Estimación de la Resistencia a la Compresión del Hormigón mediante el Método de Madurez: Estudio con Hormigón de SOBOCE S.A. ReadyMix en Cochabamba

Estimation of Concrete Compressive Strength Using the Maturity Method: A Study with Concrete from SOBOCE S.A. ReadyMix in Cochabamba

CENTRO DE INNOVACIÓN Y ASESORÍA TÉCNICA (CIATEC)

SOCIEDAD BOLIVIANA DE CEMENTO (SOBOCE.SA)

AUTOR: ANDRÉS JARAMILLO (ASESORÍA TECNICA)

EXCLUSIVO DE SOBOCE SA

Resumen

El método de la madurez del hormigón es una técnica no destructiva que permite estimar la resistencia a compresión a través de la correlación entre tiempo y temperatura. Este método se ha consolidado como una herramienta eficiente en la construcción moderna, permitiendo realizar estimaciones en tiempo real del estado del hormigón sin necesidad de realizar ensayos destructivos. En este estudio, se ha implementado el método utilizando hormigón premezclado producido por SOBOCE S.A. ReadyMix en la ciudad de Cochabamba, Bolivia.

El enfoque experimental incluyó la instalación de sensores de temperatura en muestras cilíndricas 15x30 cm, con un monitoreo continuo durante 28 días. Los datos obtenidos fueron procesados, analizados para la obtención de modelos de estimación indirecta de la resistencia a la compresión en función a la temperatura ganada por el hormigón a lo largo del tiempo. Estos modelos fueron validados a la vez estadísticamente, mostrando una correlación significativa entre la madurez del hormigón y su resistencia a compresión. Este método es una forma no destructiva y fiable de estimar la resistencia del hormigón en obra en tiempo real, permitiendo un mejor control de la calidad, y reduciendo tanto el número de ensayos tradicionales (en general rotura de probetas) como los plazos de construcción. Además, ayuda a garantizar una mayor seguridad (Akuamoah, 2021).

Palabras clave: Construcción, hormigón, estudio no invasivo, resistencia a compresión, Cochabamba, madurez, Temperatura.

Abstract

The concrete maturity method is a non-destructive technique that allows estimating compressive strength through the correlation between time and temperature. This method has become an efficient tool in modern construction, enabling real-time estimates of the concrete's condition without the need for destructive testing. In this study, the method was implemented using ready-mix concrete produced by SOBOCE S.A. ReadyMix in the city of Cochabamba, Bolivia.

The experimental approach included the installation of temperature sensors in cylindrical samples measuring 15x30 cm, with continuous monitoring over 28 days. The data obtained were processed and analyzed to develop models for the indirect estimation of compressive strength based on the heat gained by the concrete over time. These models were statistically validated, showing a significant correlation between the maturity of the concrete and its compressive strength. This method is a non-destructive and reliable way to estimate the in-situ concrete strength in real-time, allowing for better quality control and reducing both the number of traditional tests (typically cylinder break tests) and construction timelines. Additionally, it helps ensure greater safety (Akuamoah, 2021).

Keywords: Construction, concrete, non-destructive study, compressive strength, Cochabamba, maturity, temperature.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo, y su resistencia a compresión es uno de los factores más críticos para garantizar la durabilidad y seguridad de las estructuras (NEVILLE, 2011, pág. 43). Tradicionalmente, la resistencia se evalúa a través de ensayos destructivos en cilindros de hormigón que se curan en condiciones controladas (ASTM , 2003). Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones, ya que no refleja con precisión el comportamiento del hormigón en obra y puede generar demoras en la toma de decisiones (Carino & Lew, 2001, pág. 15). El método de la madurez del hormigón ofrece una alternativa no destructiva que permite estimar la resistencia en función de la temperatura acumulada durante el tiempo de curado (228.1R-03, 2003).

Este estudio tiene como objetivo evaluar la aplicación del método de la madurez en la ciudad de Cochabamba, Bolivia, utilizando hormigón premezclado suministrado por SOBOCE S.A. ReadyMix. A través de una serie de experimentos, se busca establecer la relación entre la madurez y la resistencia a compresión bajo condiciones locales, validando la precisión de este enfoque.

