

PÉRDIDA DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL HORMIGÓN PARAGUAYO DEBIDO A LA ACCIÓN DEL FUEGO

Ing. José Tomás Riera *
CTI Movil – E-mail: josedomasr@hotmail.com
Ing. Christian Dingeldein **
Sental Paraguay – E-mail: christian_dingeldein@yahoo.com
Ing. Silvio Quiñónez ***
Frigorifico Concepción S.A. – E-mail: silvio_q@hotmail.com

Palabras claves: Hormigón - Resistencia mecánica – Fuego

RESUMEN

Nuestro objetivo fue evaluar las alteraciones macro-estructurales y de resistencia a la compresión del hormigón realizado con materiales paraguayos luego de ser sometido a elevadas temperaturas.

Para el efecto fabricamos 504 probetas de hormigón con dosificaciones distintas, variando el tamaño máximo de agregado y las relaciones agua/cemento.

Las quemamos en un horno para materiales cerámicos en el cual pudimos controlar la temperatura máxima alcanzada y la tasa de aumento de temperatura.

Por último, las separamos en distintos grupos para poder evaluar la recuperación de resistencia y masa a lo largo del tiempo, es por esto que pesamos las probetas y realizamos ensayos de compresión al día siguiente, a los 28 días y a los 56 días, contados a partir de la quema de las probetas.

Los resultados obtenidos reflejaron que el hormigón fabricado con materiales paraguayos tiene un comportamiento similar al experimentado en otros países.

* Fiscal de Obras Civiles

** Gerente Administrativo

*** Encargado de Obras Civiles

1. INTRODUCCIÓN:

La fama que poseen las estructuras de hormigón como resistentes en caso de incendio se debe a las características térmicas del material, tales como su incombustibilidad y conductividad térmica baja, además el hormigón no exhala gases tóxicos al calentarse y las estructuras de hormigón presentan mayor masa y volumen en comparación a las de elementos metálicos.

Sin embargo, el aumento de la temperatura en los elementos de hormigón causa la reducción de su resistencia característica y también la de su módulo de elasticidad. La pérdida de rigidez de la estructura y el carácter heterogéneo de los componentes del hormigón armado (pasta, agregados y acero) conduce a la degradación por fases del mismo, pudiendo llevar las piezas estructurales a la ruina. Esta degradación puede ser anticipada dependiendo de las características de la pasta, como la proporción de humedad y los aditivos utilizados. Es por esto que a pesar de las características positivas del hormigón en casos de incendio, existen varios ejemplos de colapso estructural debido a daños progresivos.

2. JUSTIFICACIÓN

El hormigón es un material ampliamente utilizado en la ingeniería, para la construcción de diversos tipos de estructuras. El mismo es, tanto química como físicamente, uno de los más complejos entre los usados en la construcción civil a temperatura ambiente, siendo aún más complejo cuando es expuesto a elevadas temperaturas, tales como las de un incendio.

La variada utilización del hormigón en la construcción demanda una evaluación de sus propiedades en situaciones peculiares, tales como durante la ocurrencia de un incendio. Siniestros de este tipo representan una de las más severas situaciones a la que la estructura puede estar sometida. Por esta razón nos pareció fundamental realizar una investigación sobre las propiedades del hormigón a elevadas temperaturas.

3. OBJETIVOS:

El objetivo principal de trabajo fue el de contribuir al desarrollo de la tecnología del hormigón en el país, en lo que se refiere a sus propiedades en situaciones de exposición

a altas temperaturas, tales como en situaciones de incendio. Este deseo de comprender el comportamiento de dicho material frente a ese tipo de situaciones adversas se ve sustentado por el hecho de ser el elemento constituyente por excelencia de las estructuras de la construcción civil en el Paraguay.

Como objetivos secundarios se establecieron:

- Analizar los factores influyentes en el fenómeno de degradación térmica de hormigones, tales como temperatura de exposición, tipo de agregado, relación agua cemento, rehidratación.
- Evaluar el desempeño macro-estructural expresado en términos de resistencia a la compresión simple, de cuerpos de prueba sometidos a la acción de temperaturas elevadas.
- Evaluar la pérdida de masa de cuerpos de prueba sometidos a la acción de temperaturas elevadas.

