

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA DE POSGRADO



UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

TESIS:

**RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN FUNCIÓN DE
SU MADUREZ, BASADO EN LA NORMA ASTM C 1074.**

Para optar el Grado Académico de
MAESTRO EN CIENCIAS
MENCIÓN: INGENIERIA CIVIL

Presentada por:
ALEXANDER HUAMÁN QUISPE

Asesor:
Dr. HERMES ROBERTO MOSQUEIRA RAMÍREZ

Cajamarca, Perú

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
Alexander Huamán Quispe
DNI: 46572847
Escuela Profesional/Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Programa de Maestría en Ciencias, Mención: Ingeniería Civil.
2. Asesora: Dr. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez.
3. Grado académico o título profesional
☐ Bachiller ☐ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☒ Maestro ☐ Doctor
4. Tipo de Investigación:
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN FUNCIÓN DE SU MADUREZ, BASADO EN LA NORMA ASTM C 1074.
6. Fecha de evaluación: **17/10/2025**
7. Software antiplagio: ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **16%**
9. Código Documento: **3117:514037826**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
☒ **APROBADO** ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: **18/10/2025**

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 Dr. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez DNI: 26673916

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

COPYRIGHT © 2025 by
ALEXANDER HUAMÁN QUISPE
Todos los derechos reservados



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDUC/D
ESCUELA DE POSGRADO
CAJAMARCA – PERÚ
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

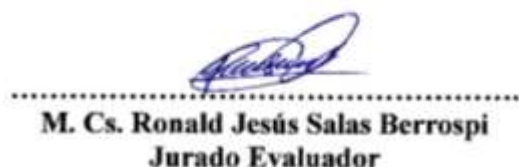
Siendo las 17:00 horas, del día 14 de Agosto de dos mil veinticinco, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **DR. MAURO AUGUSTO CENTURIÓN VARGAS, M. CS. RONALD JESÚS SALAS BERROSPI, M. CS. DORIS YVETH ORTIZ ZAMORA** y en calidad de Asesor el **DR. HERMES ROBERTO MOSQUEIRA RAMÍREZ**. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestrías y Doctorados de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se inició la Sustentación de la TESIS titulada: **“RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN FUNCIÓN DE SU MADUREZ, BASADO EN LA NORMA ASTM C1074”**, presentada por el bachiller en Ingeniería Civil **ALEXANDER HUAMAN QUISPE**.

Realizada la exposición de la TESIS y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó APROBADO con la calificación de 17 (DIECISIETE) – EXCELENTE la mencionada TESIS; en tal virtud, el bachiller en Ingeniería Civil, **ALEXANDER HUAMAN QUISPE**, se encuentra apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de **INGENIERÍA**, con mención en **INGENIERÍA CIVIL**.

Siendo las 18:00 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.


.....
Dr. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Asesor


.....
Dr. Mauro Augusto Centurión Vargas
Jurado Evaluador


.....
M. Cs. Ronald Jesús Salas Berrospi
Jurado Evaluador


.....
M. Cs. Doris Yveth Ortiz Zamora
Jurado Evaluador

DEDICATORIA

Le doy gracias a Dios Todopoderoso, por darme sabiduría y entendimiento a lo largo de toda mi carrera profesional, así mismo dedico este trabajo a:

A mi esposa e hija; Deisy Ruiz y Camila Huamán, por ser el motor y motivo de todo mi esfuerzo y dedicación tanto en el ámbito personal, laboral y académico. Brindándome siempre su amor incondicional y demostrándome que juntos somos imparables. Este y todos mis logros son para ustedes mis amores.

A mis padres; Eloy Huamán y María Quispe, por estar siempre a mi lado apoyándome en todos y cada uno de los momentos dándome todo su amor, comprensión y cariño incondicional; siendo mi ejemplo a seguir de perseverancia y esfuerzo, brindándome siempre una sonrisa a pesar de las dificultades, un millón de gracias Papas, los quiero.

A mis hermanos; Luis, Luz y Eloy quienes siempre están a mi lado acompañándome en cada paso, logros, triunfos, alegrías y tristezas, demostrándome que unidos somos uno.

A mis sobrinos; Mathias, Mariel y Eloy quienes son una extensión y reflejo del gran cariño que tengo a mis hermanos y que siempre están en mis pensamientos, los quiero hijos.

AGRADECIMIENTOS

En ningún momento de la vida estamos solos y entre las personas que nos rodean siempre habrá quien nos brinde apoyo y fuerzas para lograr nuestros objetivos. Este es el momento de agradecer a todas aquellas personas que con sus palabras, apoyo moral y académico o con el simple hecho de estar a nuestro lado nos hace la tarea más fácil.

En primera quiero agradecer a Dios Todopoderoso por guiarme todos estos años de mi vida laboral que me han servido para fortalecer mis virtudes y mejorar en mis debilidades, parte de esa enseñanza es la que me motivo a realizar la presente investigación.

En segundo lugar me gustaría agradecer, de una manera especial a mi asesor de tesis y catedrático Dr. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez, por su aliento, sus inestimables aportaciones, por su calidad humana, trabajo y humildad.

A esposa, hija, padres y hermanos que en el transcurso de mi carrera profesional y académica siempre estuvieron a mi lado para darme el soporte necesario ante las dificultades, celebrando mis aciertos y levantándome en mis tropiezos.

Un agradecimiento especial a la empresa Distribuidora Norte Pacasmayo donde trabajo actualmente y que me brindaron las facilidades para desarrollar la presente investigación en sus instalaciones.

A todos y cada uno de los que por falta de memoria he olvidado mencionar, muchas gracias, por las palabras o gestos de apoyo, que sin necesidad de hacerlo, me brindaron.

¡Gracias a Todos!

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1.1.1 CONTEXTUALIZACIÓN.....	1
1.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	3
1.1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	4
1.1.3.1 PROBLEMA GENERAL	4
1.1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS	4
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.2.1 JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA.	4
1.2.2 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA – PRÁCTICA.....	5
1.2.3 JUSTIFICACIÓN INSTITUCIONAL Y PERSONAL.....	6
1.3 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.	7
1.3.1 ESPACIAL.....	7
1.3.2 TEMPORAL.....	7
1.3.3 CIENTÍFICA.....	7
1.4 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.	10
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	10
CAPÍTULO II.....	11
MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.	11
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	11
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES.....	14
2.2 MARCO CONCEPTUAL.....	17
2.2.1 MARCO LEGAL.....	17
2.2.2 MARCO TEÓRICO.....	19
2.2.2.1 CONCRETO.	19
2.2.2.2 COMPONENTES DEL CONCRETO.....	20
2.2.2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO	25
2.2.2.4 METODO DE MADUREZ DEL CONCRETO.....	28
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.	39

CAPÍTULO III	43
PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS Y VARIABLE	43
3.1 HIPÓTESIS.....	43
3.1.1 HIPÓTESIS GENERAL.....	43
3.1.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.....	43
3.2 VARIABLES / CATEGORÍAS.....	43
3.2.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.....	43
3.2.2 VARIABLE DEPENDIENTE.....	43
3.2.3 OPERACIONALIZACIÓN / CATEGORIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA HIPÓTESIS.....	44
CAPÍTULO IV	45
MARCO METODOLÓGICO	45
4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	45
4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	46
4.3 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	49
4.4 POBLACIÓN, MUESTRA, UNIDAD DE ANÁLISIS Y UNIDAD DE OBSERVACIÓN.....	49
4.4.1 POBLACIÓN.....	49
4.4.2 MUESTRA.....	49
4.4.3 UNIDAD DE ANÁLISIS.....	51
4.4.4 UNIDAD DE OBSERVACIÓN.....	52
4.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	52
4.6 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	53
4.7 EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS:.....	54
4.7.1 EQUIPOS:.....	54
4.7.2 MATERIALES E INSUMOS:	56
4.7.2.1 CANTERA DE ESTUDIO.....	56
4.7.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS.....	58
4.7.2.3 CARACTERÍSTICA DEL CEMENTO.....	60
4.7.2.4 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA.....	60
4.8 MATRIZ DE CONSISTENCIA METODOLOGÍA.....	62

CAPÍTULO V.....	63
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
5.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	63
5.1.1 CARACTERÍSTICAS DE MATERIAS PRIMAS.....	63
5.1.1.1 Cemento.....	63
5.1.1.2 Agregados.	63
5.1.1.3 Aditivo.	64
5.1.1.4 Agua.....	64
5.1.2 ELABORACIÓN DEL CONCRETO.....	64
5.1.2.1 Diseño de mezcla.....	64
5.2 ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	84
5.3 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	88
CONCLUSIONES VI.....	91
6.1 CONCLUSIÓN GENERAL.....	91
6.2 CONCLUSIÓN ESPECIFICAS.....	91
RECOMENDACIONES Y/O SUGERENCIAS VII.....	93
7.1 RECOMENDACIONES	93
7.2 SUGERENCIAS.....	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01: Numero de probetas a ensayar para el desarrollo de la investigación.....	50
Tabla 02. Equipos para el método de madurez.....	55
Tabla 03. Tabla resumen de ensayos.	65
Tabla 04. Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm ²	66
Tabla 05: Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm ² - Shapiro Will	67
Tabla 06. Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm ² - Anova.....	67
Tabla 07. Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm ² - Tukey	68
Tabla 08. Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm ²	68
Tabla 09. Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm ² - Shapiro Will	69
Tabla 10. Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm ² - Anova.....	70
Tabla 11. Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm ² - Tukey	70
Tabla 12. Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm ²	71
Tabla 13. Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm ² - Shapiro Will.....	74
Tabla 14. Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm ² - Anova	74
Tabla 15. Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm ² - Tukey.....	74
Tabla 16. Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm ²	75
Tabla 17. Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm ² - Shapiro Will.....	78
Tabla 18. Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm ² - Anova	79
Tabla 19. Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm ² - Tukey.....	79
Tabla 20. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm ²	80
Tabla 21. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm ² – Shapiro Will	81
Tabla 22. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm ² – Anova.....	81
Tabla 23. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm ² – Tukey	82
Tabla 24. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm ²	82
Tabla 25. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm ² – Shapiro Will	83
Tabla 26. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm ² – Anova.....	83
Tabla 27. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm ² – Tukey	84
Tabla 28. Principales componentes del cemento Portland.....	98
Tabla 29. Fuentes de materias primas usadas en la fabricación de cemento Pórtland....	98
Tabla 30. Componentes químicos del cemento Portland.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Incrementos de resistencia en el concreto con la edad mientras se cuente con humedad y temperatura favorables para la hidratación del cemento.....	26
Figura 02. Metodología para la aplicación del método de madurez.....	29
Figura 03. Relación Resistencia vs Madurez.	31
Figura 04. Área bajo la curva, equivale a la madurez del concreto en un tiempo t, limitada por la temperatura del concreto y el datúm de temperatura.....	32
Figura 05. Variación aceptable del $\pm 10\%$ de la resistencia compresión obtenida por el método de madurez.	37
Figura 06. Mapa de ubicación donde se realizó la investigación “DINO”.	46
Figura 07. Fotografía satelital de la ubicación de la cantera - Crisnejas.	57
Figura 08. Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm ²	72
Figura 09. Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm ²	77

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue determinar la relación entre la resistencia a compresión del concreto y su índice de madurez, utilizando el método propuesto en la norma ASTM C1074. La metodología fue de tipo experimental y se desarrolló en el laboratorio de la empresa DINO S.R.L., en Cajamarca. Se diseñaron mezclas de concreto de 210 kg/cm² y 280 kg/cm², utilizando agregados y cementos locales. Se instalaron sensores de temperatura para registrar el historial térmico del concreto, y se calculó el índice de madurez mediante el modelo de Nurse-Saul. La resistencia a compresión se evaluó en probetas a los 1, 3, 7, 14 y 28 días. Los resultados mostraron una correlación logarítmica alta ($R^2 > 0.95$) entre madurez y resistencia a compresión. A los 7 días, el concreto alcanzó entre el 70% y 80% de su resistencia de diseño, y al día 28, superó el 100%, validando la fiabilidad del método. Se observó que temperaturas constantes y un adecuado curado aceleran significativamente el desarrollo de resistencia. Se concluye que el método de madurez permite estimar con precisión la resistencia en obra, optimizando el control de calidad. Se recomienda su implementación en obras locales, previa calibración específica, para reducir costos, tiempos de espera y riesgos estructurales.

Palabras clave: Resistencia a compresión, método de Nurse-Saul, ASTM C1074, curado y temperatura.