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La industria de la construcción en Bolivia enfrenta desafíos asociados con la variabilidad de las condiciones climáticas y la necesidad de cumplir con los plazos ajustados en proyectos de gran magnitud. En este contexto, el método de la madurez del hormigón se presenta como una solución que permite optimizar los tiempos de construcción sin comprometer la seguridad estructural.

En Cochabamba, donde las temperaturas pueden variar significativamente entre el día y la noche, es crucial contar con herramientas que permitan prever con precisión el comportamiento del hormigón en obra.

Este estudio no solo contribuye al conocimiento local sobre la aplicación de este método, sino que también ofrece un análisis detallado de los modelos predictivos que se pueden obtener y como emplearlos adecuadamente para el estudio de hormigones elaborados con materiales propios de la región a estudiar, que en el presente caso es la ciudad de Cochabamba, Bolivia y los hormigones son producidos por la empresa SOBOCE.SA ReadyMix.

METODO DE LA MADUREZ DEL HORMIGÓN

El método de la madurez se fundamenta en la relación entre el tiempo, la temperatura y el desarrollo de la resistencia del hormigón. A lo largo de las décadas, se han propuesto varios modelos para calcular el índice de madurez. Uno de los más conocidos es la **ecuación de Nurse-Saul**, que se basa en la premisa de que la resistencia del hormigón es proporcional a la "edad equivalente" de la mezcla a una temperatura de referencia. Esta ecuación, formulada por (NURSE & SAUL, 1951), se expresa de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{M(t) = \sum (T_a - T_0)\Delta t} \qquad [1]$$

Donde:

- M(t) es la madurez acumulada en un tiempo t
- T_a es la temperatura promedio durante el intervalo de tiempo Δt\Delta
- T_0 es la temperatura de referencia (usualmente 0°C).

Por otro lado, el **modelo de Arrhenius** se utiliza en situaciones donde las fluctuaciones de temperatura son más significativas. Este modelo considera la energía de activación de las reacciones químicas que ocurren durante la hidratación del cemento, permitiendo una predicción más precisa de la resistencia en climas extremos (Carino

EXCLUSIVO DE SOBOCE SA

& Lew, 2001, pág. 6). El uso de la ecuación de Arrhenius fue popularizado por McIntosh (1956) y ha sido aplicado en investigaciones recientes para mejorar la precisión de las estimaciones de resistencia en hormigones especiales (Jiang & Gary Klein, 2004).

DETALLES EXPERIMENTALES

- **Materiales**

Para la elaboración de las muestras de hormigón se usaron materiales como cemento Viacha IP40 con una gravedad especifica de 2.96, grava, arena, agua y aditivos. Los hormigones fueron diseñados para alcanzar resistencias comprendidas entre 21 a 35 MPa a los 28 días. La grava empleada de ¾ " fue extraída de la zona de Parotani en el departamento de Cochabamba – Bolivia, se usó arena fina de ríos según especificaciones técnicas y se empleó agua potable sin la presencia de algún químico. Las propiedades químicas del cemento puzolánico portland empleado en función a especificaciones de la Norma boliviana (IBNORCA (NB 011), 2012) se muestra en la siguiente tabla.

TABLA 1 – Propiedades químicas del cemento

	Contenidos	Unidad	Cemento Viacha IP-40	Método	Requerimientos según NB 011
Propiedades químicas del cemento	%SiO2	%	30	NTP-ISO29581-2	-
	%Al2O3	%	6.07	NTP-ISO29581-2	-
	%Fe2O3	%	2.65	NTP-ISO29581-2	-
	%CaO	%	53.51	NTP-ISO29581-2	-
	%MgO	%	2.22	NTP-ISO29581-2	Max% 6
	%Mn2O3	%	0.25	NTP-ISO29581-2	-
	%TiO2	%	0.18	NTP-ISO29581-2	-
	%P2O5	%	0.12	NTP-ISO29581-2	-
	%K2O	%	1.81	NTP-ISO29581-2	-
	%Na2O	%	0.67	NTP-ISO29581-2	-
	%SO3	%	2.01	NTP-ISO29581-2	Max% 4
	%LOI	%	2.77	NB 061	Max% 7
	Residuo Insoluble	%	17.64	NB 061	<35

Fuente: Elaboración Propia.

