M P E R A T U R A S

Para una mayor claridad veremos cuales son las combinaciones posibles del agua en el hormigón:

1) Agua químicamente combinada. El agua químicamente combinada es el agua necesaria para producir la hidratación del cemento. En el gráfico Nº 10 se puede apreciar que la mayor resistencia es lograda con la razón agua cemento 0,35. Al subir la temperatura en el hormigón van disminuyendo las resistencias.

Puede haber pequeñas variaciones debido a los distintos tipos de cemento, considerando su granulometría. Los cementos de molienda más fina necesitan mayor cantidad de agua.

2) Agua físicamente combinada. Es el agua que moja o se adhiere a los áridos, lo que se produce en función de la tensión superficial del líquido. Esta agua ayuda a la lubricación del concreto e influye en la relación agua cemento.

Existe además en el árido grueso el agua absorbida, que aparenta estar seca en la superficie.

Los áridos de granulometría fina necesitan, para la misma docilidad, mayor cantidad de agua que los de granulometría gruesa. Los áridos con muchas aristas y de superficies rugosas necesitan mayor cantidad de agua que el árido de canto rodado. Los áridos de mayor densidad necesitan menos cantidad de agua que los menos densos.

3) Agua mecánicamente incorporada (agua libre).

El agua mecánicamente incorporada es el agua que sobra del agua químicamente combinada y físicamente combinada. Esta agua queda libre en la masa del hormigón, formando pequeñas lagunas. Se llama agua libre, y es perjudicial bajo todo punto de vista para un buen hormigón.

AGUA Y GRANULOMETRIA.

El hormigón, con exceso de agua, se contrae en un comienzo lentamente, efectuándose en cambio, con el tiempo, una retracción total superior a la del hormigón con poca agua. Análogamente sucede con el hormigón de arena fina, que

necesita más agua, resultando con el tiempo más poroso y menos resistente.

Hecho este análisis previo del agua y sus diferentes formas de combinación, veremos qué pasa con cada una de estas combinaciones al ir aumentando la temperatura.

En los hormigones frescos la temperatura hasta los 40ºC es ventajosa para el fraguado, en especial cuando contiene vapor de agua. En el interior del hormigón se producen reacciones químicas entre el agua y el cemento desprendiéndose calor. Cuando se trata de grandes masas de hormigón, se han registrado hasta 80ºC. Esta temperatura es demasiado alta, debiéndose incorporar sistemas de refrigeración para el fraguado.

Si la temperatura es mayor a 70ºC el hormigón corre el peligro de fraguar antes de terminar su compactación. La temperatura interior, en grandes masas de hormigón, es mayor que la exterior, produciéndose expansiones internas.

Podemos decir que las temperaturas inferiores a 70ºC, en hormigones frescos, favo-

recen su fraguado aumentando rápidamente la resistencia:

15ºC	1 día	91 Kg/cm2	-	7 días	160 Kg/cm2
70ºC	1 día	174 Kg/cm2	-	7 días	270 Kg/cm2

En los hormigones endurecidos, la temperatura de 70ºC no produce ningún efecto.

A 100ºC se pierde el agua mecánicamente incorporada (agua libre). El agua pasa a estado gaseoso (vapor), aumentando su volumen y buscando salida hacia el exterior por medio de pequeñas frisuras.

El hormigón permanece, en esta forma, abierto hacia el interior, pudiendo ser atacado por cualquier elemento extraño como gases, humos, substancias químicas u otras, perdiendo totalmente sus cualidades.

En el cuadro Nº 11 observamos que la temperatura ascendió, en forma gradual e ininterrumpida, hasta los 100ºC. Se ve aquí claramente que se produjo una plataforma durante 15 minutos, que corresponde justamente al período de evaporación del agua libre.

El agua físicamente combinada con los áridos, se pierde con las mismas temperaturas que

el agua libre.

El agua químicamente combinada es aquella que, con el cemento, forma la adherencia hidráulica, dándole la propiedad de aglomerante al cemento. Con 300ºC de temperatura los hidratos de calcio del cemento comienzan a perder agua. El hidróxido se transforma en óxido de calcio. La deshidratación se hace completa a los 1000ºC, perdiéndose totalmente la cualidad aglomerante del cemento.

El gráfico Nº 12 muestra la pérdida de agua que sufre el cemento, a medida que sube la temperatura. En este caso se analiza el cemento aluminoso, cuya resistencia a la deshidratación, por efectos del calor, es muy similar al cemento Portland.

El cemento aluminoso sufre pérdida de agua (deshidratación), en los siguientes componentes:

a = $Al_2O_3 \cdot 4CaO$ aluminato tetracálcico
b = $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ aluminato tricálcico
c = $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ aluminato tricálcico
d = $Al_2O_3 \cdot 2CaO$ aluminato bicálcico

La temperatura necesaria para la deshi-

dratación no es constante, variando según la naturaleza del agregado. Se puede retardar notablemente el aumento de temperatura, en un mismo tiempo, si se elige un árido de mala conductibilidad térmica. En el gráfico Nº 13 se deduce que el hormigón, con agregado de escoria, retarda la evaporación (agua libre) y deshidratación (agua químicamente combinada) bajo las mismas condiciones de temperatura.

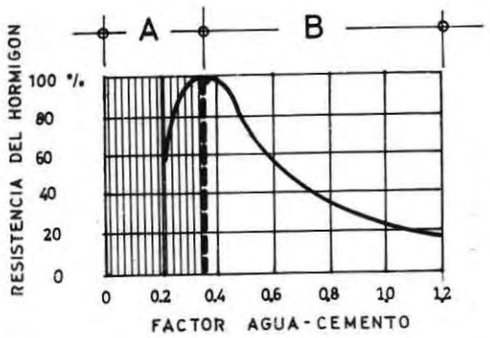
Los efectos de la deshidratación son mayores a medida que ésta es más completa, comenzando con el desastillado en las esquinas, aristas y superficies sufriendo luego fuertes contracciones con formación de grietas y llegando, finalmente, a la disgregación del hormigón.

fig 12 - 13

fig-10

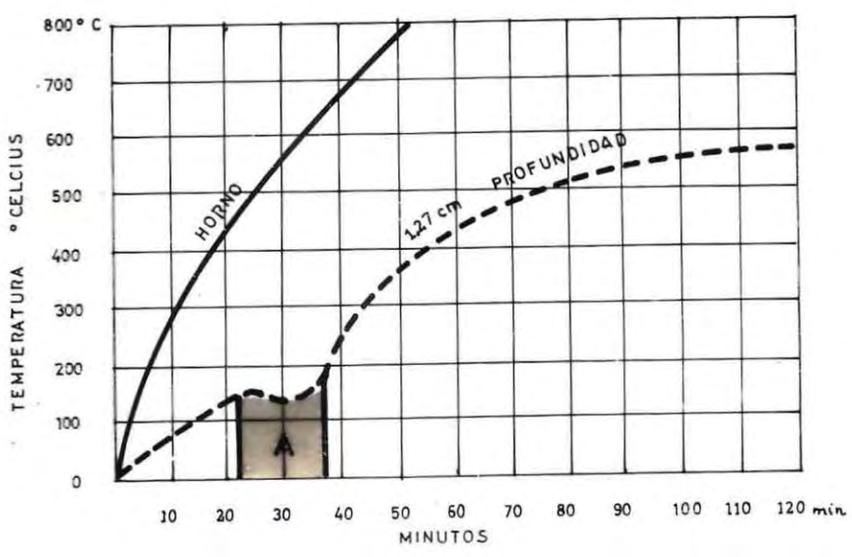
A = ZONA AGUA QUIMICAMENTE COMBINADA

B = ZONA AGUA LIBRE



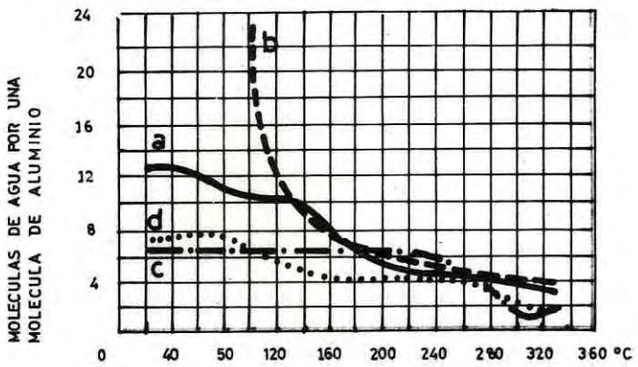
AGUA DEL HORMIGON

fig-11



A = EVAPORACION DEL AGUA LIBRE EN HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND Y AGREGADOS SILICEOS

fig-12

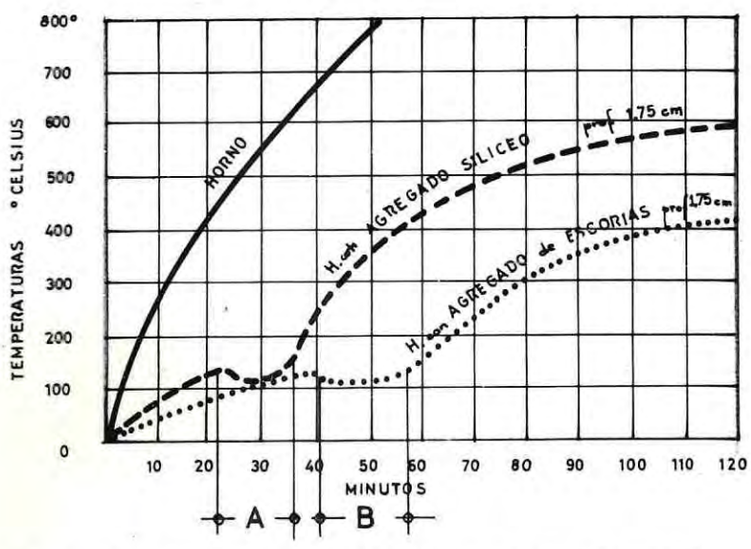


a = $Al_2O_3 \cdot 4Ca\ O$ C = $Al_2O_3 \cdot 3Ca\ O$

b = $Al_2O_3 \cdot 3Ca\ O$ d = $Al_2O_3 \cdot 2C\ O$

PERDIDA DE AGUA DE LOS CEMENTOS ALUMINOSOS

fig-13



EVAPORACION DEL AGUA LIBRE "A" y "B"

(REF. FIG. 12 ACCION DEL CALOR SOBRE LOS HORMIGONES "R. MALLOL"
FIG. 13 IDEM)

T E N S I O N E S I N T E R N A S D E L H O R M I G O N

El problema de las tensiones internas del hormigón, por el aumento de la temperatura, se debe a dos causas principales:

1) Incompatibilidad térmica entre sus componentes.

2) Tensiones internas debido al gradiente térmico.

1) INCOMPATIBILIDAD TERMICA ENTRE SUS COMPONENTES. El hormigón es un compuesto de varios materiales que debe comportarse monolíticamente. El problema está resuelto para temperaturas normales, pero al aumentarse éstas produce reacciones distintas de las partes. Esta reacción heterogénea motiva las tensiones internas ya que el agregado, en presencia del calor, se dilata y el cemento se contrae (ver gráfico Nº4). El ideal es que al aumentar la temperatura todos los materiales constituyentes experimenten un coeficiente de dilatación idéntico.

Se entiende bajo coeficiente de dilatación y contracción la variación de la unidad de longitud cuando la temperatura aumenta en 1ºC.

El coeficiente de dilatación depende de:

proporción del cemento
compacidad de la mezcla
naturaleza del cemento
naturaleza del agregado
proporción del agregado
grado de humedad contenida.

Al respecto Bounicseau* investigó experimentalmente las dilataciones entre 22º a 100ºC de distintos tipos de morteros, obteniendo los siguientes resultados:

Prismas de mortero de 7 x 7 x 30 cm entre 22º a 100ºC.

PROPORCION	COEFICIENTE DILATACION
1 : 0	0,0000126 $\frac{cm}{cm ºC}$
1 : 1	0,0000110 "
1 : 2	0,0000101 "
1 : 4	0,0000104 "
1 : 6	0,0000092 "
1 : 8	0,0000095 "

La conclusión que obtuvo, como podemos observar, fue: a mayor cantidad de cemento mayor dilatación. Este resultado pareciera contradecir lo expresado en el gráfico 4, pero lo que sucede es que el cemento aumenta

* " Hormigón en masa y armado " Kleinlögel

la conductibilidad térmica del hormigón y dilata más rapidamente el árido.

Naturaleza del cemento. Los distintos tipos de cemento tienen diferente constitución mineralógica y, por lo tanto, diferente coeficiente de dilatación. Así el cemento aluminoso tiene un coeficiente de dilatación menor que el cemento Portland. Influye, además, el tamaño de fineza del cemento: mientras más fino, mayor es la dilatación.

Naturaleza del agregado. Al analizar los diversos tipos de agregados observamos que experimentan diferentes dilataciones (ver cuadros 6 y 7). Se observó que a mayor temperatura hay mayor coeficiente de dilatación. La menor dilatación le corresponde , generalmente, al árido de menor peso específico. Respecto a la granulometría se cumple la relación: a menor granulometría, mayor dilatación.

Proporción del agregado. Tiene íntima relación con la proporción del cemento, es decir, a mayor cantidad de agregado hay menor cantidad de cemento y la dilatación es menor.

Grado de humedad. Los hormigones, con un mayor grado de humedad, contribuyen a un mayor

coeficiente de dilatación térmica. (Mayores detalles en capítulo Conductibilidad Térmica).

CONSECUENCIAS.

Esta incompatibilidad de dilataciones produce en el hormigón la ruptura del agregado, si éste es débil, o la ruptura o agrietamiento de la pasta de cemento, si el agregado es más resistente. Para evitar esta incompatibilidad debería tener el cemento una mayor resistencia a la tracción y ser, a la vez, dilatable con la temperatura.

El inconveniente de la dilatación desuniforme del hormigón es el de producirse, en un comienzo, pequeñas frisuras perdiéndose las propiedades de compacidad e impermeabilidad. Cuando la dilatación es mayor hay inclusive pérdida de resistencia.

2) TENSIONES INTERNAS DEBIDO AL GRADIENTE TERMICO. Si calentamos una cara de un cubo de hormigón con una llama, ésta tendrá mayor temperatura que la cara opuesta. Esta diferencia de temperatura depende de la velocidad con que la temperatura atraviese la masa, lo que depende de la mayor o menor conductibilidad del hormigón. Esta diferencia de temperatura en la

masa se llama gradiente térmico.

