

Evaluation of the maturity method in concrete with compressive strength $f'_c = 21$ MPa using type I cement, Sol and Cemex

Caballero- Sipiran Raniery Andre, Br¹, Sagástegui-Vásquez Germán, Mg. Ing.³

¹, Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú. N00056298@upn.pe.

² Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú. german.sagastegui@upn.edu.pe

Abstract- *The present research focuses on evaluating the compressive strength of $F'_c = 21$ MPa using the maturity method with Type I, Sol, and Cemex cements in the city of Trujillo. Its main objective is to analyze the effectiveness and application of the maturity method in a controlled environment, such as a laboratory, following an experimental methodology. The total sample consists of 60 test specimens, of which 15 are for failure testing, 2 for sensors, and 3 for reserve. After conducting the tests, it was concluded that the Cemex cement performed best using the maturity method. The characterization of aggregates was determined, along with a mix design to achieve $F'_c = 21$ MPa. Regarding the maturity indices, the concrete made with Cemex cement stood out, reaching the required strength in a short time with a maturity index of 2759.8 °C·h. This was followed by Sol cement with a maturity index of 7646.5 °C·h, and finally, Type I cement with the same maturity index of 7646.5 °C·h. These findings ensure quality control and contribute to reducing construction time.*

Keywords: *Maturity method, compressive strength, maturity index, maturity curve.*

Evaluación método de madurez en concreto con resistencia a la compresión $f'c=21$ MPa con Cemento Tipo I, Sol y Cemex

Caballero- Sipiran Raniery Andre, Br¹, Sagástegui-Vásquez Germán, Mg. Ing.³

¹ Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú. N00056298@upn.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú. german.sagastegui@upn.edu.pe

Resumen— La presente investigación está centrada en la evaluación de la fuerza a la compresión de $f'c=21$ MPa mediante el método de madurez elaborado con cementos Tipo I, Sol y Cemex en la ciudad de Trujillo, su objetivo principal es analizar la efectividad y la aplicación del método de madurez en un entorno controlado como es un laboratorio, teniendo una metodología de tipo experimental, con una población total de 60 probetas de las cuales 15 son para rotura, 2 para los sensores y 3 de reserva. Tras los ensayos realizados se pudo concluir que mediante el método de madurez el Cemex tuvo mejor desempeño, se determinó la caracterización de los agregados y un diseño de mezcla para que llegue a una $f'c=21$ MPa, los índices de madurez de los cuales podemos destacar el comportamiento de concreto realizado con el cemento Cemex el cual con un índice de madurez de 2759.8 °C·h llegó a la resistencia requerida en un tiempo corto, sigue es el cemento Sol con un índice de madurez de 7646.5 °C·h y por último el cemento tipo I con un índice de madurez de 7646.5 °C·h dándonos una certeza en el control de calidad y reduciendo tiempo de obra.

Palabras clave: método de madurez, resistencia a la compresión, índice de madurez, curva de madurez.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción, garantizar la resistencia del concreto es fundamental para la seguridad y durabilidad de las estructuras. Tradicionalmente, esta resistencia se evalúa mediante ensayos destructivos que requieren largos periodos de espera. Sin embargo, el método de madurez ha surgido como una alternativa eficiente, permitiendo estimar la resistencia del concreto en tiempo real sin necesidad de pruebas destructivas. Su implementación optimiza los tiempos de construcción, reduce costos y disminuye el desperdicio de materiales, promoviendo así una construcción más sostenible y eficiente [1].

Este método se basa en la relación entre la temperatura y el tiempo de curado del concreto para predecir su resistencia. Diversos estudios han demostrado sus beneficios en distintos países. En México, su aplicación ha reducido el tiempo de ejecución de estructuras como zapatas de columna [2]. En Chile, se ha comprobado que el uso de voltajes eléctricos en moldes de concreto acelera la madurez sin comprometer la resistencia final [3]. En Bolivia, se ha observado que el método de madurez permite desencofrar estructuras en 14 días, en comparación con los 28 días requeridos tradicionalmente [4]. Estas experiencias internacionales destacan el potencial del método para transformar la industria de la construcción y optimizar los procesos de control de calidad.

Se buscó determinar el mejor instrumento para medir resistencias a edades tempranas que se ajuste a la metodología para determinar tiempos mínimos de desencofrado de elementos verticales de hormigón. Una vez realizar dos estudios de diferentes dosificaciones de hormigón vibrado, con un total de cuatro métodos de medición de resistencia y más de 500 puntos verificados, se concluyó que: si se desea desencofrar a resistencias menores de 3 MPa, se recomienda el uso de un esclerómetro de baja resistencia para la realización de la curva de caracterización y si son con mayores de 3 MPa por diversas razones se recomienda la utilización de probetas cilíndricas de dimensiones normales de 15 x 30 cm [5].

La empresa canadiense GIATEC vio que la temperatura cumple un papel importante para el método de madurez ya que es uno de sus puntos importantes para la realización de la curva de madurez, por ello la empresa haciendo uso del sensor SmartRock®, dan un seguimiento continuo de las temperaturas del hormigón en cualquier momento de la obra que es recomendado por la norma NCh170:2016, asegurándonos un control de calidad en las diferentes etapas de la construcción. [6].

En esta investigación, para estudiar el método de madurez se toma en cuenta la Norma Técnica Peruana (NTP 339.217:2016) y la norma designada desde el año 1987 por la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM C1074), las cuales establecen que este método tiene como objetivo estimar la resistencia In Situ del concreto [7].

En el Perú, investigaciones han indicado que el uso de aditivos acelera el desarrollo de la resistencia del concreto. El método predice la resistencia con una desviación de solo 9.1% en comparación con los ensayos convencionales. Además, estudios sobre diferentes tipos de cemento han demostrado que algunas formulaciones permiten alcanzar resistencias óptimas en menor tiempo, lo que sugiere que el método de madurez puede ser adaptado a distintas condiciones climáticas y materiales de la región [8].

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la resistencia a la compresión del concreto con $f'c=21$ MPa utilizando el método de madurez en tres tipos de cemento: Tipo I, Sol y Cemex. La investigación se realizará en Trujillo durante el año 2023, analizando la precisión del método en la estimación de la resistencia en edades tempranas (3, 5, 7, 9 y 11 días) y comparando el comportamiento de los diferentes cementos. Se

espera que los resultados optimicen los procesos constructivos, reduzcan los tiempos de espera y mejoren el control de calidad en obra, permitiendo una ejecución más rápida y eficiente de los proyectos de infraestructura.

Esta investigación contribuirá a la implementación de metodologías más eficientes y sostenibles en la construcción en el Perú. Asimismo, proporcionará información relevante para estudios futuros sobre la influencia de factores climáticos y materiales en la aplicación del método de madurez. Además, los resultados podrán servir de base para la formulación de normativas que regulen su uso en la industria de la construcción, promoviendo su adopción a nivel nacional y fortaleciendo el marco regulador en el sector.

Método de madurez

Es una técnica que permite estimar la resistencia del concreto en función de la temperatura y el tiempo de curado. Consiste en registrar la temperatura del concreto durante su endurecimiento y utilizar estos datos para predecir su resistencia sin necesidad de realizar ensayos destructivos [9]. Su aplicación facilita la toma de decisiones en obra, optimizando los tiempos de construcción y reduciendo costos. Además, permite un monitoreo constante de la evolución del concreto, brindando mayor seguridad en la planificación de las obras.

Resistencia a la compresión

Es la capacidad del concreto para soportar fuerzas sin fracturarse. Se expresa en megapascuales (MPa) y es una propiedad clave para la estabilidad estructural. La resistencia a la compresión está influenciada por factores como la proporción de los materiales, el método de curado y el tiempo de fraguado. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos en laboratorio, y su medición precisa es crucial para garantizar el desempeño estructural de edificaciones y pavimentos [10].

Índice de madurez

Es un parámetro numérico que relaciona el tiempo y la temperatura de curado del concreto con su resistencia. Permite predecir con precisión el desarrollo de la resistencia sin necesidad de pruebas destructivas, lo que facilita el control de calidad en obra y optimiza los procesos constructivos. Su cálculo se basa en modelos matemáticos que permiten estimar el comportamiento del concreto a lo largo del tiempo, asegurando su correcta aplicación en distintos tipos de proyectos [11].

Curva de madurez

Es una representación gráfica que muestra cómo la resistencia del concreto evoluciona en función del índice de madurez. Se obtiene a partir de datos experimentales y es útil para prever el desempeño del concreto en diferentes condiciones, ayudando a determinar el momento óptimo para desencofrar o aplicar cargas. Esta curva es fundamental para evaluar el rendimiento del concreto en obra y ajustar las estrategias de curado según sea necesario [12].

Concreto

Es un material de construcción compuesto por cemento, agregados, agua y aditivos. Su resistencia y durabilidad lo hacen indispensable en la construcción de infraestructuras. El comportamiento del concreto depende de su diseño de mezcla, el proceso de curado y la calidad de sus componentes. Existen diferentes tipos de concreto según su composición y uso, como el concreto armado, premezclado y autocompactante, cada uno con propiedades específicas adaptadas a distintas necesidades constructivas. El uso de técnicas innovadoras, como el método de madurez, permite mejorar su desempeño y eficiencia en obra, reduciendo tiempos de espera y garantizando estructuras más seguras y duraderas [13].

II. METODOLOGÍA

A. Muestras

Agregados

Los agregados empleados para la elaboración del concreto fueron seleccionados con base en normas técnicas, garantizando su idoneidad para la investigación. Se realizó un análisis granulométrico siguiendo la norma ASTM C-136-01. Asimismo, se determinó el peso específico y la absorción de los agregados de acuerdo con la norma ASTM 128-88, al igual que se determinó el peso específico y absorción con la normativa ASTM 128-88 y el peso unitario utilizando la normativa ASTM C29 [14].

Cementos

El cemento es un material aglomerante obtenido mediante la cocción de piedra caliza y arcilla a altas temperaturas [15]. Se utilizaron cementos tipo I, Sol y Cemex, cumpliendo con la normativa vigente y garantizando resistencia a la compresión de $f'_c = 21$ MPa. Su elección responde a su disponibilidad y rendimiento en diversas condiciones ambientales.

Agua

Se utilizó agua potable en la mezcla de concreto para garantizar una correcta hidratación del cemento y la adecuada formación de la pasta cementante [16].

B. Ensayos

Ensayo de Granulometría

Se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM C-136-01, utilizando una tamizadora con tamices estandarizados. El procedimiento consistió en secar la muestra a $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, tamizar la muestra y registrar las masas retenidas en cada tamiz para calcular el módulo de finura y la distribución granulométrica. Estos resultados permitieron evaluar la idoneidad de los agregados para la mezcla de concreto [17].

Contenido de Humedad

El contenido de humedad fue determinado mediante la norma NTP 339.127. Las muestras se secaron en horno a $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ y se calculó el porcentaje de humedad con base en la diferencia de masas entre la muestra húmeda y seca. Este análisis permitió ajustar la cantidad de agua en la mezcla para garantizar una adecuada Trabajabilidad y resistencia del concreto [18].

Ensayo de Peso Específico y Absorción

Se determinó el peso específico y la absorción de los agregados mediante la norma ASTM C127 para el agregado grueso y ASTM C128 para el agregado fino. Se emplearon muestras secadas previamente en horno y posteriormente se sometieron a un proceso de saturación con superficie seca, permitiendo determinar su capacidad de absorción y su densidad real [19]. En la cual se aplicó las siguientes formulas:

Ecuación 1: Peso específico Bulk (Gsb).

$$G_{SB} = \frac{\text{Suelo seco superficie seca saturada}}{\text{Peso volumen del agua igual a la muestra seca saturada}}$$

Ecuación 2: Peso específico superficial seca saturada (GsS.S.S).

$$G_{sS.S.S} = \frac{\text{Peso de la muestra S.S.S}}{\text{Peso volumetrico del agua igual a S.S.S}}$$

Ecuación 3: Peso específico aparente (Gsa).

$$G_{sa} = \frac{\text{Suelo seco S.S.S}}{\text{Peso volumen del agua igual mente seca}}$$

Ecuación 4: Porcentaje absorción (%).

$$\% = \frac{\text{Peso húmedo muestra S.S.S}}{\text{Suelo seco S.S.S}} \times 100$$

Ensayo de Peso Unitario

Se realizó el ensayo de peso unitario siguiendo la norma ASTM C29. Se emplearon recipientes de volumen conocido y se llenaron con el agregado en estado suelto y compactado, permitiendo determinar la densidad aparente del material, información relevante para el diseño de la mezcla [20]. En la cual se aplicó las siguientes formulas:

Ecuación 5: Densidad aparente.

$$M = \frac{(G - T)}{V} \quad \text{ó} \quad M = \frac{(G - T)}{F}$$

donde:

M = densidad aparente de los áridos, lb/ft³ [kg/ m³],

G = masa de los áridos más el recipiente, lb [kg],

T = masa del recipiente, lb [kg],

V = volumen del recipiente, ft³ [m³], y

F = factor para el recipiente, ft⁻³ [m⁻³].

Si se desea obtener la densidad aparente en condición saturada superficialmente seca (SSS), calcule la densidad utilizando la fórmula siguiente:

Ecuación 6: densidad aparente en condición saturada superficialmente seca (SSS).

$$M_{SSS} = M \times \left[1 + \left(\frac{A}{100} \right) \right]$$

Diseño de Mezclas de Concreto

Se utilizó el método ACI 211.1 para el diseño de mezcla, con una resistencia de diseño para 21 (MPa). El proceso incluyó la selección de materiales, la determinación de la relación agua/cemento y el ajuste de proporciones. Se realizaron pruebas previas de dosificación para determinar la mejor combinación

de materiales que garantizara la resistencia y durabilidad del concreto [21].

Resistencia a la Compresión

Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de concreto de 10 cm x 20 cm a edades de 3,5,7,9,11. Se utilizaron 15 probetas y teniendo 3 de reserva por cada tipo de cemento, aplicándoles carga axial hasta la rotura [11].

C. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Técnica de Recolección de Datos

Se empleó la observación como método principal de recolección de datos, registrando la resistencia de las probetas a compresión y las lecturas obtenidas mediante sensores para estimar la resistencia según el método de madurez. Se realizó un control riguroso de las mediciones para evitar errores sistemáticos y garantizar la confiabilidad de los resultados.

Instrumentos de Recolección de Datos

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos incluyeron:

- Fichas de recolección de datos para registrar las cargas máximas obtenidas en los ensayos de compresión.
- Sensores de temperatura instalados en dos probetas por tipo de cemento para calcular los índices de madurez y generar curvas de resistencia.
- Software de análisis de datos, como Microsoft Excel, para organizar y graficar los resultados obtenidos.

D. Procedimiento

Elaboración y Curado de Probetas

Las probetas se fabricaron en moldes cilíndricos, llenando en dos capas con compactación de 25 golpes por capa. Posteriormente, se almacenaron en condiciones controladas y se desmoldaron tras 24 horas, sumergiéndose en agua a 23°C hasta los ensayos de compresión en las edades establecidas. Se aseguraron condiciones homogéneas de curado para evitar variaciones en los resultados.

Ensayo de Resistencia a la Compresión

Las probetas se ensayaron en una máquina de compresión hidráulica, registrando la carga máxima soportada en las edades de 3,5,7,9,11. Estos valores se emplearon para evaluar la resistencia del concreto y compararla con las estimaciones del método de madurez. Se tomaron en cuenta factores como la velocidad de aplicación de carga y la temperatura ambiental durante la ejecución del ensayo [11].

Análisis de Datos

Los datos recolectados fueron procesados mediante estadística descriptiva y graficados para analizar la relación entre la resistencia a la compresión y los índices de madurez obtenidos con sensores. Se realizaron comparaciones entre los resultados experimentales y los valores teóricos obtenidos por el método de madurez, evaluando la confiabilidad del modelo aplicado.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS Y EL DISEÑO DE MEZCLA PARA CADA CEMENTO.

TABLA I
CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO FINO

Agregado fino		
Caracterización	unidad de medición	resultados
Humedad	%	0,8
Peso unitario suelto	kg/m3	1661
Peso unitario compactado	kg/m3	1727
Peso específico base seca	kg/m3	2,57
Absorción	%	1,1
Módulo de finura		2,5

La siguiente tabla representa los resultados de las caracterizaciones del agregado fino dando las características necesarias para desarrollas correctamente el diseño de mezcla. Siguiendo las siguientes normativas para cada ensayo contenido de humedad la norma de ensayo NTP 339.185, peso unitario suelto y compactado la norma de ensayo NTP 400.017, peso específico y absorción la norma de ensayo NTP 400.022 y para el contenido de humedad y módulo de finura la norma de ensayo NTP 400.012.

TABLA II
CARACTERIZACIÓN DE AGREGADO GRUESO

Agregado grueso		
Características	unidad de medición	resultados
Humedad	%	0,4
Peso unitario suelto	kg/m3	1469
Peso unitario compactado	kg/m3	1569
Peso específico base seca	kg/m3	2,46
Absorción	%	2,0
Módulo de finura		6,38

La siguiente tabla representa los resultados de las caracterizaciones del agregado grueso dando las características necesarias para desarrollas correctamente el diseño de mezcla. Siguiendo las siguientes normativas para cada ensayo contenido de humedad la norma de ensayo NTP 339.185, peso unitario suelto y compactado la norma de ensayo NTP 400.017, peso específico y absorción la norma de ensayo NTP 400.022 y para el contenido de humedad y módulo de finura la norma de ensayo NTP 400.012.

TABLA III
TANDAS DE LABORATORIO PARA EL CEMENTO TIPO I (PACASMAYO).

	Peso Stock (kg/m3)	Tanda (m3)
		0.048
Pacasmayo	387	18.57 kg
Agua	232	11.13 kg
Agregado fino	562	26.98 kg
Agregado grueso	1021	49.01 kg
Sin aditivo	0.00	0.000 kg
Sin aditivo	0.00	0.000 kg
Aire	-	-
Total	2202	105.69 kg

La siguiente tabla representa la tanda para hacer el concreto con el cemento Tipo I con todos los pesos en kilogramos.

TABLA IV
TANDAS DE LABORATORIO PARA EL CEMENTO SOL.

	Peso Stock (kg/m3)	Tanda (m3)
		0.048
Sol	387	18.57 kg
Agua	232	11.13 kg
Agregado fino	566	27.17 kg
Agregado grueso	1021	49.01 kg
Sin aditivo	0.00	0.000 kg
Sin aditivo	0.00	0.000 kg
Aire	-	-
Total	2206	105.88 kg

La siguiente tabla representa la tanda para hacer el concreto con el cemento Sol con todos los pesos en kilogramos.

TABLA V
TANDAS DE LABORATORIO PARA EL CEMENTO CEMEX.

	Peso Stock (kg/m3)	Tanda (m3)
		0.048
Cemex	387	18.57 kg
Agua	232	11.13 kg
Agregado fino	569	27.31 kg
Agregado grueso	1021	49.01 kg
Sin aditivo	0.00	0.000 kg
Sin aditivo	0.00	0.000 kg
Aire	-	-
Total	2209	106.02 kg

La siguiente tabla representa la tanda para hacer el concreto con el cemento Cemex con todos los pesos en kilogramos.

B. DETERMINAR LOS ÍNDICES DE MADUREZ CON SU RESPECTIVA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN LAS DISTINTAS TEMPRANAS EDADES DE 3,5,7,9 Y 11 DÍAS CON SU RESPECTIVA RESISTENCIA.

En la Fig.1 se presente grafico muestra la resistencia a la compresión en las edades de 3, 5, 7,9 y 11 días del cemento realizado con el cemento tipo I (Pacasmayo). El cual nos indica que para la ultimada edad de 11 días se obtuvo una madurez de 7 487.8 °C_xh con una resistencia a la compresión de 19.1 MPa. Superando en el día 7 del ensayo la mínima resistencia del concreto estructural la cual según norma E.060 de 17 MPa.

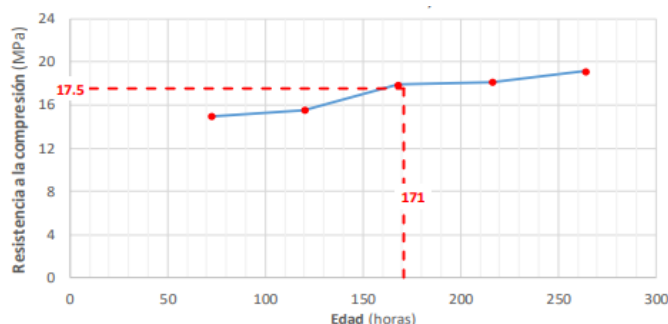


Fig. 1 Relación resistencia – tiempo del concreto realizado con el cemento tipo I (Pacasmayo).

TABLA VI
RELACIÓN RESISTENCIA – MADUREZ PARA EL CONCRETO REALIZADO CON CEMENTO TIPO I (PACASMAYO)

Horas (h)	Madurez (°C x h)	f'c prom (MPa)
72 (3 día)	2,094.4	14.9
120 (5 día)	3,434.6	15.5
168 (7 día)	4,775.8	17.9
216 (9 día)	6,131.8	18.1
264 (11 día)	7,487.8	19.1

La siguiente tabla representa los distintos puntos de madurez para las diferentes edades a tratar con su respectiva resistencia obtenida en MPa con el cemento tipo I (Pacasmayo) en la cual se utilizó la normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez ASTM C 1074 / NTP 339.217.

En la Fig. 2 se presente grafico muestra la resistencia a la compresión en las edades de 3, 5, 7,9 y 11 días del cemento realizado con el cemento Sol. El cual nos indica que para la ultimada edad de 11 días se obtuvo una madurez de 7,558.5°Cxh con una resistencia a la compresión de 20.8 MPa. Superando en el día 3 del ensayo la mínima resistencia del concreto estructural la cual según norma E.060 de 17 MPa.

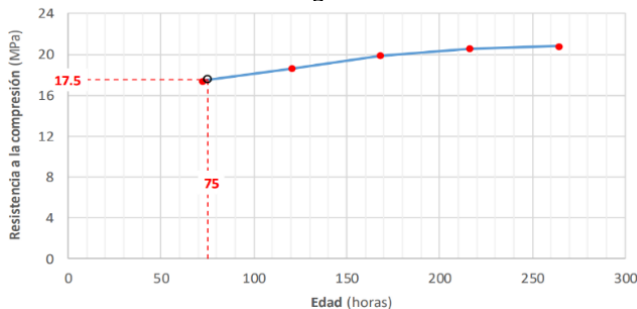


Fig.2 Relación resistencia – tiempo del concreto realizado con el cemento Sol.

TABLA VII
RELACIÓN RESISTENCIA – MADUREZ PARA EL CONCRETO REALIZADO CON CEMENTO SOL

Horas (h)	Madurez (°C x h)	F'c prom (MPa)
72 (3 día)	2,130.8	17.4
120 (5 día)	3,493.4	18.6
168 (7 día)	4,855.7	19.9
216 (9 día)	6,223.5	20.6
264 (11 día)	7,558.5	20.8

la siguiente tabla se muestras los índices de madurez para las edades de 3, 5, 7,9 y 11 días y la resistencia obtenida en MPa con el cemento Sol en la cual se utilizó la normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez ASTM C 1074 / NTP 339.217.

En la Fig.3 se presente grafico muestra la resistencia a la compresión en las edades de 3, 5, 7,9 y 11 días del cemento realizado con el cemento Cemex. El cual nos indica que para la ultimada edad de 11 días se obtuvo una madurez de 7,447.9 °C x h con una resistencia a la compresión de 26.3 MPa. Superando en el día 3 del ensayo la mínima resistencia del concreto estructural la cual según norma E.060 de 17 MPa.

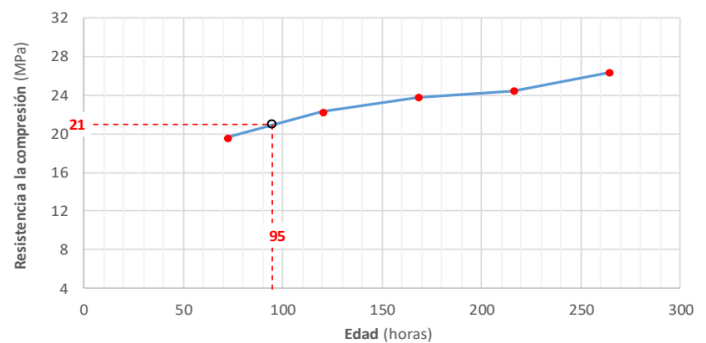


Fig.3 Relación resistencia - madurez del concreto realizado con el cemento Cemex.

TABLA VIII
RELACIÓN RESISTENCIA – MADUREZ PARA EL CONCRETO REALIZADO CON CEMENTO CEMEX

Horas (h)	Madurez (°C x h)	f'c prom (MPa)
72	2,103.6	19.6
120	3,444.8	22.3
168	4,771.2	23.8
216	6,107.3	24.5
264	7,447.9	26.3

la siguiente tabla se muestras los índices de madurez para las edades de 3, 5, 7,9 y 11 días y la resistencia obtenida en MPa con el cemento Sol en la cual se utilizó la normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez ASTM C 1074 / NTP 339.217.

C. OBTENER LA CURVA DE MADUREZ DE LOS CONCRETOS ELABORADOS CON LOS CEMENTOS TIPO I, SOL Y CEMEX CON SU FUNCIÓN DE ESTIMACIÓN DE RESISTENCIA Y SU RESPECTIVO COEFICIENTE DE CORRELACIÓN.

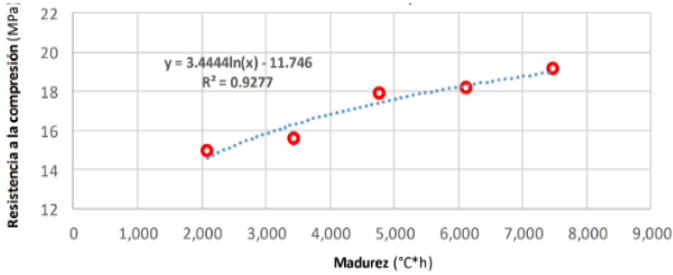
TABLA IX
REGISTRO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO REALIZADO CON EL CEMENTO TIPO I (PACASMAYO)

Edad de Referencia (días)	Edad (h)	Resistencia a la compresión		
		f'c Ind (MPa)*	Variación < 10%	f'c prom (MPa)
3.0	72	13.9		
		15.8		
		15.1	12.7%	14.9
5.0	120	15.2		
		16.3		
		15.1	7.7%	15.5
7.0	168	17.7		
		18.2		
		17.7	2.8%	17.9
9.0	216	18.8		
		17.6		
		18.0	6.6%	18.1
11.0	264	19.9		
		19.0		
		18.5	7.3%	19.1

En la presente tabla se presentan todos los datos de compresión obtenidos en las pruebas de compresión, con su respectiva edad de madurez para el concreto realizado con el cemento tipo I (Pacasmayo).

En la Fig.4 el grafico representa las distintas relaciones de los distintos puntos de madurez con su resistencia obtenida con ello mostrando la curva de madurez para el concreto realizado con

el cemento tipo I (Pacasmayo) en la cual se hizo uso de la normalizado ASTM C 1074 / NTP 339.217 para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez.



En la Fig.4 Relación resistencia - madurez del concreto realizado con el cemento tipo I (Pacasmayo).

Con los datos se obtuvo la función de estimación de resistencia a la compresión para cualquier punto de gráfica y su coeficiente de correlación los cuales:

Ecuación 7: Resistencia a la compresión del cemento tipo I (Pacasmayo).

$$Y = 3.4444 \ln(x) - 11.746$$
$$R^2 = 0.9277$$

Y= Resistencia a la compresión
X= Madurez

TABLA X REGISTRO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO REALIZADO CON EL CEMENTO SOL				
Edad de Referencia (días)	Edad (h)	Resistencia a la compresión		
		f'c Ind (MPa)*	Variación < 10%	f'c prom (MPa)
3.0	72	18.2	9.2%	17.4
		16.6		
		17.4		
5.0	120	18.9	8.6%	18.6
		19.3		
		17.7		
7.0	168	19.5	7.6%	19.9
		20.8		
		19.3		
9.0	216	21.8	3.4%	20.6
		21.8		
		20.1		
11.0	264	20.1	8.2%	20.8
		22.0		
		20.5		

En la presente tabla se presentan todos los datos de compresión obtenidos en las pruebas de compresión, con su respectiva edad de madurez para el concreto realizado con el cemento sol.

En la Fig.5 el grafico representa las distintas relaciones de los distintos puntos de madurez con su resistencia obtenida con ello mostrando la curva de madurez para el concreto realizado con el cemento tipo I (Pacasmayo) en la cual se hizo uso de la normalizado ASTM C 1074 / NTP 339.217 para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez.

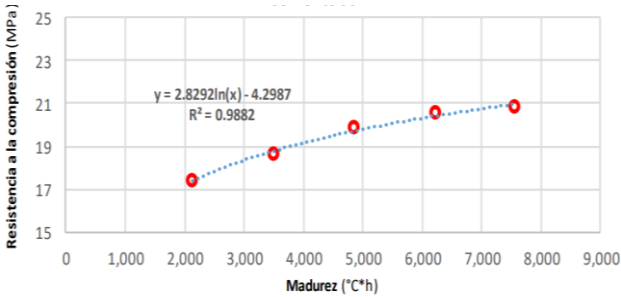


Fig.5 Relación resistencia - madurez del concreto realizado con el cemento Sol.

Con los datos se obtuvo la función de estimación de resistencia a la compresión para cualquier punto de gráfica y su coeficiente de correlación los cuales:

Ecuación 8: Resistencia a la compresión del cemento Sol.

$$Y = 2.8292 \ln(x) - 4.2987$$
$$R^2 = 0.9882$$

Y= Resistencia a la compresión
X= Madurez

TABLA XI REGISTRO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO REALIZADO CON EL CEMENTO CEMEX				
Edad de Referencia (días)	Edad (h)	Resistencia a la compresión		
		f'c Ind (MPa)*	Variación < 10%	f'c prom (MPa)
3.0	72	19.0	8.7%	19.6
		20.7		
		19.1		
5.0	120	22.8	4.0%	22.3
		21.9		
		22.2		
7.0	168	24.4	7.4%	23.8
		24.2		
		22.6		
9.0	216	24.9	4.9%	24.5
		23.7		
		24.8		
11.0	264	25.1	9.1%	26.3
		27.6		
		26.4		

En la presente tabla se presentan todos los datos de compresión obtenidos en las pruebas de compresión, con su respectiva edad de madurez para el concreto realizado con el cemento sol.

En la Fig.6 el grafico representa las distintas relaciones de los distintos puntos de madurez con su resistencia obtenida con ello mostrando la curva de madurez para el concreto realizado con el cemento tipo I (Pacasmayo) en la cual se hizo uso de la normalizado ASTM C 1074 / NTP 339.217 para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez.

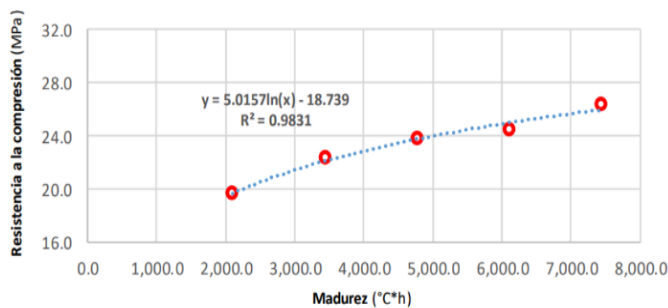


Fig.6 Relación resistencia - madurez del concreto realizado con el cemento Cemex.

Con los datos se obtuvo la función de estimación de resistencia a la compresión para cualquier punto de gráfica y su coeficiente de correlación los cuales:

Ecuación 9: Resistencia a la compresión del cemento Cemex.

$$Y = 5.0157 \ln(x) - 18.739$$

$$R^2 = 0.9831$$

Y= Resistencia a la compresión

X= Madurez

D. DETERMINAR LA MADUREZ NECESARIA PARA QUE EL CONCRETO ELABORADO CON CEMENTO TIPO I, SOL Y CEMEX ALCANCE UNA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE 21MPa

Utilizado la formula obtenida de la resistencia a la compresión de forma inversa podemos obtener la fórmula para la madurez, con ella estimamos que para que le concreto realizado con el cemento tipo I (Pacasmayo).

Ecuación 10: fórmula de la madurez para el cemento Tipo I (Pacasmayo).

$$X = e^{\frac{y+11.746}{3.4444}}$$

Remplazamos Y = 21 MPa en la fórmula:

$$X = e^{\frac{21+11.746}{3.4444}}$$

$$X = 13453.9 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$$

∴ para un Y = 21 MPa su índice de madurez es de 13453.9 °C·h

Utilizado la formula obtenida de la resistencia a la compresión de forma inversa podemos obtener la fórmula para la madurez, con ella estimamos que para que le concreto realizado con el cemento Sol.

Ecuación 11: fórmula de la madurez para el cemento Sol.

$$X = e^{\frac{y+4.2987}{2.8292}}$$

Remplazamos Y = 21 MPa en la fórmula:

$$X = e^{\frac{21+4.2987}{2.8292}}$$

$$X = 7646.5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$$

∴ para un Y = 21 MPa su índice de madurez es de 7646.5 °C·h

Utilizado la formula obtenida de la resistencia a la compresión de forma inversa podemos obtener la fórmula para la madurez, con ella estimamos que para que le concreto realizado con el cemento Cemex.

Inversión para obtenerte la fórmula de la madurez:

Ecuación 12: fórmula de la madurez para el cemento Cemex.

$$X = e^{\frac{y+18.739}{5.0157}}$$

Remplazamos Y = 21 MPa en la fórmula:

$$X = e^{\frac{21+18.739}{5.0157}}$$

$$X = 2759.8 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$$

∴ para un Y = 21 MPa su índice de madurez es de 2759.8 °C·h.

IV. CONCLUSIONES

El cemento Cemex demostró un mejor desempeño en el método de madurez para alcanzar una resistencia de 21 MPa en edades tempranas. Esto se atribuye a su menor índice de madurez en comparación con otros tipos de cemento, lo que lo convierte en una opción eficiente para proyectos donde la rapidez en la obtención de resistencia inicial es prioritaria. Este comportamiento optimiza los tiempos de obra y garantiza un control de calidad adecuado, validando la aplicabilidad del método de madurez en contextos reales de construcción.

Se demuestra que el método de madurez es una representa una opción validad y eficaz frente al método tradicional de evaluar la resistencia del concreto a los 28 días. Su capacidad para estimar la resistencia a edades tempranas permite optimizar la programación de obra, mejorar el control de calidad y tomar decisiones técnicas fundamentadas sin necesidad de esperar el curado completo. Esta característica se traduce en una notable reducción en los plazos de ejecución y una mayor eficiencia en la gestión de proyectos de construcción.

Se determinó la caracterización de los agregados finos y gruesos, donde el agregado fino presentó un módulo de finura de 2.5, lo cual indica una granulometría media favorable para la Trabajabilidad del concreto. Su absorción del 1.1% nos brida el ajuste en el contenido de agua para evitar mezclas secas. En cuanto al agregado grueso, con un módulo de finura de 6.38 y una absorción del 2.0%, se espera que contribuya adecuadamente a la resistencia y estabilidad de la mezcla, asegurando un buen desempeño mecánico del concreto resultante siguiendo las normativas peruanas pertinentes. Todo ello para realizar un diseño de mezcla para los cementos Tipo I (Pacasmayo), Sol y Cemex por el método ACI 211.1 para que lleguen a un $f'c=21\text{MPa}$.

Se determinaron los diferentes índices de madurez y sus respectivas resistencias a la compresión en distintas edades tempranas de 3, 5, 7, 9 y 11 días. En el último día de las pruebas, se obtuvieron los siguientes resultados: el cemento Cemex, con un índice de 7,447.9 °C·h y una resistencia de 26.3 MPa; para el cemento Sol, un índice de 7,558.5 °C·h y una resistencia de 20.8 MPa; y para el concreto elaborado con cemento tipo I (Pacasmayo), un índice de madurez de 7,487.8 °C·h y una resistencia de 19.1 MPa. Todos los valores superaron la resistencia mínima del concreto estructural de 17 MPa según la norma E.060, confirmando la viabilidad del método de madurez para evaluar el desempeño del concreto en edades tempranas.

Se obtuvieron las curvas de madurez de los concretos elaborados con los cementos tipo I, Sol y Cemex, junto con sus respectivas funciones de estimación de resistencia y los coeficientes de correlación. Los resultados fueron los

siguientes: Para el concreto realizado con cemento Cemex, la función fue $Y=5.0157\ln(x)-18.739$ con un coeficiente de correlación $R^2=0.9831$, para el concreto realizado con cemento Sol, la función fue $Y=2.8292\ln(x)-4.2987$ con un coeficiente de correlación $R^2=0.9882$, para el concreto realizado con cemento tipo I (Pacasmayo), la función de estimación fue $Y=3.4444\ln(x)-11.746$ con un coeficiente de correlación $R^2=0.9277$. Estas funciones permiten estimar la resistencia a la compresión de los concretos utilizando únicamente los índices de madurez, lo que facilita el monitoreo del proceso y permite alcanzar la resistencia solicitada sin necesidad de realizar pruebas adicionales, optimizando así los tiempos de ejecución y control de calidad.

Se determinó la madurez necesaria para que los concretos elaborados con los cementos tipo I, Sol y Cemex alcancen una resistencia a la compresión estimada de 21 MPa. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: Para el concreto con cemento tipo I (Pacasmayo), se obtuvo un índice de madurez de 13,453.9 °C·h, para el concreto con cemento Sol, el índice de madurez fue de 7,646.5 °C·h, para el concreto con cemento Cemex, el índice de madurez fue de 2,759.8 °C·h. Estos resultados indican que el concreto elaborado con cemento Cemex alcanza la resistencia a la compresión de 21 MPa con un índice de madurez relativamente bajo, lo que sugiere un mejor comportamiento. El concreto con cemento Sol se encuentra en un punto intermedio, mientras que el concreto con cemento tipo I (Pacasmayo) requiere un índice de madurez más alto para alcanzar la misma resistencia.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro profundo agradecimiento al Mg. Sagastegui Vásquez, Germán, por compartir sus conocimientos con nosotros y por inspirarnos a seguir creciendo en este apasionante ámbito de la Ingeniería Civil. De igual manera, extendemos nuestra gratitud a la Universidad Privada del Norte, nuestra alma mater, por brindarnos una formación integral y proporcionarnos las herramientas necesarias para hacer posible la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Carranza, A. (2018). Calibración y estudio del método de madurez para la obtención de la resistencia de dos tipos de concreto de alto desempeño, mediante el uso de dispositivos inalámbricos. Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- [2] Carufel, S., Fahim, A., Ghods, P., & Alizadeh, A. (2018). Madurez del concreto - De la Teoría a la Aplicación (Vol. 1° edición). Ontario, Canadá: Copyright.
- [3] Celis, G. G. (03 de 2014). univercidad de los andes . Obtenido de <https://pavimentosulacivil.files.wordpress.com/2018/01/prc3a1ctica-nc2b0-31-1-peso-especifico-y-absorcion-de-agregados-fino.pdf>
- [4] COMMAND CENTER. (s.f.). Historia de la madurez del concreto. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de Conceptos sobre la madurez han existido por más de 50 años.: <https://www.commandcenterconcrete.com/es/educacion/historia-de-la-madurez-del-concreto/>
- [5] Corro, H. L., & Ramos, A. L. (2015). Correlación entre el índice de madurez de una mezcla de concreto y su resistencia a la compresión. Obtenido de repositorio upao: <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/1143>

- [6] Ebensperger, L., Oyarzún, J., & Torres, R. (2020). Determinación de la temperatura datum para la aplicación de la madurez en climas fríos. Revista ingeniería de construcción., 35(1).
- [7] Gamba, O., Peña, G., & Pineda, Y. (2019). Application of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. Journal of Physics: Conference Series, 1386(1), 1-5.
- [8] Hocaoglu, I., & Uygunoglu, T. (2019). Effect of electrical cure of concrete on maturity and compressive strength. Revista de la construcción, 18(2), 214-225.
- [9] NRMCA. (s.f.). El concreto en la práctica. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de CIP 39 - Madurez del concreto: <https://www.nrmca.org/association-resources/research-and-engineering/cip/>
- [10] NTP 339.217. (2016). Norma Técnica Peruana (Vol. 2° Edición). Lima, Perú.
- [11] Peruana, N. t. (1998). comision de reglamentos tecnicos y copmrciales . Obtenido de NTP-339.127: https://kupdf.net/download/ntp-339127-suelos-metodo-de-ensayo-para-determinar-el-contenido-de-humedad-de-un-suelo-ntppdf_59741f4ddc0d60b051727654_pdf
- [12] Recabarren, D., & Tafur, J. (2019). Optimización del uso de encofrado para losas y columnas f'c 210 kg/cm2 con aditivo retardante de fragua utilizando el método de madurez del concreto. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- [13] Rudeli, N., & Santilli, A. (2017). Medición de resistencia a tempranas edades del hormigón: método que mejor se ajusta para la determinación de tiempos mínimos de desencofrado de elementos verticales de hormigón. Obras y proyectos, 22, 6-16.
- [14] Rumiche, E. (2018). Implementación del procedimiento del método de madurez del concreto (norma ASTM C 1074) para calcular la resistencia a la compresión con apoyo de equipos electrónicos. Universidad Nacional Federico Villareal, Lima, Perú.
- [15] Vargas, J., & Aguire, F. (2018). Estimando la resistencia del hormigón usando la correlación con el método de la madurez del hormigón aplicado a los materiales de Cochabamba-Bolivia. Investigación & Desarrollo, 18(1), 117-127.
- [16] Veléz, S. (22 de Agosto de 2009). Boletín técnico de INDASA S.A. Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de Madurez del Concreto: <http://www.indisa.com/indisaonline/antiores/Indisa%20On%20line%2074.pdf>
- [17] Vilar, J., Vásquez, C., Mendoza, C., Meli, R., & Aire, C. (2018). Statistical validation of new maturity functions for high-strength self-consolidating concrete mixes. Construction and Building Materials, 168, 931-945.