Los 5 tipos de hormigones clasificados según su resistencia alcanzada a los 28 días se elaboraron siguiendo las siguientes dosificaciones que se muestran en la siguiente tabla

TABLA 2 – Dosificaciones de los hormigones según su resistencia

Tipo de hormigón	Materiales					
	Cemento Viacha IP40 (Kg/m3)	Arena (Kg/m3)	Gravilla 3/4" (Kg/m3)	Agua (Kg/m3)	Aditivo VISCOFLOW 5000 (Kg/m3)	Relación A/C
H-21 IP40	280	1136	758	195	2.78	0.70
H-25 IP40	305	1085	786	195	2.90	0.64
H-28 IP40	328	1036	814	195	3.00	0.59
H-35 IP40	350	1190	773	178	2.80	0.51

Fuente: Elaboración Propia.

- **Especímenes experimentales**

USO EXCLUSIVO DE SOBOCE S.A.

Los especímenes de hormigón ensayados en laboratorio fueron elaborados usando moldes de acero de 150x 300 mm respectivamente y siguiendo el procedimiento estándar de la ASTM C-31 (ASTM , 2003). Las muestras se dejaron durante 24 horas en laboratorio, luego una vez pasado ese lapso de tiempo se desmoldaron para luego ser almacenadas y curadas en piscinas a una temperatura de 23° ± 2°C en tiempos comprendidos entre 1,3,7,14 y 28 días respectivamente.

- **Equipos de medición**

Para la medición de la temperatura en el hormigón se usó los sensores COMMAND CENTER™, dispositivos los cuales permiten la medición de la temperatura interna del hormigón cada 30 min, por otro lado para la medición y procesamiento de datos se hizo uso del dispositivo TRIMBLE NOMAD COMMAND CENTER™).

Por otro lado las muestras experimentales de hormigón fueron ensayadas en la maquina a compresión del laboratorio de READYMIX Cochabamba.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

- **Relación entre la resistencia a compresión y la madurez del hormigón**

Relacionando la resistencia a compresión obtenida experimentalmente y la temperatura acumulada de muestras de hormigón cilíndricas 15x30 cm, ensayadas en laboratorio se pudieron obtener el siguiente modelo de estimación de forma lineal, el cual permitió el estudio de especímenes en edades comprendidas entre 1 a 28 días de curado para hormigones cuyas resistencias están en el intervalo de 21 a 35 MPa, todo esto mediante la ejecución del procedimiento estándar referente a la madurez del hormigón ASTM 1074-19 (ASTM (American Society for Testing and Materials), 2003).

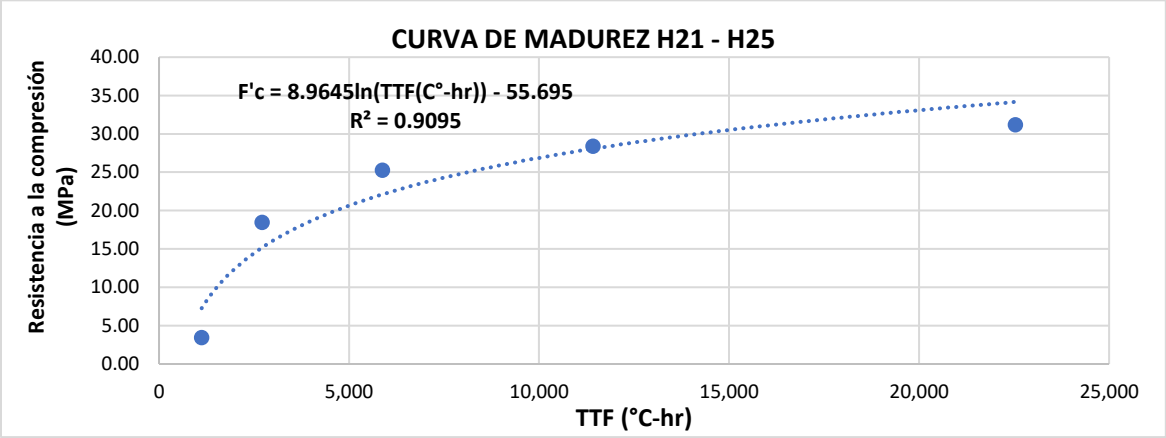

Figura 1: Grafica del modelo de regresión logarítmica de la resistencia a compresión y la ganancia de temperatura del hormigón (H21-H25)

Fuente: Elaboración Propia.