Como sabemos que la conductibilidad térmica del hormigón es baja siendo el valor de k = 1,2 (mientras que el acero k = 50; piedras duras k = 3 y corcho k = 0,03), las diferencias de temperaturas que hay hacia el interior de la masa son considerables. Se producen entonces mayores dilataciones en el exterior, que irán disminuyendo hacia el interior. Dichas diferencias de dilataciones producen las tensiones internas.

El problema se hace mucho más grave si además se mantiene artificialmente la cara opuesta con temperaturas bajas y constantes. Ejemplo: Se calienta un muro de hormigón armado. La cara "a" recibe el calor que pasa lentamente a la cara opuesta "b".
Si "a" alcanza 300ºC por gradiente "b" tiene 20ºC.
Si "a" alcanza 600ºC por gradiente "b" tiene 40ºC.

Pero si en la cara "b" se mantiene siempre la temperatura 20ºC ocurre:
Si "a" alcanza 300ºC por gradiente "b" tiene 20ºC.
Si "a" alcanza 600ºC artificialmente "b" tiene 20ºC.
Si "a" alcanza 900ºC artificialmente "b" tiene 20ºC.

Esta diferencia de temperatura mantenida artificialmente , por ejemplo, con el agua fría, produce grandes tensiones internas causantes de esfuerzos de tracción y corte.

CONSECUENCIAS.

El desequilibrio térmico del hormigón, producido por el gradiente térmico, tiene las siguientes consecuencias:

Paralelamente a la cara del hormigón se produce una exfoliación o desastillado, comenzando siempre en el siguiente orden: esquinas, aristas y superficie o cara. Fuera de este tipo de roturas aparecen, además, las grietas en forma perpendicular a las caras.

El desequilibrio térmico que es aumentado artificialmente, causa rupturas mucho más peligrosas, ya que éstas pueden producirse en el interior de la masa, quedando ocultas a simple vista.

JUNTAS DE DILATACION TERMICA

Cuando hay temperaturas superiores a 300ºC, conviene que el tamaño de las unidades no exeda

la dimensión máxima de 2 metros, o de diez a doce veces la dimensión mínima.

Estas juntas de expansión deben hacerse con materiales de mala conductibilidad térmica, para impedir el paso de calor por conducción (fieltros, amiento, corcho).

REF. MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH Nº 43

fig – 14

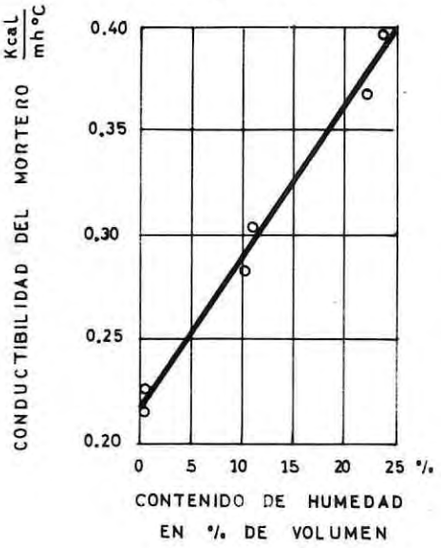


fig – 15

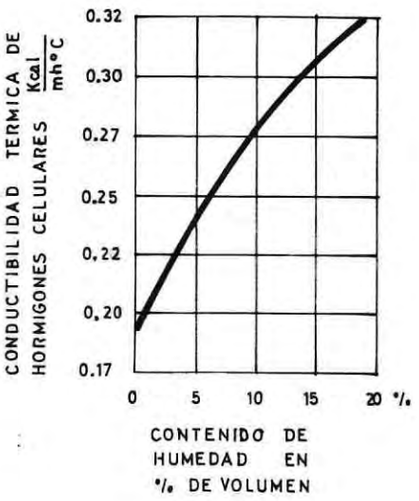


fig – 16

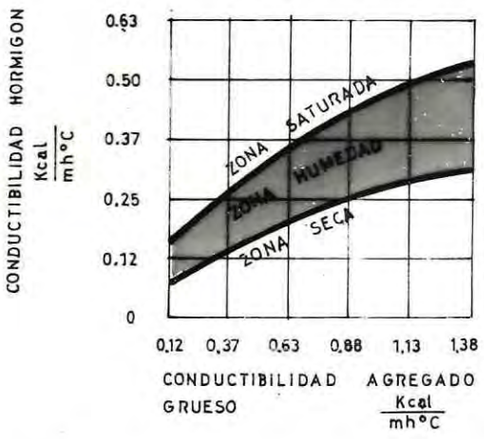
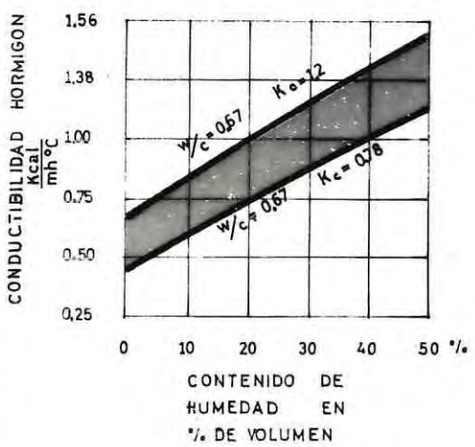


fig – 17



C O N D U C T I B I L I D A D T E R M I C A

Si dos o más cuerpos están en contacto, en cualquier estado físico y tienen una diferencia de temperatura entre ellos, se produce un intercambio de ésta por conducción hasta alcanzar una igualdad térmica. Esta igualdad térmica es conseguida, en algunos materiales, con mayor rapidez por oponer menor resistencia al paso del calor.

De aquí obtenemos un coeficiente de conductibilidad térmica que es la cantidad de calor que pasa, en la unidad de tiempo, a travez de una unidad de superficie del material, cuyo espesor es unitario y que tiene la diferencia de temperatura entre sus dos superficies.

El coeficiente de conductibilidad de un material dado depende de su estructura atómica y molecular, y puede ser deducido de consideraciones de la física de los sólidos. Sin embargo, en el hormigón esta teoría no es aplicable, porque es de constitución heterogénea.

Para obtener la conductibilidad del hormigón, deben conocerse los factores que influyen en él y que son:

el tipo de agregado

las proporciones de la mezcla

el tipo de cemento

la humedad contenida

la temperatura del hormigón

la enfierradura, si es hormigón armado

la compacidad.

El valor de la conductibilidad del hormigón, debe ser el término medio entre estos constituyentes.

Para obtener el equilibrio o valor resultante consideramos:

1) La conductibilidad media de tres capas de espesor t1, t2, t3 es:

FLUJO CALOR →

t1	k1
t2	k2
t3	k3

$$\frac{t1 + t2 + t3}{\frac{t1}{k1} + \frac{t2}{k2} + \frac{t3}{k3}}$$

PARALELO

$$\frac{k1t1+k2t2+k3t3}{t1 + t2 + t3}$$

Cuando las unidades están en paralelo, la conductibilidad es diferente que en serie:

FLUJO CALOR →

t1	t2	t3
k1	k2	k3

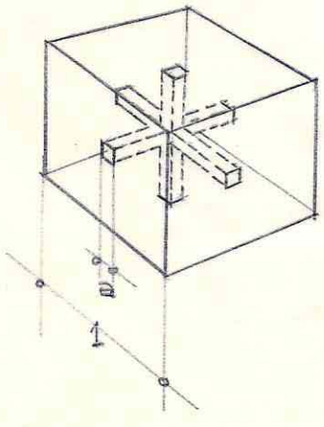
$$\frac{t1 + t2 + t3}{t1k1+t2k2+t3k3}$$

SERIE

Si las unidades o capas t_1, t_2, t_3 representaran respectivamente: cemento hidratado, agregados y espacio poroso, el valor de conductibilidad término medio del hormigón estaría intermedio a la posición de paralelo y serie.

Con el objeto de simplificar el problema, se ha idealizado el hormigón, considerándolo como un conjunto de partículas inertes de agregado suspendidas en una matriz continua de pasta de cemento. La pasta de cemento se idealiza atravesada por numerosos y finos capilares que existen debido al agua sobrante de la hidratación del cemento, y a causa del aire atrapado.

En una primera etapa se procede a calcular la conductibilidad de la pasta de cemento, representándose ésta en un volumen de sección unitaria. Dentro de la pasta existen los poros que atraviesan, en tres sentidos paralelos, a los ejes x, y, z de dicho volumen.



Representación idealizada de pasta de cemento.

Simbología:

a^2 = sección de los poros en la pasta de cemento.

k_1, k_2, k_3 = conductibilidad térmica.

k_s = conductibilidad térmica de los espacios porosos de la pasta.

n^2 = número de poros en una dirección en una pasta de cemento de estructura idealizada.

p = volumen de la pasta de cemento por unidad de volumen de concreto.

p_o = volumen del espacio de poros por unidad de volumen de hormigón.

r^3 = número de piezas de agregado por unidad de volumen de hormigón.

t_1, t_2, t_3 = espesor de la pasta de cemento.

Esta idealización nos permite calcular el volumen total de poros. Si hay n^2 conductos en cada dirección de sección a^2, su volumen total será:

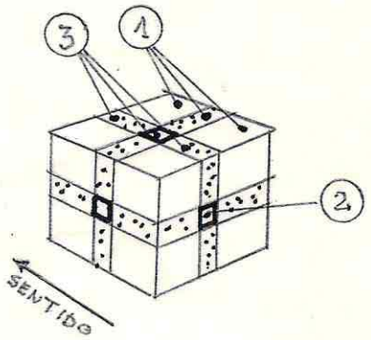
$$(na)^2 + (na)^2 - (na)^3 + (na)^2 - (na)^3$$

$$\boxed{3(na)^2 - 2(na)^3}$$

Si la conductibilidad térmica del cemento hidratado es k_c y la del fluído k_s (poroso),

el calor conducido a travez del cubo en una dirección, para una diferencia de temperatura AT°C, puede ser calculada sumando el calor conducido por cada uno de los caminos.

En la figura podemos ver que hay tres caminos a recorrer:



1) Caminos continuos del cemento hidratado, cuya sección total es:

$$(1 - na)^2$$

luego $1 - 2na + n^2a^2$ a través de la cual el calor conducido es $k_c AT (1 - 2na + n^2a^2)$.

2) Espacio poroso contínuo de sección n^2 por a^2 por el cual el calor conducido es $k_g AT (n^2a^2)$.

3) Camino en serie formado por pasta de cemento, poros y pasta de cemento cuya área es:

$$2na (1 - na)$$

$$\text{luego } 2na - 2(na)^2$$

el calor transferido resulta:

$$\frac{AT (2na - 2n^2a^2) k_c k_g}{k_g (1 - na) + na k_c}$$

Con estos resultados podemos obtener el calor conducido a través del cubo unitario, siendo igual a la suma de los componentes

individuales.

$$k_p = k_c(1-na)^2 + k_g n^2 a^2 + \frac{2(na-n^2a^2)k_c k_g}{k_g(1-na) + k_c na}$$

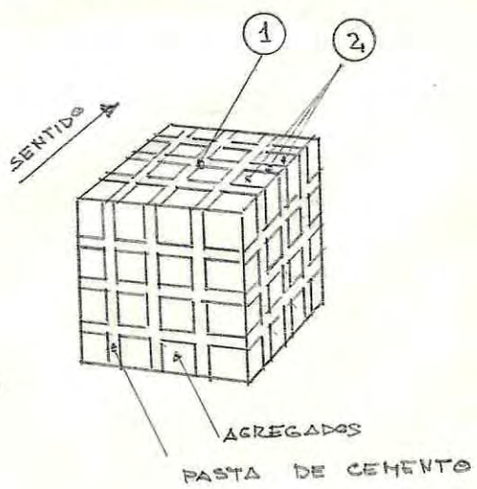
El valor k_g depende del contenido de la humedad de la pasta de cemento. Si hay saturación de los poros, la conductibilidad es igual a la del agua que es 0,15 Kcal/mh°C. A medida que la humedad decrece, el valor se acerca a 0, hasta llegar al aire puro.

Si consideramos este valor como 0 obtenemos:

$$k_p = k_c\ (1-na)^2$$

Pasando a la segunda etapa, en la que calculamos la conductibilidad térmica del hormigón, suponemos la siguiente idealización:

En un volumen unitario el agregado es la estructura ordenada y sistemática que se halla suspendida entre la pasta de cemento.



Las posibilidades del paso de calor entre las caras opuestas son:

1) El camino continuo de la pasta de cemento cuya sección total es $2rt - r^2t^2$

luego el calor conducido es

$$AT\, k_p\, (2rt - r^2t^2)$$

2) Capas de pasta de cemento y agregado en serie de área total $(1 - rt)^2$

$$1 - 2rt + r^2t^2$$

por la cual el calor conducido es

$$\frac{AT\, k_p\, k_a\, (1-at)^2}{rtk_a + (1-rt)\, k_p}$$

Resultando la conductibilidad del concreto

$$k = k_p\, (2rt - r^2t^2) + k_p\, k_a\, \frac{(1-rt)^2}{rtk_a + (1-rt)\, k_p}$$

Para obtener un resultado práctico de la fórmula reemplazamos los valores de rt por M. Como el volumen del mortero es:

$$p = rt + rt - r^2t^2 + rt - 2r^2t^2 + r^3t^3$$

$$p = 3rt - 3r^2t^2 + r^3t^3$$

$$-1+p = 3rt - 3r^2t^2 + r^3t^3 - 1$$

$$(p-1) = (rt-1)^3$$

$$rt = 1 - \sqrt[3]{1-p}$$

$$M = 1 - \sqrt[3]{1-p}$$

Es por lo tanto posible calcular la con-

ductibilidad del hormigón en función de la conductibilidad del agregado, las proporciones de la mezcla y el volumen y conductibilidad del mortero.

$$k = k_m (2M - M^2) + \frac{k_m k_a (1 - M)^2}{k_a M + k_m (1 - M)}$$

Campbell-Allen demostró su teoría llevándola a experiencias prácticas.

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LA CONDUCTIBILIDAD TERMICA.

La conductibilidad de cualquier concreto dado, varía en forma aproximada linealmente con el contenido de humedad. A mayor contenido de humedad, hay mayor conductibilidad. Además sabemos que a mayor humedad del concreto, el porcentaje de caída de la conductibilidad será mayor a medida que se pierda la humedad.

En la figura Nº 14 podemos ver la influencia del contenido de humedad en la conductibilidad del mortero. Esta experiencia muestra un resultado teórico y práctico.

