

Impacto de la energía de activación en la estimación de la resistencia a la compresión de hormigones masivo

Impact of activation energy on the estimation of compressive strength of mass concrete

Rodrigo Guerra¹, Christian Vargas¹ y Paulo Rojas¹

¹Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Serena.

El objetivo de este estudio es analizar el impacto de la energía de activación en la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón masivo. Para ello, se confeccionó un cubo de hormigón G35 de arista 1,0 m. como un estudio de validación experimental de un caso único. Este bloque fue monitoreado con sensores de temperatura impermeables DS18B20 a distintas profundidades. Se registraron las temperaturas de cinco sensores durante 28 días en intervalos de recolección de información cada 15 minutos. La resistencia a la compresión de laboratorio fue medida en probetas cilíndricas para edades de 1, 3, 5, 7, 14, 21 y 28 días en el caso del hormigón patrón y en el caso del bloque de hormigón masivo su resistencia se comparó con un testigo. Los resultados permiten apreciar una mejor precisión en la estimación de la resistencia a la compresión al utilizar los métodos asociados a energía de activación. Entre ellos destaca el método de Nielsen-Kaasgaard con un error observado entre 1,07 % y 2,27% y se obtuvo una menor precisión en las estimaciones realizadas con el método de Nurse-Saul al reportar errores del orden del 5%.

Palabras clave: Calor de hidratación, Hormigón masivo, Factor temperatura-tiempo, Madurez del hormigón.

The aim of this study is to analyze the impact of activation energy on estimating the compressive strength of mass concrete. To this end, a G35 concrete cube with a 1.0 m edge was constructed as a single-case experimental validation study. This block was monitored with DS18B20 waterproof temperature sensors at various depths. Temperatures were recorded by five sensors over a 28-day period, with data collection intervals of every 15 minutes. The laboratory compressive strength was measured in cylindrical specimens for ages of 1, 3, 5, 7, 14, 21 and 28 days in the case of the mass concrete block its strength was compared to a core sample. The results show improved accuracy in estimating compressive strength when using methods associated with activation energy. Among them, the Nielsen-Kaasgaard method stands out with an observed error between 1.07% and 2.27%, and less precision was obtained in the estimates made with the Nurse-Saul method, reporting errors of around 5%.

Keywords: Heat of hydration, Mass concrete, Temperature-time factor, Concrete maturity

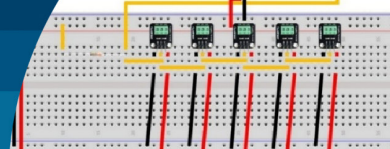
Introducción

El hormigón es un material artificial similar en apariencia y propiedades a algunas rocas naturales de piedra caliza. Su componente principal es agregado natural como grava o roca triturada, arena y partículas finas de cemento, todo mezclado con agua (Kaur & Kaur, 2012).

En la construcción de hormigones de dimensiones menores, el calor desarrollado por la hidratación de los materiales cementicios se disipa rápidamente al medio ambiente y esto normalmente no plantea problemas graves. Sin embargo, en elementos de hormigón de grandes dimensiones o masivos, el agrietamiento temprano inducido térmicamente

es un problema que requiere especial atención en las etapas de diseño y construcción (Ballim, 2004).

El hormigón masivo se ha asociado históricamente con estructuras como presas o grandes elementos de hormigón como pilares de puentes o fundaciones. El Comité ACI 207 ha definido el hormigón masivo como cualquier volumen de hormigón con dimensiones lo suficientemente grandes como para requerir que se tomen medidas para hacer frente a la generación de calor por la hidratación del cemento y el consiguiente cambio de volumen para minimizar el agrietamiento (Bakour & Ftima, 2021). Debido a que esta



definición no proporciona una medida específica, muchas agencias han desarrollado sus propias definiciones de hormigón masivo. Por ejemplo, algunas agencias definen el hormigón masivo como cualquier elemento de hormigón que tenga una dimensión mínima superior a 0,90 m. Otras agencias utilizan dimensiones mínimas diferentes, que van desde 0,46 a 2,00 m, según su experiencia. Es importante tener en cuenta que ninguna de estas definiciones considera el contenido de cemento del hormigón (Gajda & Vangeem, 2002).

Los efectos térmicos asociados con las primeras etapas de hidratación del cemento son de particular importancia en estructuras masivas de hormigón. La diferencia de temperatura entre el interior y la superficie exterior del elemento de hormigón, que se enfría relativamente rápido, provocada como resultado del calor liberado por la hidratación del cemento, conduce a la formación de tensiones térmicas en un hormigón inmaduro (Batog & Giergiczny, 2017)(Ballim, 2004).

La hidratación del cemento provoca una reacción exotérmica capaz de generar grandes cantidades de calor. Históricamente, esto ha sido un problema en obras como las presas, y desde la década de 1920 se dispone de métodos numéricos para predecir las temperaturas en elementos masivos de hormigón (Riding *et al.*, 2006).

Se han desarrollado numerosos productos comerciales para controlar los límites de temperatura permitidos y las diferencias de temperatura en el hormigón masivo, pero dicho control es una tarea difícil en las obras de construcción. La diferencia de temperatura máxima permitida (19°C) y los límites de temperatura (68-74°C) son factores esenciales que son críticos para lograr la integridad estructural, la capacidad de servicio y la durabilidad a largo plazo de estructuras masivas de hormigón, y deben ser tomados en cuenta para contrarrestar los efectos negativos del agrietamiento térmico sobre las propiedades mecánicas del hormigón (Y. R. Kim *et al.*, 2015).

La resistencia del hormigón correctamente dosificado, colocado y curado se puede expresar como una función de la historia temperatura-tiempo que se relaciona con la hidratación del hormigón (Yikici & Chen, 2015). Este concepto se conoce como madurez y está relacionado directamente a la temperatura a la que está expuesto el

hormigón, aunque en algunos casos esta tiene que ver con el grado de resistencia. Esto indica que un hormigón alcanza a cierta edad un grado de resistencia, dependiendo de las temperaturas a las que ha estado sometido durante dicho período (Instituto Nacional de Normalización, 2018).