EXCLUSIVO DE SOBOCE SA

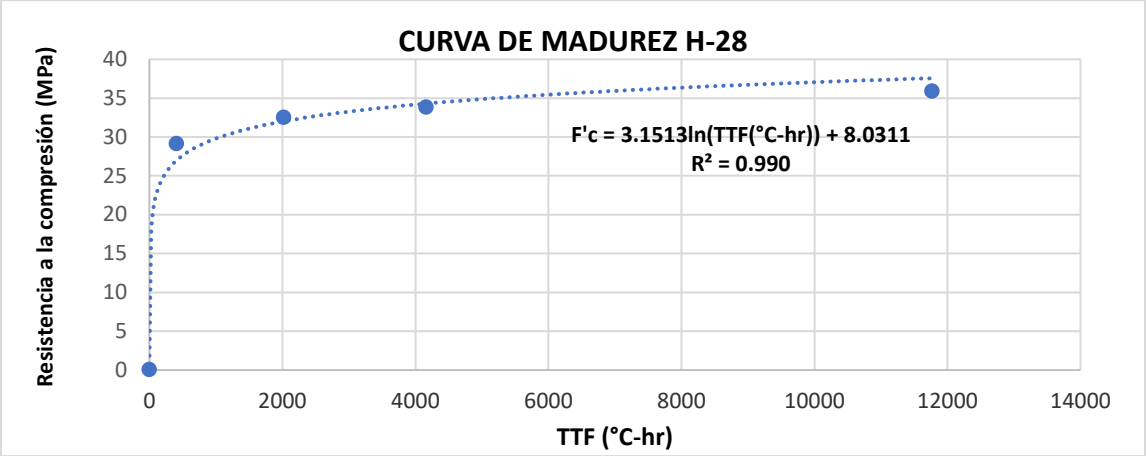

Figura 2: Grafica del modelo de regresión logarítmica de la resistencia a compresión y la ganancia de temperatura del hormigón (H28)

Fuente: Elaboración Propia.

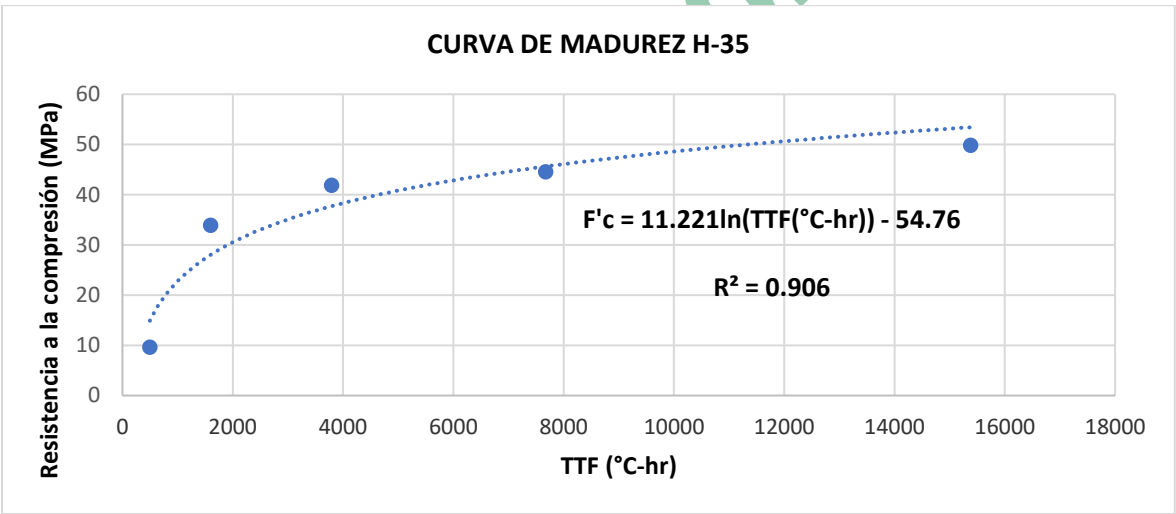

Figura 3: Grafica del modelo de regresión logarítmica de la resistencia a compresión y la ganancia de temperatura del hormigón (H35)

Fuente: Elaboración Propia.