Baker también obtuvo un resultado teórico

del hormigón celular en relación a su contenido de humedad en % del volumen. Ver figura Nº15.

LOS AGREGADOS Y LA CONDUCTIBILIDAD.

Sabemos que existen agregados con buena y mala conductibilidad. Estos agregados producen, sin embargo, un cambio de poca importancia en la conductibilidad del hormigón si se encuentran saturados de agua.

En la figura Nº 16 podemos valorar la importancia del agregado grueso, con respecto a su humedad en la conductibilidad del hormigón. Varía totalmente la conductibilidad de un agregado grueso seco a la de uno saturado.

EL CEMENTO Y LA CONDUCTIBILIDAD.

La conductibilidad del cemento hidratado tiene un efecto significativo en la conductibilidad del hormigón. Un cemento de buena conductibilidad térmica, sube notoriamente la conductibilidad del hormigón. En la figura Nº 17 se puede apreciar los ensayos efectuados con una igual relación agua cemento y distinta con-

ductibilidad del cemento, manteniéndose las proporciones y agregados constantes.

PROPORCIONES DE LA MEZCLA Y LA CONDUCTIBILIDAD.

Las diferentes proporciones, por volumen, de agua libre, cemento hidratado y agregados influyen en la conductibilidad del hormigón. Con la excepción de los hormigones livianos de agregados livianos, la mezcla de cemento tiene siempre una conductibilidad más baja que el agregado.

Si los morteros tienen una razón agua cemento alta, el agua libre que se evapora dejará mayor cantidad de poros, razón por la cual, éstos morteros tienen menor conductibilidad que los de una razón agua cemento más baja.

También interviene en la conductibilidad del mortero el tipo de agregado, siendo más conductible el de mayor densidad a igualdad de humedad. En el caso de los agregados livianos, la conductibilidad del agregado " k_a " es menor que la conductibilidad del cemento " k_c ", de modo que si se aumenta la cantidad de cemento se aumenta la conductibilidad del mortero.

En el caso de usarse agregados corrientes,

la conductibilidad del agregado " k_a " es mayor que " k_c ", de modo que si aumenta la cantidad de cemento se disminuye la conductibilidad del mortero.

Respecto a la edad de los morteros u hormigones, los más nuevos tienen mayor conductibilidad por tener mayor cantidad de agua.

En el gráfico Nº 18 se aprecia la importancia del contenido de humedad de los agregados, para la obtención de la conductibilidad.

El proceso de fabricación y hormigonado en obra contribuye también a una diferencia de conductibilidad térmica.

En un hormigón liviano, con exceso de vibrado, se producen diferentes valores de conductibilidad por el hecho de subir el agregado liviano dentro de la masa. Este fenómeno se llama segregación.

LA TEMPERATURA Y LA CONDUCTIBILIDAD.

Todas las tablas que dan coeficientes de conductibilidad se refieren siempre a temperaturas que están entre 0ºC y 100ºC.

Cuando hay temperaturas sobre los 100ºC, podemos decir que a medida que se eleva la temperatura, disminuye el coeficiente de conductibilidad. La razón estriba en la pérdida gradual del agua y en las alteraciones del cemento y del agregado que producen expansiones.

En el cuadro a continuación, obtenido por Ramón Mallol*, se expresan los porcentajes en que disminuye la conductibilidad al aumentar la temperatura:

TEMP. DE COCCION	DURACION DE COCCION	COEF. DE CONDUCT. Kcal/mhºC	% DEL COEF. A 20º C
20	--	0.74	100
120	6	0.70	94
300	3	0.66	89
300	6	0.64	87
500	3	0.53	72

Sin embargo esta pérdida de conductibilidad en ciertos agregados, que sufren estados alotrópicos, varía sobre los 500ºC produciéndose aumentos de conductibilidad térmica. Ej: cuarzo.

* " Acción del Calor sobre los Hormigones "

GRADIENTE Y CONDUCTIBILIDAD.

Debido a que los hormigones tienen un coeficiente de conductibilidad muy bajo, que fluctúa entre 0,2 y 1,5 Kcal/mh°C, el paso del calor a través de ellos se hace muy lento. Se producen en el hormigón, por esta razón, diferencias de temperaturas considerables, formándose así el gradiente térmico.

Para obtener las características del gradiente térmico Woolson hizo ensayos colocando termopares situados a diferentes profundidades en el hormigón. Ver cuadro Nº 19.

La resistencia a la transmisión del calor no es proporcional a la distancia entre la fuente del calor y el punto en el cual se mide la temperatura. Para una distancia doble, es necesario más del doble del tiempo para alcanzar una misma elevación de temperatura.

Este gradiente obtenido es de utilidad para comprobar la temperatura que alcanza el hormigón a la profundidad de la enfierradura, en caso de ser hormigón armado.

*" Acción del Calor sobre los Hormigones " R. Mallol

Como se sabe que el gradiente, mientras más elevado sea, será más perjudicial para el hormigón, debe disminuírse al máximo posible. El problema es de orden cuantitativo, ya que nunca se puede eliminar del todo, debido a las características propias de los materiales (siempre que exista diferencia de temperatura).

Los factores que contribuyen a obtener un menor gradiente son :

- Diferencia de temperatura entre cara expuesta y no expuesta (opuesta) muy pequeña. Cuando la diferencia de temperatura es 0ºC, el gradiente desaparece.
- Mientras mejor sea la conductibilidad hay menor gradiente.
- A mayor tiempo de aplicación de calor constante, baja el gradiente, hasta producir una igualdad térmica entre superficies opuestas.
- A menor espesor se efectúa, en menos tiempo, la igualdad térmica. Si se mantienen diferencias de temperaturas forzadas entre las caras, será en cambio más peligroso un espesor menor a uno mayor.

De todas las características expuestas, que intervienen en la conductibilidad térmica del hormigón, podemos obtener el siguiente resumen :

1) Agregados. Son menos conductibles los agregados de menor densidad. Varía totalmente la conductibilidad si el agregado está saturado, húmedo o seco.

2) Cemento. La conductibilidad del cemento hidratado varía de acuerdo a su composición mineralógica y al contenido de humedad.

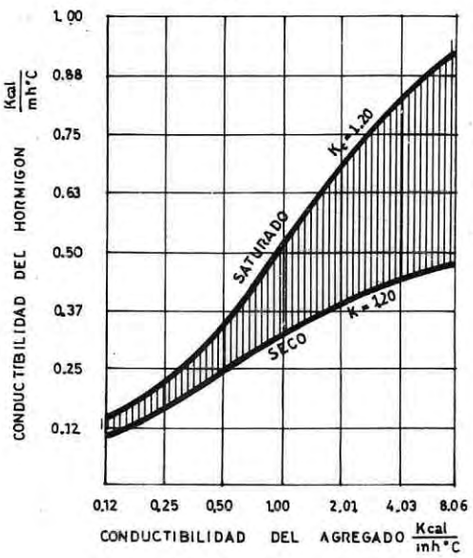
3) Proporciones de la mezcla. En hormigones corrientes con agregados corrientes, el cemento disminuye la conductibilidad. En hormigones livianos, con agregados livianos, el cemento aumenta la conductibilidad.

4) Temperatura. A medida que se va aumentando la temperatura, el coeficiente de conductibilidad va disminuyendo.

5) Compacidad. A mayor compacidad, mayor conductibilidad.

6) Enfierradura. En el hormigón armado, el acero es de una conductibilidad 50 veces mayor que el hormigón. Se producen pérdidas de adherencia entre ellos. Ver cap. Aceros.

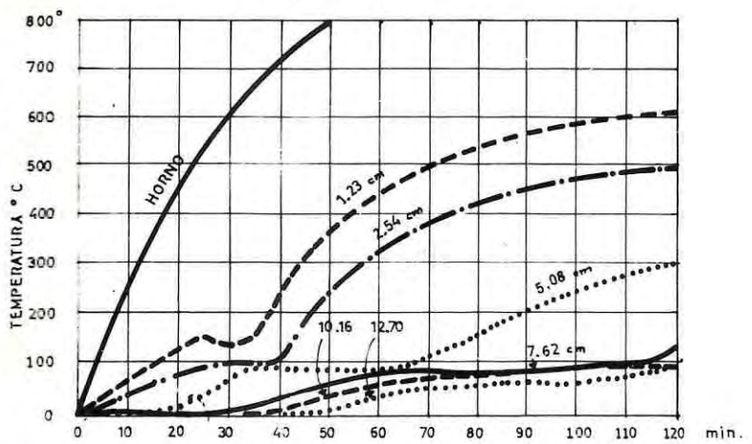
fig-18



ESC. LOGARITMICA

CONDUCTIBILIDAD TERMICA DE LOS HORMIGONES

fig-19



TEMPERATURAS ALCANZADAS A DISTINTAS PROFUNDIDADES EN HORMIGONES SILICEOS

GRADIENTE DE TEMPERATURA DE LOS HORMIGONES

R E S I S T E N C I A M E C A N I C A D E L O S H O R M I G O N E S A N T E A L T A S T E M P E R A T U R A S

Ha sido motivo principal de este estudio analizar y valorar todos los efectos producidos por las altas temperaturas en el hormigón.

Los análisis cualitativos y, en lo posible, cuantitativos han sido orientados para poder obtener un resultado final y para contestar a la pregunta ¿ en qué medida el hormigón armado es afectado, en su comportamiento, por temperaturas más altas que las del ambiente ?

A continuación se darán los resultados de diferentes posibilidades de los hormigones y morteros, en presencia de temperaturas. Esta información nos proporcionará una visión general de la pérdida de la resistencia mecánica por efecto del fuego.

En presencia de elevadas temperaturas (sobre 200ºC) los hormigones comienzan a perder su resistencia mecánica, tanto de compresión como de tracción. Respecto a la flexión, * Steppes efectuó una interesante experiencia.

* " Steppes " Kleinlögel

COMPRESION

350 Kg c/m3

Temperatura ºC	Resistencia %
20	100
200	90 a 120
300	80 a 110
400	60 a 90
600	50 a 80
800	40 a 70
1000	0 a 30

TRACCION

350 Kg c/m3

Temperatura ºC	Resistencia %
20	100
100	80 a 90
200	70 a 85
300	50 a 75
400	40 a 55

Ensayo de Steppes con hormigones de 14 días de duración:

	COMPRESION		FLEXION	
ARIDOS	250º	500º	250º	500º
Arena y gravilla del Rhin	+27%	+19%	-28%	-71%
Basalto	+16%	+15%	-31%	-43%
Gravilla Pómez	+ 8%	-38%	-33%	-56%
Escoria	+ 6%	+ 6%	-17%	-35%

De acuerdo con los gráficos sobre porcentajes de resistencia, con el aumento del calor, obtenemos el gráfico Nº 20.

AGREGADOS Y RESISTENCIA MECANICA DEL HORMIGON FRENTE A LAS TEMPERATURAS.

En el capítulo sobre conductibilidad térmica se trata sobre la resistencia al calor de los agregados, analizando sus cambios de expansión, contracción y estados alotrópicos. No se menciona, en cambio, la resistencia mecánica a medida que se aumenta la temperatura.

Entre estos dos factores que son resistencia mecánica y resistencia al paso del ca-

lor hay una relación inversa, de modo que una buena aislación es acompañada de una mala resistencia.

Lepingle ha ensayado a compresión cubos de pasta pura y de morteros, según se puede ver en la figura Nº 21.

CEMENTO Y RESISTENCIA MECANICA DEL HORMIGON FRENTE A LAS TEMPERATURAS.

Si se analiza la resistencia mecánica de los hormigones a temperaturas normales, siendo iguales las dosificaciones para cemento aluminoso, supercemento y cemento corriente (Portland), se obtienen resultados diferentes. Ver figura Nº 22.

Si a estos hormigones, con diferentes clases de cemento, se les aumenta la temperatura cada uno obtiene una resultante de resistencia diferente.

Para el comportamiento de los hormigones con cemento aluminoso se obtiene mayor resistencia al fuego mientras más alta sea su proporción dentro de la mezcla, siendo para los cementos Portland lo contrario. En la figura Nº 23 se deduce que el cemento aluminoso influye di-

H O R M I G O N A R M A D O

En los hormigones simples, se han analizado sus propiedades bajo las temperaturas elevadas. Para el hormigón armado este análisis es igualmente válido, debiéndose sólo incorporar el estudio del acero, como material aislado y como material incorporado en el hormigón.

Por ser el acero un material de muy buena conductibilidad térmica, siendo su coeficiente de conductibilidad de 50 Kcal/mh°C, y el hormigón un material de mala conductibilidad térmica, siendo su coeficiente de conductibilidad 1,0 Kcal/mh°C, el hormigón debe proteger al acero del calor.

En el capítulo a continuación se trata en forma detallada la estructura interna del acero, sus propiedades bajo temperaturas elevadas y su comportamiento dentro del hormigón.

A C E R O S A N T E T E M P E R A T U R A S

En el hormigón armado se emplea acero dulce, que tiene un contenido inferior a 0,35% de carbono. Estos aceros, con el aumento de temperatura, experimentan cambios de fases, que a su vez producen cambios en la resistencia mecánica.

En la figura 24 observamos para el acero dulce de construcción, que se ubica entre un 0,15 a un 0,35% de carbono, las siguientes fases :
A los 700ºC, de perlita y ferrita en ferrita y austenita; a los 800ºC en austenita y a los 1500ºC, en hierro delta y líquido.

Las características de estas fases son :
a) Austenita. Es una fase dúctil y blanda compuesta por hierro gama. Su estructura es cristalina cúbica. Tiene una solubilidad de 2% de carbono.

b) Ferrita. Forma las soluciones sólidas, en las que el solvente es el hierro alfa, es decir, la forma alotrópica del hierro cúbico, y en la que el soluto es normalmente el carbono. Contiene cantidades inferiores a 0,02% de carbono y se llama comunmente hierro puro, al no contener otros aleantes.

c) Cementita. Es el constituyente más duro del ace-

ro, siendo su fórmula química Fe_3C. Su contenido de acero es muy elevado 6,67%, haciéndola muy frágil. Nunca se encuentra como único constituyente estructural; va acompañado generalmente con ferrita o perlita.

d) Perlita. Es de estructura laminar formada por placas alternadas de cementita y ferrita. Sus características son intermedias a éstas. Contiene un 86,5% de ferrita y un 13,5% de cementita.