Dada la complejidad del tema, varias limitaciones se imponen al momento de interpretar los datos obtenidos en esta investigación.

Una de las principales cuestiones que debe ser considerada al ensayar hormigones a altas temperaturas, consiste en simular las condiciones reales de utilización. En la práctica, las estructuras de hormigón están sujetas a una cantidad de carga considerable durante un incendio, y este aspecto ha sido dejado de lado en la mayoría de los estudios realizados y en este también, debido a la complejidad de los ensayos de exposición al fuego de piezas sometidas a carga. Habiendo expuesto esta importante limitación, es necesario mencionar que los efectos de la carga en las propiedades mecánicas del hormigón sometido a elevadas temperaturas aún no han sido bien evaluados, dada la significativa influencia de la carga en las propiedades de tensión-deformación, en las características hídricas y micro-estructurales.

Además, es necesario considerar la influencia del tamaño de la pieza, ya que el calentamiento del hormigón produce gradientes de tensión, temperatura y humedad que variarán dependiendo del volumen y profundidad de la pieza. Se admite en muchos estudios, erróneamente, que los cuerpos de prueba (generalmente pequeñas piezas de hormigón), calentados son representativos de la "estructura" y no del "material".

Los problemas continúan con la evaluación de algunas propiedades, como la masa residual y la permeabilidad para citar algunos, ya que los ensayos son realizados a temperatura ambiente, después del enfriamiento del hormigón, puesto que los equipamientos y métodos de ensayo no son adecuados para ser aplicados a probetas que se encuentran calentadas a elevadas temperaturas. La estructura físico-química del hormigón durante el calentamiento puede diferir considerablemente de su estructura después de del enfriamiento, haciendo que las propiedades mecánicas del hormigón después de la exposición al calor pudiesen no representar las propiedades durante la misma.

Por otro lado, cabe recordar que cuando se realizan ensayos a temperatura ambiente, el régimen térmico es estático, no consiguiendo simular correctamente las condiciones térmicas dinámicas que ocurren durante el calentamiento en un incendio.

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para conseguir nuestros objetivos fabricamos 504 probetas de hormigón cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Facultad de Ingeniería U.N.A., con ayuda de los profesores encargados del mismo laboratorio.

Utilizamos 6 dosificaciones distintas:

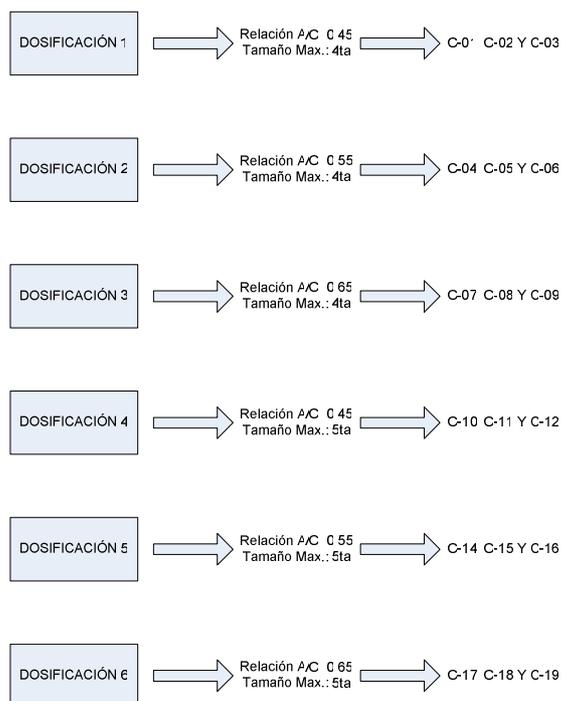


Figura 1. Dosificaciones del método experimental

Decidimos utilizar una tasa de calentamiento de 5°C por minuto, por ser esta la utilizada por varios investigadores en estudios similares al nuestro, como ser los de los investigadores Balendram; Nadeem y Maqsood; Komonen y Penttala; Sun, Luo y Chan.