Sin embargo, existen preocupaciones sobre la precisión del método de madurez en aplicaciones de hormigón estructural, especialmente cuando se construyen elementos de hormigón masivo donde las temperaturas variables del hormigón en toda la sección afectan el historial de curado (Maruyama & Lura, 2019). Además, el efecto “crossover” ha sido reportado en la literatura, dado que limita la aplicabilidad del método de madurez para predecir el comportamiento del hormigón que tiene una temperatura alta a temprana edad. Específicamente, las altas temperaturas de curado (>40°C) a una edad temprana conducen a valores de resistencia última más bajos en comparación con una temperatura de curado inicial más baja (Yikici & Chen, 2015).

A pesar de los avances normativos y los aportes de distintos autores, existe una brecha en la validación de estos modelos en contextos locales, específicamente para hormigones masivos con áridos del norte de Chile. Este estudio busca aportar a la discusión de esta brecha comparando la precisión del método de Nurse-Saul (NCh 3565:2018) frente a modelos de energía de activación variable en un bloque de 1 m³ de resistencia G35, proporcionando evidencia sobre el modelo que mejor captura la cinética de hidratación in situ para este estudio. Este trabajo se presenta como un estudio de validación experimental de un caso único.

Materiales y Métodos

Hormigón Patrón

Para la confección del bloque de hormigón masivo se dosificó un hormigón patrón G35 que tradicionalmente es utilizado en pavimentos o estructuras como puentes en Chile. Este hormigón tiene como característica principal una alta impermeabilidad y alto contenido de cemento. El cemento utilizado es del tipo alta resistencia Polpaico P-400 y la razón agua-cemento considerada en la dosificación es 0,46. En la Tabla 1 se muestran las cantidades de materiales que fueron consideradas en este trabajo.

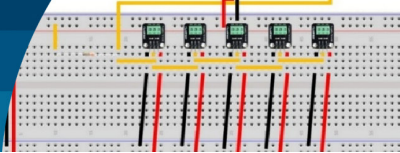


Tabla 1. Dosificación del Hormigón G35 para 1 m³.

Material	Masa Húmeda kg
Cemento	395
Agua	180
Grava	639
Gravilla	458
Arena	737
	2.409 kg

En el laboratorio se preparó un hormigón G35, con el fin de elaborar la curva de calibración por el método de madurez según NCh 3565:2018. Estas probetas cilíndricas se curaron en piscina con agua y cal a temperatura de 23°C ± 1°C..Se prepararon 3 probetas cilíndricas y se ensayaron dos para cada edad, dejando la tercera para corregir dispersiones importantes, totalizando 21 en total disponibles para la determinación de la resistencia a la compresión a 1, 3, 5, 7, 14, 21 y 28 días. Se confeccionó una probeta cilíndrica adicional para incorporar el sensor de temperatura y registrar la historia temperatura-tiempo del hormigón patrón durante los 28 días de curado.

Los resultados a 28 días presentaron un promedio de 38,23 MPa con un coeficiente de variación de 1,65%, garantizando la repetibilidad del ensayo de laboratorio. Se ha incluido la Tabla 2 con datos del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para cada edad, lo que da muestra de la dispersión aceptable de los datos en el registro de resultados.

Tabla 2. Estadística de resultados Hormigón G35.

Edad (días)	Resistencia Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Coeficiente Variación (%)
1	6,36	0,06	0,89
3	14,35	0,23	1,63
5	18,87	0,72	3,84
7	23,03	0,88	3,82
14	33,29	1,10	3,30
21	35,70	0,34	0,94
28	38,23	0,63	1,65

Métodos de madurez

El desarrollo de los métodos de madurez se inicia a fines de la década de los ‘40 e inicio de los ‘50, y fue el resultado de la necesidad de estimar los efectos de los tratamientos

de curado con vapor sobre el desarrollo de resistencia del hormigón (Soutsos & Kanavaris, 2018).

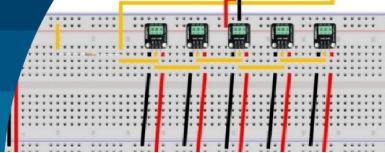
La norma NCh3565:2018 está dirigida al uso práctico de la metodología para estimar la resistencia del hormigón en Chile en terreno por medios no destructivos y está basada en la norma ASTM C1074 (Ebensperger *et al.*, 2020). En esta norma se define la ecuación de Nurse-Saul para la estimación del índice de madurez, la que tiene una estructura matemática simple (Guerra, 2025). La norma ASTM C1074 proporciona un procedimiento para estimar la resistencia del hormigón mediante el método de madurez, a través del índice de madurez se expresa en términos del factor temperatura-tiempo o en términos de la edad equivalente a una temperatura específica o temperatura Datum. Estas ecuaciones fueron incorporadas en la primera versión de la ASTM C1074 (ASTM C1074, 2019)

Aunque la NCh 3565:2018 define el método de Nurse-Saul como estándar en Chile, ACI 207 y autores como Maruyama & Lura (2019) advierten que modelos lineales pueden ser insuficientes cuando el calor de hidratación genera temperaturas que activan de forma no lineal la cinética del cemento.

Por ello, en la norma Chilena apartado 1.2 Alcance y campo de aplicación, se indica que en aquellos casos de condiciones de hormigonado y endurecimiento del hormigón con temperaturas del hormigón sobre 40°C de forma prolongada (como por ejemplo hormigones masivos, hormigones curados en vapor), la estimación de resistencia mediante el método, sobre 7 días, se debiera estudiar (Instituto Nacional de Normalización, 2018). Lo anterior, cobra relevancia dado que la ecuación de Nurse-Saul incorpora en su formulación una evolución lineal de la Madurez y no representa la no linealidad de la evolución de la temperatura en el hormigón y el fenómeno termodinámico que se produce. Esta no linealidad es un fenómeno relevante en hormigones masivo y es lo que motiva el estudio de este caso.