Para los 4 tipos de hormigones empleados a distintas edades de curado se encontraron las siguientes relaciones logarítmicas entre la resistencia a la compresión (F´c) y la temperatura acumulada en el hormigón a lo largo del tiempo (TTF(°C-hr)):

$$F´c = 9.19\ ln(\boldsymbol{TTF}(°\boldsymbol{C} - \boldsymbol{hr})) - 53.02 \quad [2]$$

$$F´c = 3.1513\ ln\big(\boldsymbol{TTF}(°\boldsymbol{C} - \boldsymbol{hr})\big) + 8.0311 \quad [3]$$

$$F'c = 11.221\, ln(\boldsymbol{TTF}(°\boldsymbol{C} - \boldsymbol{hr})) - 54.76 \quad [4]$$

- **Análisis estadístico**

Para dar validez a los modelos presentados se realizó un análisis estadístico de los modelos mediante el uso del programa EVIEWS 12. En la siguiente tabla se muestra los parámetros evaluados de cada modelo para poder observar si se encuentran entre los rangos de aceptación en función principalmente a los siguientes supuestos que son linealidad, dependencia, normalidad, homocedasticidad y la ausencia de autocorrelación en los modelos.

TABLA 3 – Parámetros analizados para la validación estadística de los modelos propuestos

Modelo	Propiedades							
	>0.5	<0.05	<0.05	<0.05	>0.05	≈2	>0.05	<5.9915
	R^2	A.S (I)	A.S (P)	A.V	(H)	(A)	(A- χ2)	(N)
MM H21- H25	0.909	0.0292	0.0119	0.0119	0.213	2.46	0.851	0.617
MM H28	0.987	0.0275	0.0007	0.000652	0.18	1.95	0.977	0.43
MM H35	0.906	0.0486	0.0125	0.0125	0.1299	2.36	0.85	0.572

Fuente: Elaboración Propia.

En la anterior tabla presentada se puede observar que todos los modelos en los casos de linealidad A.S (I) y A.S (P) al ser menores a 0.05 demuestran que existe una relación significativa entre ambas variables y que son de gran importancia para el modelo. Por otro lado realizando el análisis de varianza y obteniendo un valor P menor a 0.05, se deduce que los modelos son significativamente representativos a un 95% de confianza usando el análisis de variabilidad.

Finalmente para dar validez a los modelos de regresión se analizaron tres aspectos principales que son la heteroscedasticidad, normalidad y residuos. Para el análisis de heteroscedasticidad se dio uso al programa de análisis estadístico de cómputo EVIEWS, en el cual mediante la aplicación del método de Breusch-Pagan-Godfrey, se calcularon los valores para ambas variables de los probabilísticos CHI cuadrado (χ^2), los cuales dieron valores mayores a 0.05, lo que significó la inexistencia del problema en el modelo.

En cuanto al análisis de normalidad, se realizó también con la ayuda del programa EVIEWS un test de normalidad, donde se obtuvo mediante los cálculos del parámetro de Jarque-Bera para cada modelo que al ser menores a 5.9915 y la probabilidad es mayor al 5% se confirma que los errores del modelo siguen una tendencia normal.

Por último se ejecuta un análisis de los residuos en el modelo, se procede a analizar el valor obtenido de DURBIN-WATSON. Las estimaciones encontradas (A) están muy cercanas a 2 lo cual indican inexistencia de autocorrelación en los errores (Pulido, 2008).

- **Análisis de los modelos**

Para poder poner a prueba los modelos, se instalaron sensores de temperatura en diferentes estructuras de hormigón armado. Se realizaron las mediciones a los 28 días en cada estructura, estimado indirectamente la resistencia a compresión del elemento. Por otro lado el valor estimado será comparado con el valor real obtenido de la rotura a compresión de los cilindros muestreados del elemento al momento del vaciado. Los cilindros muestreados fueron curados según establece la normativa ASTM C31.