Estos cambios de constitución interna del acero dulce con la temperatura, influyen en su comportamiento. En el gráfico Nº 25 se exponen las variaciones de : resistencia mecánica, modulo de elasticidad, modificación de área, límite elástico y alargamiento.

Si comparamos estos resultados del acero con el hormigón, se observa que para el primero la disminución de los diferentes factores indicados en el cuadro 25 es muy anterior y más rápida que en el caso del hormigón.

Otro factor que incide desfavorablemente en el acero, es su excelente conductibilidad térmica.

En efecto, sabemos que la velocidad de conducción es de 50 a 100 veces mayor que el hormigón.

Esta buena conductibilidad del acero transmite, por conducción, la temperatura en muy corto tiempo a toda la masa, siendo en cambio el hormigón de una conductibilidad muy lenta. Este fenómeno produce entonces, en lugares no afectados por el fuego, altas temperaturas en el acero y bajas en el hormigón. Debido a que el acero se dilata con el calor, trata de dilatar por la fuerza de adherencia al hormigón contiguo. Si esta fuerza tensional térmica es muy elevada, se produce la ruptura de la adherencia. Puede también ocurrir que la fuerza de adherencia no permita dilatar al acero, produciéndose en él pandeo hacia el lado más débil, que terminaría por romper la capa protectora de hormigón, quedando totalmente expuesto al fuego.

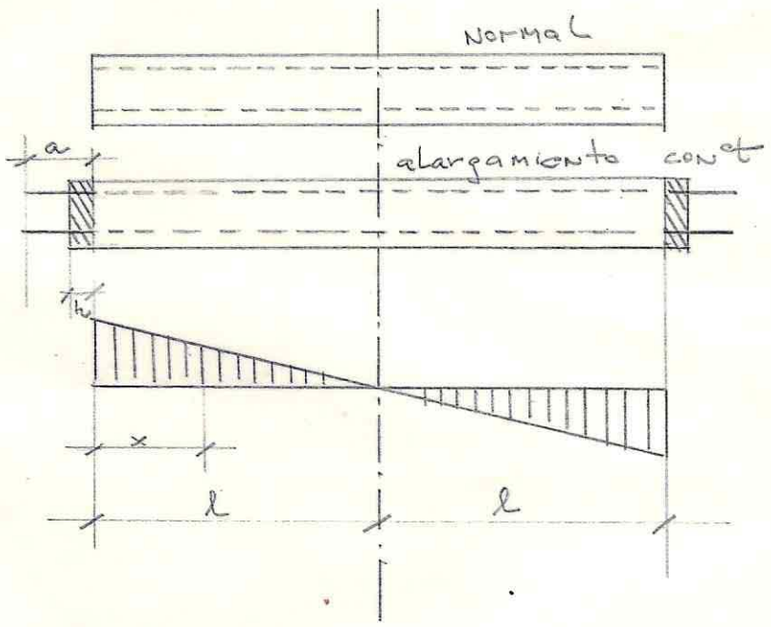
El fenómeno tensional podemos definirlo en la siguiente forma :

El acero se dilata siendo a su vez comprimido por el hormigón (adherencia).

El hormigón es traccionado por la dilatación del acero.

Es necesario, por lo tanto resguardar al máximo posible el acero de las temperaturas, no solamente por su pérdida de resistencia a la tracción, sino además por las fuertes tensiones entre hormigón y acero.//.

Con el objeto de llegar a un resultado práctico de la adherencia, en presencia de calor, se desarrolla a continuación el cálculo.



Simbología :

θ = tensión adherencia máxima

l = semi-longitud

θ_x = valor de tensión de adherencia a la dist. x del extremo

F_x = fuerza normal de interacción a la distancia x (acumulada desde x=0 hasta x = x)

$F_{máx}$ = F(1) F(x) para x = 1

α_a = coef. dilatación acero

α_h = coef. dilatación hormigón

Δt = diferencia de temp.

E_h = módulo elasticidad hormigón

E_a = módulo elasticidad acero

$\Delta a = k \cdot \frac{1}{4} \pi d^2$ sección de las armaduras

k = número de barras

d = diámetro de las barras

P = perímetro total de las armaduras

Δh = sección hormigón

tensión de adherencia $\theta(x) = \theta_e \left(1 - \frac{x}{e}\right)$

fuerza de interacción acumulada

$$F(x) = \int_0^x p\,\theta(x)\,dx = p\,\theta_e \int_0^x \left(1 - \frac{x}{e}\right) dx$$

$$F(x) = p\theta_e \left(x - \frac{x^2}{2l}\right)$$

acortamiento debido a la acción de la fuerza

alargamiento debido a la acción de la fuerza

alargamiento por temperatura hormigón +
alargamiento por temperatura fuerza =
alargamiento por temperature fierro −
alargamiento del fierro por fuerza

$$J_F = 2\int_0^l \frac{F(x)dx}{E\Delta} = \frac{2p\theta_e}{E\Delta} \int_0^l \left(x - \frac{x^2}{2l}\right) dx = \frac{2}{3} p \frac{\theta_e l^2}{E\Delta}$$

$$J_{th} + J_{Fh} = J_{ta} - J_{Fa}$$

alargamiento común J

③ $$f = 2l\,\alpha_a\,\Delta t - \frac{2\,\theta_{opl}\,l^2}{3\,E_a\,\Delta_a} = 2l\,\alpha_h\,\Delta t + \frac{2\,\theta_{opl}\,l^2}{3\,E_h\,\Delta_h}$$

④ $$(\alpha_a - \alpha_h)\,\Delta t = \frac{1}{3}\,\theta_{opl}\,l\left(\frac{1}{E_a\,\Delta_a} + \frac{1}{E_h\,\Delta_h}\right)$$

$$\left(\frac{1}{E_a\,\Delta_a} + \frac{1}{E_h\,\Delta_h}\right) = \left(\frac{1}{E_a\,\Delta_a} + \frac{E_a\,\Delta_a}{E_h\,\Delta_h}\cdot\frac{1}{E_a\,\Delta_a}\right)$$

$$= \frac{1}{E_a\,\Delta_a}\left(1 + \frac{E_a}{E_h}\cdot\frac{\Delta_a}{\Delta_h}\right)$$

$$n = \frac{E_a}{E_h}$$

$$\mu = \frac{\Delta_a}{\Delta_h}$$

reemplazando en ④

$$(\alpha_a - \alpha_h)\,\Delta t = \frac{\theta_{opl}}{3\,E_a\,\Delta_a}\,(1 + n\mu)$$

$$\theta_{opl} = 3\,E_a\,\Delta_a\,\frac{\alpha_a - \alpha_h}{1 + n\mu}\,\Delta t$$

valor máximo de la fuerza acumulada

$$F_{máx.} = F(l) = \frac{1}{2}\,\theta_{opl} = \frac{3}{2}\,E_a\,\Delta_a\,\frac{\alpha_a\,\alpha_h}{1+n\mu}\,\Delta t$$

máxima tensión del (compresión para $\Delta t > 0$) acero σ_a

máxima tensión del (tracción para $\Delta t > 0$) hormigon σ_h

$$\sigma_a = \frac{F_{máx}}{\Delta_a} = \frac{3}{2}\,E_a\,\frac{\alpha_a - \alpha_h}{1+n\mu}\,\Delta t$$

$$\sigma_h = \frac{F_{máx}}{\Delta_h} = \frac{3}{2}\,\mu\,E_a\,\frac{\alpha_a - \alpha_h}{1+n\mu}\,\Delta t$$

máxima tensión de adherencia

$$\theta = 3\,E_a\,\frac{\alpha_a - \alpha_h}{1+n\mu}\,\Delta t\,\frac{\Delta_a}{p^2}$$

$$\boxed{\theta = \frac{3}{4}\,\frac{d}{l}\,E_a\,\frac{\alpha_a - \alpha_h}{1+n\mu}\,\Delta t}$$

$$\Delta_a = k\,\frac{1}{4}\,\pi\,d^2$$

$$p = k\,\pi\,d$$

$$\frac{\Delta_a}{p} = \frac{d}{4}$$

H O R M I G O N E S P R E E S F O R Z A D O S

En Inglaterra y Estados Unidos se efectuaron numerosos ensayos sobre la resistencia al fuego de vigas preesforzadas, cuyos resultados fueron expuestos por L. A. Ashton y S. C. C. Bate en " Journal of the American Concrete Institute ", en Mayo de 1961.

Los ensayos se efectuaron en " Fire Research Station " y en " Building Research Station ", en un horno abierto por arriba, que después de colocar la viga, es cerrado con concreto refractario y sellado con cuerdas de asbesto. Se ubicaron convenientemente pirómetros a lo largo de la viga. El horno estaba provisto, además, de quemadores en los lados y de ventanillas de observación, como se puede apreciar en la foto Nº 1 de vigas preesforzadas.

Como el tamaño del horno no permitía las dimensiones usuales de vigas preesforzadas, fue adoptada una técnica de escalas de 1/4, 3/8, 1/2, 4/5 y 6/5.

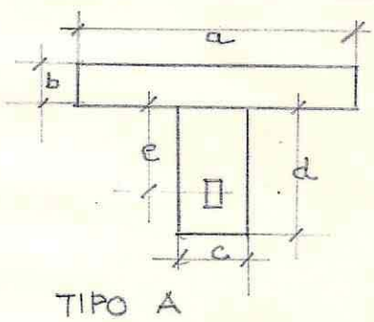
En las experiencias se aplicaron, fuera del peso propio, cargas adicionales con sistema de presión hidráulica en 4 puntos de la viga, tomando cada punto 1/4 del peso total. En la foto 2 de vigas

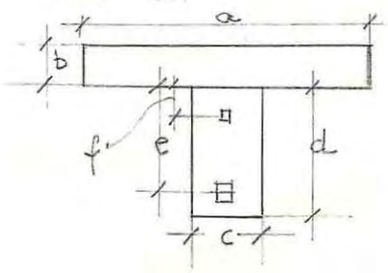
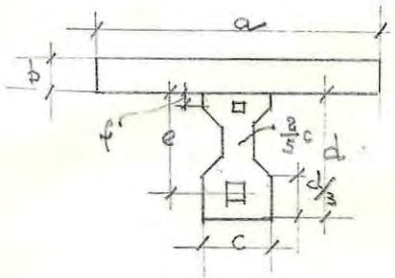
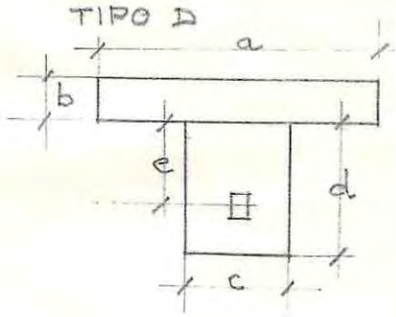
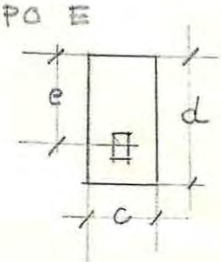
preesforzadas, vemos la viga cargada y lista para comenzar la prueba. En algunos casos no se aplicó carga adicional.

Para la prueba se consideraron los siguientes factores :

1) Tamaño viga
2) Sección y forma de la viga
3) Condiciones de carga
4) Tipo de agregado
5) Condiciones de resistencia final
6) Propiedades del concreto
7) Espesor del concreto protector del acero
8) Tensión inicial en el preesforzado
9) Tipo de acero
10) Dimensiones de acero corriente
11) Uso de protecciones adicionales.

DIMENSIONES DE LA VIGA

Sección	ESCALA	Dimensiones en pulgadas a	b	c	d	e	f
 TIPO A	1/4	10	1.5	2.5	4.5	3.0	-
	3/8	15	2.3	3.8	6.8	4.5	-
	1/2	20	3.0	5.0	9.0	6.0	-
	4/5	32	4.8	8.0	14.4	9.9	-
	6/5	48	7.2	12.0	21.6	14.4	-

Sección	ESCALA	Dimensiones en pulgadas a	b	c	d	e	f
TIPO B 	1/4	10	1.5	2.5	4.5	3.6	1.1
	1/2	20	3.0	5.0	9.0	7.3	2.3
	4/5	32	4.8	8.0	14.4	11.6	2.7
	6/5	48	7.2	12.0	21.6	17.4	5.4
TIPO C 	1/4	10	1.5	2.5	4.5	3.5	0.6
	3/8	15	2.3	3.8	6.8	5.3	0.9
	1/2	20	3.0	5.0	9.0	7.0	1.3
TIPO D 	1/2	20	3.0	7.5	9.6	6.0	-
	4/5	32	4.8	12.0	15.4	9.9	-
TIPO E 	1/2	-	-	5.0	9.0	6.0	-
	4/5	-	-	8.0	14.4	9.9	-

Los hormigones empleados eran de cemento Portland de fragua rápida y los agregados, sacados del Thames, dieron en el análisis la siguiente composición : 89% de silicio de veta y 2% de cuarzo.

Su razón agua : cemento correspondía a 0,4 lts. La humedad relativa, al comenzar la prueba, fue de un 65%, con una temperatura de 20ºC.

Algunas vigas fueron provistas de una protección adicional de su superficie con vermiculita. Se entiende por vermiculita un material micáceo hidratado, de estructura escamosa, formando laminillas o capas, de las que entran cerca de medio millón por centímetro. En el proceso de expansión por el calor, quedan aprisionadas entre las láminas un enorme número de diminutas células de aire, que dan a la vermiculita el poder aislante.

Las temperaturas aplicadas en el ensayo fueron de acuerdo a la curva patrón de temperatura, que se emplea para estos casos. Ver gráfico Nº 1.

Algunas vigas preesforzadas se reforzaron con barras y estribos de acero dulce corriente, logrando mejores resistencias para aquellas vigas donde el acero se encontraba más profundo.

Grado	Espesor concreto
1/2 hr	2,50 cm
1	3,75
2	6,25
4	10,00

Para el caso de revestimiento de vermiculita, se observó :

Grado	Espesor vermiculita
3,57 hrs	2,50 cm
6,00 hrs	6,25 cm

En la fotografía Nº 3 de vigas preesforzadas vemos una viga a escala de 4/5, con refuerzo de acero dulce, después de la prueba.

En la fotografía Nº 4 de vigas preesforzadas se observa una viga a escala 4/5, sin acero dulce de refuerzo. En el caso de no existir armaduras de refuerzo y carga adicional, la viga presentaba su peor resistencia, quebrándose hacia arriba.