Método de Nurse-Saul

El método de Nurse-Saul se distingue por su sencillez, ya que establece una relación lineal entre el tiempo y la temperatura acumulada. Su facilidad de aplicación lo hace ideal para proyectos que requieren una rápida toma



de decisiones o que están ubicados en zonas donde las variaciones térmicas son mínimas. No obstante, esta simplicidad implica ciertas limitaciones, ya que no ajusta la ganancia de resistencia frente a cambios significativos en las temperaturas, lo que reduce su precisión en climas más variables (Maruyama & Lura, 2019). La ecuación (1) presenta la fórmula asociada al modelo de madurez de Nurse-Saul.

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Donde:

$M(t)$: Función de Madurez (°C-h)

T : Promedio de la temperatura en cada intervalo de tiempo (°C)

T_0 : Temperatura Datum (°C)

Δt : Intervalo de tiempo (h)

Una estimación práctica de la temperatura Datum o de referencia, que se define cuando el hormigón comienza a ganar resistencia, sugiere valores entre 0°C y -10°C. En Chile, el valor para la temperatura datum recomendado es 0°C para las regiones con temperaturas cálidas la mayoría del año y de -10°C para regiones del extremo sur o zonas de bajas temperaturas (Instituto Nacional de Normalización, 2018). El monitoreo y registro de la temperatura del hormigón, durante el tiempo de estudio, se realiza en intervalos de 30 minutos.

Método de Arrhenius

El método de Arrhenius introduce la energía de activación como un factor crucial, permitiendo modelar de manera más detallada la influencia de las variaciones térmicas en el proceso de hidratación del cemento. Este enfoque teórico ofrece mayor precisión en climas extremos o en proyectos con cambios importantes de temperatura (Tekle *et al.*, 2022). Sin embargo, su implementación requiere ensayos experimentales previos para determinar parámetros específicos de cada mezcla, lo que incrementa el tiempo y los recursos necesarios para su aplicación.

$$t_{eq} = \sum_0^t \exp \left[-\frac{E_a}{K} \cdot \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \cdot \Delta t \quad (2)$$

Donde:

t_{eq} : Edad Equivalente (días, horas)

E_a : Energía de Activación (J/mol)

K : Constante de los gases 8,314472 (J/mol*K)

T_a : Promedio de temperatura en el intervalo de tiempo (273 + T_a) (°K)

T_s : Temperatura de referencia especificada 20°C (273+20 = 293) (°K)

Δt : Intervalo de tiempo (horas)

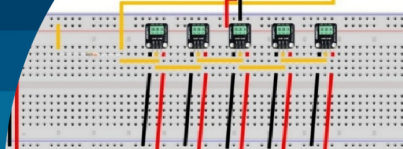
Ambas formas de determinar la función de Madurez fueron incorporadas en la primera versión de la norma ASTM C1074, entregando incluso procedimientos de laboratorio para determinar la Energía de Activación de un determinado cemento, y poder así aplicar adecuadamente la ecuación (2). Para la determinación de la Energía de Activación se pueden utilizar varios métodos, como la medición de la resistencia de cubos de mortero, la medición del calor de hidratación o de retracción química en la pasta de cemento (Ebensperger *et al.*, 2020).

El cálculo de la energía de activación (E_a) sigue una metodología estandarizada por la norma ASTM C1074 (ASTM C1074, 2019). Primero, se ensayan probetas de hormigón a diferentes edades bajo al menos tres temperaturas de curado, obteniendo curvas de desarrollo de resistencia específicas para cada caso. De estas curvas se derivan los valores de la constante K , que indican la tasa de ganancia de resistencia bajo las condiciones ensayadas. Luego, se calcula el logaritmo natural de K y se determinan las temperaturas absolutas en grados kelvin para graficar $\ln(K)$ frente a $1/T$. La pendiente de la recta obtenida mediante regresión lineal permite calcular $-E_a/R$, y a partir de este valor se determina E_a , que representa la sensibilidad térmica del hormigón en las condiciones evaluadas (Ebensperger *et al.*, 2020).

Propuestas para la determinación de la Energía de activación

La energía de activación es un parámetro clave en los métodos empleados para la estimación de la resistencia del hormigón y permite considerar cómo las condiciones térmicas afectan la velocidad de las reacciones de hidratación del cemento y, en consecuencia, el incremento de resistencia en el hormigón (Geng *et al.*, 2021).

Para la determinación de la Energía de Activación se pueden utilizar varios métodos, como la medición de la resistencia de cubos de mortero, la medición del Calor



de Hidratación o de Retracción Química en pasta de cemento (Ebensperger *et al.*, 2020). En la norma ASTM C1074 se entrega el procedimiento para determinar el valor de la energía de activación curando probetas de mortero a tres temperaturas isotérmicas diferentes y midiendo su resistencia a compresión a distintas edades. Sin embargo, en ocasiones, las tres condiciones de curado isotérmico resultan imposibles o requieren mucho tiempo para su aplicación en obra (Tekle *et al.*, 2022). En este estudio se evalúan distintas propuestas numéricas para la determinación de la energía de activación y su posterior uso en la estimación de la resistencia de hormigones.

Valores recomendados por ASTM y CEB-FIP

La norma ASTM C1074 proporciona valores de referencia, recomendando un rango de energía de activación entre 38.000 y 45.000 J/mol (ASTM C1074, 2019). Este intervalo es aplicable a una amplia variedad de mezclas de hormigón, ya que considera factores como el tipo de cemento, la relación agua/cemento y las condiciones de curado, que influyen en el comportamiento del material, basado especialmente en climas templados o en situaciones donde se controla la temperatura de curado.