EXCLUSIVO DESOBOCE SA

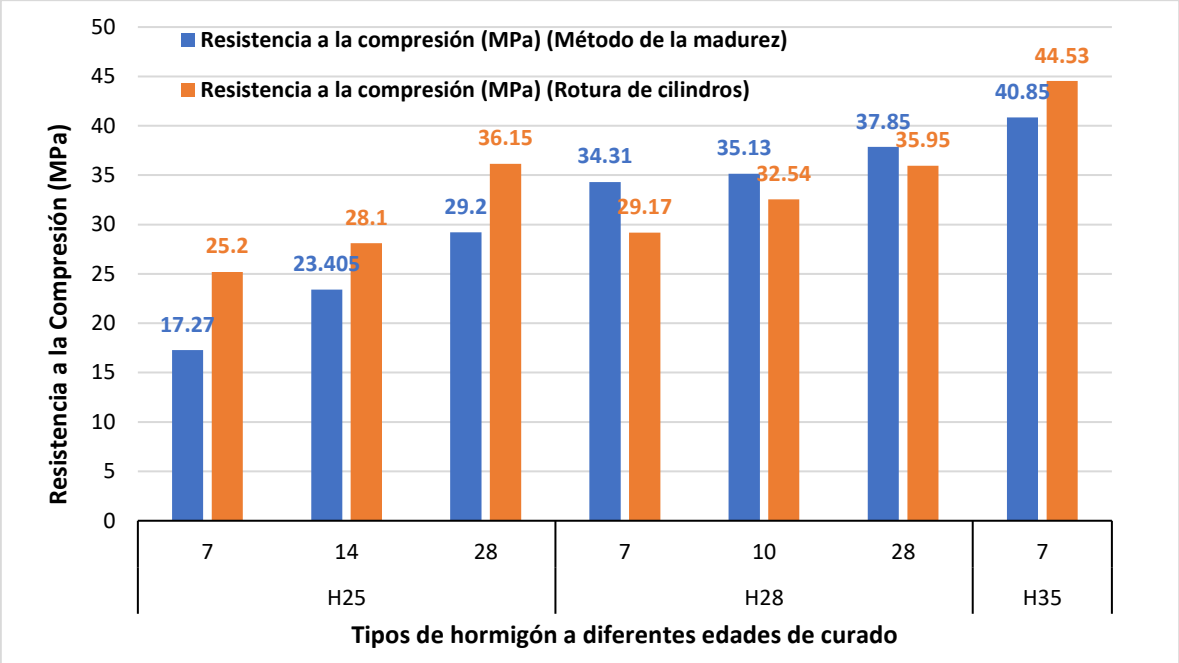

Figura 4: Grafica Comparativa entre resistencias a compresión alcanzadas por método de estudio a diferentes edades de curado

Fuente: Elaboración Propia.

EXCLUSIVO DE S

CONCLUSIONES

Respecto a los resultados obtenidos se pudieron realizar las siguientes conclusiones:

El estudio se centró en el desarrollo y la aplicación de curvas de madurez junto con su ecuación para estimar la resistencia del hormigón, considerando tanto la temperatura interna como el tiempo de curado. Se llevaron a cabo ensayos de compresión en cilindros de hormigón con diferentes mezclas para validar la metodología, lo que permitió confirmar la relación entre el índice de madurez y la resistencia del material. Las ecuaciones resultantes, derivadas de los ensayos con los materiales provenientes de Cochabamba, Bolivia, son específicas para las mezclas analizadas y además las cuales fueron sometidas a un riguroso análisis estadístico que garantizó su fiabilidad.

En la fase final del estudio, se aplicaron las curvas de madurez ya validadas al estudio y estimación de la residencia a la compresión a proyectos de construcción real. Los resultados mostraron que los hormigones H25, H28 y H35 alcanzaron resistencias de rotura en laboratorio óptimas de 25.2, 29.2 y 44.53 MPa tras 7 días de curado, por otro lado el método de la madurez permitió una estimación de 17.3, 34.31 y 40.85 MPa. Al observar la cercanía de los datos, esto permite la remoción anticipada del encofrado y la aplicación de cargas. Esta capacidad para validar la resistencia temprana del hormigón es crucial en el contexto de la construcción, donde el tiempo y la eficiencia son esenciales.

