

ANÁLISIS DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE HORMIGÓN H23 Y SU RELACIÓN CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

ANALYSIS OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF H23 CONCRETE AND ITS RELATIONSHIP WITH COMPRESSION RESISTANCE

ROCHA ARGOTE, F.

RESUMEN

La resistencia del hormigón es un factor determinante en cuanto a la calidad del mismo, que a medida que pasa el tiempo presenta un incremento, en parte debido a la pérdida de agua dentro del proceso de endurecimiento, esto provoca constantes cambios dentro de sus propiedades físicas, siendo una de ellas su conductividad térmica, ya que este valor es sensible a la presencia de agua o aire dentro del material analizado. El objetivo de esta investigación es precisamente analizar la conductividad térmica de un hormigón H23 para obtener una relación con su resistencia a compresión y así estimar dicha resistencia a través del tiempo. Los métodos utilizados para este estudio están regidos bajo las normas ASTM, ACI para la elaboración de la mezcla y el equipo TLS-100 para el análisis de las propiedades térmicas en campo. Los resultados obtenidos demuestran que a medida que va disminuyendo el agua de la mezcla durante el proceso de endurecimiento del hormigón las propiedades térmicas presentan variaciones crecientes y decrecientes sobre todo cuando el hormigón alcanza el día 14, esto debido a que la conductividad y difusividad térmica varía con el agua y el aire, ya que a los primeros días se registra un material compuesto hormigón y agua y después del día 14 se registra un material poroso cambiando de esta manera la lectura de las propiedades térmicas.

ABSTRACT

The resistance of concrete is a determining factor in terms of its quality, which increases as time goes by, in part due to the loss of water during the hardening process, this causes constant changes within its physical properties, one of them being its thermal conductivity, since this value is sensitive to the presence of water or air within the material analyzed. The objective is precisely to analyze the thermal conductivity of H23 concrete to obtain a relationship with its compression resistance and thus estimate said resistance over time. The methods used for this study are governed by ASTM and ACI standards for the preparation of the mixture and the TLS-100 equipment for the analysis of thermal properties in the field. The results obtained demonstrate that as the water in the mixture decreases during the concrete hardening process, the thermal properties present increasing and decreasing variations, especially when the concrete reaches day 14, this is because the thermal conductivity and diffusivity varies with water and air, since in the first days a composite material of concrete and water is recorded and after day 14 a porous material is recorded, thus changing the reading of the thermal properties

PALABRAS CLAVE

Hormigón,
Conductividad térmica,
Porosidad,
ASTM,
ACI,
TLS-100

KEYWORDS

Concrete,
Thermal conductivity,
Porosity,
ASTM,
ACI,
TLS-100

INTRODUCCIÓN

El hormigón es la mezcla de un material aglutinante (cemento), un material de relleno, como los agregados y agua, que a través del tiempo desarrolla una resistencia a compresión (Diego, 2001) (Zoldners, 1973), donde previo a este proceso, pasa por un estado fresco donde el agua de amasado rodea y humecta el cemento penetrando así desde el exterior hacia el interior de los agregados, lo que da inicio a reacciones químicas.

En un principio, esta estructura contiene una gran cantidad de poros y capilares formados por el agua no combinada, química o físicamente, a medida que la hidratación progresa, los poros van reduciendo debido a que son llenados por un gel coloidal producto de los sólidos de hidratación, esto produce un aumento de resistencia mecánica en el tiempo. (Solas A. & Giani D., 2010).

Dentro del proceso de endurecimiento del hormigón se produce una reducción de la porosidad del mismo dando lugar a cambios dentro de las propiedades físicas del hormigón, una de ellas es la conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad esencial dentro de los balances de energía en la transferencia de calor, siendo de esta manera una propiedad de transporte definido mediante la ecuación de Fourier.

$$q \propto A \frac{dT}{dx} \tag{1}$$

La proporcionalidad se convierte en:

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \tag{2}$$

Donde q es el flujo de calor en joule, A es el área dT es la variación de la temperatura y K es la conductividad térmica medida en W/mK. El signo negativo indica que el flujo de calor decrece acorde al espesor del elemento analizado.