Para definir el tiempo de exposición al calor, debimos adoptar el siguiente criterio: procuramos que cada probeta sufra los efectos del calor en la totalidad de su masa. Es decir, calentar cada probeta durante el tiempo necesario para que el núcleo de la probeta alcance la temperatura máxima del ensayo.

Ambrosio de Souza, Lopes Moreno y Brum Prata Bizzo (investigadores brasileiros, autores de "Efeito do fogo no concreto"), calentaron probetas con distintas dosificaciones de hormigón con un termómetro externo y uno en el seno de la misma.

La tabla 1 es el resultado de su investigación. Utilizamos estos resultados para definir los tiempos de quemado que son los que figuran en la tabla 2, necesarios para que se alcance la temperatura máxima de quemado y luego ésta sea mantenida durante 30 minutos.

Temperatura	Tipo de Agregado	Tiempo necesario que el seno de la probeta alcance la temperatura de la superficie
300° C	Arcilla Expandida	140 minutos
	Basalto	160 minutos
	Calcareo	130 minutos
600° C	Arcilla Expandida	160 minutos
	Basalto	200 minutos
	Calcareo	160 minutos

Tabla I. Tiempo de exposición a la temperatura para cada tipo de agregado de hormigón

Temperatura	Tiempo de quema adoptado en el TFG
300° C	190 minutos
450° C	210 minutos
600° C	230 minutos

Tabla II. Tiempos de quema adoptados en el trabajo para cada temperatura

Decidimos utilizar el método más habitual para enfriar las probetas, el ataque con agua, puesto que representaría la acción directa de los bomberos. Sin embargo, también quisimos observar las diferencias que existirían entre cuerpos de prueba enfriados rápidamente (con agua) y lentamente, lo que simularía una extinción del incendio por falta de combustible. Este último objetivo fue logrado apagando el horno y esperando a que

su interior se encuentre a temperatura ambiente. Evidentemente, en el caso del enfriado rápido esto no fue realizado, ya que el horno fue abierto mientras aún mantenía los 300° C, y para simular la acción de los bomberos durante el siniestro, las probetas fueron enfriadas con chorros de agua a temperatura ambiente. Es importante mencionar que no fue posible realizar el enfriado rápido de probetas sometidas a 600° C, porque el horno utilizado no permitía la apertura de la puerta mientras existiese en su interior una temperatura mayor a 310° C.

Cuando el hormigón es calentado, el agua libre presente en la pasta se evapora. Al llegar a los 100° C, la temperatura del material permanecerá inalterada hasta que toda el agua evaporable sea perdida, inclusive el agua adsorbida. Solamente después de la esta pérdida, el hormigón excederá los 100° C. A partir de este nivel, el agua químicamente combinada comienza a perderse, deshidratando los silicatos de calcio hidratado, responsables de la mayor parte de la resistencia del hormigón. Al alcanzar los 710° C, los silicatos se hayan extintos. También, al acercarse a los 400° C se inicia la descomposición de los hidróxidos de calcio, en óxido de calcio y vapor de agua. Cuando la temperatura alcanza los 535° C la deshidratación de los hidróxidos de calcio, responsables de la pasivación de las armaduras, es completa. Es, por lo tanto, evidente la relación que existe entre la evaporación del agua en la masa del hormigón y la pérdida de sus características mecánicas.

Existen autores que afirman que estas características pueden ser recuperadas por el hormigón, debido a la rehidratación. Sin embargo, son pocos y controvertidos los estudios sobre la recuperación de la resistencia mecánica de hormigones sometidos a elevadas temperaturas debido a la rehidratación. Decidimos estudiar este fenómeno pero debíamos decidir las características de rehidratación de las probetas quemadas, pues estas podían esperar la fecha de rotura al aire libre, sumergidas en agua, pintadas con algún producto de curado, envueltas en plástico (para poder evitar la rehidratación), etc. El valor más representativo de rehidratación es el que refleje la recuperación de agua presente en la humedad del ambiente. De esta manera, decidimos no influenciar esta etapa con algún elemento que perturbe la recuperación natural de agua en el seno del hormigón y dejamos las probetas expuestas al aire, pero bajo techo, hasta su rotura.