Los aceros de alta resistencia empleados en el preesforzado fueron de 0.1 a 0.2" de diámetro, siendo la tensión inicial apróximadamente 0,6 veces de la fuerza de tensión final. Se observó, que a los pocos minutos de iniciada la prueba, escapaba agua

por la vaina del cable. Se estima que el agua, alrededor de la zona del cable, se evaporaba y se condensaba en la vaina que tenía 100ºC, escapando hacia el exterior por el sistema de anclaje.

Para mayor protección del acero se puede hacer el sellado del cable, con un mortero aislante.

Una viga de hormigón preesforzado, que alcance 230ºC, debe ser reemplazada. A los 280ºC hay pérdida total de preesforzado y a los 400ºC la viga se desploma.

PRUEBA DE VIGAS PRETENSADAS
(TEMPERATURA Y CARGA)

ESCALA
VIGA

TIPO DE VIGA	ENMIERRADURA DE REFUERZO	PROTECCION ADICIONAL	PESO PROPIO P.P. PESO ADICIONAL PA	TIEMPO AL FUEGO hr. min. 1/4	3/8	1/2	4/5	4/5	6/5
A	NO	NO	PP+1½PA	0.36 0.40	1.06 1.08	1.30 1.46	2.35		
						1.36			
						1.28			
	ESTRIBOS Y BARRAS	NO	PP+1½PA					2.30	4.23
	NO	NO	PP+PA					1.26	1.54
	ESTRIBOS Y BARRAS	NO	PP+PA					3.22	6.00
	REFUERZO A 15cm PROFUNDIDAD	NO	PP+PA					3.23	
	NO	VERMICULITA 2,5 cm	PP+1½PA	2.34	2.38 3.37	3.51	6.03		
B	NO	NO	PP+1½PA	0.35		1.20			
	ESTRIBOS Y BARRAS	NO	PP+1½PA					2.41	
	NO	NO	PP+PA					1.02	1.37
	NO	VERMICULITA 2.5 cm	PP+PA	3.25		6.00			
C	NO	NO	PP+1½PD	0.30	0.50	1.16			
D	NO	NO	PP+1½PA			3.00	3.40		
E	NO	NO	PP+1½PA			0.55	1.55		
	NO	VERMICULITA 2.5 cm	PP+1½PA				4.39		

rectamente en una mejor resistencia.

LA EDAD Y RESISTENCIA MECANICA DEL HORMIGON FRENTE A ALTAS TEMPERATURAS.

En los capítulos anteriores se han mencionado las dosificaciones y cualidades de los constituyentes del hormigón, no habiéndose tratado, la influencia de la edad del hormigón.

Existen riesgos de incendio a partir del hormigonado. Durante la edificación, los materiales acumulados: moldajes, andamiajes, y sistemas de curado hacen de combustibles en caso de incendios, produciéndose la disgregación de los hormigones frescos en un par de horas.

Al respecto, Peter Smith* hace un estudio del hormigón con 1 hora y 1, 4, 6, 11, 19 y 140 días basándose en un siniestro durante una ampliación y reparación de un puente. Esta experiencia, que es de gran valor por estar comprometidos en ella hormigones corrientes y preesforzados de entre 1 hora a 20 años de edad, se detallará en el capítulo sobre ensayos prác-

* "Journal of the American Concrete Institute" Nov. 1963

ticos.

Por otra parte sabemos que la presencia de agua afecta mayormente a los hormigones, la cual se halla presente especialmente en los de poca edad. En concretos de más edad el daño se hace, por esa razón, menos notorio para iguales circunstancias.

C O E F I C I E N T E D E E L A S T I C I D A D

Al respecto Woolsoon* hizo investigaciones para el comportamiento de la elasticidad de los hormigones bajo diferentes temperaturas.

El ensayo experimental lo efectuó en bloques de hormigón, con diferentes agregados y diferentes proporciones de éstos.

Los resultados obtenidos fueron resumidos en dos cuadros.

COEFICIENTES DE ELASTICIDAD EN BLOQUES DE HORMIGON BAJO CARGA

Cuadro 1 : Hormigón con piedra volcanita

Temperatura °C	0	260	400	540	680
σ = 14 Kg/cm^2 E_b=	243.000	56.000	32.000	10.000	6.000
σ = 42 Kg/cm^2	151.000	63.000	35.000	13.000	9.000
σ = 70 Kg/cm^2	120.000	70.000	-	-	-
Resist. Kg/cm^2	120	120	71	63	60

*Woolsoon " American Society Testing Materials "

Cuadro 2 : Hormigón con piedra caliza

Temperatura ºC	0	260	400	540	680
σ= 14 Kg/cm^2 E_b=	210.000	72.000	25.000	11.000	5.000
σ= 42 Kg/cm^2	140.000	53.000	25.000	17.000	8.000
σ= 70 Kg/cm^2	106.000	51.000	22.000	-	-
Resist. Kg/cm^2	100	97	81	71	56

Los cuadros nos indican que con el aumento de temperatura, hay disminución del coeficiente de elasticidad.

H U M O S

La influencia constante de los humos sobre el hormigón armado es perjudicial tanto para el hormigón como para sus armaduras.

Si el hormigón está bien compactado no existe peligro de la agresión de los humos. Cuando, en cambio, es de defectuosa elaboración resultando poroso, el peligro es inminente.

Los humos pueden contener, en estado gaseoso, las siguientes substancias: anhídrido carbónico, nitrógeno, óxido de carbono, sulfuro de carbono, amoníaco, ácido nítrico, anhídrido sulfuroso y anhídrido sulfúrico. Entre ellos el agente destructor más importante es el anhídrido sulfuroso, que con la humedad (vapor de agua), se combina con el oxígeno, formando ácido sulfúrico. Este ácido ataca la cal libre , transformando el hidrato de calcio en sulfato.

De acuerdo con estudios del cemento,*1 el sulfato de calcio en los hormigones de cemento Portland a 20ºC de temperatura experimenta las mayores dilataciones. Estas dilataciones disgregan el cemento, dejándolo cada vez más

abierto y expuesto hacia el interior. Es de igual peligro el hecho que las armaduras queden expuestas.

El hidrógeno sulfurado (SH_2), combinado con la humedad, forma el yeso (sulfato de cal hidratado), que con la temperatura se expande y disgrega.

El anhídrido carbónico, con mucha humedad, forma el bicarbonato de calcio que se manifiesta hacia el exterior con eflorescencias blancas.

Estas observaciones son sólo valederas donde existen fuegos y desprendimientos de gases permanentes, ya que el humo provocado en un incendio, de tres horas o más, no alcanza a atacar en forma efectiva al hormigón.

En caso de proyectarse hormigones para una exposición permanente a los gases nocivos, deben tomarse las siguientes precauciones:
Empleo de cemento pobre en cal.
Resguardo prudente de las armaduras.
Ventilación adecuada.
Evitar bolsas donde quede encerrado el humo.
Elaborar el hormigón con muy buena compacidad.

Para el efecto existe el cemento super sulfatado, que en un ensayo de 24 meses, no presentó ningún aumento de volumen.

En la tabla a continuación podemos apreciar los porcentajes de los componentes que forman el cemento Portland y el Super sulfatado.*3

	CEMENTOS	
	PORTLAND	SUPER SULFATADO
Sílica Si02	21,20	28,67
Oxido férrico Fe203	1,75	1,11
Alúmina Al203	5,46	14,61
Oxido calcio CaO	64,30	43,03 (21,27% menos)
Oxido magnesio MgO	1,07	3,81
Tróxido de S SO3	2,39	5,79
Pérdida en ignición 0 - 105ºC	0,36	0,33
Pérdida en ignición 105 - 1000ºC	2,38	1,08
Oxido de sodio Na20	0,14	0,30
Oxido de potasio K20	0,55	0,98
Carbonato libre	2,21	0,13

Ref:

*1 " Magazine of Concrete Research "

*2 " Hormigón en masa y armado " Kleinlögel

*3 " Acción del calor sobre los hormigones " R. Mallol F.

T I P O S D E H O R M I G O N E S S E G U N S U R E S I S T E N C I A A L F U E G O

Si analizamos los hormigones desde el punto de vista de su resistencia al fuego, podemos distinguir 3 grupos enumerados a continuación :

1) Hormigones corrientes

2) Hormigones aislantes

3) Hormigones refractarios.

1) HORMIGONES CORRIENTES. Son aquellos en que no hay ninguna posibilidad voluntaria de contacto con altas temperaturas o fuego.

Este hormigón corriente está dosificado especialmente para cumplir con solicitaciones de resistencia mecánica, sin darle ninguna importancia a la resistencia ante el fuego, ya que ésto ocurriría sólo en ocasiones involuntarias, como son los incendios.

Estos hormigones forman, sin lugar a dudas, el mayor porcentaje de todos los hormigones y son los que, en este estudio, tienen una dedicación preferente.

Como sabemos por capítulos anteriores, para

los hormigones existe una incompatibilidad o más bien una razón inversa, entre su resistencia mecánica y su resistencia al fuego. Mientras más compacto y homogéneo, peor será su resistencia al fuego. En el capítulo sobre Resistencia Mecánica observamos que a los 400ºC ya se ha perdido entre un 10 a un 40% de su resistencia, con respecto a las temperaturas normales (20ºC).

Podemos concluír diciendo que los hormigones corrientes no constituyen un material refractario, puesto que absorven calor, eliminan el agua de hidratación, pierden su poder aglomerante y se disgregan.

2) HORMIGONES AISLANTES. Son de menor resistencia mecánica que los hormigones corrientes, pero tienen una mayor capacidad de aislamiento térmico. Los hormigones aislantes están formados por cementos aluminosos y agregados livianos (piedra pómez, escorias, etc), resistiendo hasta los 1000ºC de temperatura, asunto que se explica en otros capítulos.

El peso específico fluctúa entre 500 a 1500 Kg/m^3 y su conductibilidad térmica oscila de 0.20 a 0.50 Kcal/mhºC. Se emplea principalmente en la construcción de hornos.

3) HORMIGONES REFRACTARIOS. El "New York Building Code" define el material refractario como aquel capaz de resistir a la acción de la llama, a una temperatura de 930ºC durante 2 horas, sin que la elevación de temperatura del material protegido alcance por transmisión 290ºC, a una profundidad de 50 milímetros.

La conductibilidad térmica es mayor que la de los hormigones aislantes, siendo su valor apróximadamente 0,70 Kcal/mhºC.

Respecto a la constitución del hormigón refractario, éste está formado por cemento aluminoso y agregados con alto contenido de alúmina, siendo su peso entre 1800 a 1950 Kg/m^3.

Mantiene sus propiedades hasta los 1770ºC y es de mejor resistencia mecánica que el hormigón aislante.

M E T O D O D E E V A L U A C I O N Y M E D I C I O N D E D A Ñ O S C A U S A - D O S P O R E L F U E G O E N H O R - M I G O N E S

Para determinar los daños producidos por el calor en los hormigones, existen 2 líneas a seguir :

El análisis no destructivo, sistema empleado en construcciones reales afectadas por el fuego y el ensaye destructivo, que se aplica especialmente en la investigación de laboratorios.

ANALISIS DESTRUCTIVO. Este método consiste justamente en romper la probeta, para verificar sus resistencias mecánicas ante diferentes grados de temperatura.

ANALISIS NO DESTRUCTIVO. Cuando se debe emitir un juicio sobre el estado del edificio dañado, para efectos de las futuras reparaciones o seguros, sería ilógico romper parte de su estructura. Se recurre, entonces, a la evaluación no destructiva, que se puede realizar en las siguientes formas :

1) Inspección visual del daño (para hormigón armado). Tan pronto sean removidos los escombros, se hace una detallada inspección visual del hormigón u hormigón armado, que quedó mayormente expuesto al fuego. Se anota todo tipo de fisuras, diferenciándose entre las más profundas y las más superficiales, como igualmente el descascarado u otras características anormales. Este análisis es completado con fotografías, que dan una idea sobre la extensión de la acción del fuego. Si se deduce que hay evidencia o posibilidad de daños tanto visuales (superficiales) como internos, se debe proceder a un análisis en profundidad.

2) El martillo de impacto.* El martillo de impacto nos provee de una útil y manuable herramienta que se basa en la dureza de la superficie del concreto por la repercusión de un resorte de una masa cargada, el que golpea un émbolo cuyo otro extremo está en contacto con el concreto.

Influyen en esta medición la humedad, discontinuidad, vacíos y comienzos de descascarados. Es por lo tanto necesario tomar varias mediciones, incluyendo partes no dañadas, para ob-

* Peter Smith " Journal of the American Concrete Institute "

tener resultados calibrados o comparados.

3) Mediciones de velocidad de vibraciones. Se basa este método en explorar la condición estructural interna del concreto, por medio de vibraciones ultrasónicas. El instrumento encargado de medir el tiempo requerido por una vibración sonora para atravesar el concreto, se llama soniscopio.

Sabiendo el tiempo y la distancia a través de la cual el sonido pasa, es posible calcular la velocidad media del sonido, que llamamos la velocidad de vibración del concreto.

La vibración no nos proporciona una medición de fuerzas de compresión; está relacionada con la densidad y elasticidad modular.

Si la vibración es de baja velocidad, el concreto indica una inferior calidad. Cuando, además, la baja velocidad va acompañada de una reducción de la amplitud de la vibración, indica una grieta interna del concreto.

Para llevar a la práctica este sistema se requiere de un transmisor y de un receptor, que

van colocados en contacto íntimo a las superficies opuestas.

4) Investigación por muestra de taladro. Si se persiguen resultados cuantitativos, es necesario sacar muestras del material para su examen en laboratorio, donde se aplican las pruebas por procedimientos standard.

Para emitir un juicio serio sobre el módulo de elasticidad, dureza, resistencia mecánica, permeabilidad y aire contenido es necesario que la muestra de concreto contenga, por lo menos, los tamaños máximos normales de áridos, recomendándose por esta razón un diámetro de 5 pulgadas. Si solamente se requiere de una determinación general, será suficiente con 2 pulgadas de diámetro.

H O R M I G O N E S L I V I A N O S

Son más resistentes al fuego que los hormigones fabricados con agregados corrientes. Reciben este nombre por tener un peso específico muy bajo, que es de 500 a 1500 Kg/m^3, siendo el peso del hormigón corriente de 2200 Kg/m^3.

Esta característica de los hormigones livianos de tener un peso específico muy bajo, se debe a sus agregados que tienen un peso específico entre 100 a 800 Kg/m^3 (vermiculita, pómez, escoria, etc).