La conductividad térmica depende de muchos factores, según los elementos que forman parte en un determinado estrato, en el caso del hormigón depende de los materiales que lo conforman, como ser los agregados, además de la dosificación siendo un factor muy importante la cantidad de agua (Zoldners, 1973).

Esto incluye de igual manera la porosidad presentando bajos niveles de conductividad térmica en hormigones porosos (Svanholm, 1980), esto tiene cierta relación con la resistencia del hormigón, ya que al elaborar hormigones porosos se reduce significativamente la cantidad de agua ocasionando bajas conductividades térmicas a edades tempranas ya que la conductividad del agua registrada es 0.58 W/mK y del aire 0.02 W/mk (Thermtest, 2020) y por ende bajas resistencias.

La resistencia mecánica del hormigón, esta se ve afectada según la temperatura a razón de 20 a 120 °C en la cual depende de los agregados que lo conforman, condicionándolo de esta manera en su resistencia a compresión (Naus, 2010).

De esta manera se determinó que la resistencia del hormigón y el módulo de deformación inicial del hormigón decrecían, mientras que el valor de la deformación máxima del hormigón aumentaba (Youssef, 2007).

MÉTODOS Y MATERIALES

Los materiales empleados fueron muestras cilíndricas de hormigón tipo H23 elaborados con cemento Camba IP-40 y agregados procedentes de San Ramón, Río Iquise, cuyas

propiedades físicas fueron obtenidas mediante las normas ASTM mostradas a continuación.

Tabla 1. Ensayos de calidad para los materiales que componen el hormigón

Ensayo	Norma ASTM	Agregado		Cemento
		Fino	Grueso	
Porcentaje de humedad, %	C-70	4	2	-
Módulo de finura	C-136	2,8	-	-
Peso Específico, g/cm ³	C-88-127-128	2,60	2,65	3,15
Porcentaje de absorción, %	C-88-127-128	2,30	1,80	-
Peso unitario suelto, g/cm ³	C-29	1,54	1,46	1,56
Peso unitario compactado, g/cm ³	C-29	1,62	1,60	1,65
Desgaste, %	C-131	28	-	-
Porcentaje más fino, %	C-117	2,40	1,85	-
Porcentaje de finura, %	C-184	-	-	97

Una vez obtenidas las propiedades de los materiales que componen el hormigón, se procedió a determinar las proporciones de material para 1 m³ de hormigón mediante el método ACI 211.1.

Tabla 2. Proporciones de material para un hormigón H23 mediante ACI 211.1.

Material	Peso por m ³ de Hormigón		Relación	Volumen Por m ³ de Hormigón
	Seco	Húmedo		
Agua	195,00	179,71	0,50	0,180
Cemento	361,11	361,11	1,00	0,115
Grava	1056,00	1077,12	2,98	0,377
Arena	775,37	806,38	2,23	0,298

Con las cantidades de materiales determinadas, se procedió a elaborar probetas de hormigón, en un total de 80 probetas distribuidos en dos tipos, 40 probetas llenas y 40 con orificio central de diámetro 2 cm, esto para el análisis de conductividad térmica mediante TLS-100.

Las probetas de hormigón fueron sometidos a análisis de conductividad térmica cada 5 días, mediante el equipo TLS-100, que consistió en inducir un flujo de calor interno en las probetas mediante una sonda que luego pasa por un proceso de corrección de forma para hallar la conductividad térmica del elemento, este proceso se describe a continuación:

Se obtienen las muestras de hormigón preparadas incluyendo el orificio para la sonda del equipo TLS-100 figura 1.

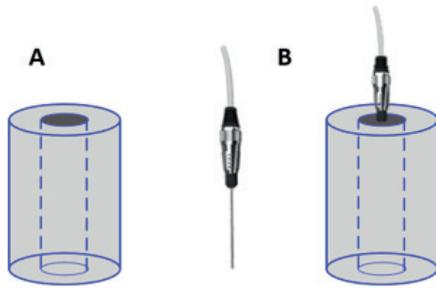


Figura 1. A. Esquema de las muestras con la incorporación del espacio para la sonda. B. Colocación de la sonda en las muestras de hormigón.

Una vez introducida la sonda para el ensayo se procedió a realizar las lecturas de conductividad térmica. Dicha sonda induce calor a las paredes internas del hormigón de tal manera que se debe realizar la corrección para determinar la conductividad.