4.1 Ensayos realizados

Medición de masas

Todas las probetas quemadas, salvo las de la quema de 300° C enfriado rápido, fueron pesadas antes y después de realizar las quemas. También fueron pesadas a los 28 y 56 días luego de quemadas, antes de realizar el ensayo de compresión de las mismas.

Las probetas que fueron quemadas a 300° C y luego enfriadas rápidamente no fueron pesadas pues la variación de la masa sería alterada por el agua utilizada para el enfriado de las mismas.

Rotura por compresión simple

Los ensayos de roturas por compresión simple fueron realizados en distintas fechas. Inicialmente se rompieron las probetas testigo que servirían para poder conocer la resistencia previa a las quemas. Luego se rompieron las probetas quemadas en tres fechas para cada quema:

- El día siguiente a la quema
- 28 días después de la quema
- 56 días después de la quema

5. CONCLUSIONES

Es fundamental recordar que las comparaciones entre resistencias a compresión y masas que encaminaron a estas conclusiones fueron comparaciones entre proporciones y no comparaciones de valores absolutos.

Por último, las conclusiones obtenidas en este trabajo se refieren a las conseguidas con el método experimental ejecutado y, si bien pueden ser extrapoladas y se encuentran justificadas, no deben pasarse por alto las limitaciones propias a investigaciones de estas características.

5.1 Las dosificaciones preparadas con tamaño máximo de agregado de 25 mm (aquellas preparadas con piedra triturada 4ta) sufrieron una mayor pérdida de resistencia debido a las altas temperaturas que aquellas fabricadas con tamaño máximo de agregado de 12,5 mm (las dosificaciones preparadas con piedra triturada 5ta).

Esta conclusión afirma que un hormigón preparado con un tamaño máximo de árido menor resiste mejor la acción del fuego que uno preparado con áridos mayores. Esperábamos que las probetas preparadas con piedra triturada 5ta perdiesen más

resistencia que aquellas preparadas con piedra triturada 4ta pues las primeras poseen más pasta por metro cúbico de hormigón y la pasta es la principal afectada por las altas temperaturas (pues son los elementos hidratados los que se deshidratan y pierden su resistencia durante el calentamiento).

El estudio de la granulometría revelaba que la triturada 4ta utilizada era mucho mayor en dimensiones que la triturada 5ta, además la triturada 4ta ocupaba aproximadamente un tercio del peso de la mezcla en aquellas dosificaciones que la utilizaron en su dosificación. Creemos que esta diferencia de tamaños de los componentes del hormigón es fundamental al estar sujeta a elevadas temperaturas, pues todos los constituyentes de la probeta se expanden debido al calor. Esta expansión depende de la variación entre la temperatura inicial, el material que se está expandiendo y el tamaño inicial del cuerpo.

Entonces, mientras mayor es el cuerpo calentado, mayor será su expansión. Creemos que la piedra triturada 4ta sufrió una mayor expansión que la triturada 5ta, debido a su mayor volumen y que esta mayor expansión originó microfisuras de gran tamaño que terminaron debilitando más a los cuerpos de prueba preparados con triturada 4ta.

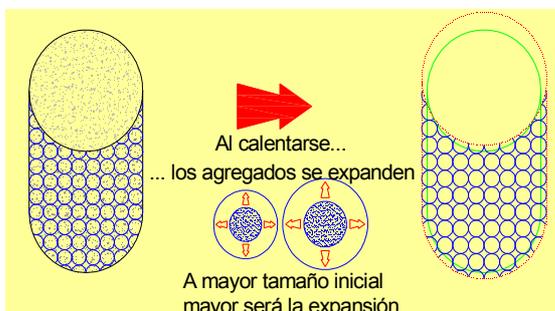


Figura 2. Expansión de la probeta y sus componentes debido al calor

Además, los esfuerzos generados dependen de la magnitud de los movimientos impedidos. Y en el caso ensayado, no solo los movimientos impedidos de la triturada 4ta eran mayores (debido a su mayor expansión), si no que las superficies de apoyo de los esfuerzos eran menores, pues la superficie específica de esta triturada es menor que la de la triturada 5ta. Esta sería una razón más para suponer que las microfisuras originadas en las probetas preparadas con piedra triturada 4ta serían mayores, pues los esfuerzos son mayores y se encuentran más concentrados.