Otra de las propiedades de los hormigones livianos es su mala conductibilidad, siendo su coeficiente de conductibilidad térmica 0,20 a 0,50 Kcal/mh°C. Como el cemento tiene una conductibilidad térmica de 0,78, resulta que mientras más rico sea el hormigón, será más baja su resistencia al fuego y mayor su conductibilidad térmica.

Para que un hormigón resista más de 400°C, debe emplearse cemento aluminoso, resultando así el hormigón aislante.

F E R R O C E M E N T O

El problema de resistencia al fuego del ferrocemento es más grave que el del hormigón armado. Como el ferrocemento es un material compuesto por múltiples capas de mallas de acero, consolidadas entre sí por mortero de cemento de alta resistencia, podemos decir lo siguiente respecto a su resistencia al fuego :

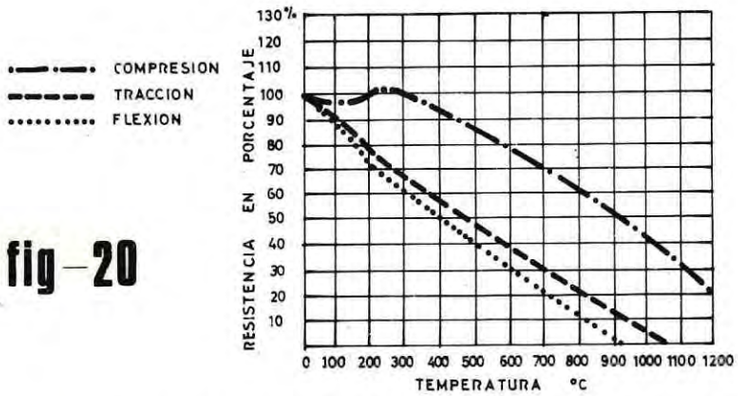
El ferrocemento es de espesor muy reducido, alrededor de 3 cm, siendo el paso del calor muy rápido a través de él.

El ferrocemento es de una dosificación de cemento muy rica, hecho por el cual disminuye la resistencia al fuego.

El ferrocemento es de una cuantía elevada, factor que lo hace buen conductor térmico.

Por estas razones : poco espesor, buena conductibilidad, elevada cuantía y alta dosificación de cemento, el ferrocemento tiene sólo una resistencia grado D en la curva patrón de temperaturas.

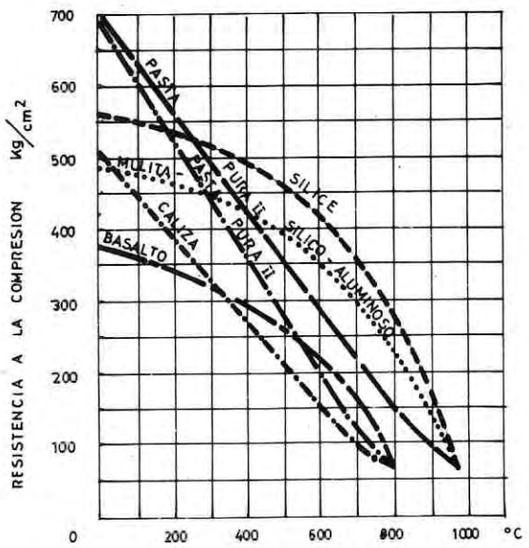
REF. HORMIGON Y HORMIGON ARMADO — SALLIGER
MATERIALES DE CONSTRUCCION (U.AVANCES) — Nº 104
ACCION DEL CALOR SOBRE LOS HORMIGONES — R.MALLOL



fig–20

RESISTENCIA A COMPRESION-TRACCION-FLEXION

fig–21

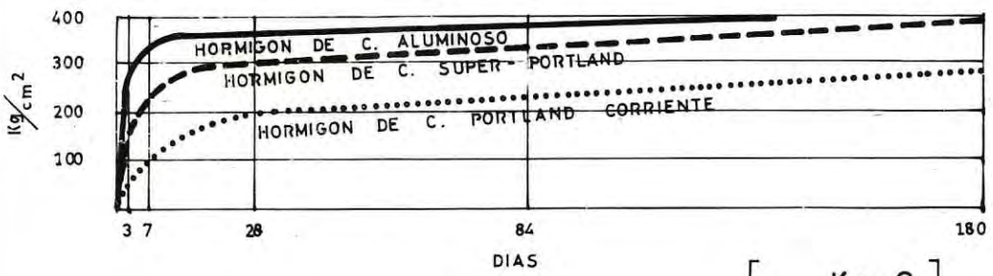


RESISTENCIA A COMPRESION DE MORTEROS Y PASTA PURA

análisis

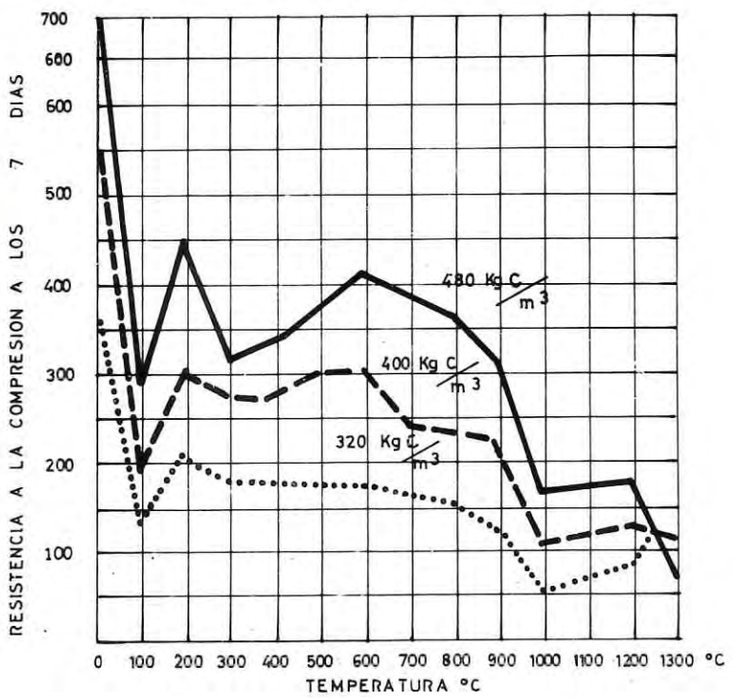
8

fig – 22



RESISTENCIA A COMPRESION $\left[300 \frac{Kg\ C}{m3}\right]$

fig – 23



RESISTENCIA DE MORTEROS CON DIFERENTES DOSIFICACIONES DE CEMENTO ALUMINOSO

ENSAYO VIGAS PREESFORZADAS

1



1 Horno de ensayo para vigas preesforzadas de 7,20 mts de longitud.

2 Ensayo preparado para la prueba.

2



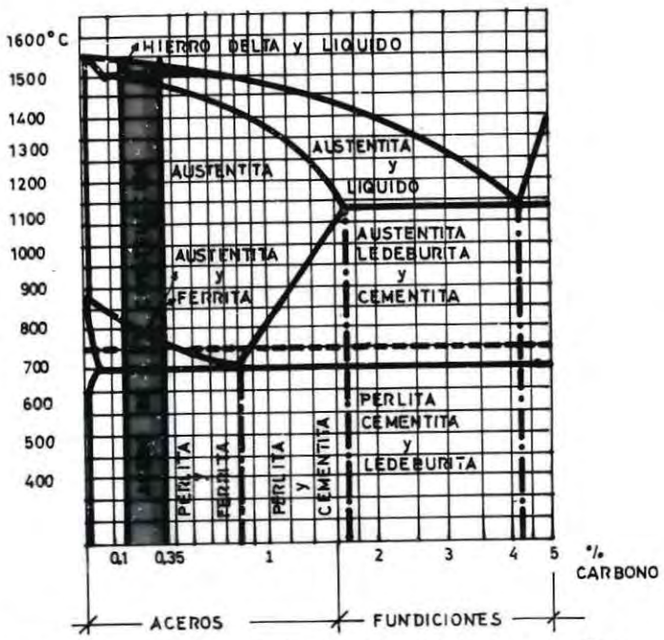
ENSAYO VIGAS PREESFORZADAS



3 y 4 Ensayo vigas preesforzadas bajo la acción del fuego y de carga hidráulica.

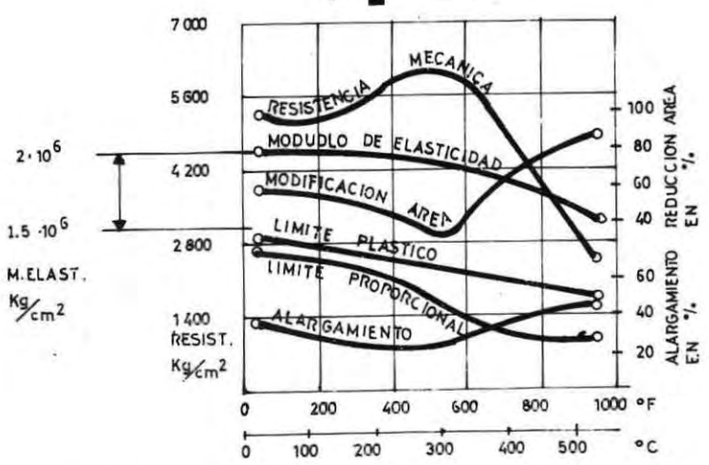


fig—24



FASES DE TRANSFORMACION DEL ACERO

fig—25



DIFERENTES VARIACIONES EN PROPIEDADES DEL ACERO

I N C E N D I O U S I N A S O R V I R E L

En los " Annales de l'Institut Technique du Batiment " de 1959, M. Brice y M. Chefdeville presentaron un estudio sobre los daños causados por un incendio en la usina Sorvirel.

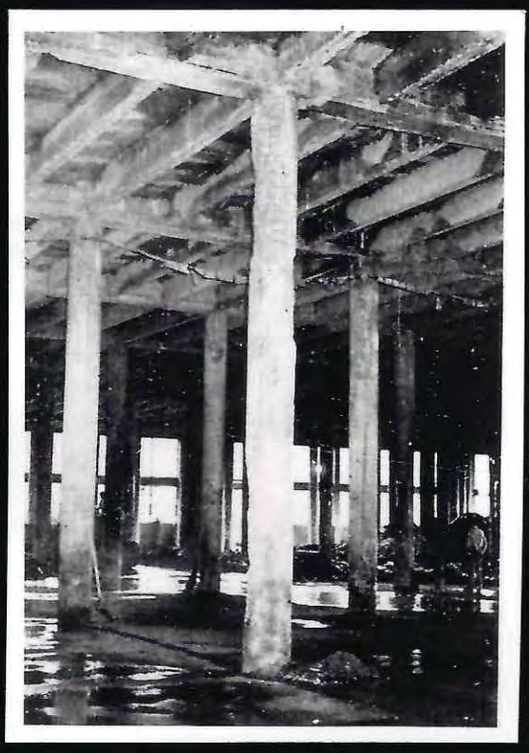
La usina está ubicada en Bagneaux, Francia, y se dedica a la fabricación de tubos de televisión. El edificio es de 2 pisos, siendo la losa de entrepiso de elementos de hormigón armado prefabricados. Los muros son de albañilería, con pilares de hormigón armado, que soportan una techumbre metálica.

El primer piso tiene una superficie de 180 x 70 mts, ubicándose en el centro de éste la sección de embalajes. El fuego comenzó justamente por los embalajes, consistentes en cajas de cartón.

A los pocos minutos el fuego se propagó en toda la parte central del primer piso, siendo atacados violentamente los pilares y cielos. El incendio fue dominado después de 10 hrs de intenso trabajo bomberil.

INCENDIO USINA SORVIREL

1



1 Vista general interior

2 Esfuerzo de corte en muros por dilatación losas

3 Esfuerzo de corte en cabeza pilar por dilat. losas.

2



3



Como consecuencia del incendio en la parte más expuesta del edificio, se observó :

1) Los revestimientos se desastillaron y desprendieron. Ver fotografía Nº 5 de losa.
2) La protección de las armaduras saltaron parcialmente.
3) Los pilares resistieron, observándose sólo disgregación superficial en la parte superior de ellos. Ver fotografía Nº1.

Sin embargo, al analizar la estructura en la parte menos expuesta al fuego, que corresponde a la zona exterior, se observaron serias rupturas causadas por la dilatación de las losas prefabricadas :

1) Esfuerzos de corte en muros de albañilería. Ver fotografía Nº 2.
2) En la altura de la losa entrepiso los muros de fachadas se reventaron hacia afuera. Se observaron, por tal motivo, desaplomos de más de 10 cm.
3) Los pilares más alejados del fuego, sufrieron cortes transversales en la parte superior. Ver fotografía Nº 3.

INCENDIO USINA SORVIREL



4

4 Pilar de hormigón de la usina sometido a ensayo violento.

5 Superficie losa prefabricada después del incendio.

5



Es interesante destacar que el daño causado en la estructura, no se debió a la descomposición del hormigón o a la pérdida de su resistencia mecánica, sino a esfuerzos de corte causados por dilataciones horizontales.

I N C E N D I O P U E N T E B R O N T E

En la revista " Journal of the American Concrete Institute ", de Noviembre de 1963, Peter Smith describe una investigación sobre los efectos del incendio de Mayo de 1959, en el puente Bronte (Canadá).

El puente fue construído unos años antes de la Segunda Guerra Mundial con 4 pistas de circulación, que al ser ensanchado a 6 pistas, el 24 de Mayo de 1959 comenzó un incendio en el arco que observamos en la fotografía Nº 1.

El concreto tenía sólo 19 días y los moldajes estaban todavía colocados. Igualmente fueron consumidos por las llamas parte de los andamios y aislantes de paja. El fuego alcanzó también pilares de 6 días, de 40 días y los del puente viejo que tenían 20 años.

Tan pronto como fueron removidos los escombros, se efectuó una detallada inspección visual, pruebas no destructivas con el martillo de impacto, muestras de taladro y mediciones de vibraciones ultrasónicas.