Adicionalmente, el estudio de Geng *et al.* (2021) hace referencia al valor recomendado por el modelo CEB-FIP, que establece el cociente Ea/R en aproximadamente 4.000 K ($Ea=33.257$ J/Mol) (Geng *et al.*, 2021). Este valor, algo menor que el sugerido por la norma ASTM C1074, refleja un enfoque más conservador para estimar la influencia de la temperatura en la resistencia del hormigón y resulta adecuado en aplicaciones que consideran el efecto de temperaturas moderadas durante el curado.

Modelo de Freisleben-Hansen

El modelo de Freisleben-Hansen se caracteriza por su relación bilineal que ajusta los valores de la energía de activación según si la temperatura está por encima o por debajo de los 20 °C como se muestra en las ecuaciones (3) y (4) (Hansen & Pedersen, 1977). Su principal objetivo es proporcionar una herramienta para calcular la energía de activación en entornos donde la temperatura puede influir considerablemente en la cinética de la hidratación del cemento, especialmente en climas fríos (Nielsen & Kaasgaard, 2020).

$$Ea = [33.500 + K(20 - T)] J/mol \text{ Para } T \leq 20^\circ C \quad (3)$$

$$Ea = 33.500 J/mol \text{ Para } T > 20^\circ C \quad (4)$$

En este caso, el coeficiente K fue definido con un valor de 1470 J/mol/°C, como una constante de ajuste para temperaturas inferiores a 20°C. Este enfoque permite representar de manera efectiva el impacto de las bajas temperaturas en la reacción de hidratación, donde se observa una disminución en la velocidad de ganancia de resistencia (Nielsen & Kaasgaard, 2020).

Modelo de Nielsen-Kaasgaard

Nielsen y Kaasgaard (2020) introdujeron modificaciones al modelo de Freisleben-Hansen para superar las limitaciones observadas en el análisis inicial. La propuesta incluyó una diferenciación más detallada de los coeficientes de ajuste térmico según si la temperatura era superior o inferior a los 20 °C. Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$Ea = [Ea_{20} + K_1(20 - T)] J/mol \quad (5)$$

$$Ea = [Ea_{20} + K_2(T - 20)] J/mol \quad (6)$$

En estas ecuaciones, $Ea_{20} = 33.500$ J/Mol y representa la energía de activación de referencia a 20°C, mientras que los coeficientes K_1 y K_2 reflejan la variación de la sensibilidad térmica según el rango de temperaturas. Los valores propuestos fueron $K_1 = 700$ J/mol/°C para temperaturas inferiores a 20 °C y $K_2 = 300$ J/mol/°C para temperaturas iguales o superiores a 20 °C. Estos valores fueron seleccionados considerando las mezclas más comunes, basadas en composiciones estándar con cemento Portland sin aditivos (Nielsen & Kaasgaard, 2020).

Método RILEM TC 119-TCE

El método RILEM TC 119-TCE (1997) establece una aproximación para calcular la energía de activación del hormigón, permitiendo estimar su resistencia en función de las temperaturas de curado. Este método es particularmente útil en condiciones climáticas variables, donde la temperatura puede afectar significativamente el desarrollo de resistencia del material (Geng *et al.*, 2021).

Para temperaturas iguales o superiores a 20 °C, se define un valor constante de energía de activación dividido por la constante universal de los gases ideales, el cual se utiliza en condiciones de curado estables o con variaciones térmicas mínimas, permitiendo una estimación uniforme de la resistencia del hormigón.

$$Ea / R = 4.000 \text{ J / mol} \quad (7)$$

Por otro lado, cuando la temperatura desciende por debajo de los 20 °C, la ecuación ajusta este valor para reflejar la disminución en la velocidad de hidratación del cemento.

$$Ea / R = [4.000 + 175(20 - T)] \text{ J / mol} \quad (8)$$

En este caso, T representa la temperatura de curado en grados Celsius. La ecuación (8) ajusta Ea/R de acuerdo con el descenso de la temperatura respecto al umbral de 20 °C, lo que permite adaptar el cálculo de madurez a entornos fríos. Este ajuste incremental en Ea/R representa la disminución de la velocidad de hidratación del cemento a medida que disminuye la temperatura, asegurando una estimación más precisa del desarrollo de resistencia en estas condiciones (Anonymous., 1997).

Método de Kim J. K.

El método propuesto por Kim *et al.* (2021) es reconocido porque el cálculo de la energía de activación es no lineal, considerando de manera integral los efectos de la temperatura y el tiempo sobre el desarrollo de resistencia del hormigón. Este método responde a las limitaciones de modelos tradicionales que asumen una energía de activación constante y, por ende, no logran capturar la dinámica compleja del proceso de hidratación bajo condiciones variables de curado (J. K. Kim *et al.*, 2001).

$$Ea = (42.830 - 43 \cdot T) e^{(-0.00017 \cdot T \cdot t)} \text{ J / mol} \quad (9)$$

Donde T representa la temperatura en grados Celsius y t el tiempo de curado, expresado en días. Este modelo se compone de dos términos fundamentales, donde el primer término introduce una reducción lineal en la energía de activación a medida que aumenta la temperatura, reflejando la aceleración de la hidratación del cemento a temperaturas más altas. El segundo término aplica un factor exponencial

que incorpora la interacción entre la temperatura y el tiempo, ajustando la energía de activación para considerar la hidratación progresiva conforme avanza el curado del hormigón (J. K. Kim *et al.*, 2001).

Desarrollo experimental

Instrumentación del bloque de hormigón masivo

Se confeccionó un bloque de hormigón masivo de dimensiones 1,0x1,0x1,0 m. El bloque fue instrumentado con cinco sensores digitales de temperatura impermeable DS18B20 con precisión de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, los que se conectaron a una placa Arduino Uno para recolectar la temperatura con una frecuencia de 15 minutos a lo largo de los 28 días de duración del estudio del curado del bloque in situ.