5. 2 Es mayor la pérdida de resistencia en el hormigón enfriado rápidamente, con agua, que en aquel enfriado lentamente.

Durante el ensayo las probetas se encontraban a 300° C cuando fueron regadas por chorros de agua fría, es más, nos aseguramos que el corazón de las probetas también se encuentre a esa temperatura al empezar el enfriamiento rápido.

Al ser enfriadas bruscamente la superficie de la probeta en contacto directo con el agua baja de temperatura más rápido que el corazón de la misma. Esta disminución de temperatura conlleva una reducción de volumen, sin embargo el corazón de la probeta, al no encontrarse a la misma temperatura que la superficie, no acompaña esta disminución de volumen. Tenemos, pues, una situación de movimientos impedidos debido a la diferencia de temperaturas entre el interior de la probeta y su superficie, que creemos que genera una serie de esfuerzos y fisuras que debilitan al hormigón. Esta sería una de las razones por las que el hormigón enfriado rápidamente pierde más resistencia que el enfriado lentamente.

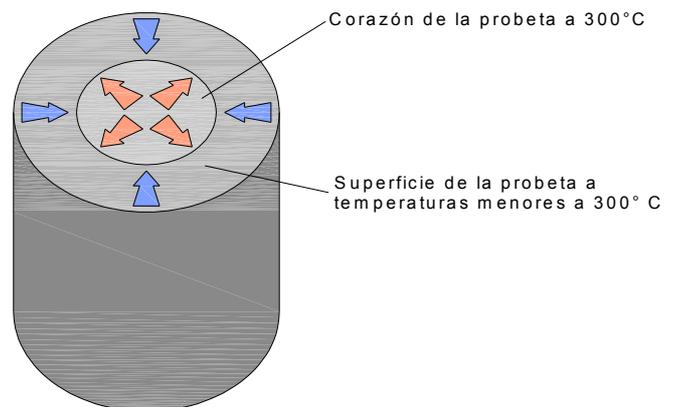


Figura 3. La probeta al ser enfriada con agua posee grandes gradientes de temperatura en su interior

5. 3 Las relaciones A/C no influyeron en la resistencia residual al día siguiente de quemado de los cuerpos de prueba ni en la recuperación de resistencia, para dosificaciones con tamaños máximos de agregados iguales.

En realidad, antes de realizar los ensayos creíamos que las dosificaciones con mayores relaciones de A/C sufrirían una mayor pérdida de resistencia que aquellas de menores relaciones de A/C, pues las primeras poseen una menor cantidad de elementos hidratados

(por tener menos cemento en la dosificación) y estos son los componentes del hormigón que son destruidos por las altas temperaturas.

Analizando más profundamente el problema, podemos suponer que la cantidad de calor que llegó a cada una de las probetas en el horno fue la misma (las probetas fueron colocadas de manera ordenada para que no influyan las unas con las otras durante la quema). También podemos suponer que los componentes del hormigón en cada una de las probetas se encontraban uniformemente distribuidos, pues se tomaron las precauciones necesarias para obtener esta característica durante la elaboración de las mismas.

Por último debemos imaginar a cada componente dentro de la probeta sometido al calor de la quema. Según la dosificación de cada probeta tendremos a los agregados gruesos formando un 40 a 43% de la probeta, a los agregados finos ocupando un 30 a 36% de la probeta, y a la pasta de agua y cemento constituyendo el 21 a 29% restante (estos serían los elementos hidratados). La cantidad de calor absorbida por el cuerpo de prueba debe distribuirse en estos componentes, y como habíamos supuesto que estos se hallaban uniformemente esparcidos en el cuerpo de prueba se puede deducir que, si bien existen probetas con más elementos hidratados que otras, el calor quema una cantidad proporcional al total de elementos hidratados, pues el calor que no quema elementos hidratados se halla calentando algún otro componente de la probeta.