Los resultados obtenidos indicaron que los

INCENDIO PUENTE BRONTE

1



2



1 Vista general

2 Superficie expuesta al fuego

3 Vista del arco.

3



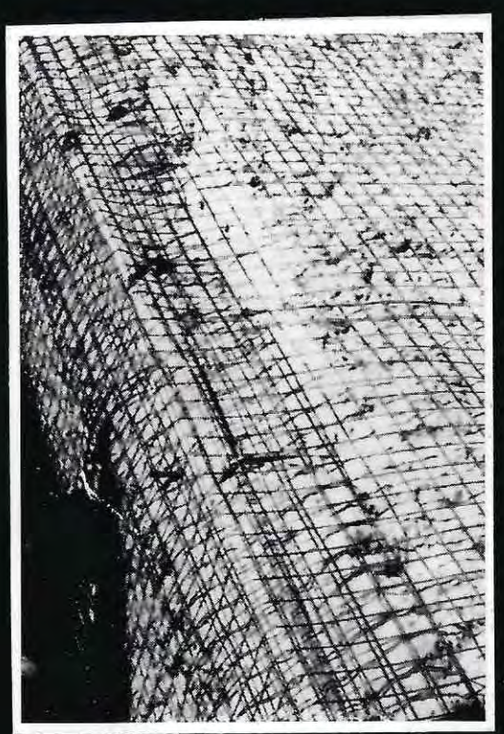
INCENDIO PUENTE BRONTE



4

4 Efecto del fuego sobre la superficie y aristas de un arco del puente.

5 Faena de reparación.



5

hormigones más antiguos resistieron mejor que los nuevos.

En los hormigones de 20 años se obtuvo un psi de 5000 a 6000, valor considerado normal.

En los hormigones de 28 días se obtuvieron 3000 psi.

En los hormigones de 21 días se obtuvieron 2000 psi.

En los hormigones de 6 días se obtuvieron 1800 psi.

E N S A Y O S D E L A B O R A T O R I O

En la revista francesa " Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Batiment " Nº 49, se describe una interesante investigación sobre la resistencia al fuego de pilares de hormigón armado. Esta experiencia se efectuó en un horno especialmente equipado, como podemos apreciar en la foto de ensayo de pilares Nº 4. En las fotos 1, 2 y 3 se observan 3 fases interesantes de la experiencia.

La dosificación para la prueba fue de 350 KgC/m^3 y se empleó el sistema de la curva patrón " tiempo - temperatura ".

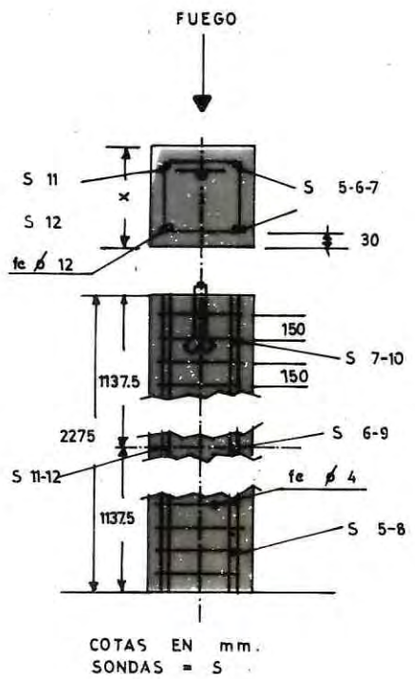
Todos los pilares fueron probados con 26 toneladas de carga y tenían una edad de 3 meses y medio. En la figura Nº 26 se describen todos los datos de la prueba y en la figura Nº 27, se dan los resultados obtenidos.

Otra experiencia muy similar fue hecha en Alemania por H. Seekamp, que fue publicada en el " Deutscher Ausschuss für Stahlbeton ".

En esta experiencia se hicieron ensayos con

REF. CAHIERS DE CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT N° 49

Fig 26



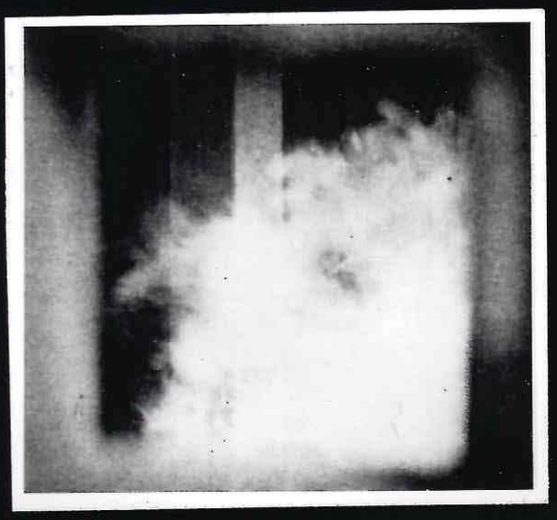
COTAS EN mm.
SONDAS = S

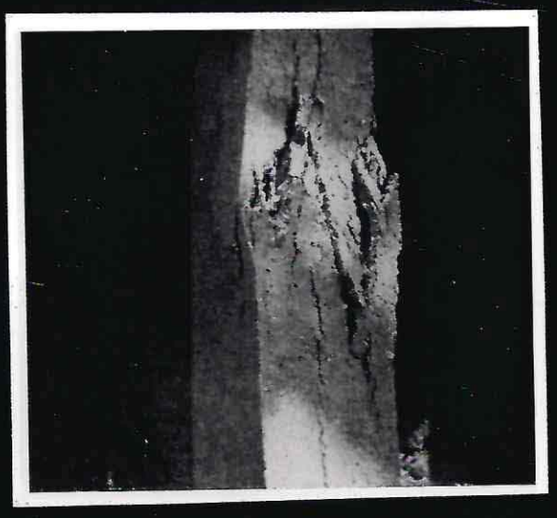
ENSAYOS DE PILARES

ENSAYO	SECCION	ARMADURAS	ESTRIBOS	DURACION DE RESIST. AL FUEGO	CLASIFICACION
A	22.5 × 22.5 cm 506 cm^2	10 mm	4 mm	3 h 12 min	3 h
B	20 × 20 cm 400 cm^2	12 mm	4 mm	2 h 24 min	2 h
C	18 × 20 cm 360 cm^2	14 mm	6 mm	2 h 10 min	2 h
D	15 × 15 cm 225 cm^2	22 mm	8 mm	1 h 33 min	1 h 30 min

ENSAYO PILARES

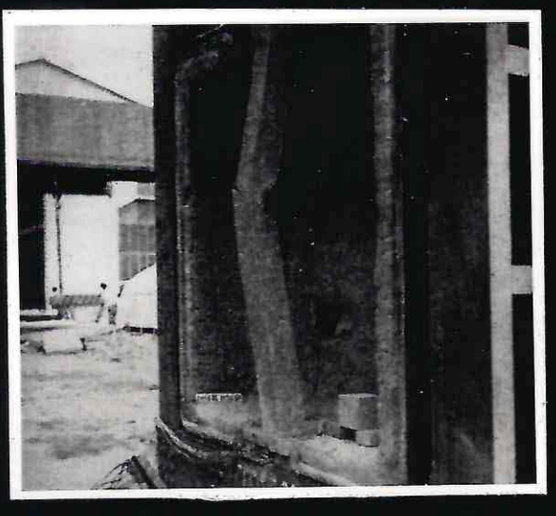
1





2

3



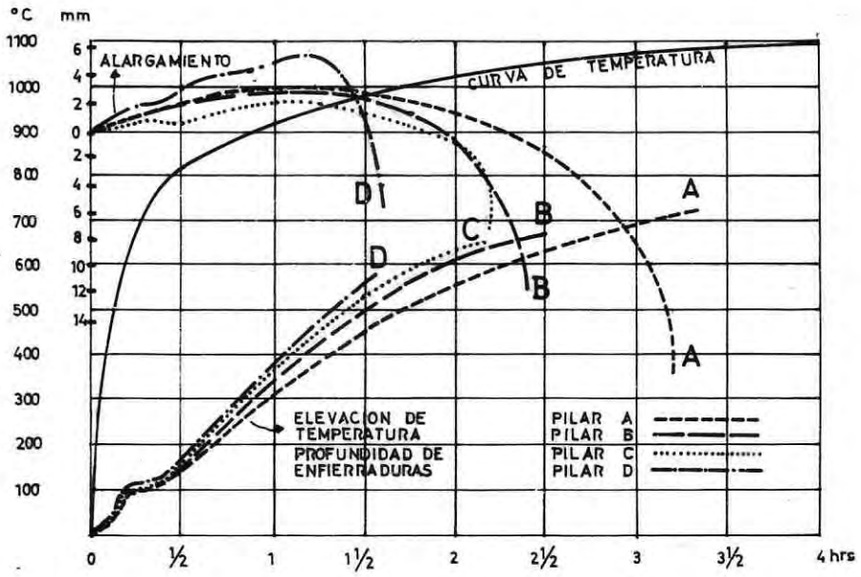
1 Pilar de Hormigón Armado en horno de ensayo

2 Deformación parcial bajo fuego y carga

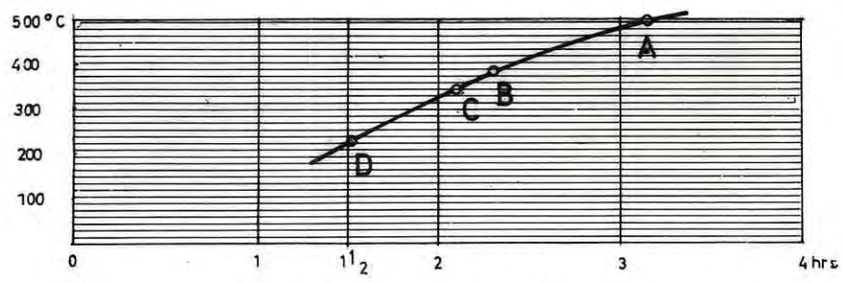
3 Deformación final bajo fuego y carga.

REF. CAHIERS DE CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT Nº 49

Fig 27



ENSAYOS DE PILARES



VARIACION DE DURACION DE RESISTENCIA AL FUEGO EN FUNCION DE LA SECCION DE LOS PILARES A - B - C - D

pilares estucados y no estucados.

Para los pilares estucados de 30 x 30 cm, se anotaron las siguientes observaciones :

15 min	fisuras en las aristas
30 min	comienza desprendimiento de estucos
60 min	hay un desprendimiento de 1/3 del estuco. Comienza la separación del estuco y del hormigón, formando ampollas.
2 hrs 15 min	hay desprendimiento total del estuco.

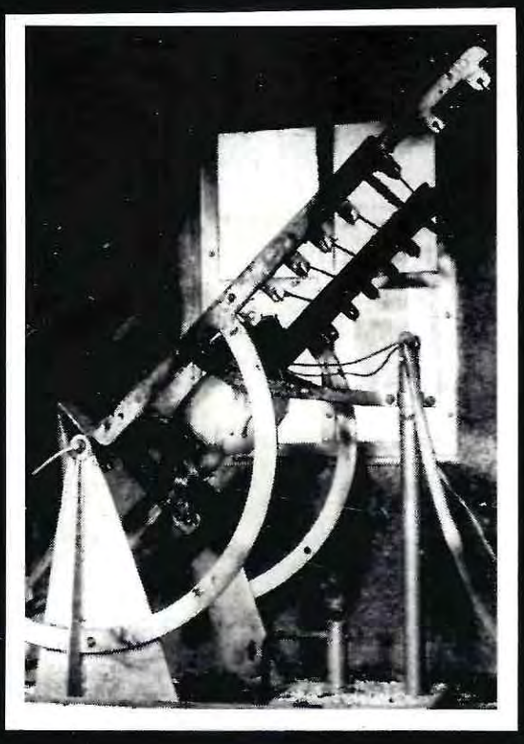
En pilares no estucados :

10 min	Salta un trozo de arista en la sección donde llega el fuego directamente. Aparecen grietas que aumentan lentamente. Con la presión del agua, hay desprendimiento del hormigón disgregado. Ver fotografía 6 de ensayo de pilares.

Los resultados de resistencia al fuego de los pilares, son dados en el cuadro a continuación :

ENSAYO PILARES

4



4 Horno de ensayo de materiales ante el fuego.

5



5 Zona dañada del pilar.

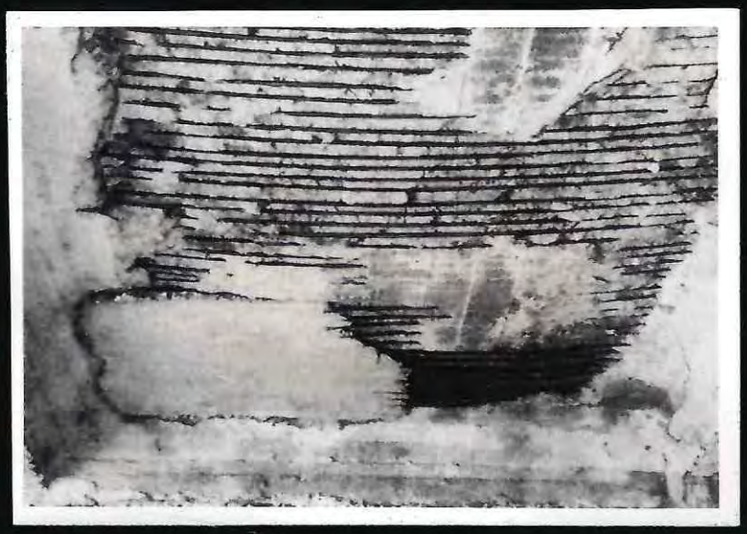
6



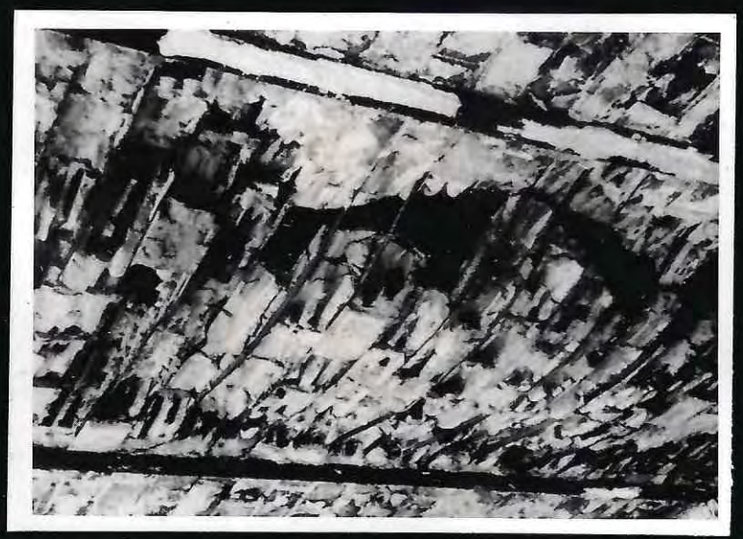
6 Resultado final de un pilar bajo fuego, carga y enfriamiento brusco.