En una vista en planta, las muestras de hormigón presentan dos radios, el primero interno y el segundo externo que está formado por la superficie del mismo. figura 2.

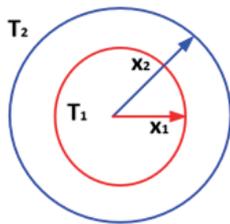


Figura 2. Radios interno y externo formado en las muestras de hormigón

Para realizar la corrección, se parte de la ley de Fourier, expresada de la siguiente manera:

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \tag{3}$$

Donde q es el flujo de calor, K es la conductividad térmica, A es la superficie de la muestra, ΔT es la variación de la temperatura y Δx la variación de la profundidad, además:

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{-KA}} \tag{4}$$

La superficie para aplicar la ley de Fourier se obtiene del espacio interno de la muestra, donde se aplicó el flujo de calor, de esta manera se tiene figura 3.

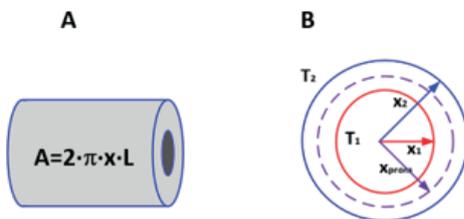


Figura 3. A. Superficie interna de la muestra de hormigón y B. profundidad o radios promedio x ubicada entre la capa superior e interior de la muestra.

De esta manera se obtiene la superficie o área interna y externa de la muestra donde se aplicará el flujo de calor.

$$A_{int} = 2\pi r_1 L$$

$$A_{ext} = 2\pi r_2 L \tag{5}(6)$$

Donde L es la longitud y r son los radios externos e interno de la muestra.

De esta manera la ley de Fourier quedó expresada de la siguiente forma:

$$q = -K2\pi rL \frac{dT}{dr} \tag{7}$$

Ordenando la ecuación 7 se tiene una ecuación con variable separable.

$$\frac{q}{2\pi rL} dr = -KdT \tag{8}$$

Para resolver se aplicó integrales definidas desde r₁ a r₂ que son los radios respectivos.

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{2\pi rL} dr = -K \int_{T_1}^{T_2} dT \tag{9}$$

Resolviendo la integral se obtiene lo siguiente:

$$q = KA_{log\ media} \frac{(T_1 - T_2)}{(r_2 - r_1)} \tag{10}$$

Se puede observar la presencia del área logarítmica media, que se expresó de la siguiente manera:

$$A_{log\ media} = \frac{2\pi L (r_2 - r_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \tag{11}$$

Despejando la conductividad térmica de la ecuación se obtiene la corregida.

$$K = \frac{q}{A_{log\ media} \frac{(T_1 - T_2)}{(r_2 - r_1)}} \tag{12}$$

Obtenidas las lecturas de conductividad térmica cada 5 días, se procedió a las roturas a compresión de las muestras de hormigón mediante la norma ASTM C-39.

RESULTADOS

Tabla 3. Resultados obtenidos de conductividad térmica y resistencia a compresión del hormigón

Edad (días)	Conductividad Térmica K (W/mk)	Resistencia a compresión Kg/cm ²	Edad (días)	Conductividad Térmica K (W/mk)	Resistencia a compresión Kg/cm ²
0	0,600	0	100	0,740	253,76
5	0,590	89,65	105	0,741	258,05
10	0,570	102,05	110	0,741	258,87
15	0,580	160,13	115	0,743	259,21
20	0,600	195,28	120	0,743	259,87
25	0,620	218,34	125	0,743	261,11
30	0,670	225,23	130	0,745	261,39
35	0,700	225,78	135	0,745	262,14
40	0,720	231,02	140	0,747	262,19
45	0,730	231,65	145	0,747	262,68
50	0,730	231,74	150	0,747	263,54
55	0,732	232,12	155	0,747	263,93
60	0,734	232,76	160	0,747	265,21
65	0,738	233,86	165	0,750	265,76
70	0,738	239,04	170	0,750	265,84
75	0,739	241,11	175	0,751	268,45
80	0,749	243,21	180	0,751	268,69
85	0,739	243,45	185	0,751	268,89
90	0,740	246,65	190	0,752	270,28
95	0,740	249,04	195	0,752	270,66

A partir de la tabla 3 se realizó un análisis de normalidad para aplicar la estadística correspondiente, paramétrica o no paramétrica, esto se puede evidenciar en la tabla 4.