Para conectar los sensores DS18B20 al computador se utilizó una protoboard como se muestra en la Figura 1, junto con una resistencia de 4,7K Ohmios (ohm) para la comunicación OneWire, este protocolo utiliza solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo bus. La conexión del sensor tiene tres pines, el primero es el pin VDD (rojo) que debe conectarse al pin 5V de la placa Arduino, el segundo es el pin GND (negro) o tierra y el último es el pin DQ (amarillo) o Data, el cual es el pin que entrega la información de la temperatura (Ruiz Guti, 2007).

Una vez conectados adecuadamente todos los pines, la placa Arduino que se ve en la Figura 1 es conectada al computador mediante un cable USB B, además para la conexión de esta, se debe cargar un código en el programa Arduino IDE. Para capturar los datos del monitoreo de la temperatura, se utilizó una macro de Excel PLX-DAQ Spreadsheet la que permite la captación de la información (Guerra, 2025).

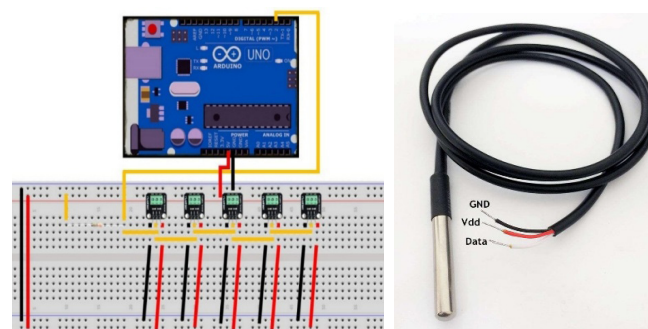
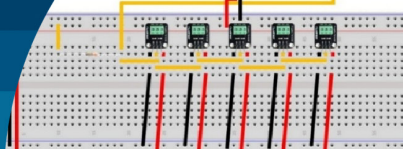


Figura 1. Esquema Arduino Sensor DS18B20



Confección del cubo de hormigón

Se confeccionó un moldaje de madera terciada revestido con placas de poliestireno expandido de 50 mm en cada cara del moldaje y además se incorporó una capa de polietileno que ayuda a la impermeabilidad del bloque, lo que se puede ver en la Figura 2. En el exterior del terciado como reforzamiento se dispuso elementos de madera de pino 2"x 4" entrecruzado para evitar el desarme del moldaje en el vertido de la mezcla.

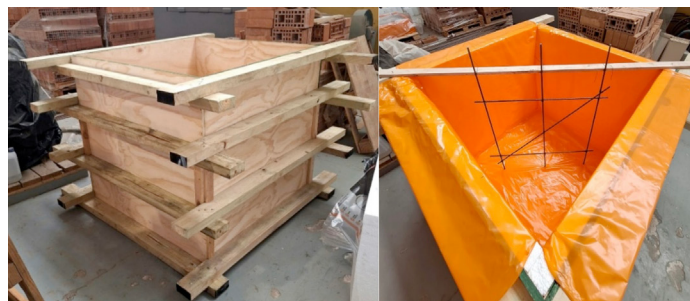


Figura 2. Moldaje para la confección del bloque de hormigón masivo.

Ubicación de los sensores

Los sensores fueron ubicados estratégicamente para poder monitorear las temperaturas en distintos lugares dentro del bloque de hormigón, como se muestra en la Figura 3. Se colocó uno en el núcleo del bloque que es donde se espera que el diferencial de temperatura sea mayor. Otros dos sensores fueron posicionados en las partes externas del elemento, a 3 cm del borde, tanto en la base como en la parte superior. Por último, los otros dos sensores fueron colocados a 25 centímetros de la superficie y del fondo del bloque, con esto se obtuvo la información para estudiar la evolución de la temperatura en el bloque y pronosticar la evolución de la resistencia del hormigón in situ.

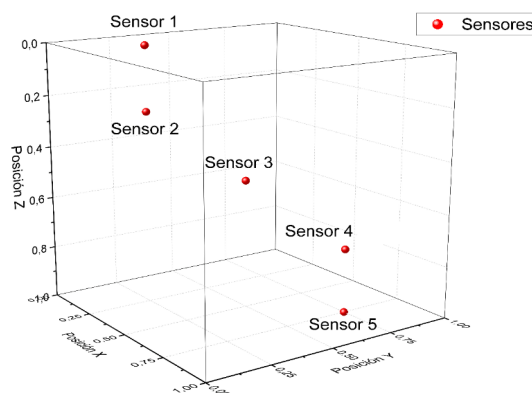


Figura 3. Ubicación de sensores de temperatura en el interior del bloque.

Resultados y discusión

Curva de calibración en laboratorio Método Nurse-Saul para hormigón patrón

En la Figura 4 se muestra la curva de calibración Madurez-Resistencia, obtenida por el método Nurse-Saul, para el hormigón patrón curado en piscina a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Cada valor de la curva representa los resultados de madurez y resistencia a la compresión a 1, 3, 5, 7, 14, 21 y 28 días de curado. La curva de calibración se obtuvo según NCh 3565:2018 y para ello se ensayaron 14 probetas (2 por edad) y se reservó una tercera para casos de alta dispersión. Los resultados a 28 días presentaron un promedio de 38,23 MPa con un coeficiente de variación de 1,65% y para las restantes edades el coeficiente de variación es menor a 4% como se muestra en la Tabla 2, garantizando la repetibilidad del ensayo de laboratorio. Sin embargo, es importante indicar que la curva de calibración es válida para las condiciones y resultados obtenidos para el hormigón de estudio en este trabajo, sometido a condiciones controladas en laboratorio según el plan de ensayo.