Adicionalmente, a los 28 días, las resistencias del método de la madurez del hormigón H25 están por debajo del valor a compresión de rotura en un 23.8% y para el hormigón H28 existe una diferencia superior de 5.34% siendo este último el más aproximado al valor real de resistencia a la compresión.

Estos hallazgos al ser corroborados mediante ensayos de compresión de cilindros, confirman la efectividad del método propuesto y su potencial aplicación en futuras estimaciones de resistencia en hormigón con mezclas similares.

RECOMENDACIONES

1. **Comparación de Equipos de Medición**: Utilizar equipos de diferentes fabricantes y realizar un estudio comparativo para observar posibles diferencias en los resultados, mejorando así la precisión y la bibliografía en la medición de madurez del hormigón.
2. **Estudios en Distintas Regiones**: Repetir el estudio con materiales y cementos de diferentes regiones, permitiendo ajustar las ecuaciones a las características locales de los materiales y mejorar su eficiencia en diversas condiciones.
3. **Desarrollo de Modelos Predictivos Locales**: Antes de usar nuevos equipos, realizar estudios previos para generar modelos predictivos que se adapten a las características de los materiales y cementos específicos de la región, asegurando mediciones confiables.

BIBLIOGRAFÍA

228.1R-03, A. (2003). *228.1R-03: In-Place Methods to Estimate Concrete Strength.* Obtenido de AMERICAN CONCRETE INSTITUTE: https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=228103&Format=DOWNLOAD&Language=English&Units=US_AND_METRIC

Akuamoah, F. (2021). *HILTI.* Recuperado el 19 de 09 de 2024, de HILTI: https://www.hilti.es/media-canonical/ASSET_DOC_LOC_17626794_APC_RAW

ASTM . (2003). *ASTM C31 (Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra).* Recuperado el 04 de 05 de 2021, de https://www.astm.org/astm-tpt-773.html

ASTM (American Society for Testing and Materials). (2003). *ASTM C 597-02 (Velocidad de Pulso a Través del Concreto)*. Obtenido de https://afzir.com/knowledge/wp-content/uploads/2018/02/ASTM-C-597.pdf

Carino, & Lew. (Mayo de 2001). *National Institute of Standars and Technology.* Recuperado el 20 de 09 de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/237724702_The_Maturity_Method_From_Theory_to_Application1?enrichId=rgreq-fdaf2470fbd10a4056aae1ce02393b39-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzIzNzcyNDcwMjtBUzoyNDQ2MzY5OTYzMzc2NjdAMTQzNTMzNzQxMzgyMQ%3D%3D&el=1_x_2&_esc=

IBNORCA (NB 011). (2012). *IBNORCA.* Obtenido de https://www.ibnorca.org/tienda/catalogo/detalle-norma/nb-011:2012-nid=2219-12

EXCLUSIVO DE SOBOCE SA

Jiang, J. J., & Gary Klein. (Enero de 2004). *ResearchGate.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/222693660_An_exploration_of_the_relationship_between_software_development_process_maturity_and_project_performance

NEVILLE, A. (2011). Properties of Concrete. En *Properties of Concrete* (5th Edition ed., pág. 2866). Pearson Education Limited. Recuperado el 19 de 09 de 2024, de https://www.academia.edu/31961399/properties_of_concrete_by_a_m_neville_pdf

NURSE, & SAUL. (1951). *ResearchGate.* Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Fragkoulis-Kanavaris/publication/328476596_The_Modified_Nurse-Saul_MNS_maturity_function_for_improved_strength_estimates_at_elevated_curing_temperatures/links/5bd02a6d299bf1a43d9c8235/The-Modified-Nurse-Saul-MNS-maturi

Pulido, H. G. (2008). *Análisis y diseño de experimentos.* (I. The McGraw-Hill Companies, Ed.) Recuperado el 21 de 09 de 2024

EXCLUSIVO DE SOBOCE SA