Tabla 4, Prueba de Normalidad,

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
RESISTENCIA	0,237	39	0,000	0,671	39	0,000
CONDUCTIVIDAD	0,370	39	0,000	0,584	39	0,000

a, Corrección de significación de Lilliefors

Siendo el número de muestras n = 39 representado como grados de libertad, la prueba de normalidad elegida es de Shapiro-Wilk ya que verifica la normalidad con un número de pruebas menor a 50, De esta manera los datos no tienen una distribución normal por lo que se debió aplicar una estadística no paramétrica de Spearman,

Tabla 5, Correlación no paramétrica mediante Spearman

		Resistencia	Conductividad
Rho de Spearman	Resistencia	Coeficiente de correlación	1
		Sig, (bilateral)	0
		N	39
	Conductividad	Coeficiente de correlación	0,967**
		Sig, (bilateral)	0
		N	39

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas)

La significancia en la prueba de Spearman es menor a 0,05, indicando de esta manera que existe correlación entre las dos variables. Correlación obteniendo dos variables, dependiente e independiente donde la resistencia a compresión depende de la conductividad térmica, siendo así los resultados se expresan de la siguiente manera:

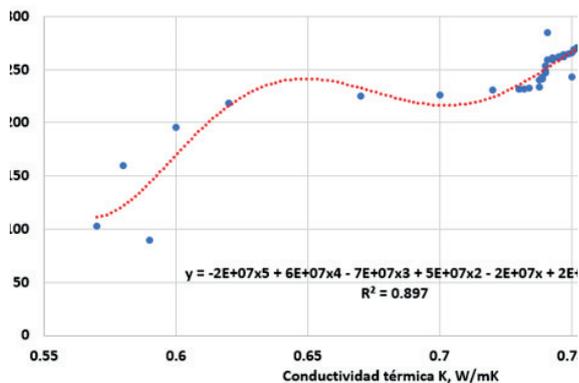


Figura 4, Relación conductividad térmica vs resistencia a compresión

Donde y es la resistencia a compresión y x es la conductividad térmica. Estas variables se relacionan a través de una ecuación polinómica de quinto grado, donde el valor de R² representa una correlación fuerte, indicando que el modelo de regresión se ajusta a los resultados experimentales.

De igual manera, los resultados experimentales demuestran el incremento gradual de la resistencia del hormigón a través del tiempo, confirmando así la correlación existente entre ambas variables resistencia y conductividad térmica, ya que mientras una variable crece la otra experimenta el mismo cambio creciente.

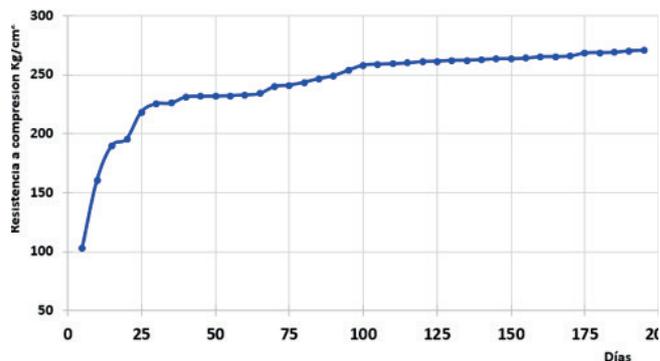


Figura 5, Resistencia a compresión del hormigón vs tiempo

DISCUSIÓN

Mediante la dosificación ACI 211,1 se obtuvo una relación agua cemento de 0,54 factor determinante en el proceso de obtención de la conductividad térmica ya que se observó que en el día inicial se tiene una conductividad térmica de 0,6 W/mk esto por la combinación del agua y los materiales que componen el hormigón, sin embargo, a partir del día 5 la conductividad decreció por la ausencia de agua producto del endurecimiento del hormigón alcanzando aproximadamente un 40 % de su resistencia de diseño.

Al reducir el agua la porosidad empezó a surgir de forma conjunta con el proceso de endurecimiento del hormigón ocasionando un ligero crecimiento en la conductividad térmica del hormigón a partir del día 15, es aquí donde la porosidad es determinante en la conductividad térmica ya que combinado con los materiales que conforman el hormigón proporcionan lecturas de conductividad creciente demostrando así que a medida que pasa el tiempo la porosidad disminuye y la conductividad térmica crece siendo constante a partir del día 190.

Demostrando así que la resistencia del hormigón y su conductividad están relacionados mediante el tiempo, donde el hormigón no solo incrementa su resistencia sino también su conductividad térmica.

Las ecuaciones de correlación obtenidas pueden estimar la resistencia del hormigón tipo H23 a partir de la conductividad térmica obtenida in situ ya que los resultados obtenidos demuestran que dicho valor se relaciona con la resistencia a compresión a medida que pasa el tiempo siendo de gran utilidad a la hora de obtener un criterio de aceptación o rechazo de estructuras de hormigón de este tipo, sobre todo en pavimentos rígidos donde este estudio es primordial.

CONCLUSIONES

Se determinó la relación que existe entre la resistencia a compresión y la conductividad térmica en un hormigón tipo H 23 con resistencia característica de 230 kg/cm² normalmente utilizado en pavimentos rígidos, mediante el ensayo de TLS 100.

El análisis de correlación mediante la prueba de normalidad y ajuste no lineal, demuestra la relación existente entre las variables de resistencia y conductividad térmica obteniendo

un valor de ajuste fuerte de 0,897, esto demostró que la conductividad térmica varía acorde la resistencia del hormigón a compresión crece a través del tiempo, de esta manera se puede estimar dicha resistencia mediante el ensayo de conductividad térmica para estimar criterios de aceptación o rechazo en cuanto a resistencias se refiere en edades tempranas siendo útil en pavimentos rígidos donde este criterio se torna de imperiosa necesidad,

El resultado de conductividad térmica del hormigón presenta valores constantes a partir del día 190, de esta manera se puede demostrar que la resistencia del hormigón llega a su punto máximo relativo.

REFERENCIAS

- DIEGO, S. D., (2001), TECNOLOGÍA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO, COLOMBIA: BHANDAR EDITORES,
 ASTM C-70 (2001), STANDARD TEST METHOD FOR SURFACE MOISTURE IN FINE AGGREGATE,
 ASTM C-127 (S,F.), MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA DETERMINAR LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO, ASTM,
 NAUS, D., (2010), A COMPILATION OF ELEVATED TEMPERATURE CONCRETE MATERIAL PROPERTY DATA AND INFORMATION FOR USE IN ASSESMENTS OF NUCLEAR POWER PLANT REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, U.S, NRC, SOLAS A. A., & GIANI D. R., (2010), TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN AVANZADA, CHILE: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE,
 SVANHOLM, G., (1980), LEIGHTWEIGHT CONCRETE, THE CONCRETE SOCIETY, THERMAL CONDUCTIVITY AS QUALITY PARAMETER, , INTERNATIONAL CONGRESS ON LIGHTWEIGHT CONCRETE, ISBN: 0-86095-856-6,
 THERMTEST, (23 DE ABRIL DE 2020), THERMTEST, OBTENIDO DE THERMTEST.COM: [HTTPS://THERMTEST.COM/LATINAMERICA/MATERIALES-TERMICAMENTE-CONDUCTORES-Y-APLICACIONES-COMUNES#:~:TEXT=EL%20AIRE%20TIENE%20UNA%20CONDUCTIVIDAD,20%2D25%C2%BC](https://thermtest.com/LATINAMERICA/MATERIALES-TERMICAMENTE-CONDUCTORES-Y-APLICACIONES-COMUNES#:~:TEXT=EL%20AIRE%20TIENE%20UNA%20CONDUCTIVIDAD,20%2D25%C2%BC)),
 YOUSSEF, M. M., (2007), GENERAL STRESS-STRAIN RELATIONSHIP FOR CONCRETE AT ELEVATED TEMPERATURES, ENGINEERING STRUCTURES, 2618-2634,
 ZOLDNERS, N., (1973), THERMAL PROPERTIES OF CONCRETE UNDER SUSTAINED ELEVATED TEMPERATURES, TEMPERATURE AND CONCRETE, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 33-50,

CITA