Esto explicaría porque la resistencia residual no depende de la relación A/C, pues a pesar de que ciertas dosificaciones poseen una mayor cantidad de elementos hidratados, estos son quemados proporcionalmente.

Con respecto a la recuperación de resistencia a lo largo del tiempo, debido a la rehidratación de los elementos anhidros, creemos que sucede algo similar a lo anterior.

Para poder entender el concepto es necesario recordar que las probetas estuvieron en iguales condiciones de rehidratación, expuestas al aire pero bajo techo. Con estas acciones procuramos que todas las probetas accedan a la misma cantidad de agua del ambiente durante los periodos de recuperación de resistencia.

Si suponemos que, efectivamente, la cantidad de agua que abordó a cada probeta fue la misma nos encontraremos con que la cantidad de agua que consiguió penetrar a las probetas dependería de la porosidad de cada una de las dosificaciones. Pero después del ensayo el concepto de porosidad cambia radicalmente, pues las microfisuras creadas durante la quema tienen diámetros de hasta diez veces los de los poros iniciales, y debido a esto el volumen de la red de poros se ve varias veces multiplicada. Entonces, las distintas porosidades que aportan las dosificaciones con relaciones A/C diferentes son obsoletas luego de la quema, se puede suponer que la red de poros y microfisuras es de mucho mayor tamaño y relevancia a las diferencias que existían antes de la quema.

Así, debido a lo explicado anteriormente, podemos suponer que cantidad de agua que penetró a las probetas fue la misma. Los cuerpos de prueba de dosificaciones con menores relaciones A/C poseían más cemento, por lo tanto más elementos anhidros que hidratar y, efectivamente, fueron más los elementos hidratados y mayor el aumento de resistencia en kilogramos por centímetro cuadrado, pero proporcionalmente todas las dosificaciones, independientemente de la relación A/C, recuperaron la misma resistencia.

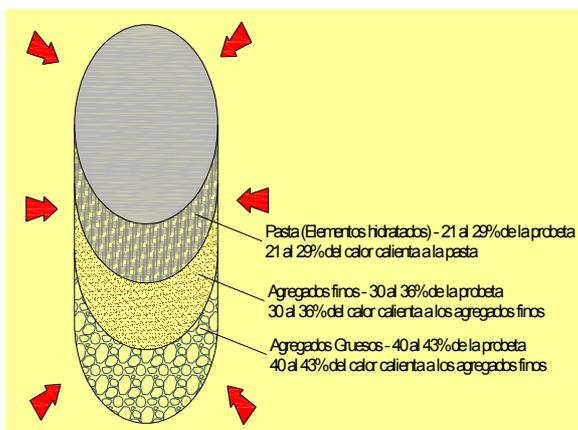


Figura 4. Calentamiento de los componentes del hormigón

5.4 Los cuerpos de prueba recuperaron más resistencia a la compresión durante los primeros 28 días postquema que en los siguientes 28 días.

La recuperación de resistencia se debe a la rehidratación de los elementos anhidros. Estas reacciones entre los elementos anhidros y el agua progresan con el tiempo, siendo, por ende, de carácter asintótico. Es por esto que suponemos que la recuperación de resistencia se asemeja al endurecimiento inicial del hormigón, que en los primeros días aumenta de manera significativa y a medida que transcurre el tiempo continúa pero de manera cada vez más lenta.

5.5 La recuperación de resistencia de las probetas no fue influenciada por el tamaño máximo del árido con el que fueron elaboradas.

Esto se debe a que la recuperación de la resistencia depende de la rehidratación de los elementos anhidros del cemento.

5.6 Los factores de reducción de resistencia, según la temperatura máxima alcanzada en cada quema, fueron similares a los sugeridos por el Eurocódigo 2 (2001) y la Norma Brasileira NBR 6118.

El hormigón elaborado con materiales paraguayos se comportó, bajo los efectos del fuego, de manera similar al ensayado en otros países.

5.7 Las dosificaciones preparadas con tamaño máximo de agregado de 25 mm (aquellas preparadas con piedra triturada 4ta) sufrieron una menor pérdida de masa debido a las altas temperaturas que aquellas fabricadas con tamaño máximo de agregado de 12,5 mm (las dosificaciones preparadas con piedra triturada 5ta).