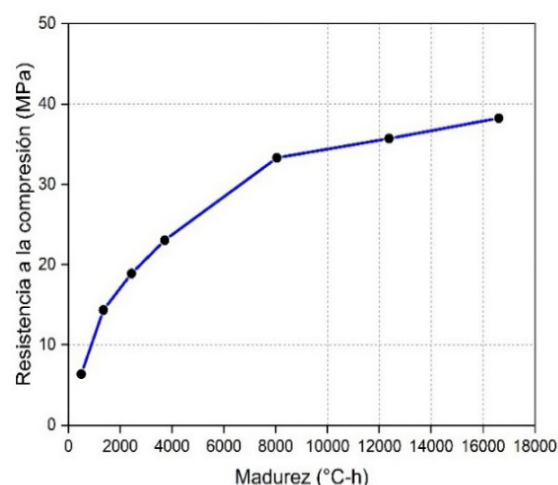


Figura 4. Curva Madurez-Resistencia método de Nurse-Saul para el hormigón patrón.

Temperatura del bloque a través del tiempo

El registro de la historia temperatura-tiempo de los sensores dispuestos en el interior del bloque se puede observar en la Figura 5. El registro muestra que el sensor 1, que es el que se ubica en la parte superior del bloque, presenta una marcada influencia de la temperatura ambiente mostrando ciclos día y noche muy marcados. En cambio, el sensor

ubicado en el núcleo del bloque presentó una mayor variación de temperatura, alcanzando una temperatura máxima de 52 °C aproximadamente. Esta temperatura se alcanzó entre el primer y segundo día después del vaciado. Los demás sensores muestran un comportamiento similar en cuanto a historia temperatura-tiempo, pero en escalas menores según su profundidad.

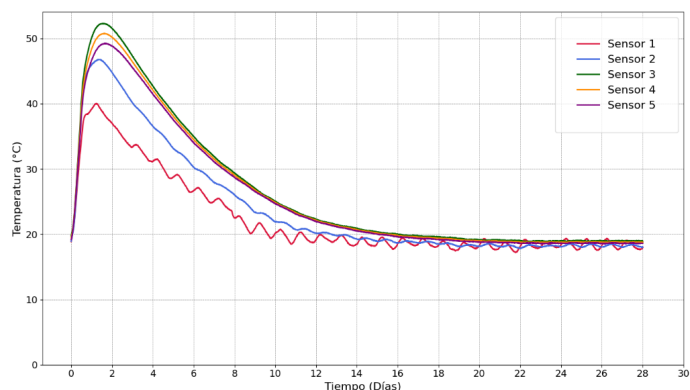


Figura 5. Evolución de las temperaturas en los sensores del bloque

La temperatura máxima de 52°C alcanzada en el núcleo del bloque supera el umbral crítico de 40°C donde se manifiesta el efecto crossover. Esto explica la mayor desviación del método Nurse-Saul, validando la necesidad de emplear energías de activación que se ajusten a estas condiciones térmicas.

Evaluación de la Resistencia a la compresión

Dada la naturaleza del hormigón masivo, este trabajo se presenta como un estudio de validación experimental in situ. A la edad de 28 días se extrajo un testigo en el bloque de hormigón con el fin de comparar los resultados obtenidos in situ con los predichos por el método de madurez de Nurse- Saul y Arrhenius para distintos valores de energía de activación. El testigo fue extraído en el centro del bloque de forma horizontal y sus dimensiones fueron de 10cm de diámetro y largo total de 40cm. En la Figura 6 se muestra el proceso de extracción del testigo desde el bloque de hormigón limitadas por el alcance del equipo extractor.

El testigo de hormigón se dividió en dos secciones para obtener estimaciones más representativas de las resistencias en la zona interior y exterior del bloque como se muestra

en la Figura 7. Para asegurar la calidad de las muestras, se descartaron los primeros 2 cm del testigo, dejando dos muestras (interior y exterior) de altura 19 cm cada una. Estas muestras fueron sometidas a ensayos en laboratorio.



Figura 6. Testigo extraído del bloque de hormigón masivo.

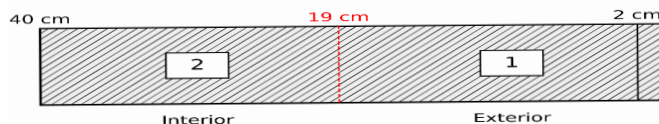


Figura 7. Esquema de segmentación del testigo de hormigón

Los ensayos realizados en laboratorio proporcionaron los valores corregidos de resistencia a la compresión para las muestras del testigo de hormigón a los 28 días, como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados corregidos de ensayo a la compresión del testigo de hormigón.

Nº de muestra	RESISTENCIA testigo 1 (MPa)
1 (Exterior)	41,11
2 (Interior)	40,87

A partir de los parámetros edad equivalente y energía de activación consideradas en este estudio, se estimaron las resistencias correspondientes a cada sensor. En la Tabla 4 se presentan los resultados de las resistencias estimadas a la edad de 28 días para cada sensor.

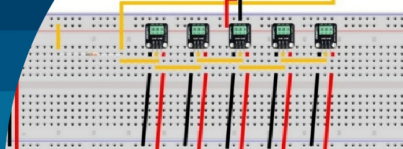


Tabla 4. Resistencia estimada para cada método y sensor a los 28 días

Método	Sensor 1 (MPa)	Sensor 2 (MPa)	Sensor 3 (MPa)	Sensor 4 (MPa)	Sensor 5 (MPa)
CEB-FIP	37,58	38,64	39,91	39,71	39,51
38000 J/mol	37,51	38,77	40,26	40,02	39,78
41500 J/mol	37,47	38,88	40,55	40,28	40,01
45000 J/mol	37,44	39,02	40,85	40,55	40,25
Arrhenius	37,55	38,69	40,06	39,84	39,62
Freisleben-Hansen	37,57	38,64	39,93	39,73	39,52
Nielsen	37,84	39,16	40,69	40,43	40,18
RILEM	37,57	38,63	39,91	39,71	39,51
Kim J. K.	37,54	38,90	40,50	40,24	39,98
Nurse-Saul	37,37	38,10	38,99	38,86	38,74

El análisis del sensor 4, ubicado a 25 cm de la base del cubo, se basó en una comparación con la resistencia obtenida en la muestra 2 (interior) del testigo de hormigón a los 28 días. En esta comparación, se observa, que en este estudio, los métodos basados en edad equivalente muestran mayor precisión en la estimación de la resistencia en comparación con el método de Nurse-Saul.

Los errores reportados son observaciones directas del caso de estudio. Es importante notar que la incertidumbre de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ de los sensores DS18B20 y pequeñas desviaciones en la profundidad de extracción de los testigos podrían influir en la correspondencia exacta entre la madurez calculada y la resistencia medida.

En la Tabla 5 se presentan los valores de resistencia estimada por cada método para este estudio, junto con el porcentaje de error observado respecto a la resistencia real de la muestra 2 de 40,87 MPa obtenida en el testigo. En la Tabla 5 se evidencia que los métodos con energías de activación más elevadas, como 45.000 J/mol, presentan un buen nivel de precisión, con un error de solo 0,79 %. Sin embargo, el modelo de Nielsen y Kaasgaard, que utiliza una energía de activación variable en función de la temperatura, también destaca por su capacidad de adaptarse a las condiciones térmicas locales, logrando un error de 1,07 %. Por otro lado, el método de Nurse-Saul muestra un error mayor al alcanzar un 4,91 %.

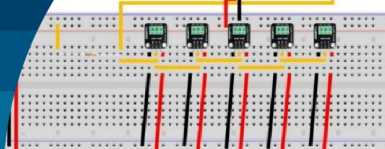
Tabla 5. Porcentaje de error observado en la estimación de resistencia sensor 4

Método	Resistencia (MPa)	Error (%)
CEB-FIP	39,71	-2,84
38.000 J/mol ASTM C1074	40,02	-2,07
41.500 J/mol ASTM C1074	40,28	-1,45
45.000 J/mol ASTM C1074	40,55	-0,79
Arrhenius	39,84	-2,53
Freisleben-Hansen	39,73	-2,80
Nielsen	40,43	-1,07
RILEM	39,71	-2,84
Kim J. K.	40,24	-1,54
Nurse-Saul	38,86	-4,91

En cuanto al sensor 5 ubicado a 3 cm de la base del cubo y en la periferia, este fue utilizado para estudiar la resistencia de la muestra 1 (exterior) del testigo. El análisis muestra un comportamiento similar a la del sensor 4, aunque con un ligero aumento en las diferencias entre las estimaciones de resistencia y la resistencia real. Este sensor se utilizó para comparar las estimaciones con la resistencia obtenida en la muestra 1 del testigo de hormigón. Los métodos basados en la energía de activación y edad equivalente, en particular el modelo de Nielsen y Kaasgaard, se acercaron más a los valores reales en comparación con el método de Nurse-Saul, que presentó una subestimación mayor en este caso.

La Tabla 6 se muestra la comparación de las resistencias estimadas por los diferentes métodos con la resistencia real de la muestra 1 de 41,11 MPa obtenida en el testigo en este estudio. En esta representación, se observa que los métodos de edad equivalente se ajustan mejor, mientras que Nurse-Saul subestima la resistencia respecto al valor real.

El análisis de los datos de la Tabla 6 permite indicar que los métodos con energías de activación más elevadas, como 45.000 J/mol, destacan por su precisión, con un error observado de 2,09 %. Por su parte, el modelo de Nielsen y Kaasgaard también demuestra un error observado bajo de 2,27 %. En contraste, el método de Nurse-Saul presenta un error observado mayor al alcanzar un 5,77 %,



lo que evidencia su menor capacidad para adaptarse a las variaciones de temperatura.

Tabla 6. Porcentaje de error observado en la estimación de resistencia para el sensor 5.

Método	Resistencia (MPa)	Error (%)
CEB-FIP	39,51	-3,89
38.000 J/mol ASTM C1074	39,78	-3,22
41.500 J/mol ASTM C1074	40,01	-2,68
45.000 J/mol ASTM C1074	40,25	-2,09
Arrhenius	39,62	-3,62
Freisleben-Hansen	39,52	-3,86
Nielsen	40,18	-2,27
RILEM	39,51	-3,89
Kim J. K.	39,98	-2,74
Nurse-Saul	38,74	-5,77

Distintos autores han utilizado experiencias basadas en bloques de hormigón para el estudio de hormigones masivos analizando temas de resistencias, estimación de campos temperatura o parámetros que representen el comportamiento adiabático de hormigones. En el estudio de Yikici & Chen (2015), se utilizó el método de madurez para estimar la resistencia in situ de grandes bloques de hormigón de dimensiones 1,8m, determinando los valores de energía de activación en el laboratorio para los cálculos de edad equivalente. Sus resultados muestran una importante variabilidad de la resistencia predicha versus los testigos tanto en la superficie, zona media y en la sección inferior de los bloques de hormigón reportando incluso diferencias de $\pm 15\%$.

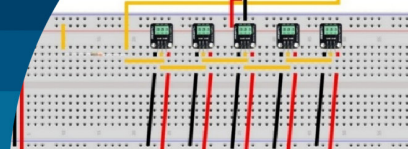
Conclusiones

En este trabajo se puede observar que la energía de activación desempeña un rol esencial en la ecuación de Arrhenius y los valores recomendados ofrecen una solución práctica para proyectos con recursos limitados o mezclas estándar de hormigón. Los distintos modelos presentados en este estudio introducen un concepto relevante al considerar que la energía de activación puede variar según

las condiciones externas. Este planteamiento rompe con el paradigma tradicional de que la energía de activación es un valor constante para cada mezcla. Sin embargo, en futuros trabajos se debe abordar las limitaciones del programa experimental, considerando mayor número de testigos, varias dimensiones del bloque, evaluación a edades tempranas y distintas condiciones ambientales.

Los resultados para el hormigón G35 utilizado en este estudio permiten observar que se obtiene una mayor precisión en la estimación de la resistencia a la compresión utilizando los métodos asociados a energía de activación (E_a). Se aprecia que los métodos empleados en este estudio para estimar la resistencia a la compresión subestiman el valor real de resistencia en el hormigón. Entre los distintos métodos que se utilizaron en este estudio destaca la propuesta de Nielsen-Kaasgaard con un error observado de estimación entre 1,07 y 2,27% y se obtuvo una menor precisión en las estimaciones realizadas con el método de Nurse-Saul al reportar errores observados entre 4,91 y 5,77%. Estas predicciones incrementan su error observado si la estimación de la resistencia se realiza con respecto a probetas de laboratorio, como lo indica la norma, al reportar errores observados entre 6,46 y 7,01%. Sin embargo, en este trabajo se verificó que a tempranas edades el método de Nurse-Saul entrega muy buenas estimaciones de la resistencia. La precisión superior del método de Nielsen-Kaasgaard se limita al caso estudiado, pero sugiere que, en proyectos de hormigón masivo en el norte de Chile, su adopción permitiría optimizar la secuencia constructiva como el caso de retiro de moldajes, aplicación de cargas de rellenos en muros de contención o la entrega al tránsito de pavimentos, evitando la condición conservadora del método de madurez tradicional a los 28 días. Por ello, este trabajo con hormigones masivos nos obliga a poner atención en la forma en que se aborda la estimación de resistencia de hormigones in situ.

Para este diseño específico con áridos locales, los modelos de E_a variable resultaron más adecuados. Investigaciones futuras deberían validar estos hallazgos en bloques de distintas geometrías, diferentes condiciones climáticas, diferentes tipos y cantidades de cemento, nuevas dosificaciones para hormigones de resistencia distinta a G35 e incorporar diferentes adiciones para generalizar la recomendación a nivel global. En la misma línea, se debe



avanzar a la validación en elementos masivos a escala real y el uso de modelos numéricos para su estudio.

Referencias

Anonymous. (1997). TCE1: Adiabatic and semi-adiabatic calorimetry to determine the temperature increase in concrete due to hydration heat of the cement. *Materials and Structures*, 30(8), 451–464. <https://doi.org/10.1007/bf02524773>

ASTM C1074. (2019). *Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*. <https://doi.org/10.1520/C1074-19>

Bakour, A., & Ftima, M. Ben. (2021). Experimental investigations on the asymptotic fracture energy for large mass concrete specimens using wedge splitting test. *Construction and Building Materials*, 279, 122405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122405>

Ballim, Y. (2004). A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 695–703. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00093-3)

Batog, M., & Giergiczny, Z. (2017). Influence of mass concrete constituents on its properties. *Construction and Building Materials*, 146, 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.085>

Ebensperger, L., Oyarzún, J., & Torres, R. (2020). Determination of the datum temperature for applying maturity in cold weathers. *Revista Ingenieria de Construcción*, 35(1), 84–99. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000100084>

Gajda, J., & Vangeem, M. (2002). Understanding mass concrete is the key to controlling temperatures and ultimately saving time, effort, and money. *Concrete International*, January, 58–62.

Geng, D. J., Dai, N., Jin, X. S., & Miao, E. X. (2021). Comparison of calculating methods and applications of different concrete maturity. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2011/1/012022>

Guerra, R. (2025). Estimación de la resistencia a la compresión de hormigones a los 28 días utilizando Modelos de Mezclas Gaussianas. *Obras y Proyectos*, 37, 4–14.

Hansen, P. F., & Pedersen, E. J. (1977). *Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete*.

Instituto Nacional de Normalización. (2018). NCh 3565 Hormigón - Estimación de la resistencia mecánica- Método de

la madurez. In *INN*.

Kaur, M., & Kaur, M. (2012). A review on utilization of coconut shell as coarse aggregates in mass concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(11 SUPPL.), 2063–2065.

Kim, J. K., Han, S. H., & Lee, K. M. (2001). Estimation of compressive strength by a new apparent activation energy function. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 217–225.

Kim, Y. R., Khil, B. S., Jang, S. J., Choi, W. C., & Yun, H. Do. (2015). Effect of barium-based phase change material (PCM) to control the heat of hydration on the mechanical properties of mass concrete. *Thermochimica Acta*, 613, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.05.025>

Maruyama, I., & Lura, P. (2019). Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. *Cement and Concrete Research*, 123(May), 105770. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.015>

Nielsen, C. V., & Kaasgaard, M. (2020). Activation Energy for the Concrete Maturity Model – Part 1: Compressive Strength Tests at Different Curing Temperatures. *Nordic Concrete Research*, 62(1), 87–106. <https://doi.org/10.2478/ncr-2020-0002>

Riding, K. A., Poole, J. L., Schindler, A. K., Juenger, M. C. G., & Folliard, K. J. (2006). Evaluation of temperature prediction methods for mass concrete members. *ACI Materials Journal*, 103(5), 357–365. <https://doi.org/10.14359/18158>

Ruiz Guti, M. (2007). Manual de Programación Arduino Arduino : Manual de Programación. *Arduino Notebook*, 1, 3–70.

Soutsos, M., & Kanavaris, F. (2018). The modified nurse-saul (MNS) maturity function for improved strength estimates at elevated curing temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00206. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00206>

Tekle, B. H., Al-Deen, S., Anwar-Us-Saadat, M., Willans, N., Zhang, Y., & Lee, C. K. (2022). Use of maturity method to estimate early age compressive strength of slab in cold weather. *Structural Concrete*, 23(2), 1176–1190. <https://doi.org/10.1002/suco.202000693>

Yikici, T. A., & Chen, H. L. (2015). Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. *Construction and Building Materials*, 95, 802–812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.026>