INCENDIO — LOSAS

1



1 Desprendimiento de estucos en losas de H.A.



2

2 Deformación de losas cerámicas de H.A.

3



3 Ruptura de muro albañilería por dilatación losas.

	tiempo resistencia	ruptura	Temp. °C a los 90 min	
			acero	hormigón
30x30 sin estuco	1¼ hrs	1½ hrs	300-600	100-300
20x20 con estuco	1½	1½	200-300	120-130
30x30 con estuco	2½ - 3½	3½	150-200	70-130

E N S A Y O S P R O P I O S

Con el objeto de efectuar un ensayo lo más similar posible a un incendio corriente, se siguió la curva patrón de temperatura y tiempo del gráfico Nº 1. Se consideró como temperatura máxima 900ºC.

DOSIFICACION

La dosificación del hormigón empleado es la siguiente (clase C de 300 KgC/m3) :

grava	-	37,500	Kg
gravilla	-	34,200	Kg
arena	-	39,300	Kg
cemento	-	15,000	Kg
agua	-	7,875	lts
slump	-	0,5	cm
W / C	-	0,52	

Se eligió esta dosificación de hormigón por considerarse como la más corrientemente empleada en la construcción.

PROBETA

La probeta de ensayo es de forma cilíndri-

ENSAYOS PROPIOS



1

1 Ensayo 1er grupo 1, 2 y 3 a los 7 días
Ensayo 2º grupo 1, 2 y 3 a los 28 días

2 y 3 Desprendimiento del agregado grueso del hormigón por deshidratación del cemento.



2



3

ca y tiene las siguientes medidas :

diámetro - 6"

altura - 12"

superficie cara - 172 cm^2

EDAD

Con el objeto de comparar los ensayos de resistencia al fuego de los hormigones, con otros normales (solamente resistencia a compresión), se trabajó con 4 probetas de 7 días y 4 probetas de 28 días. De éstas se emplearon 3 de cada grupo para el ensayo al fuego. Ver fotografía Nº1 de Ensayos Propios.

Debo aclarar que habría sido de gran valor haber probado hormigones de más edad, no habiendo sido posible por estar el Seminario limitado a un plazo de entrega.

HORNO

Por su reducido tamaño permitía solamente la introducción de 2 probetas a la vez. El calor era mantenido con una llama de petróleo que daba diferentes temperaturas dentro del horno. Por tal motivo se determinarán, mediante un pirómetro, las temperaturas para diferentes partes.

HORMIGON 7 DIAS

PRUEBA Nº 1

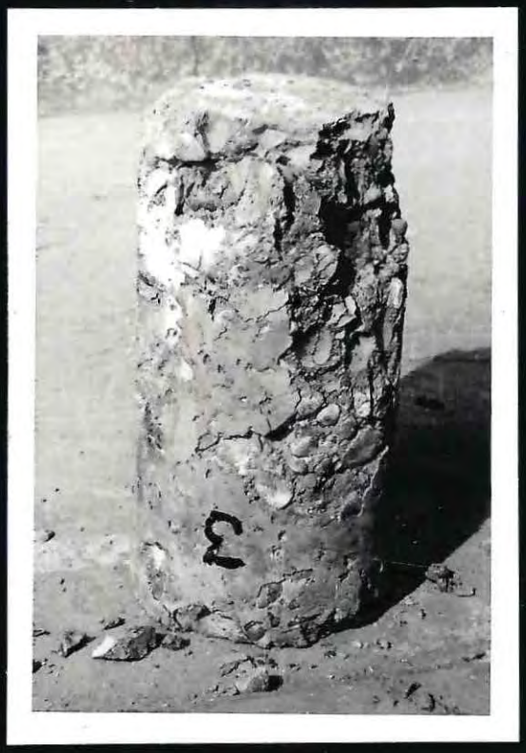
Min. Tiempo	ºC Temp. Horno	Observaciones
1 min	500ºC	- - - -
5 min	500ºC	Pérdida de agua en goteras.
10 min	500ºC	Saltan astillas de la superficie en 4 partes. Comienza expulsión de agua en chorro.
15 min	700ºC	Hay sólo pérdida de agua por evaporación.
30 min	700ºC	No hay pérdida visible de agua.
60 min	900ºC	Los cantos comienzan a disgregarse.
90 min	1000ºC	La probeta se mantiene íntegra. En el mortero se observa un color blanco transparente. En el agregado grueso un color rojo débil. Termina la experiencia.
91 min	- -	Se somete a un enfriamiento violento de agua fría. Hay una fuerte vibración interna.
100 min	- -	Se retira del agua. Se vuelca en el piso y se quiebra en 3 partes. Al tomar un trozo de hormigón se disgrega en las manos. En las fotografías 2 y 3 del ensayo, se observa la separación total del agregado grueso y mezcla. No hay poder aglomerante en el cemento.

HORMIGON 7 DIAS

PRUEBA Nº 2

Min	ºC Horno	Observaciones
1	500ºC	- - - - -
5	500ºC	Aparecen 2 goteras y evaporación de agua.
10	500ºC	Desastillado violento en 3 partes. Quedan boquetes de 2 cm de diámetro. El agua sale, en goteras, por ellos.
15	700ºC	Decrece la pérdida de agua.
30	700ºC	No hay pérdida visible de agua.
45	900ºC	- - - - -
60	900ºC	El cilindro de ensayo se ha desintegrado en una cara. Tiene un color blanco semi-transparente.
61	- -	Enfriamiento violento en agua fría.
70	- -	Se retira del agua.
Nota		Superficie del cilindro muy dañada, no se puede hacer prueba de compresión.

ENSAYOS PROPIOS



4

4 Hormigón de 7 días con 300 Kg C/m^3 después del ensayo al fuego y resistencia mecánica.

5 Hormigón de 28 días con 300 Kg C/m^3 después del ensayo al fuego y resistencia mecánica.



5

HORMIGON 7 DIAS

PRUEBA Nº 3

Min	ºC Horno	Observaciones
1	500º	- - - -
5	500º	Hay pérdida de agua, en forma de gotera, en 3 puntos.
10	500º	Continúan goteras. Aparece evaporación por las 2 caras. Desprendimiento violento de un trozo de hormigón, con agregado grueso. Ver foto Nº 7 de ensayo.
15	700º	Solamente hay pérdida de agua por evaporación.
30	700º	No hay pérdida de agua visible.
60	900º	- - - -
90	1000º	El cilindro de ensayo se mantiene íntegro. El mortero tiene color blanco transparente. El agregado grueso rojo opaco. Termina la operación.
91	- -	Enfriamiento violento en agua fría.
100	- -	Se retira del agua.
		Resistencia a compresión 0,2 Kg/cm^2 Ver foto Nº 4 de ensayo
		Resistencia a compresión 367 Kg/cm^2 sin prueba de fuego

HORMIGON 28 DIAS

PRUEBA Nº 1

Min	ºC Horno	Observaciones
1	500º	- - - -
5	500º	Desprendimiento de agua por 2 goteras.
10	500º	No hay pérdida visible de agua.
15	700º	- - - -
45	900º	Hay disgregación y desprendimiento de un trozo de hormigón. Ver foto Nº 1 de ensayo (en grupo 2 Nº 1).
60	900º	El cilindro de ensayo es retirado. Se observa un color blanco semitransparente.
61	- -	Enfriamiento violento en agua fría.
70	- -	Se retira del agua.
		Cilindro muy dañado para efectuar ensayo de compresión.

HORMIGON 28 DIAS

PRUEBA Nº 2

Min	ºC Horno	Observaciones
1	500º	- - - -
5	500º	Gotera contínua.
10	500º	Decrece pérdida de agua. Desprendimiento violento de trozo de hormigón, con agregado grueso. Diámetro rotura 7 cm y profundidad 2 cm. Aparecen luego 3 piquetes menores. No hay pérdida de agua visible.
15	700º	- - - -
45	900º	- - - -
60	900º	Se retira cilindro de prueba. Se observa un color blanco semitransparente.
61	- -	Enfriamiento violento en agua fría.
70	- -	Se retira del agua.

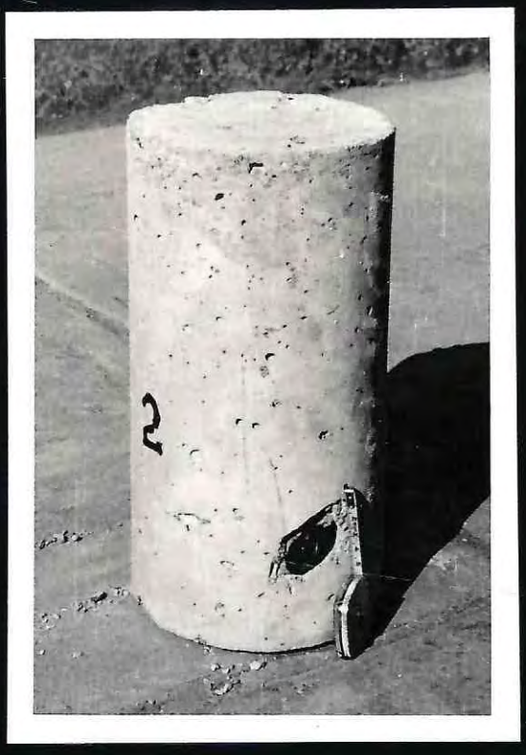
Resistencia mecánica	10 Kg/cm^2
Resistencia mecánica sin prueba del fuego	444 Kg/cm^2

HORMIGON 28 DIAS

PRUEBA Nº 3

Min	ºC Horno	Observaciones
1	500º	- - - -
5	500º	1 Gotera contínua.
10	500º	No hay pérdida de agua visible. Desprendimiento violento de trozos pequeños de hormigón. Diámetro 1 cm, profundidad 5 mm.
15	700º	Comienza nuevamente pérdida de agua por gotera. Desprendimiento violento de hormigón, formando piquetes de 4 cm de diámetro y 5 mm de profundidad. A los 25 min. desaparece la pérdida de agua visible.
45	900º	- - - -
60	900º	Termina la experiencia. Se retira el cilindro. Tiene color blanco semitransparente.
61	- -	Enfriamiento violento en agua fría.
70	- -	Se retira del agua.
		Resistencia mecánica 7 Kg/cm^2
		En foto Nº 5 de ensayo se aprecia que la ruptura produjo grietas y desastillado, mientras que en la foto Nº 4 hubo una ruptura por disgregación inmediata.

ENSAYOS PROPIOS



6

7



6 y 7 Desastillado violento a los 10 minutos.

8 Disgregación superficial.



8

C O N C L U S I O N E S

La resistencia del hormigón armado ante altas temperaturas depende de 2 factores fundamentales que son :

1) Los materiales que lo constituyen.
2) El elemento que el hormigón forma.

1) De acuerdo con la materia expuesta en este Seminario, los materiales del hormigón armado influyen en la siguiente forma :

CEMENTO

A mayor cantidad de cemento Portland, menor resistencia al fuego.
A mayor cantidad de cemento aluminoso, mayor resistencia al fuego.
A mayor cantidad de CaO y SiO_2, menor resistencia al fuego.
A mayor conductibilidad del cemento, menor resistencia al fuego.

AGREGADOS

Con agregados corrientes, la peor resistencia del hormigón armado al fuego.
Con agregados livianos, mejor resistencia al fuego.

Con agregados livianos y cierto % de alúmina, combinados con cemento aluminoso, muy buena resistencia al fuego : hormigones refractarios.
A mayor conductibilidad y peso específico de los agregados en general, menor resistencia al fuego.

AGUA

A mayor cantidad que la químicamente necesaria, menor resistencia al fuego.
Tiene relación directa con la edad del hormigón.
A mayor edad, menor cantidad de agua libre y mayor resistencia al fuego.

ACERO

Mientras más superficial se encuentre en la pieza de hormigón armado, será menor la resistencia al fuego.

DENSIDAD

En términos generales, con los hormigones convencionales, a igualdad de los demás factores, en el hormigón armado se cumple la ley de a mayor densi-

dad, siempre menor resistencia al fuego.

2) Al referirse sobre la resistencia del hormigón armado al fuego, es necesario saber el elemento que éste forma. Para diferentes secciones y masas de hormigón armado, hay diferentes resistencias al fuego.

Como el objetivo principal de este estudio es saber si el hormigón armado, después de aplicada la alta temperatura, sigue respondiendo a las exigencias mecánicas, podemos concluír :

Con el aumento de la temperatura, el hormigón armado de cemento Portland y agregados silíceos, tiene las siguientes pérdidas de resistencia a la compresión

Temperatura hormigón	Pérdida de resist. a compresión
300ºC	20%
400ºC	40%
800ºC	60%
1000ºC	90%

Ahora bien, aunque un incendio provoca usualmente temperaturas cercanas a los 1200ºC, las

estructuras de hormigón armado, frecuentemente soportan estos siniestros en condiciones satisfactorias, en función de la relativa mala conductibilidad térmica de la masa de hormigón, lo que provoca una gradiente que impide temperaturas internas fatales para la resistencia de la estructura.

F U E N T E S D E I N F O R M A C I O N

INCENDIOS :

" Cahiers du Centre Scientifique e Technique du Batiment "	Nº 5
" Aislamiento y Protección de las Construcciones "	R. Cadiergues
" Manual del Ingeniero "	Tomo III
" Manual del Arquitecto y del Constructor "	Kidder Parker
" General Insurance "	Magee

ACEROS :

" Hormigón y Hormigón Armado "	Salliger
" Strengh and Resistance of Metals "	
" Metalurgia Aplicada "	Burton

HORMIGONES :

" Magazine of Concrete Research "	Nº 51
" Magazine of Concrete Research "	Nº 43
" Hormigón y Hormigón Armado "	Salliger
" Ultimos Avances "	Inst. Torroja Nº 104
" Aislamiento y Protección de las Construcciones "	R. Cadiergues
" Acción del Calor sobre los Hormigones "	Inst. Torroja Nº 217
" Magazine of Concrete Research "	Nº 39

" Concrete Engineering Handbook "	
" Manual del Arquiteco y del Constructor "	Kidder Parker
" Beton et Mortier du Cement Armes ou non Armes "	
" Hormigón Armado "	Murdock
" Hormigón en Masa y Armado "	Kleinlögel
" The Chemestry of Cement and Concrete "	F. M. Lea C. H. Desch
" Journal of the American Concrete Institute "	Mayo 1961
" Journal of the American Concrete Institute "	Nov. 1963
" Zement Kalk Gips "	vol. 10 - 1957
" Deutscher Ausschuss für Stahlbeton "	1959
" Cahiers du Centre Scientifique du Batiment "	Nº 49
" Annales de l'Institut Technique du Batiment "	1959