Las dosificaciones preparadas con triturada 4ta tenían menos agua que aquellas preparadas con triturada 5ta, suponemos que esta es la razón por la cual las primeras perdieron menos peso que las segundas.

5.8 Los cuerpos de prueba recuperaron más masa durante los primeros 28 días postquema que en los siguientes 28 días.

La recuperación de masa se debe a la recuperación de agua dentro del cuerpo de prueba, tanto la libre como la adsorbida y la químicamente combinada. Esta rehidratación progresa con el tiempo y adquiere características asintóticas.

5.9 Las diferentes relaciones de A/C no influyeron en la masa residual al día siguiente de quemado de los cuerpos de prueba, para dosificaciones con tamaños máximos de agregados iguales.

La cantidad de agua utilizada en las distintas dosificaciones para un mismo tamaño máximo de agregado fue la misma, solo la cantidad de cemento variaba para obtener las distintas relaciones A/C. Es por esto que no

existieron diferencias significativas entre las masas residuales, pues el agua es, sin la menor duda, el elemento más influyente en la pérdida de masa de las probetas.

5.10 El tamaño máximo del árido ni la relación A/C con la que fueron fabricadas las probetas no influyeron en la recuperación de masa.

Si aceptamos que la cantidad de agua que penetra a la probeta durante el periodo de recuperación es la misma, como se ha explicado anteriormente, parte de esta reacciona con los elementos anhidros y ayuda en la recuperación de resistencia del cuerpo de prueba, otra parte es adsorbida (o sea retenidas sobre la superficie de la mezcla) y otra queda libre dentro de la red de poros y microfisuras (no se combina químicamente ni es adsorbida). Es decir, la cantidad de agua que penetra a la probeta queda dentro de la misma, combinada o no, sin que en esto influya el tamaño máximo del árido ni la relación A/C utilizada durante la confección de las mismas.

5.11 No existe una diferencia significativa entre la masa residual de las probetas ensayadas a 450 L y 600 L, el promedio de las mismas es de 91,94% y 91,99% respectivamente. La diferencia entre la masa residual de las probetas ensayadas a 300 L con las anteriormente mencionadas es significativa, el promedio de estas últimas es de 94,16%.

La pérdida de masa de la probeta se debe principalmente a la pérdida del agua libre y la adsorbida, inicialmente, y luego a la químicamente combinada. Es por esto que este fenómeno refleja que los silicatos de calcio hidratados sufren un proceso de deshidratación que se inicia a los 100° C y termina aproximadamente a los 400° C, y también, aproximadamente a los 400° C ocurre una abrupta pérdida de masa debido a la deshidratación de la portlandita.

Los pesos de las probetas sometidas a 450 L y 600 L fueron muy similares pues los S-C-H y la portlandita ya habían desaparecido a los 400° C, en cambio dentro del seno de las probetas sometidas a 300 L, aún existían.

6. BIBLIOGRAFÍA

6.1 Considerações sobre as normas brasileiras de estruturas em situação de incêndio.

Valdir Pignatta e Silva. Professor doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

6.2 NISTIR 5934 Fire Performance of High-Strength Concrete: A report of the State-of-the-Art

L.T.Phan. Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, Maryland.

6.3 Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio. Métodos tabulares apresentados em normas internacionais.

Carla Neves COSTA; Eng^a Civil, M.Sc., Doutoranda, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Valdir Pignatta e SILVA Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

6.4 Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas.

Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Tesis de Doctorado; PORTO ALEGRE, Brasil.

6.5 Fire Performance of High-Strength Concrete Structural Members

V.K.R. Kodur, Research officer in the Fire Risk Management Program of the National Research Council's Institute for Research in Construction.

6.6 Efeito do fogo no concreto: avaliação da influência do tipo de agregado e da reidratação.

Adriana Aparecida Ambrosio de Souza, Mestranda do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas; Armando Lopes Moreno Júnior, Professor Doutor do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas; Laura Brum Prata Bizzo, Pós-Doutoranda do Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas.