



Universidad de
los Andes

Evolución térmica en hormigones masivos

Proyecto 1

Integrantes:

- José Tomás Arteaga
- Klaus Brien
- María Jesús Gutiérrez
- María Luisa Urzúa
- Andrés Vera

Curso:

Métodos computacionales

Profesor:

José Antonio Abell

Fecha:

12 agosto 2019

Introducción

El hormigón masivo es aquel hormigón que debido al gran volumen de los elementos que compone, genera grandes gradientes térmicos en su interior posterior a la hidratación del cemento. Dicho gradiente genera dilataciones o contracciones muy diferentes en la cara exterior de un elemento de hormigón masivo que en su interior y es por esto que se produce el agrietamiento por retracción térmica. Éste fenómeno puede estar presente en casi cualquier tipo de estructura formada por hormigón armado, dependiendo del tipo de hormigón utilizado, la forma en la que se difunde el calor a través de él y las restricciones con las que se desplaza (además de la geometría y volumen). La hidratación del cemento genera calor en las etapas tempranas del hormigón.

La modelación numérica de la evolución térmica se da por:

$$\frac{\delta u}{\delta t} - \frac{k}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} = q(t)$$

Donde k corresponde a la conductividad térmica, que depende fuertemente del tipo de árido utilizado, c al calor específico y ρ a la densidad del hormigón.

El objetivo de este proyecto es utilizar una simulación numérica en diferencias finitas para predecir la evolución térmica de hormigones masivos en un caso real durante su proceso de maduración. Para ello, se simulará un caso en una dimensión considerando diferentes parámetros, condiciones de borde, términos de fuente calórica y discretizaciones.

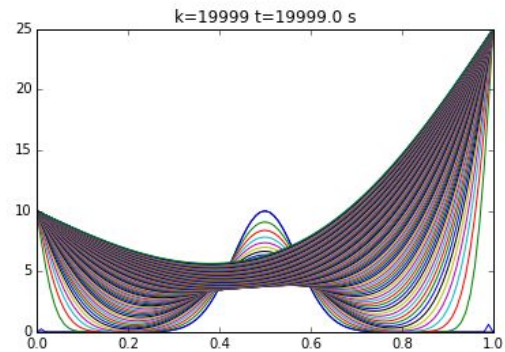
Análisis de casos

A continuación, se presentan 10 casos diferentes con variaciones en las subdivisiones, temperaturas, Δt , conductividad térmica, densidad. Cada caso posee su respectiva tabla con las condiciones asociadas y el gráfico obtenido producto de ellas, considerando para todos los casos un largo equivalente a 1 metro.

→ Caso 1

Subdivisiones	100
Conductividad térmica (k)	5,5 m ² /s
Calor Específico (c)	900 j/Kg°C
Densidad Hormigón	2400 Kg/m ³
Δt	1 s
Condición de borde k=0	10 °C
Condición de borde final k=n	25 °C
Condiciones iniciales $u_0(x)$	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

Tabla 1: parámetros utilizados en el caso 1

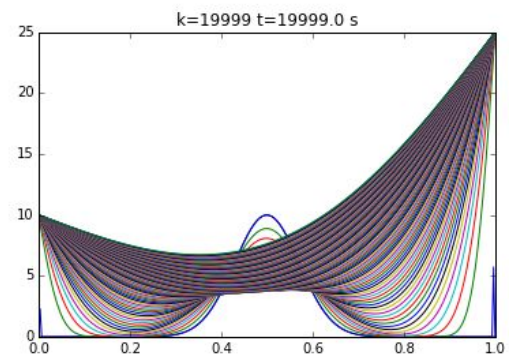


Observación: Se observa que la convergencia de la curva no es la "línea recta" que se produce al momento en el cual el hormigón no presenta más difusión. Es decir, si existe una curvatura en el perfil de temperatura para las condiciones dadas en la tabla, por lo que se concluye que la difusión aún no se detiene.

→ Caso 2

Subdivisiones	300
Conductividad Térmica (k)	5,5 m ² /s
Calor Específico (c)	900 j/Kg°C
Densidad Hormigón	2400 Kg/m ³
Δt	1 s
Condición de borde k=0	10 °C
Condición de borde final k=n	25 °C
Condiciones iniciales $u_0(x)$	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

Tabla 2: parámetros utilizados en el caso 2



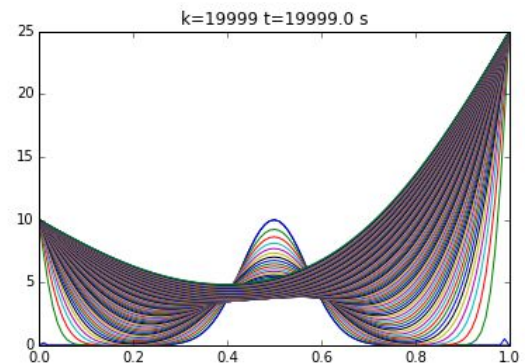
Observación: Este caso, posee las mismas características que el "Caso 1", diferenciándose en que las subdivisiones aumentan a 300. Este aumento provoca una convergencia más cercana a la unión entre dos puntos entre los cuales no hay difusión, pero aún así, no se alcanza el punto donde no hay más difusión pues la curvatura aún es notoria. Esto se debe a que al cambiar el número de

subdivisiones del elemento, el análisis se vuelve más específico resultando así respuestas más cercanas a la realidad.

→ **Caso 3**

Subdivisiones	300
Conductividad Térmica (k)	5,5 m ² /s
Calor Específico (c)	1100 j/Kg°c
Densidad Hormigón	2400 Kg/m ³
dt	1 s
Condición de borde k=0	10 °c
Condición de borde final k=n	25 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

Tabla 3: parámetros utilizados en el caso 3

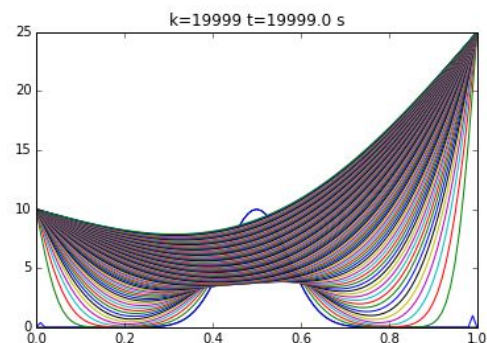


Observación: En este caso se aumentó el calor específico con respecto al “Caso 2”. Este aumento provocó una mayor curvatura, y, por ende, la difusión aún no se ha detenido. El aumento del calor específico provoca que, los áridos (que representan entre un 60 - 80% del volumen del hormigón) realicen de manera más lenta la absorción del calor, ya que requieren un mayor esfuerzo para elevar su temperatura. Este cambio genera una respuesta más tardía en la difusión de la temperatura.

→ **Caso 4**

Subdivisiones	100
Conductividad Térmica (k)	10,5 m ² /s
Calor Específico (c)	1100 j/Kg°c
Densidad Hormigón	2400 Kg/m ³
dt	1 s
Condición de borde k=0	10 °c
Condición de borde final k=n	25 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

Tabla 4: parámetros utilizados en el caso 4

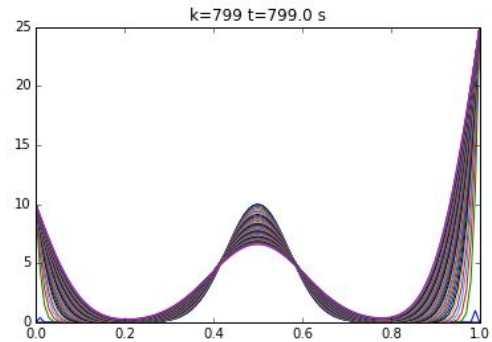


Observación: Bajo estas condiciones se observa que la convergencia es bastante, por lo que la difusión no se encuentra tan lejos de su punto de detención. Esto se debe a la alta conductividad térmica que posee el hormigón de este caso (por ejemplo, al compararlo con el caso 3), que permite un buen traspaso de la temperatura.

→ **Caso 5**

Subdivisiones	100
Conductividad Térmica (k)	5,5 m ² /s
Calor Específico (c)	1100 j/Kg°C
Densidad Hormigón	2400.0 Kg/m ³
dt	1 s
Condición de borde k=0	10 °c
Condición de borde final k=n	25 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

Tabla 5: parámetros utilizados en el caso 5

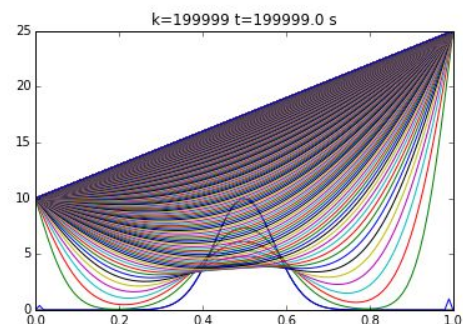


Observación: Este caso muestra una convergencia mínima. Esto se debe a que el k es menor, por ende, el tiempo en el que ocurre la difusión es más corto y no se alcanza a detener.

→ **Caso 6**

Subdivisiones	100
Conductividad Térmica (k)	10.5 m ² /s
Calor Específico (c)	1100 j/Kg°C
Densidad Hormigón	2400.0 Kg/m ³
dt	1 s
Condición de borde k=0	10 °c
Condición de borde final k=n	25 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

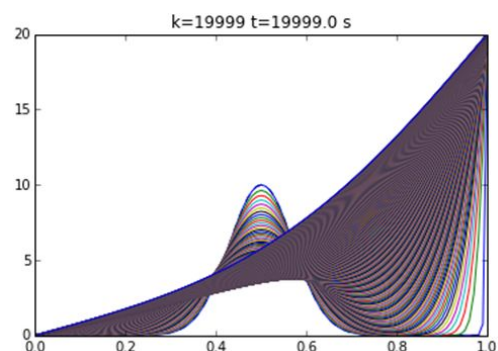
Tabla 6: parámetros utilizados en el caso 6



Observación: Bajo las condiciones dadas, este caso generó una línea casi recta, por lo que se obtuvo una convergencia considerable. Esto se da debido a que las condiciones de este caso provocan la unión entre dos puntos que no poseen difusión, provocando la inexistencia de la curvatura en el perfil de la temperatura y una difusión “detenida”.

→ **Caso 7**

Subdivisiones	100
Conductividad Térmica (k)	5,5 m ² /s
Calor Específico (c)	900 j/Kg°C



Densidad Hormigón	1600 Kg/m ³
dt	1 s
Condición de borde k=0	0 °c
Condición de borde final k=n	20 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

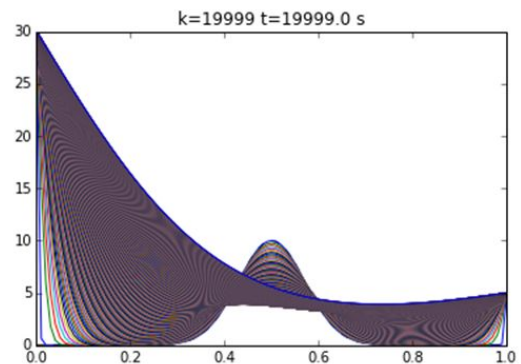
Tabla 7: parámetros utilizados en el caso 7

Observación: Cabe destacar las condiciones de borde de temperatura inicial de 0°C y final de 20°C, debido a que se está observando un hormigón sometido a bajas temperaturas. Este análisis se requiere para ver el comportamiento en diferentes zonas climáticas de temperaturas variables, y se observa una buena convergencia. Además, la densidad que se usó (baja en comparación a otros casos) corresponde a la propia de un hormigón ligero, empleado para construcciones en zonas frías.

→ **Caso 8**

Subdivisiones	100
Conductividad Térmica (k)	5,5m ² /s
Calor Específico (c)	900j/Kg°C
Densidad Hormigón	2400Kg/m ³
dt	1 s
Condición de borde k=0	30 °c
Condición de borde final k=n	5 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

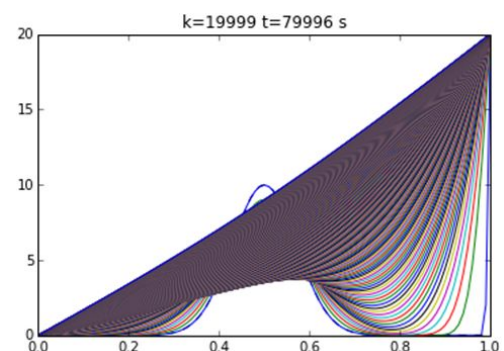
Tabla 8: parámetros utilizados en el caso 8



Observación: este caso muestra un hormigón sometido a una temperatura más elevada, con una densidad que se emplea principalmente para hormigón armado. La difusión de calor aún no se encuentra cerca del punto de detención.

→ **Caso 9**

Subdivisiones	100
Conductividad Térmica (k)	5,5 m ² /s
Calor Específico (c)	900 j/Kg°C
Densidad Hormigón	2400 kg/m ³
dt	4 s
Condición de borde k=0	0 °c



Condición de borde final k=n	20 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

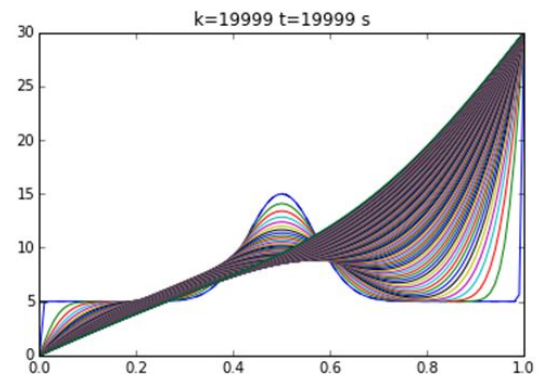
Tabla 9: parámetros utilizados en el caso 9

Observación: Se da bajo estas condiciones una buena convergencia. Esto se deduce dado que al unir los puntos, la línea es prácticamente recta, por lo que no hay curvatura y se asume que la difusión está detenida o muy cerca de estarlo.

→ Caso 10

Subdivisiones	100
Conductividad Térmica (k)	5,5 m ² /s
Calor Específico (c)	900 j/Kg°c
Densidad Hormigón	2400 Kg/m ³
dt	1 s
Condición de borde k=0	0 °c
Condición de borde final k=n	30 °c
Condiciones iniciales u0(x)	$5 + 10 \cdot \exp(-(x-0.5)^2/0.1^2)$

Tabla 10: parámetros utilizados en el caso 10



Observación: en un rango de temperaturas más amplias, el comportamiento de la curva tiende a converger de a poco en el tiempo, generando una cercanía al punto de detención de la difusión.

Discusiones y conclusiones

Luego de ensayados 10 casos hipotéticos distintos para observar la difusión del calor en el hormigón masivo, cada uno con parámetros diferentes modificados, se pueden extraer una serie de conclusiones acerca de cómo se manifiestan dichas variaciones en la curva que representa dicha difusión. Mientras más alejada de la linealidad se encuentre la curva, menos se alcanza a detener la difusión y cuando tienda a la linealidad, se habrá detenido.

En primer lugar, cabe destacar que mientras más baja sea la conductividad térmica, menos va a converger la curva, debido a que la difusión a través del hormigón es más pobre, mientras que a conductividades mayores, la curva tiende a ser lineal debido a que el traspaso energético a través del hormigón es más eficiente.

En segundo lugar, las variaciones en los rangos de temperatura también tienen una incidencia importante en la difusión de calor. La temperatura inicial puede ser una temperatura fría cercana o igual a 0 como puede ser alta también por ejemplo 30°C y en ambos casos el comportamiento en cuanto a difusión es distinto. Cuando la temperatura inicial es alta y la

temperatura final es baja, la difusión no alcanza a detenerse, en cambio con exactamente las mismas características del hormigón, cuando la temperatura inicial es baja y la final es moderada - alta se alcanza a detener la difusión.

En tercer lugar, cuando se aumenta el calor específico, la difusión tarda mucho más en realizarse debido a que los áridos pueden absorber más calor y es por esto que la difusión no se alcanza a detener.

En cuarto lugar, cuando se aumenta el número de subdivisiones del elemento se obtiene un análisis más detallado y acercado a la realidad.

Finalmente, es importante observar que estos modelos nos permiten entender de mejor forma como se altera la difusión de calor en hormigones masivos al ser modificada alguna de sus propiedades físicas o condiciones ambientales. De esta forma se logra un mejor entendimiento del fenómeno y se puede abordar de mejor manera el problema relacionado a como hacer esa difusión lo más eficiente posible con el propósito de evitar la formación de grietas debido a la retracción térmica que ocurre cuando el cemento ha sido hidratado y está mucho más frío en sus caras exteriores que en el centro, donde alcanza altas temperaturas.