ABSTRACT

The objective of this investigation was to determine the relationship between concrete compressive strength and its maturity index, using the method proposed in ASTM C1074. The methodology was experimental and developed in the laboratory of DINO S.R.L., in Cajamarca. Concrete mixtures of 210 kg/cm² and 280 kg/cm² were designed using local aggregates and cements. Temperature sensors were installed to record the thermal history of the concrete, and the maturity index was calculated using the Nurse-Saul model. Compressive strength was evaluated in test specimens at 1, 3, 7, 14, and 28 days. The results showed a high logarithmic correlation ($R^2 > 0.95$) between maturity and compressive strength. At 7 days, the concrete reached between 70% and 80% of its design strength, and at day 28, it exceeded 100%, validating the reliability of the method. It was observed that constant temperatures and proper curing significantly accelerate strength development. It is concluded that the maturity method allows for accurate on-site strength estimation, optimizing quality control. Its implementation is recommended for local projects, subject to specific calibration, to reduce costs, lead times, and structural risks.

Keywords: Compressive strength, Nurse-Saul method, ASTM C1074, curing, and temperature.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1.1 CONTEXTUALIZACIÓN.

La resistencia a compresión del concreto es un factor con un alto grado de importancia en la construcción como en la ingeniería civil a nivel global, ya que constituye el principal parámetro para garantizar la estabilidad y seguridad de las infraestructuras. A lo largo de las últimas décadas, el método de madurez, regulado por la norma ASTM C1074, ha ganado popularidad en mercados internacionales debido a su capacidad para predecir la resistencia del concreto de manera no destructiva y en tiempo real, reduciendo así los costos y tiempos de construcción (ASTM, 2020).

En países como Estados Unidos, Canadá y Japón, el uso de sensores de madurez en proyectos de infraestructura ha demostrado ser altamente eficiente, especialmente en climas extremos donde las variaciones de temperatura afectan significativamente el desarrollo de resistencia del concreto (Kim et al., 2021). Por ejemplo, en Europa, estudios recientes han incorporado tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT) para monitorear y registrar la temperatura y la madurez del concreto en tiempo real, mejorando la precisión del método en proyectos de gran escala (Xu et al., 2021).

No obstante, a nivel internacional, persisten desafíos relacionados con la aplicabilidad del método de madurez en diferentes contextos. Las variaciones en las propiedades de los materiales locales y los métodos de fabricación del concreto limitan la universalidad de las curvas de calibración, obligando a cada región a ajustar el modelo según sus condiciones particulares (Mehta & Monteiro, 2021).

En Latinoamérica, la construcción es un sector clave para el desarrollo económico, representando una parte significativa del Producto Interno Bruto (PIB) en muchos países. Sin embargo, las limitaciones técnicas y económicas de la región dificultan la implementación de tecnologías avanzadas para la predicción de la resistencia del concreto (López et al., 2021). A pesar de que el método de madurez ofrece grandes oportunidades para optimizar los procesos constructivos, su adopción en la región ha sido limitada debido a la falta de estándares locales claros y a la carencia de infraestructura tecnológica.

En países como México, Brasil y Colombia, los estudios recientes han comenzado a explorar la adaptación del método de madurez para condiciones locales. Por ejemplo, en México, se ha reportado que las condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas y humedad, requieren ajustes específicos en las curvas resistencia-madurez para reflejar el comportamiento real del concreto (Gutiérrez et al., 2020). En Brasil, la alta variabilidad en las características de los cementos y agregados locales representa un desafío adicional para la calibración del método, mientras que, en Argentina y Chile, las condiciones sísmicas han impulsado la necesidad de contar con predicciones más precisas del desarrollo de resistencia en etapas tempranas (Santiago et al., 2021).

Adicionalmente, los costos iniciales asociados con el monitoreo de madurez y la capacitación técnica limitan su uso en pequeñas y medianas empresas de construcción, que constituyen la mayoría en la región. Sin embargo, los esfuerzos para integrar estas técnicas están creciendo gracias a colaboraciones con instituciones académicas y organismos internacionales que buscan fomentar la innovación y la sostenibilidad en la construcción.

1.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

El concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial debido a su versatilidad, resistencia mecánica y bajo costo relativo. Su comportamiento estructural, sin embargo, depende de que alcance la resistencia a compresión prevista dentro del tiempo estipulado en el diseño. Esta propiedad es crítica para garantizar la seguridad y funcionalidad de las estructuras, y está influenciada por múltiples factores como la proporción de la mezcla, las condiciones de curado y las variables ambientales (Mindess, 2021).

Tradicionalmente, la evaluación de esta resistencia se realiza mediante ensayos destructivos en especímenes cilíndricos, a edades estándar de 7 o 28 días. Aunque efectivos, estos métodos presentan limitaciones importantes: requieren tiempo, recursos y no reflejan necesariamente el comportamiento del concreto en condiciones reales de obra. Ante esta problemática, el método de madurez, regulado por la norma ASTM C1074, ha surgido como una alternativa innovadora. Este procedimiento permite estimar la resistencia del concreto en función del tiempo y la temperatura acumulados, brindando resultados en tiempo real y sin afectar la integridad estructural del elemento evaluado (Suárez & Gómez, 2020).

En países como Estados Unidos, Canadá y Japón, el método de madurez ha sido ampliamente adoptado e integrado con tecnologías emergentes como sensores IoT y sistemas de monitoreo digital. Estas herramientas han permitido optimizar los procesos constructivos, reducir costos y mejorar la precisión en la toma de decisiones (Xu et al., 2021). No obstante, su implementación a nivel global enfrenta desafíos, como la necesidad de generar curvas de calibración específicas para cada mezcla de concreto, así como la influencia de condiciones climáticas extremas sobre los resultados. Esto

evidencia la necesidad de validar el método en distintos contextos técnicos y geográficos (Kim et al., 2021).

En zonas como Cajamarca, donde las condiciones térmicas pueden ser variables y los recursos técnicos limitados, resulta especialmente relevante contar con métodos que permitan estimar la resistencia a compresión del concreto en sus primeras edades. En este contexto, la aplicación del método de madurez ofrece una solución técnica viable y eficiente, que justifica su investigación y adaptación en entornos locales de construcción.

1.1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

1.1.3.1 PROBLEMA GENERAL

¿De qué manera se relacionan la resistencia a compresión del concreto y su índice de madurez, utilizando el método definido en la norma ASTM C1074?

1.1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿La temperatura influye en la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez?
- ¿El tiempo de curado afecta a la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez?
- ¿Se puede determinar con un grado alto de confiabilidad en tiempo real la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez?

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.

1.2.1 JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA.

La resistencia a compresión del concreto es una de las propiedades mecánicas más relevantes para garantizar la seguridad, estabilidad y durabilidad de las estructuras. Tradicionalmente, esta propiedad se determina mediante ensayos destructivos

normalizados; sin embargo, estos procedimientos presentan limitaciones técnicas y logísticas en obra, como el tiempo requerido para obtener resultados, la necesidad de equipos adicionales y la imposibilidad de evaluar componentes estructurales sin comprometer su integridad.

En este contexto, el método de madurez, descrito en la norma ASTM C1074, constituye una alternativa científica confiable y no destructiva, que permite estimar la resistencia a compresión del concreto a partir del registro continuo de temperatura y tiempo, parámetros que afectan directamente la hidratación del cemento. Este método se fundamenta en modelos como el de Nurse-Saul, ampliamente validados en la literatura técnica. Diversos estudios han demostrado que el uso del método de madurez mejora el control de calidad, reduce costos operativos y permite tomar decisiones técnicas oportunas en campo (Suárez & Gómez, 2020). Por tanto, su aplicación representa un aporte significativo a la innovación y eficiencia de los procesos constructivos.

1.2.2 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA – PRÁCTICA.

El método de madurez, descrito en la norma ASTM C1074, ofrece una solución práctica para correlacionar datos de tiempo y temperatura con el desarrollo de la resistencia a compresión del concreto. En la práctica, esta correlación permite prever con precisión la resistencia del concreto en distintas edades sin la necesidad de realizar múltiples ensayos destructivos, lo que representa una ventaja significativa en términos de eficiencia y optimización de recursos en la construcción, la correlación entre la resistencia y la madurez del concreto es una técnica eficaz que en otros países se está utilizando como herramienta adicional a otros métodos de control de calidad. La correlación de los datos obtenidos (temperatura y tiempo) con la resistencia a compresión transforma la manera en que se gestionan los tiempos y la calidad en obra. Este enfoque no solo facilita una construcción más ágil y eficiente, sino que también fortalece la seguridad al garantizar

que el concreto cumple con los requisitos de resistencia antes de ser sometido a esfuerzos. De esta manera, el método de madurez se posiciona como una herramienta indispensable para la modernización de los procesos constructivos. Por la importancia de estos parámetros y lo sensible que puede llegar a ser, es pertinente un estudio para determinar con mayor certeza el grado de correlación entre la madurez y resistencia del concreto realizadas para Cajamarca, de esta forma se dará un enfoque que englobe la realidad de las mezclas de concretos fabricadas en nuestra localidad que difiere grandemente de otras realidades.

1.2.3 JUSTIFICACIÓN INSTITUCIONAL Y PERSONAL.

La Escuela de Posgrado como centros de generación y difusión de conocimientos, se interesan en investigaciones innovadoras y que propongan alternativas de solución ante problemas ingenieriles. El método de Madurez, basado en la norma ASTM C 1074 es un ensayo no destructivo que permite conocer la resistencia a compresión del concreto a edades tempranas, para tomar decisiones oportunas en diferentes situaciones, contribuyendo así con la seguridad estructural y la reducción de tiempos en el calendario de obra.

La motivación personal que conlleva a desarrollar la presente investigación radica en aplicar los conocimientos adquiridos dando un enfoque local a los métodos estudiados en otras realidades, ya que el simple hecho de contar con diferentes agregados, cementos y formas de fabricar el concreto, hace que varíe los resultados obtenidos en otras investigaciones.

1.3 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.3.1 ESPACIAL.

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Control de Calidad de la empresa Distribuidora Norte Pacasmayo S.R.L. (DINO S.R.L.), ubicado en la ciudad de Cajamarca, Perú. Asimismo, se realizaron mediciones complementarias en diversas obras de construcción donde la mencionada empresa suministró concreto premezclado, permitiendo replicar condiciones reales de producción, transporte y colocación del material.

1.3.2 TEMPORAL.

El desarrollo experimental de la investigación se efectuó durante el período comprendido entre los meses de setiembre y noviembre del año 2024, etapa en la cual se recolectaron datos, se realizaron los ensayos de laboratorio y se procesaron los resultados correspondientes al análisis de madurez y resistencia a compresión del concreto.

1.3.3 CIENTÍFICA.

La presente investigación se inscribe en el ámbito de la Tecnología del Concreto, una especialidad fundamental dentro del campo de la Ingeniería Civil. Su base teórica y metodológica se sustenta en la aplicación rigurosa de la norma ASTM C1074, la cual establece los procedimientos para estimar la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez térmica. En este estudio, se optó por emplear el modelo de Nurse–Saul para el cálculo del índice, dada su aplicabilidad práctica y validación en estudios similares. Además, la investigación se apoya en un marco normativo consolidado, compuesto por estándares tanto nacionales como internacionales, entre ellos las Normas Técnicas Peruanas (NTP), la American Society for Testing and Materials (ASTM) y el American Concrete Institute (ACI).

El alcance del estudio se circunscribe exclusivamente al análisis físico-mecánico del concreto, en particular a la estimación de su resistencia a edades tempranas mediante el método de madurez. No se consideran, por tanto, aspectos relacionados con evaluaciones económicas, análisis de costos, rendimientos operativos ni implicancias logísticas de la aplicación del método.

Para la ejecución experimental, se utilizaron materiales e insumos representativos del entorno constructivo local. Los agregados empleados provienen de fuentes regionales: arena de río lavada extraída de la Cantera Crisnejas, ubicada en el Valle de Condebamba, y piedra caliza tipo H67 y H57 procedentes de la Cantera Cochambul, en el distrito de Llacanora. El cemento utilizado fue de la marca Pacasmayo, en sus variedades Tipo I y MS (MH), cumpliendo con las especificaciones técnicas correspondientes. El agua de mezclado y curado se obtuvo de la poza subterránea de la planta DINO S.R.L., garantizando su calidad conforme a la normativa vigente. Finalmente, se incorporaron aditivos plastificantes de la marca Sika, específicamente los productos Sikament RB 2025 P (Tipo G) y Sikament RB 1201 P (Tipo F), con el propósito de mejorar la trabajabilidad y el desempeño del concreto fresco.

1.4 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.

Se pretenden alcanzar cada uno de los objetivos teniendo presente que existen limitantes propias del método y también limitantes propias del tipo de investigación.

- La determinación de la madurez del concreto se realizará con base en la teoría de Nurse–Saul, la cual constituye un modelo ampliamente aceptado por la norma ASTM C1074. Si bien existen otros enfoques teóricos para estimar la madurez, el uso exclusivo de este método no representa una limitante significativa, sino una

elección metodológica orientada a mantener la comparabilidad de resultados con investigaciones previas.

- En el desarrollo experimental no se incluirán ensayos de análisis térmico diferencial (DTA) ni termogravimétrico (TGA). Aunque dichas técnicas permiten un estudio más profundo de los procesos físico-químicos de hidratación, la investigación se centra en la aplicación práctica del método de madurez para estimar la resistencia a la compresión, siendo suficiente la instrumentación utilizada para este propósito.
- El valor del Datum de temperatura será estimado conforme a los lineamientos establecidos en la norma ASTM C1074, en lugar de determinarse experimentalmente. Esta decisión metodológica responde a la disponibilidad de equipos, sin afectar la confiabilidad del cálculo de madurez, dado que la norma permite el uso de valores estimados dentro de rangos técnicamente aceptables.
- La investigación se circunscribe al análisis técnico de la resistencia del concreto y la confiabilidad del método de madurez, por lo que no contempla evaluaciones económicas, de productividad o de gestión operativa. Dichos aspectos podrían considerarse en investigaciones complementarias enfocadas en la aplicación integral del método en obra.
- No se incluyen ensayos mediante espectrometría ni microscopía electrónica, tales como FTIR o EDS, debido a la naturaleza práctica del estudio. Si bien estos ensayos aportarían información adicional sobre la composición química y mineralógica del concreto, el alcance de esta investigación se orienta a correlacionar la evolución de la resistencia con la madurez, empleando métodos experimentales convencionales reconocidos por normas internacionales.

- Finalmente, se reconoce la influencia del factor humano en las etapas de mezcla, curado, instrumentación y ensayo de probetas. Sin embargo, se tomaron medidas de control y supervisión para minimizar posibles desviaciones, asegurando la trazabilidad y confiabilidad de los datos obtenidos conforme a las normas ASTM C1074 y ASTM C39.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.5.1 OBJETIVO GENERAL.

Determinar la relación entre la resistencia a compresión del concreto y su índice de madurez, mediante la aplicación del método establecido en la norma ASTM C-1074.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar la influencia de la temperatura en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez.
- Cuantificar el efecto de historial de tiempo de curado en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez.
- Determinar con un grado alto de confiabilidad en tiempo real la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

Para el desarrollo de la presente investigación, ha sido necesario realizar una profunda revisión de investigaciones previas relacionadas con el tema, específicamente en la determinación de la resistencia del concreto mediante el método de madurez, como antecedentes relevantes en cuanto al tipo de investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, la metodología empleada para las mediciones, las conclusiones y los autores con los cuales se construyeron sus bases teóricas.

2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES.

El trabajo desarrollado por Beton Consulting Engineers (2019), Titulado: “Uso de la norma ASTM C1074 para predecir la resistencia del hormigón in situ”, el cual tuvo como principal objetivo el validar el uso del método de madurez de la norma ASTM C1074 en la estimación de la resistencia de la concreta in situ en proyectos de construcción modernos. Para esto se utilizó una serie de cilindros de concretos fabricados en laboratorio, los cuales fueron sometidos a pruebas de resistencia de acuerdo con los estándares ASTM. Para cada cilindro se colocaron sensores de temperatura con el fin de monitorear el historial de temperatura-tiempo, necesario para calcular el índice de madurez. Se registraron los valores de resistencia a compresión en intervalos de 7, 14 y 28 días, permitiendo una correlación precisa con el índice de madurez determinado para cada punto. Los resultados demostraron que, al aplicar el método de madurez, el concreto alcanzó el 75% de su resistencia de diseño, que fue de 35 MPa, en los primeros 7 días. Al día 28, el concreto había alcanzado el 100% de su resistencia, lo que sugiere que el método es adecuado para estimar con precisión el desarrollo de resistencia temprana en campo. Las conclusiones del estudio indicaron que el uso de la norma ASTM C1074 permite

optimizar los tiempos de construcción, al reducir la espera para remoción de encofrados sin comprometer la seguridad estructural. Este método se destacó como una herramienta precisa y eficiente para el control de calidad en proyectos que requieren predicciones de resistencia en etapas tempranas.

El trabajo desarrollado por el International Society for Concrete Pavements (2019), titulado: “Método de madurez para estimar la resistencia del hormigón in situ: descripción general y ventajas” que tuvo como principal objetivo el proporcionar una revisión de la aplicabilidad del método de madurez en proyectos de pavimentación y su impacto en la industria de la construcción. La investigación se basó en estudios de caso donde se utilizó el método de madurez para monitorear el desarrollo de resistencia del concreto en pavimentos. Se colocaron sensores de madurez a diferentes profundidades en losas de pavimento y se registraron datos de temperatura durante el proceso de curado. Las pruebas de compresión se realizaron en intervalos de 1, 7, 14 y 28 días, y los resultados se compararon con la resistencia estimada a través del método de madurez. Los resultados de la investigación mostraron que el concreto alcanzó un 90% de la resistencia objetivo de 40 MPa en solo 15 días, y una resistencia de 42 MPa al día 28. Estos resultados confirmaron que el método de madurez es eficaz para anticipar la resistencia en etapas tempranas, proporcionando datos con un margen de error de $\pm 5\%$. Se concluyó que el uso del método de madurez según la norma ASTM C1074 en pavimentos permite una toma de decisiones informada sobre el avance de las obras, mejorando la seguridad y eficiencia operativa.

El trabajo desarrollado por Giatec Scientific Inc. (2020), Titulado: “Concrete Maturity Method and Its Application in Modern Construction”, el cual tuvo como principal propósito explorar la utilidad del método de madurez para la estimación de la resistencia en tiempo real en proyectos de construcción moderna. La metodología de estudio

empleada fue la combinación de sensores de temperatura y el método de madurez en concreto fresco, aplicando la ecuación de Arrhenius para correlacionar la temperatura con el desarrollo de resistencia. Se prepararon cilindros en laboratorio y se mantuvieron en un ambiente controlado. Las resistencias se midieron a los 10, 14 y 28 días, y los datos se compararon con los valores obtenidos mediante la curva de madurez para validar el modelo. Los resultados mostraron que el método de madurez permitió que el concreto alcanzara un 80% de su resistencia especificada de 30 MPa a los 10 días. Para el día 28, la resistencia registrada fue de 31 MPa, superando el valor objetivo. Este estudio concluyó que el método de madurez es una herramienta confiable para reducir el número de pruebas destructivas, y su implementación podría optimizar los tiempos y costos asociados a la construcción, especialmente en obras con cronogramas acelerados.

El trabajo desarrollado por Hilti Corporation (2021), Títulado: “Método de madurez para la estimación de la resistencia del hormigón: análisis de los efectos de la temperatura en el desarrollo de la resistencia”, el cual tuvo como principal objetivo examinar cómo la variabilidad térmica afecta el desarrollo de resistencia en el concreto utilizando el método de madurez. En este estudio, se prepararon cilindros de concreto en un ambiente de laboratorio y se expusieron a diferentes condiciones de temperatura para analizar su efecto en el desarrollo de la resistencia. A cada cilindro se le colocaron sensores para registrar la temperatura a lo largo del tiempo, calculando el índice de madurez con la ecuación de edad equivalente. Las resistencias se midieron en intervalos de 7, 14 y 28 días, y se correlacionaron con los índices de madurez registrados. Los resultados indicaron que el concreto alcanzó el 70% de la resistencia objetivo de 32 MPa en los primeros 14 días (22.4 MPa), alcanzando el 100% al día 28. Estos resultados destacaron la capacidad del método para adaptarse a fluctuaciones de temperatura y proporcionar una estimación precisa de la resistencia final. Se llegó a las conclusiones que el método

de madurez es particularmente útil en condiciones variables, ya que permite ajustes en el curado que optimizan el proceso sin comprometer la resistencia estructural. Las conclusiones confirmaron que el método es esencial en proyectos que requieren flexibilidad en el manejo de los tiempos de curado.

El trabajo desarrollado por Ramírez, A. y Gutiérrez, F. (2021), Títulado: “Impacto del Método de Madurez en la Construcción de Pavimentos en Zonas Andinas”, el objetivo principal fue el evaluar la efectividad del método de madurez en la construcción de pavimentos de concreto en condiciones de montaña. Este estudio se realizó en zonas de alta montaña donde se construyeron losas de pavimento de concreto. Se colocaron sensores de madurez en las losas y se monitorizaron los cambios de temperatura durante el proceso de curado. Las resistencias a la compresión se midieron a los 7, 14 y 28 días para comparar los valores reales con los estimados mediante el índice de madurez. Los resultados mostraron que los pavimentos alcanzaron el 85% de la resistencia de diseño de 25 MPa en 7 días (21.25 MPa) y el 100% al día 28. Los resultados indicaron que el método de madurez permite una estimación confiable y segura para abrir al tráfico antes de lo esperado, incluso en condiciones extremas. La investigación concluyó que el método de madurez es una herramienta viable para la planificación de pavimentos en zonas montañosas, reduciendo costos de mantenimiento y optimizando el uso de los caminos rurales.

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES.

El trabajo desarrollado por Mendoza, L. (2019), titulado: “Madurez del Concreto en Proyectos de Construcción en el Altiplano Peruano”, que tuvo como principal objetivo evaluar la efectividad del método de madurez en condiciones de gran altitud y bajas temperaturas en proyectos de construcción de concreto en el Altiplano peruano. Este estudio empleó cilindros de concreto en los cuales se instalaron sensores de temperatura

para registrar la madurez en un ambiente de altitud elevada, caracterizado por temperaturas bajas y fluctuantes. Las pruebas de compresión se llevaron a cabo a los 7, 14, 20 y 30 días, ajustando el índice de madurez para reflejar los efectos de las bajas temperaturas sobre el desarrollo de la resistencia del concreto. Los resultados muestran que el concreto alcanzó el 85% de su resistencia de diseño de 35 MPa en 20 días, logrando el 100% en 30 días. Se observó que las temperaturas bajas prolongan ligeramente el tiempo necesario para alcanzar la resistencia total, pero el método de madurez fue capaz de predecir con precisión el desarrollo de resistencia bajo estas condiciones extremas. La investigación concluyó que el método de madurez es una herramienta viable en condiciones de alta altitud, aunque requiere ajustes específicos debido a las bajas temperaturas. El estudio sugiere que el método permite adaptar los tiempos de curado para optimizar el rendimiento del concreto en ambientes fríos, mejorando la durabilidad de las estructuras en el Altiplano.

El trabajo desarrollado por Salas, E. S. (2020), Titulado: “Implementación del Método de Madurez en la Construcción Costera de Lima”, que tuvo como objetivo principal el evaluar la efectividad del método de madurez para estimar la resistencia del concreto en construcciones costeras en Lima, Perú. Para esto se utilizaron cilindros de prueba de concreto que se colocaron en un ambiente de obra costera, expuestos a condiciones de temperatura moderada y controlada. Se insertaron sensores de temperatura en varios cilindros para monitorear el índice de madurez, y se realizaron pruebas de compresión a los 7, 14 y 28 días. Los datos obtenidos se utilizaron para construir una curva de madurez que permitiera estimar la resistencia in situ en función del tiempo y la temperatura. Los resultados indicaron que el concreto alcanzó el 80% de la resistencia de diseño de 28 MPa en 14 días, con una resistencia final que alcanzó el 100% antes de los 28 días. Esto demostró que las condiciones costeras de Lima permiten un desarrollo de resistencia

eficiente, validando el uso del método de madurez para una evaluación rápida. Este estudio concluyó que el método de madurez es particularmente útil en climas costeros como el de Lima, donde las temperaturas son moderadas y estables. Se sugirió que el método permite una remoción segura y oportuna de moldajes, optimizando los tiempos de construcción y garantizando la resistencia adecuada del concreto.

El trabajo desarrollado por Evangelista, G. (2021), titulado: “Aplicación de la Norma ASTM C1074 en Proyectos de Infraestructura en Climas Áridos de Trujillo”, que tuvo como objetivo principal el analizar la aplicabilidad del método de madurez para mejorar el control de calidad del concreto en climas áridos, específicamente en la ciudad de Trujillo, Perú. Este estudio utilizó cilindros de concreto con sensores de temperatura en un ambiente árido. Los cilindros fueron sometidos a un curado en condiciones naturales y se registraron los cambios de temperatura. Las resistencias se midieron a los 7, 14 y 28 días, permitiendo construir una curva de madurez específica para estas condiciones. Los resultados de madurez se correlacionaron con las resistencias de diseño para evaluar la precisión de las predicciones de resistencia. Los resultados muestran que el concreto alcanzó aproximadamente el 75% de su resistencia objetivo de 32 MPa a los 14 días y el 98% a los 28 días. Las condiciones áridas no mostraron un impacto negativo significativo sobre el desarrollo de resistencia del concreto. El estudio concluyó que el método de madurez bajo la norma ASTM C1074 es adecuado para ambientes áridos, proporcionando datos precisos que permiten optimizar los tiempos de curado y asegurar la calidad del concreto en la ciudad de Trujillo. La investigación sugirió que este método es especialmente útil para climas secos, donde el control de curado es crítico.

El trabajo desarrollado por Benites, M. (2021), titulado: “Evaluación de Concreto de Alta Resistencia en Arequipa mediante el Método de Madurez”, el objetivo principal fue investigar la relación entre la madurez del concreto y su resistencia en proyectos

industriales de alta resistencia en la ciudad de Arequipa, Perú. Se utilizó un diseño experimental en el que cilindros de concreto de alta resistencia fueron sometidos a condiciones de curado controladas. Se colocaron sensores en los cilindros para monitorear el índice de madurez, y se realizaron pruebas de compresión a los 7, 14 y 28 días. El estudio se enfocó en observar cómo las condiciones secas de Arequipa afectaban el desarrollo de resistencia del concreto y en verificar si el método de madurez ofrecía una predicción precisa. Los resultados mostraron que el concreto alcanzó el 70% de la resistencia objetivo de 40 MPa en 14 días y el 95% en 28 días. Las condiciones secas de Arequipa facilitaron el control de la madurez del concreto, permitiendo un curado más rápido y efectivo en comparación con otras condiciones climáticas. El estudio validó el uso del método de madurez como una herramienta confiable para la predicción de resistencia en concreto de alta resistencia en condiciones de clima seco, típico de Arequipa. Se concluyó que el método permite reducir los tiempos de espera y optimizar los recursos, siendo ideal para proyectos industriales que requieren alta precisión en el control de calidad.

2.2 MARCO CONCEPTUAL.

2.2.1 MARCO LEGAL.

- ASTM C1074 (2021): Establece los procedimientos para calcular la madurez del concreto mediante sensores de temperatura y correlacionar este índice con la resistencia a compresión. Incluye ecuaciones como la de Nurse-Saul y Arrhenius, y proporciona lineamientos para desarrollar y verificar curvas de calibración.
- ASTM C39/C39M (2022): Especifica el método para ensayar la resistencia a compresión de cilindros de concreto, siendo una referencia fundamental para la verificación experimental de la resistencia predicha por el método de madurez.

- EN 12390-13:2023: Norma europea que complementa los ensayos de compresión con métodos para evaluar el módulo de elasticidad, lo que enriquece el análisis de las propiedades mecánicas del concreto.
- NTP 334.009.2013. CEMENTOS. Cementos Portland. requisitos.
- NTP 339.034.2008 (revisada 2013). Establece las condiciones para los ensayos de resistencia a compresión en especímenes cilíndricos, una metodología clave para validar las predicciones del método de madurez.
- NTP 339.046.2008 (revisada 2013). Método de ensayo normalizado para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón (concreto).
- NTP 339.047.2006. Hormigón. Definiciones y terminología relativas al hormigón y agregados.
- NTP 339.088.2006 Hormigón. Define los requisitos que debe cumplir el agua empleada en la preparación del concreto, incluyendo límites para impurezas que puedan afectar la hidratación del cemento.
- NTP 339.183.2013. Hormigón. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio.
- NTP 339.185.2013. Agregados. Regula los procedimientos para la preparación y curado de especímenes en laboratorio, asegurando la representatividad de las muestras frente a las condiciones reales.
- NTP 400.010.2011 Agregados. Extracción y preparación de muestras.

- NTP 400.011.2008 (revisada el 2013) AGREGADOS. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos).
- NTP 400.012.2013 Agregados. Norma indispensable para el control de calidad de los agregados empleados en las mezclas de concreto.
- NTP 400.017.2011 Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso unitario”) y los vacíos en los agregados.
- NTP 400.018.2013 Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por tamiz normalizado 75 μ (N° 200).
- NTP 400.019.2002 Agregados. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores para abrasión e impacto en la máquina de los ángeles.
- NTP 400.021.2013 Agregados. Método de ensayo normalizado para la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso.
- NTP 400.022.2013 Agregados. Método de ensayo normalizado para la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino.
- NTP 400.037.2002 Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en hormigón (concreto).

2.2.2 MARCO TEÓRICO.

2.2.2.1 CONCRETO.

El concreto es un material compuesto ampliamente utilizado en la construcción debido a su versatilidad, resistencia y durabilidad. Se forma mediante la combinación de cemento,

agua, agregados (finos y gruesos) y, en algunos casos, aditivos químicos y fibras. La hidratación del cemento produce una matriz endurecida que encapsula los agregados, proporcionando la resistencia estructural necesaria (Neville & Brooks, 2020).

2.2.2.2 COMPONENTES DEL CONCRETO.

El concreto está compuesto por cemento, agua, agregados finos y gruesos, y aditivos. Cada uno de estos elementos cumple una función específica: el cemento actúa como aglomerante, los agregados proporcionan volumen y resistencia, el agua inicia el proceso de hidratación y los aditivos modifican las propiedades del concreto según las necesidades del proyecto" (Mehta y Monteiro, 2021)

2.2.2.2.1 Cemento.

El cemento Portland, el más utilizado en la construcción, está compuesto principalmente por compuestos como el silicato tricálcico (C_3S), silicato bicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Estos compuestos determinan las propiedades mecánicas y el tiempo de fraguado del material al reaccionar con el agua durante el proceso de hidratación" (Neville y Brooks, 2020).

Cemento Portland.

El cemento Portland es un aglomerante hidráulico que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y endurece debido a las reacciones químicas de hidratación. Se compone principalmente de clinker, yeso y, en algunos casos, adiciones minerales, lo que le confiere propiedades de resistencia y durabilidad adecuadas para aplicaciones estructurales" (Mehta y Monteiro, 2021)

El cemento Portland se clasifica en diferentes tipos según las especificaciones normativas, como ASTM C150 y las Normas Técnicas Peruanas (NTP 334.009-2013). Estas categorías incluyen el Tipo I (uso general), Tipo II (resistencia moderada a sulfatos), Tipo

III (alta resistencia inicial), Tipo IV (bajo calor de hidratación) y Tipo V (alta resistencia a sulfatos), cada una diseñada para cumplir con requisitos específicos de resistencia, durabilidad y condiciones ambientales. (Neville, 2020)

- **Cemento tipo I:** El cemento Portland tipo I, conocido como cemento de uso general, es adecuado para aplicaciones donde no se requieren propiedades especiales, como resistencia a sulfatos o calor de hidratación moderado. Este tipo de cemento se utiliza en estructuras de concreto armado, pavimentos, prefabricados y obras en condiciones climáticas normales que brindan mayor resistencia inicial y menores tiempos de fraguado. Sus aplicaciones más importantes. (Kim et al., 2021)
 - ✓ Obras de concreto y concreto armado en general.
 - ✓ Estructuras que requieran un rápido desencofrado.
 - ✓ Concreto en clima frío.
 - ✓ Productos prefabricados, pavimentos y cimentaciones.
- **Cemento tipo II:** El cemento Portland tipo II está diseñado para ofrecer resistencia moderada a los sulfatos y generar un calor de hidratación moderado, lo que lo hace adecuado para estructuras expuestas a ambientes ligeramente agresivos o que requieren un control del calor liberado durante el fraguado, como presas o muros de contención. (López et al., 2021)
- **Cemento tipo III:** El cemento Portland tipo III es un cemento de alta resistencia inicial diseñado para alcanzar rápidamente propiedades mecánicas significativas. Es ideal para proyectos que requieren desmoldes rápidos, como elementos prefabricados, o para trabajos en climas fríos donde se necesita acelerar el proceso de fraguado y endurecimiento. (Santiago et al., 2021)
- **Cemento tipo IV:** El cemento Portland tipo IV, conocido como de bajo calor de hidratación, se utiliza en estructuras masivas como presas o cimentaciones

profundas, donde la generación excesiva de calor durante el fraguado podría causar fisuración. Este tipo de cemento desarrolla su resistencia de manera más lenta y es ideal para condiciones en las que el control térmico es crítico. (Xu et al., 2021)

- **Cemento tipo V:** El cemento Portland tipo V se caracteriza por su alta resistencia a los sulfatos, lo que lo hace adecuado para estructuras expuestas a ambientes agresivos como agua de mar, suelos con alta salinidad o aguas residuales industriales. Este tipo de cemento tiene un contenido reducido de aluminato tricálcico (C_3A), minimizando las reacciones deletéreas con sulfatos. (Santiago et al., 2021)

2.2.2.2.2 Agregados.

Los agregados constituyen entre el 60% y el 80% del volumen total del concreto y tienen un impacto significativo en sus propiedades mecánicas y de trabajabilidad. Se clasifican en agregados finos, como la arena, y gruesos, como la grava o piedra triturada, cuya calidad, forma y granulometría son determinantes para la resistencia y durabilidad del concreto. (Mehta, 2021)

A. Agregado fino:

El agregado fino, comúnmente conocido como arena, está compuesto por partículas que pasan por el tamiz N° 4 (4.75 mm) y quedan retenidas en el tamiz N° 200 (0.075 mm). Este material es esencial para llenar los vacíos entre las partículas del agregado grueso, mejorando la trabajabilidad y reduciendo la segregación del concreto. (Gutiérrez et al., 2020)

B. Agregado grueso:

El agregado grueso está formado por partículas de roca o piedra triturada que quedan retenidas en el tamiz N° 4 (4.75 mm). Este componente aporta resistencia al concreto,

reduce los costos y minimiza los cambios volumétricos. Su tamaño, forma y textura influyen directamente en la trabajabilidad y en las propiedades mecánicas del concreto. (Mehta, 2021)

2.2.2.2.3 Agua.

El agua constituye un componente fundamental en la elaboración del concreto, no solo por su función física dentro de la mezcla, sino por su papel químico esencial en el proceso de hidratación del cemento. Esta reacción química permite el fraguado y posterior endurecimiento del material, garantizando el desarrollo progresivo de sus propiedades mecánicas. Asimismo, el agua actúa como agente lubricante, mejorando la trabajabilidad del concreto fresco y facilitando su colocación y compactación en obra.

Para asegurar un comportamiento estructural adecuado y una mayor durabilidad, es indispensable que el agua utilizada sea de calidad aceptable, es decir, libre de impurezas como sales, aceites, materia orgánica o productos químicos que puedan interferir con el proceso de hidratación o generar reacciones deletéreas en el tiempo. El uso de agua no apta puede comprometer la resistencia, aumentar la porosidad, e incluso provocar fenómenos patológicos como la expansión por reacciones álcalis-sílice o la corrosión del acero de refuerzo.

A. Agua de mezclado.

- El agua de mezclado es la cantidad de agua utilizada en la preparación del concreto, la cual reacciona químicamente con el cemento para formar productos de hidratación. Su calidad y cantidad son cruciales para garantizar la trabajabilidad, resistencia y durabilidad del concreto. El agua debe estar libre de contaminantes que puedan interferir con el proceso de fraguado y endurecimiento. (Santiago et al., 2021)

B. Agua de curado.

El agua de curado se utiliza para mantener la humedad del concreto durante su endurecimiento, asegurando la continuidad del proceso de hidratación del cemento. Este procedimiento es esencial para prevenir fisuras por retracción y maximizar las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. (Xu et al., 2021)

C. Relación agua: material cementante.

La relación agua-material cementante (a/c) es el factor más influyente en las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Una relación baja reduce la porosidad, aumentando la resistencia y la densidad del material. Por el contrario, una relación alta genera un concreto más trabajable, pero con mayor porosidad y menor resistencia. (Xu et al., 2021)

$$R = a/c \quad \dots\dots\dots (1)$$

R: Relación agua/ material cementante.

a: masa de agua del concreto fresco.

c: masa del material cementante del concreto fresco.

Cuanto más baja es la relación a/c tanto más favorables son las propiedades de la pasta de cemento endurecida, si en cambio esta relación es mayor, habrá mayor cantidad de poros capilares en la pasta de cemento, logrando el incremento de la permeabilidad y reduciendo la resistencia. (Pasquel, 2020)

- Para $a/c > 0.42$ sobra agua de hidratación y todo el cemento se hidrata.
- Para $a/c = 0.42$ no sobra agua de hidratación.
- Para $a/c < 0.42$ queda cemento sin hidratar.

2.2.2.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO

La resistencia a la compresión es la propiedad mecánica más importante del concreto, utilizada como parámetro principal en el diseño estructural. Representa la capacidad del material para soportar cargas axiales sin fallar, y se determina mediante ensayos en especímenes cilíndricos estándar bajo condiciones controladas. (Santiago et al., 2021)

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se pueden utilizar para fines de control de calidad, aceptación del concreto y para estimar la resistencia del concreto en estructuras y así poder programar las operaciones de construcción tales como; cuando remover los encofrados o para evaluar la conveniencia del curado y protección suministrada a la estructura. Los cilindros sometidos a ensayos de aceptación y control de calidad se elaboran y curan siguiendo los procedimientos descritos en la norma NTP 339.183. Es de vital importancia que se cumpla con todos los requerimientos presentes en las normas mencionadas, pues la resistencia del concreto se encuentra influenciada por muchos factores tanto internos como externos, por tanto, es indispensable que los procedimientos de elaboración de los cilindros y ensayo de los mismos sean estándares para evitar incluir otra variable más a los resultados de resistencia. (Pasquel, 2020)

2.2.2.3.1 Factores que influyen en la resistencia a la compresión del concreto

A. Relación agua-cemento.

La relación agua-cemento (a/c) es la proporción entre la cantidad de agua y la cantidad de cemento en una mezcla de concreto. Este factor es crucial, ya que influye directamente en la resistencia, trabajabilidad y durabilidad del material. Una relación a/c baja genera mayor resistencia y densidad, mientras que una relación alta mejora la trabajabilidad, pero reduce la resistencia y aumenta la porosidad. (Mehta, 2021)

B. Contenido de cemento.

El contenido de cemento en una mezcla de concreto afecta directamente la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del material. Una mayor cantidad de cemento tiende a incrementar la resistencia, mientras que una cantidad insuficiente puede comprometer las propiedades mecánicas y la cohesión de la mezcla. (López et al., 2021)

C. Curado del concreto.

Dado que las reacciones de hidratación del cemento solo ocurren en presencia de una cantidad adecuada de agua, se debe mantener la humedad en el concreto durante el periodo de curado, para que pueda incrementarse su resistencia con el tiempo. (Pasquel, 2020)

Un curado deficiente o la falta total de curado pueden reducir la resistencia del concreto en la estructura, comparando con las probetas con curado normalizado, hasta en un 50%, como puede apreciarse en la figura N° 01.

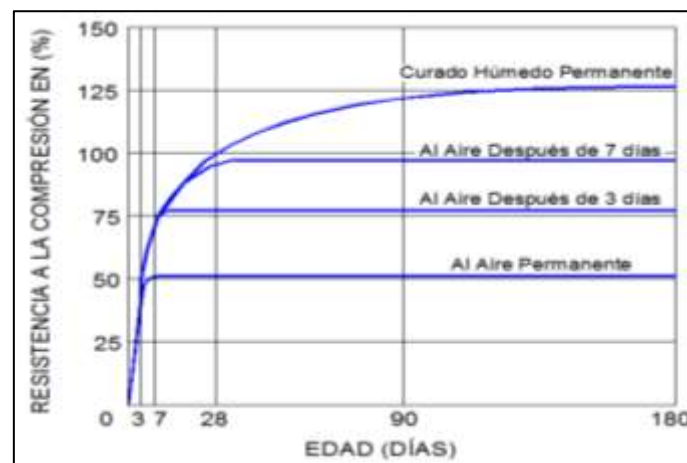


Figura 01. Incrementos de resistencia en el concreto con la edad mientras se cuenta con humedad y temperatura favorables para la hidratación del cemento.

Fuente: Instituto Mexicano del Cemento del Concreto – IMCYC.

La pérdida de agua también provocará que el concreto se contraiga, creando así esfuerzos de tensión. Si estos esfuerzos se presentan antes que el concreto haya

adquirido la resistencia a la tensión adecuada, se podría tener como resultado agrietamientos superficiales.

D. Temperatura Ambiente.

La temperatura ambiente influye en el concreto aumentando su temperatura interna generando serios problemas si no se cuenta con una inspección precisa y continua que nos permitan tomar acciones a tiempo. (Santiago et al., 2021)

- Temperaturas muy altas durante los procesos de colocación y fraguado del concreto incrementan la resistencia a muy temprana edad, pero afectan negativamente la resistencia a edades posteriores, especialmente después de los 7 días, debido a que se da una hidratación superficial de los granos de cemento que producen una estructura físicamente más pobre y porosa. (Santiago et al., 2021)
- Durante el proceso de curado, temperaturas más altas aceleran las reacciones químicas de la hidratación aumentando la resistencia del concreto a edades tempranas, sin producir efectos negativos en la resistencia posterior. (Santiago et al., 2021)
- Cuando la temperatura es baja, la hidratación avanza a una velocidad lenta. Las temperaturas menores de 10°C son desfavorables para el desarrollo de la resistencia a edad temprana; debajo de los 4.5°C el desarrollo de la resistencia a edad temprana se retrasa en gran medida y a temperaturas de congelación o por debajo de ellas, hasta los -10°C el desarrollo de la resistencia es nulo (Santiago et al., 2021).

2.2.2.4 METODO DE MADUREZ DEL CONCRETO.

El método de la madurez es una técnica no destructiva que permite estimar la resistencia a compresión del concreto en cualquier etapa de su proceso de curado, mediante el cálculo de un índice de madurez térmica. Este índice se basa en el historial térmico acumulado por el concreto, es decir, la interacción entre el tiempo transcurrido y la temperatura registrada durante el proceso de hidratación del cemento. Su principio fundamental establece que una misma combinación de tiempo y temperatura conduce a un nivel similar de hidratación y, por tanto, a una resistencia comparable (ASTM International, 2019; Mehta & Monteiro, 2021).

A diferencia de los métodos tradicionales, que utilizan ensayos destructivos en especímenes cilíndricos moldeados y curados en condiciones controladas, el método de madurez permite una estimación más precisa de la resistencia in situ, ya que considera las condiciones reales de la estructura, como la variación térmica ambiental, el tipo de encofrado, el espesor de los elementos y la ventilación superficial (Carino & Lew, 2001; Evangelista, 2021).

Las probetas de laboratorio, al presentar geometrías distintas y regímenes térmicos artificiales, no siempre representan de forma confiable el comportamiento del concreto en obra. Por tanto, la aplicación del método de madurez reduce significativamente el riesgo de errores en la estimación del desarrollo de resistencia, y facilita la toma de decisiones técnicas en etapas críticas del proceso constructivo, como el desencofrado, la habilitación estructural o el postensado (Ramírez & Gutiérrez, 2021; Hilti Corporation, 2021).

Este método se encuentra normado por la ASTM C1074, que contempla dos enfoques matemáticos principales: el modelo lineal de Nurse–Saul, y el modelo no lineal de Arrhenius. El primero es más simple y ampliamente utilizado en obra, mientras que el

segundo ofrece mayor precisión en ambientes con grandes fluctuaciones térmicas, al incorporar la energía de activación como variable en el cálculo de la edad equivalente del concreto (ASTM International, 2019; Giatec Scientific Inc., 2020).

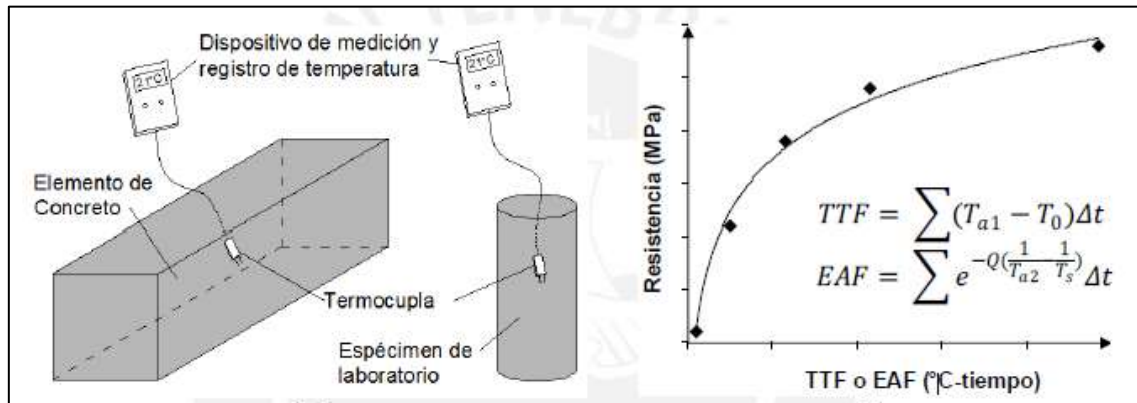


Figura 02. Metodología para la aplicación del método de madurez.

Fuente: American Society for Testing and Materials – ASTM C 1074.

El concepto de madurez asume que las muestras de hormigón que tenga la misma madurez, tendrán resistencias similares, independientemente de la combinación de tiempo y temperatura con la que se alcance la madurez (Gutiérrez et al., 2020).

El método de madurez posee variadas ventajas, entre ellas se pueden mencionar:

- Es una metodología basada en ensayos tradicionales a compresión.
- La implementación en terreno del concepto y del procedimiento es relativamente simple.
- Provee una predicción instantánea para resistencia en terreno.
- Provee importantes beneficios relacionados con operaciones en terreno, como la remoción de puntales, moldajes y la protección al frío; la determinación del tiempo de ejecución de juntas; el cálculo del tiempo adecuado para comenzar a cargar una estructura o para abrir un camino.
- No depende directamente del operador ni del espécimen controlado.

- Es económicamente viable.

Las técnicas no destructivas (TND) constituyen herramientas fundamentales en el control de calidad del concreto, especialmente cuando se requiere evaluar propiedades mecánicas sin afectar la integridad de los elementos estructurales. Estas técnicas permiten realizar inspecciones in situ, obtener información en tiempo real y reducir el uso de ensayos destructivos que implican costos adicionales y pérdida de muestras.

Entre las TND más utilizadas se encuentran el esclerómetro de rebote (ensayo Schmidt), el ultrasonido de pulso, la termografía infrarroja, la radiografía de rayos X y el método de madurez, regulado por la norma ASTM C1074. Este último se basa en la relación entre el tiempo, la temperatura y la resistencia del concreto, permitiendo estimaciones confiables del comportamiento estructural en sus primeras edades.

Según Castro-Borges et al. (2019), las técnicas no destructivas han demostrado ser altamente efectivas para evaluar la resistencia, la uniformidad, la detección de vacíos y la integridad del concreto, constituyéndose en una estrategia complementaria que mejora la seguridad, reduce costos y optimiza los procesos

El índice de madurez medido en el sitio, en función de su desarrollo de temperatura y edad, es utilizado para estimar el desarrollo de la resistencia, basado en una gráfica de la relación madurez-resistencia desarrollada sobre ensayos de laboratorio para esa mezcla (Carino y Lew, 2001; ASTM, 2004).



Figura 03. Relación Resistencia vs Madurez.

Fuente: National Ready Mixed Concrete Association

Los índices de madurez se miden tomando los diferenciales de la curva tiempo - temperatura, para la obtención de esta curva se realiza un procedimiento ayudado por sensores de temperatura y otros dispositivos diseñados para obtener estos índices, y así obtener los datos temperatura - tiempo cada hora, o según se recomiende.

2.2.2.4.1 Ecuaciones del método de madurez:

Los orígenes del método de la madurez se remontan a una serie de documentos en Inglaterra, donde se utilizaban métodos de curado acelerado. Existiendo la necesidad de un procedimiento que explicará los efectos combinados del tiempo y temperatura sobre el desarrollo de resistencia bajo temperaturas de curado elevado.

Fue así que se propuso que el producto del tiempo y temperatura se podría utilizar para ese fin. Estas ideas condujeron a las famosas funciones o ecuaciones de madurez de Nurse-Saúl y Arrherius (McIntosh, 1949; Nurse, 1949; Saúl, 1951).

A. Teoría de Nurse-Saúl.

La ecuación Nurse-Saúl (Factor tiempo-temperatura TTF) asume que la velocidad de reacción química en el concreto se incrementa linealmente con la temperatura. Fue así que se propuso que el producto del tiempo y temperatura dará como resultado la madurez.

$$M = \sum_0^t (T - T_o) \Delta t \dots \dots \dots (02)$$

Dónde:

M : Índice de madurez, en °C-horas o °C-días.

T : T° promedio del concreto, en °C, durante el intervalo de tiempo Δt .

T_o : Datúm de temperatura.

t :Tiempo transcurrido.

Δt : intervalo de tiempo (días u horas).

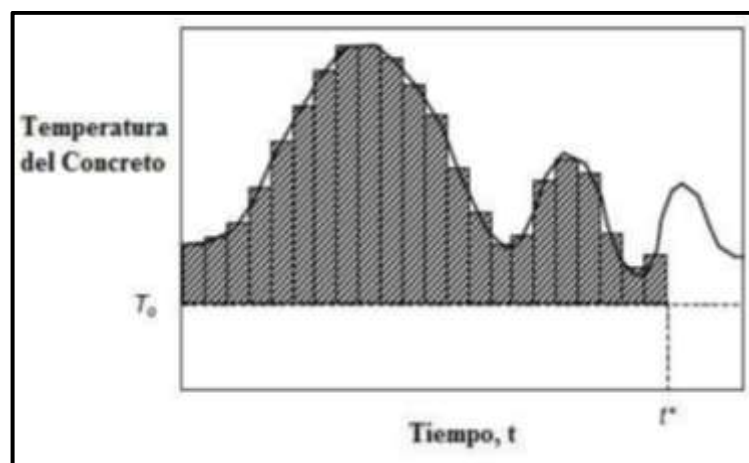


Figura 04. Área bajo la curva, equivale a la madurez del concreto en un tiempo t, limitada por la temperatura del concreto y el datúm de temperatura.

Fuente: *Nacional Institute of Standards and technology.*

El factor temperatura-tiempo en una cierta edad iguala el área bajo la curva entre la temperatura y el datúm, definiendo este último como la temperatura bajo la cual el concreto deja de ganar resistencia. Es por eso que en el gráfico de la figura N°03 se toma el área bajo la curva limitada por la temperatura y el datúm (T_o), que depende del tipo de cemento y de cómo es la ganancia de resistencia con respecto al tiempo,

alternativamente el T_0 puede ser determinado para un diseño de mezcla en específico siguiendo el procedimiento descrito por ASTM C 1074 (Nurse, 1949; Saúl, 1951).

Datúm de temperatura T_0 :

La explicación teórica de la temperatura Datum o temperatura de referencia es "la temperatura de una mezcla de concreto por debajo del cual todas las reacciones de hidratación cesan". En teoría, cuando la temperatura del concreto cae por debajo de la temperatura de referencia, no se produce aumento adicional de resistencia, por lo tanto, no hay ganancia neta en la madurez registrada por la **ecuación (2)** (Nurse, 1949; Saúl, 1951).

La temperatura de referencia puede depender del tipo de cemento, la dosificación de aditivos y otros factores que afecten la razón de hidratación y el rango de temperaturas que el concreto experimente cuando endurece, la temperatura de referencia apropiada puede ser determinado experimentalmente de acuerdo con los procedimientos dados en el **ANEXO III** del mismo de la presente investigación, en donde se detalla la norma ASTM C 1074.

B. Ecuación de Arrhenius (Edad Equivalente).

La ecuación de Arrhenius, responde a la no linealidad en la proporción de la hidratación del cemento. Este método produce un índice de madurez en términos de una "edad equivalente" que representa la duración equivalente de curado en la temperatura de referencia que produciría el mismo valor de madurez como el periodo de curado para la temperatura promedio dada:

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r})} \Delta t \dots \dots \dots (03)$$

Dónde:

Te : Edad equivalente a la temperatura de referencia

E : Energía de activación equivalente, J/mol

R : Constante universal del gas, (8.314 J/mol-K)

T : Temperatura absoluta promedio del concreto durante el Intervalo de tiempo Δt en grados Kelvin.

Tr : Temperatura absoluta de referencia

Δt : Intervalo de tiempo, días u horas.

Esta ecuación se usa para calcular la edad equivalente a una temperatura especificada. Para ello es necesario también conocer la energía de activación para los materiales y condiciones específicas. La energía de activación depende de:

- El tipo de cemento
- El tipo y dosaje de los agregados en polvo que afecte la proporción de desarrollo de resistencia
- La relación agua- cemento

2.2.2.4.2 Comparación de Nurse-Saúl y Arrhenius.

La energía de activación varía a lo largo del proceso de curado y/o durante toda la vida de un proyecto (como materiales de cemento con diferentes productos químicos composiciones y/u otras características de calidad puede ser suministrado a lo largo del tiempo de construcción del proyecto, incluso cuando los materiales se reciben de la misma "fuente"). Acción aparente para la mezcla de hormigón no puede ser precisamente determinada antes de tiempo y la energía de activación aparente puede

Esta incertidumbre acerca de la "verdadera" energía de activación de la mezcla de concreto crea una situación en la cual uno no puede saber si los cálculos de madurez

correspondientes son conservadores o poco conservadores y, posteriormente, si las estimaciones de resistencia mediante madurez son conservador poco conservador. En forma similar, pero menos de una forma menos severa, el método de Nurse-Saúl puede, a veces, ser poco conservador. El impacto es por lo general menos grave debido al hecho de que el método de Nurse-Saúl asume una relación lineal en vez de una relación exponencial

2.2.2.4.3 Equipos para medición de la madurez.

Debido a que la madurez depende sólo de la historia de temperatura y tiempo del concreto, los requisitos más básicos de los equipos para determinar la madurez, son un termómetro y un reloj. Sin embargo, en los últimos años diversos dispositivos de madurez se han desarrollado para monitorear y registrar automáticamente la temperatura del concreto como una función del tiempo.

Dos diferentes tipos de sensores de temperatura se utilizan en la medición de la madurez, las termocuplas (termopares) y termistores. Sea cual sea el tipo de sensor de temperatura que se emplee, debe cumplir con la norma ASTM C1074, la cual establece que el sistema de medición de temperatura deberá tener una precisión de ± 1 °C, que registran y almacenan la temperatura del concreto en los intervalos definidos por el usuario. El intervalo de tiempo registrado será 1 hora o menos. Los datos pueden ser descargados por el usuario en cualquier momento, algunos incluso por medios inalámbricos, o conectándose a unos terminales mediante cables embebidos en el concreto fresco y puede ser programado para calcular la madurez ya sea por la ecuación Nurse-Saúl o la ecuación de Arrhenius.

2.2.2.4.4 Desarrollo de la curva de calibración de madurez.

El desarrollo de la curva de calibración para cualquier mezcla de concreto depende de las características de la mezcla específica; cualquier cambio en el material de origen, en las proporciones de la mezcla, o en el equipo de mezclado requiere el desarrollo de una nueva curva de la calibración.

La calibración para cada diseño de mezcla específica se lleva a cabo normalmente en un entorno de laboratorio. Sin embargo, el concreto utilizado para el lote de calibración puede ser producido en el laboratorio o en el campo.

Los pasos generales en el desarrollo de una curva de madurez se describen a continuación:

1. Moldear como mínimo 09 probetas cilíndricas y ensayar el asentamiento.
2. Embeber los sensores de temperatura dentro de ± 15 mm del centro, de por lo menos 2 probetas. Conectar los sensores a los instrumentos de madurez o a los equipos de registro de temperatura. Estas probetas no se ensayarán a compresión, pero se usarán para evaluar la madurez de las mismas.
3. Se realizará el curado de las probetas de acuerdo a la norma NTP 339.183.
4. Realizar ensayos de compresión de por lo menos 2 probetas a edades de 1, 3, 7, 14 y 28 días y calcular la resistencia promedio. Si el rango de resistencia a compresión de las 2 probetas excede el 10 % de su resistencia promedio, ensayar otro cilindro y calcular el promedio de los tres ensayos. Si el resultado del ensayo bajo es debido a una probeta defectuosa, desecharlo.
5. En cada edad de ensayo registrar el índice de madurez. Para los especímenes instrumentados. Si se usan registros de temperatura. Evalúe la madurez de acuerdo a la ecuación de Nurse-Saúl.

6. Trazar la resistencia a compresión promedio como una función del valor promedio del índice de madurez. Dibujar la curva más adecuada con los datos. Utilizando la función de línea de tendencia de Excel, ajustar una curva logarítmica a través de estos puntos, mostrando la ecuación y el R^2 .

2.2.2.4.5 Verificación de la Curva de Madurez.

Puesto que los materiales, el rendimiento de los equipos de mezclado, y las condiciones de la construcción pueden variar con el tiempo, es importante verificar la correlación de la resistencia-madurez. Las pruebas de validación se deben realizar cada vez que existan cambios significativos en la dosificación y/o calidad de los materiales, entre otros aspectos. Para determinar si la resistencia del concreto está siendo adecuadamente representada por la curva de madurez actual.

La ASTM C1074 recomienda que la curva se considera válida si los promedios de resistencia para cada edad, de los valores de verificación están dentro del $\pm 10\%$ de la relación original (Aguilar, E., Rodríguez, E. y Sermeño, M. 2009).

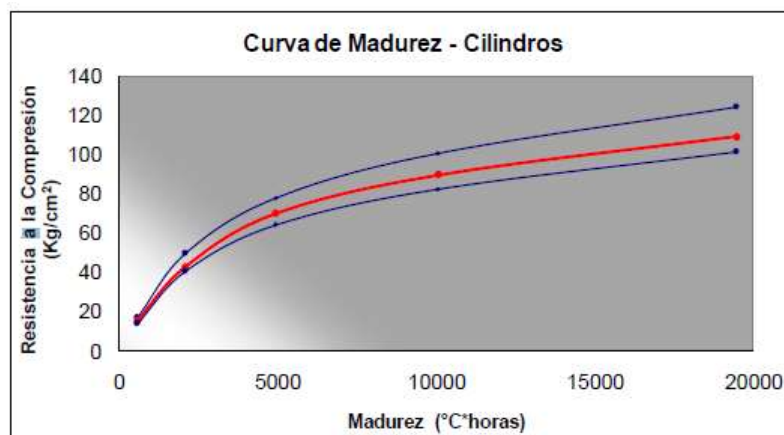


Figura 05. Variación aceptable del $\pm 10\%$ de la resistencia compresión obtenida por el método de madurez.

Fuente: Aguilar, E., Rodríguez, E. y Sermeño, M. (2009).

2.2.2.4.6 Precisión y fuentes de error.

La ASTM C1074 manifiesta que la precisión de la resistencia estimada es dependiente de varios factores, tales como la inapropiada función de madurez para la mezcla específica, el historial de temperatura a edad temprana y las proporciones actuales de la mezcla.

Debemos tener en cuenta otras posibles fuentes de error las cuales se mencionan a continuación:

- Los cambios de las características de materias primas.
- Los errores en el ensayo de calibración.
- Errores humanos al recopilar los datos de madurez o de cálculo de la resistencia de la madurez.

2.2.2.4.7 Beneficios y aplicaciones del método de madurez.

El principal beneficio de usar este método es que proporciona un medio no destructivo relativamente rápido para supervisar continuamente la resistencia del concreto mejorando así notablemente el nivel de confiabilidad en la verificación del cumplimiento de especificaciones técnicas del concreto, optimizando los tiempos y tecnificando los sistemas de aseguramiento y control de calidad en obra.

Los beneficios y aplicaciones típicas del método de madurez se resumen a continuación:

- Requiere un menor número de especímenes (vigas o cilindros) para los ensayos, reduciendo así los costos de control de calidad y tiempo en la preparación.
- Permite monitorear permanentemente y tomar acciones correctivas en forma oportuna en los efectos del clima frío sobre la ganancia de resistencia del concreto. Así mismo detener rápidamente los sistemas de calentamiento.

- Los cables de pos tensado pueden ser tensados más pronto, acelerando el flujo de trabajo.
- Predecir con alto grado de exactitud el momento en el cual el concreto lanzado en las paredes del túnel adquiriría la resistencia requerida, así como para determinar las condiciones mecánicas del concreto.
- Los encofrados en proyectos de puentes o edificios pueden retirarse más rápido, agilizando la construcción y disminuyendo costos de arrendamiento y horas hombre.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

ACI: Siglas del American Concrete Institute, organización internacional dedicada al desarrollo de normas y guías para el diseño, producción y control del concreto (ACI, 2021).

Agregado bien graduado: Es aquel cuya distribución granulométrica permite una densidad máxima al minimizar los vacíos entre partículas (Neville & Brooks, 2020).

Agregado fino: Material granular que pasa el tamiz de 9.5 mm (3/8”) y queda retenido en el tamiz N° 200, conforme a la NTP 400.037 (INDECOPI, 2013).

Agregado grueso: Componente retenido en el tamiz N° 4 (4.75 mm), que cumple con los requisitos de calidad establecidos por la NTP 400.037 (INDECOPI, 2013).

ASTM: Siglas de la American Society for Testing and Materials, organización que estandariza métodos de ensayo y especificaciones para materiales, incluyendo el concreto (ASTM International, 2019).

Compactación: Proceso mecánico que reduce los vacíos en mezclas de concreto fresco, mejorando su densidad y resistencia (Neville, 2020).

Contracción plástica: Reducción de volumen en el concreto fresco, debida a la evaporación del agua y a la hidratación del cemento, que puede provocar fisuras si no se controla adecuadamente (Mehta & Monteiro, 2021).

Curado: Mantenimiento de condiciones adecuadas de humedad y temperatura para permitir el desarrollo óptimo de la hidratación del cemento y la ganancia de resistencia (ACI, 2021).

Curva granulométrica: Representación gráfica de la distribución de tamaños de partículas de un agregado, que permite evaluar su grado de compactación (INDECOPI, 2013).

Cribado del concreto: Proceso de separación de partículas del concreto fresco por tamaño, generalmente para eliminar agregados de dimensiones no deseadas (Mehta & Monteiro, 2021).

Datúm de temperatura: Temperatura por debajo de la cual se considera que no ocurre ganancia significativa de resistencia en el concreto (ASTM International, 2019).

Dosificación: Proceso de medición y mezcla de materiales (cemento, agua, agregados y aditivos) en proporciones definidas para obtener una mezcla de concreto con características específicas (Neville & Brooks, 2020).

Energía de activación: Energía mínima necesaria para que se inicie la reacción química de hidratación entre el cemento y el agua (ASTM International, 2019).

Ensayo destructivo: Prueba que implica la rotura total o parcial del espécimen, como el ensayo a compresión de cilindros (INDECOPI, 2013).

Ensayo no destructivo: Método que permite evaluar propiedades del concreto sin dañar la estructura o el espécimen (ACI, 2021).

Factor temperatura-tiempo: Índice de madurez del concreto determinado a partir de la suma acumulada de temperatura y tiempo durante el curado (Carino & Lew, 2001).

Granulometría: Distribución de tamaños de partículas de un agregado, determinada por tamizado, según lo establecido en la NTP 400.012 (INDECOPI, 2013).

Hidratación: Proceso químico por el cual el cemento reacciona con el agua para formar productos que endurecen y dan resistencia al concreto (Mehta & Monteiro, 2021).

Instrumentalización del concreto: Incorporación de sensores o dispositivos electrónicos dentro del concreto para monitorear variables como temperatura o deformación (Giatec Scientific Inc., 2020).

Madurez: Medida del desarrollo del concreto en función del tiempo y la temperatura, correlacionada con la resistencia a compresión (ASTM International, 2019).

Módulo de finura (MF): Índice numérico que representa el tamaño medio de las partículas de un agregado, calculado como la suma de los porcentajes retenidos acumulados dividido entre 100 (INDECOPI, 2013).

Reacción exotérmica: Proceso químico que libera calor, como ocurre durante la hidratación del cemento (Mehta & Monteiro, 2021).

Relación agua/cemento (a/c): Proporción en peso entre el agua y el cemento en una mezcla de concreto, determinante en su resistencia y durabilidad (Neville, 2020).

Relación resistencia–madurez: Relación empírica entre el índice de madurez del concreto y su resistencia a compresión, generalmente representada por una curva logarítmica (ASTM International, 2019).

Resistencia a compresión del concreto: Capacidad del concreto endurecido para resistir esfuerzos de compresión axial, determinada mediante ensayos normalizados (INDECOPI, 2013).

Resistencia potencial: Resistencia máxima teórica que puede alcanzar el concreto a los 28 días bajo condiciones ideales de curado (ACI, 2021).

Sangrado (exudación): Movimiento ascendente del agua libre en el concreto fresco, que puede generar debilidad superficial si no se controla (Neville, 2020).

Segregación: Separación no deseada de los componentes del concreto fresco, que puede ocasionar zonas débiles o vacíos en la estructura (Mehta & Monteiro, 2021).

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 HIPÓTESIS.

3.1.1 HIPÓTESIS GENERAL.

Existe una correlación lineal fuerte y positiva entre la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez, basado en la norma ASTM C 1074.

3.1.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.

- La temperatura influye en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez.
- El tiempo de curado afecta en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez.
- Es posible determinar con un grado alto de confiabilidad en tiempo real la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez.

3.2 VARIABLES / CATEGORÍAS.

3.2.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.

Índice de madurez del concreto.

3.2.2 VARIABLE DEPENDIENTE.

Resistencia a compresión del concreto.

3.2.3 OPERACIONALIZACIÓN / CATEGORIZACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA HIPÓTESIS.

Hipótesis	Definición Operacional			
	Variables	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos de recolección de datos
Existe una correlación lineal fuerte y positiva entre la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez, basado en la norma ASTM C 1074.	<u>Variable Independiente:</u> Índice de Madurez del Concreto.	-Temperatura del concreto. - Tiempo en el que alcanza una temperatura determinada (Edad).	- °C. - Minutos, horas, días.	Observación: Fichas de registro de temperatura del concreto cada ½, 1, 2, 4, 8 y 24 horas, para obtener Factor Temperatura – Tiempo (Índice de Madurez).
	<u>Variable dependiente:</u> Resistencia a Compresión del Concreto.	- Ensayo a compresión.	- Materiales y equipo.	Observación: - Agregados. - Tipo cemento. - Maquina a compresión.
		- Calidad del concreto.	- Muestreo.	Observación: - Normas NTP.
			- Calidad.	Observación: - Preparación. - Llenado. - Curado.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Cajamarca, ubicada en la región andina del norte del Perú, a una altitud aproximada de 2,750 m s. n. m. Esta condición geográfica implica características climáticas particulares que inciden directamente en el comportamiento del concreto durante el fraguado y curado. Entre los factores ambientales más influyentes se encuentran la temperatura ambiente, la humedad relativa y la radiación solar, todos ellos determinantes en la tasa de hidratación del cemento y, por tanto, en la evolución de la resistencia a compresión. Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2022), la temperatura promedio anual en Cajamarca oscila entre los 10 °C y 18 °C, con mínimas que pueden descender por debajo de los 5 °C en temporadas secas y máximas que alcanzan los 22 °C en días soleados. La humedad relativa se mantiene, en promedio, por encima del 60 %, y existe una marcada oscilación térmica entre el día y la noche.

Estas condiciones térmicas variables afectan directamente el desarrollo de la madurez térmica del concreto, especialmente en sus primeras 72 horas, cuando se produce la mayor parte de la hidratación. En este contexto, el uso del modelo de Nurse-Saul, aplicado conforme a la norma ASTM C1074, permite compensar estas fluctuaciones mediante el registro continuo de la temperatura interna del concreto.

La presente investigación se Ubica en:

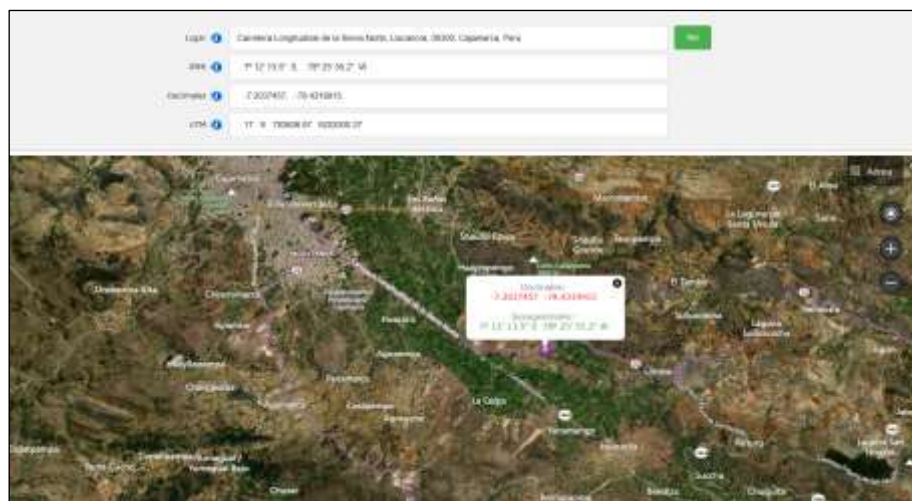
- **El Mundo** : América del Sur.
- **País** : Perú.
- **Región** : Cajamarca.

- **Departamento** : Cajamarca.
- **Provincia** : Cajamarca.
- **Distrito** : Llacanora.

Específicamente la recolección de datos y muestras de la investigación fue realizada en el laboratorio de calidad de la empresa DISTRIBUIDORA NORTE PACASMAYO SRL, en la sede denominada Región 2, ubicado en Siguispampa S/N, Cas la Banda – Llacanora en Cajamarca, entre los meses de Setiembre a Noviembre del 2024.

Figura 06. Mapa de ubicación donde se realizó la investigación “DINO”.

Fuente: <http://www.mundivideo.com/coordenadas.htm>.



4.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

El diseño de la investigación fue experimental - correlacional, puesto que se determinó la relación o asociación existentes entre las dos variables, en la misma unidad de investigación.

El desarrollo de esta investigación se estructuró en fases sucesivas, cuidadosamente planificadas, para cumplir con el objetivo general de establecer la relación entre el índice de madurez del concreto y su resistencia a compresión, conforme a la norma ASTM

C1074. Cada paso se diseñó para obtener datos confiables que permitieran validar o rechazar las hipótesis propuestas.

Diseño de mezclas y caracterización de materiales

- Se formularon dos mezclas de concreto con resistencias de diseño de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, de acuerdo con la norma ACI 211.1.
- Se seleccionaron agregados, cemento y agua de acuerdo con las normas técnicas nacionales (NTP) y se verificaron sus propiedades físicas y químicas.
- Se aseguró la calidad del agua de mezclado para evitar efectos adversos sobre la hidratación.

Elaboración de especímenes

- Para cada tipo de mezcla se prepararon probetas de 8" de alto por 4" de diámetro.
- Se colocaron las probetas en los sensores de temperaturas, conectados a un sistema de adquisición de datos para registrar la temperatura interna del concreto desde el momento del vaciado.
- Las probetas fueron almacenadas en condiciones ambientales controladas, simulando el curado típico en obra.

Registro térmico y cálculo de madurez

- Se registró la temperatura interna del concreto en intervalos de una hora durante las primeras 72 horas y cada 6 horas hasta los 28 días.
- Con estos datos, se calculó el índice de madurez usando la fórmula del modelo de **Nurse-Saul**, con una temperatura umbral de referencia de 0°C , según ASTM C1074.

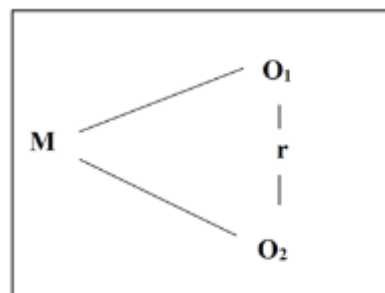
Ensayos de resistencia a compresión

- A los 1, 3, 7, 14 y 28 días se realizaron ensayos de compresión en las probetas, siguiendo la norma ASTM C39.
- Se utilizó una prensa hidráulica calibrada para obtener valores precisos de resistencia.

Análisis estadístico

- Se construyeron curvas de correlación entre madurez y resistencia para cada tipo de mezcla.
- Se aplicó análisis de regresión lineal para evaluar el nivel de correlación (R^2).
- Se calculó el error relativo entre los valores estimados por madurez y los obtenidos mediante ensayo destructivo.

Esquema:



Fuente: elaboración propia

Dónde:

M : Muestra de 220 probetas de concreto de 8" de alto por 4" de diámetro.

O1 : Índice de madurez

O2 : Resistencia a la compresión del concreto.

r : Relación de las variables de estudio.

4.3 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.

Por su naturaleza; se aplicó el método empírico (observación), el experimento y la medición, así como el método estadístico y método teórico: para llegar de lo inductivo a lo deductivo.

Por el nivel de conocimientos que se adquirirán; se aplicó el método científico, ya que la investigación se basará en la medición de ensayos los cuales estarán sujetas a los principios específicos de las pruebas de razonamiento.

4.4 POBLACIÓN, MUESTRA, UNIDAD DE ANÁLISIS Y UNIDAD DE OBSERVACIÓN.

4.4.1 POBLACIÓN.

La población de estudio estuvo conformada por todas las mezclas de concreto premezclado elaboradas y suministradas por la empresa Distribuidora Norte Pacasmayo S.R.L. (DINO S.R.L.) durante el periodo de ejecución de la investigación. Dichas mezclas fueron utilizadas en diversas obras ubicadas en la ciudad de Cajamarca, en las cuales se aplicaron procedimientos de control de calidad que incluyeron el monitoreo de la temperatura del concreto y la evaluación de su resistencia a compresión.

De manera específica, la población estuvo constituida por el conjunto de especímenes cilíndricos de concreto de 8 pulgadas de altura por 4 pulgadas de diámetro, elaborados conforme a lo establecido en la Norma Técnica Peruana NTP 339.183, los cuales fueron utilizados para los ensayos de resistencia y el cálculo del índice de madurez.

4.4.2 MUESTRA.

La muestra estuvo compuesta por un conjunto de 220 especímenes de concreto obtenidos de una mezcla diseñada con una resistencia nominal de 210 kg/cm² y 280 kg/cm². Esta mezcla fue seleccionada intencionalmente por su uso frecuente en obras de infraestructura

local y por ser representativa de las condiciones de producción habituales en la ciudad de Cajamarca. La selección de la muestra fue de tipo no probabilístico intencional, dado que se eligieron unidades que cumplieran con criterios específicos de control, seguimiento y trazabilidad para la aplicación del método de madurez conforme a la norma ASTM C1074, según se detalla en la siguiente Tabla:

Tabla 01: Numero de probetas a ensayar para el desarrollo de la investigación.

NÚMERO DE PROBETAS PARA LA INVESTIGACIÓN				
F'c (Kg/cm²)	Tipo de Cemento			
	Tipo I - Pacasmayo		MS (HM)	
	f'c	Temperatura	f'c	Temperatura
210	3	8	3	8
280	3	8	3	8
SUB TOTAL	44			
EDADES DE ENSAYO	05 edades de ensayos (1, 3, 7, 14 y 28 días)			
TOTAL DE PROBETAS	220 probetas			

Para la elección del número de muestras se tomó como referencia lo estipulado en la norma NTE E.060 (

Tabla 31. Diseño para Cemento Tipo MS – m3

f'c (kg/cm²)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	a/c
210	320	176	720	1080	0.55
280	380	190	690	1070	0.5

Tabla 32. Diseño para Cemento Tipo I – m3

f'c (kg/cm²)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	a/c
210	320	176	720	1080	0.55
280	380	190	690	1070	0.5

ANEXO I) que está basado en la norma ASTM C-192 “Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio” en donde indica que; para un análisis no estadístico deben moldearse mínimo tres o más especímenes para cada edad de ensayo (07, 14 y 28 días).

Eligiendo por la naturaleza de nuestro estudio, 3 especímenes de concreto, ensayados a diferentes edades (1, 3, 7, 14 y 28 días). Así mismo, según lo establecido en la norma ASTM C 1074 (

Tabla 31. Diseño para Cemento Tipo MS – m3

f'c (kg/cm²)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	a/c
210	320	176	720	1080	0.55
280	380	190	690	1070	0.5

Tabla 32. *Diseño para Cemento Tipo I – m3*

f'c (kg/cm²)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	a/c
210	320	176	720	1080	0.55
280	380	190	690	1070	0.5

ANEXO II), en donde indica que para la aplicación del método de madurez se debe ensayar mínimo 02 probetas de concretos, eligiendo 08 especímenes para ensayos en las celdas: 07 para ensayos de comparación + 01 muestra patrón para nuestro análisis.

En relación con el análisis fisicoquímico del agua presentada en el **ANEXO III**, se precisa que dicho estudio fue realizado en el laboratorio de la Universidad de Piura únicamente con fines referenciales y comparativos. No obstante, toda la experimentación de la presente investigación, incluyendo la elaboración de mezclas, curado y ensayos de resistencia a compresión, se llevó a cabo en la ciudad de Cajamarca.

Por tanto, el agua empleada para la preparación del concreto provino del pozo tubular que es de propiedad y administrada por la empresa DINO SRL, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma ASTM C1602, que regula la calidad del agua para uso en mezclas de concreto. Esta precisión garantiza la validez de los resultados, asegurando la coherencia entre los materiales utilizados localmente y los ensayos desarrollados.

Cabe precisar que, si bien el análisis del agua se efectuó en Piura, toda la aplicación experimental de la investigación, incluyendo el diseño de mezclas, el curado de probetas, la recolección de datos de madurez y los ensayos de resistencia a compresión, se realizó en la ciudad de Cajamarca, específicamente en la planta de concreto local.

Por tanto, los materiales (cemento, agregados y agua) corresponden a las condiciones reales de obra de Cajamarca, y los resultados obtenidos reflejan la aplicabilidad del método de madurez en dicho contexto geográfico de Cajamarca. El análisis del agua en Piura tuvo carácter complementario y técnico, sin afectar la representatividad del ensayo en su entorno original.

4.4.3 UNIDAD DE ANÁLISIS.

La unidad de análisis de la presente investigación está constituida por cada espécimen cilíndrico de concreto premezclado, moldeado con dimensiones de 8 pulgadas de altura

por 4 pulgadas de diámetro, de acuerdo con las especificaciones de la Norma Técnica Peruana NTP 339.183.

Estos especímenes representan unidades individuales en las que se midieron dos variables clave: el índice de madurez térmica, calculado a partir del historial de temperatura durante el curado, y la resistencia a compresión, determinada mediante ensayo destructivo en edades específicas. Cada cilindro fue preparado, curado y ensayado bajo condiciones controladas, lo que permitió establecer la relación funcional entre la madurez y la resistencia del concreto, conforme a los lineamientos de la norma ASTM C1074.

4.4.4 UNIDAD DE OBSERVACIÓN.

La unidad de observación de esta investigación corresponde a cada registro individual de datos obtenidos de los especímenes cilíndricos de concreto premezclado, moldeados bajo condiciones controladas y monitoreados durante el proceso de curado.

En cada unidad se observaron y registraron dos tipos de información esenciales:

- La temperatura interna del concreto en el tiempo, medida registro de temperaturas, para el posterior cálculo del índice de madurez térmica.
- La resistencia a compresión alcanzada por el espécimen a edades determinadas (1, 3, 7, 14 y 28 días), evaluada mediante ensayo destructivo conforme a la NTP 339.034 y la ASTM C39.

Cada unidad de observación representa, por tanto, un conjunto de valores empíricos que permiten establecer la relación cuantitativa entre la madurez y la resistencia del concreto, lo cual constituye el objetivo principal del estudio según lo estipulado en la norma ASTM C1074.

4.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.

Para recopilar la información se utilizó el Método Cuantitativo; este método se usará para medir las variables cuantitativas de estudio de las dosificaciones de concreto a elaborar; para lo cual se emplearán equipos e instrumentos del laboratorio de DINO SRL tales como: máquina de ensayo a compresión uniaxial, moldes adecuados para la elaboración y control de calidad del concreto, balanzas, tamices compatibles con las NTP y ASTM correspondientes, celdas de registro de temperatura, software adecuado para el procesamiento de la información registrada.

También se elaboraron fichas técnicas; este instrumento consiste en un listado de 8 características con respecto a la resistencia a la compresión del concreto. Asimismo para el índice de madurez del concreto también se utilizará una ficha técnica, el cual consta de 7 características.

Finalmente se obtuvo una tabla resumen para encontrar la correlación de las dos variables antes mencionadas.

4.6 TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.

Técnicas:

Las técnicas utilizadas para la recolección de datos para la presente investigación fueron los métodos:

- a.** Observación directa.
- b.** Observación documental.

Análisis de información:

La información cuantitativa que se obtuvo de las variables de estudio de las diferentes dosificaciones de concreto será procesada mediante métodos estadísticos como la determinación de promedios, análisis de varianza y prueba de hipótesis.

Para lo cual se empleará programas computarizados como:

Aplicando Excel y en concordancia con los criterios de la norma ASTM C 1074 determinamos:

- La resistencia a la compresión.
- El índice de madurez del concreto aplicando la ecuación de Nurse- Saúl.
- La curva de calibración que correlaciona el índice de madurez y la resistencia a la comprensión del concreto.

Aplicando el programa estadístico determinamos:

La correlación entre las variables de estudio, el modelo matemático y su respectiva significancia.

4.7 EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS:

4.7.1 EQUIPOS:

Debido a que la madurez depende sólo de la historia de tiempo y temperatura del concreto, los requisitos de los equipos más básicos para la determinación de la madurez son un termómetro y un reloj. Sin embargo, el uso de este equipo básico consume tiempo y es poco práctico. Con los años, diversos dispositivos de madurez se han desarrollado que automáticamente vigilar y registrar la temperatura del concreto como una función del tiempo. Estos dispositivos se conectan a unos terminales mediante cables embebidos en el concreto fresco y puede ser programado para calcular la madurez ya sea por la ecuación Nurse-Saúl o la ecuación de Arrhenius.

En los últimos años han experimentado transformaciones significativas en el uso de microprocesadores para aplicaciones de madurez del concreto. Estos microprocesadores son pequeños e independientes incrustados en el concreto plástico para registrar y almacenar de forma automática la temperatura del concreto en los intervalos definidos por el usuario. El intervalo de tiempo registrado son en algunos casos de ½ hora o menos para las primeras 48 h y 1 h o menos para después. Los datos pueden ser descargados por el usuario en cualquier momento, algunos incluso por medios inalámbricos.

Los equipos de medición de madurez se dividen en dos generaciones distintas, la distinción entre los equipos de la primera y segunda generación es la discrepancia en el registro de datos y la tecnología de almacenaje.

Para la presente investigación se realizará los ensayos y tomas de muestras de temperatura utilizando muestras de concreto los cuales serán procesadas y colocadas en celdas para su toma de temperatura en un tiempo determinado.

En general un equipo para determinar la madurez del concreto se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 02. Equipos para el método de madurez.

EQUIPOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A COMPRESION MEDIANTE LE METODO DE MADUREZ	
Máquina de compresión uniaxial. Para medir la resistencia a la compresión uniaxial de los especímenes de concreto (60 especímenes de concreto a ensayar), siguiendo lo establecido en la NTP 339.034 y ASTM C 1074, para determinar una correlación entre las dos variables de estudio.	

Dispositivo de toma de temperatura. Para medir y registrar las temperaturas dentro del rango de -20 °C a 100 °C, con una precisión de ± 1 ° C. Las medidas que se registrarán al menos cada media hora, según lo establecido en la ASTM C 1074, para determinar el historial de temperaturas de los especímenes de concreto.	
Sistema de almacenamiento. Thermocrete, software de registro de temperaturas adquirido por Cementos Pacasmayo SAA.	
Equipos mínimos para fabricar los especímenes de concreto. Juego de tamices, probetas y fiolas, moldes para especímenes de concreto y ensayos de peso unitario, badilejo, cucharón y mazo de goma, vernier digital con 0.01 mm de precisión.	

4.7.2 MATERIALES E INSUMOS:

4.7.2.1 CANTERA DE ESTUDIO.

4.7.2.1.1 Elección de la cantera para el presente trabajo.

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron agregados de canteras de origen pluvial y sedimentario (piedra caliza), validadas en base al cumplimiento con la norma ASTM C33 / NTP 400.037.

4.7.2.1.2 Ubicación.

Se tiene 02 canteras de donde provienen los agregados utilizados en la presenta investigación:

- Arena lavada de origen Fluvial, extraído de la Cantera Crisnejas, ubicado en el Valle de Condebamba de la Provincia de San Marcos en la Región de Cajamarca. Ubicado geográficamente en las coordenadas UTM según Datum WGS-84; **ESTE: 815538.24 y NORTE: 9161217.58**, a una altitud de **2084 m.s.n.m.**

Figura 07: Fotografía satelital de la ubicación de la cantera - Crisnejas.

Fuente: <http://www.mundivideo.com/coordenadas.htm>.



- Piedra caliza H67 y H57 de origen sedimentario, extraído de la Cantera Cochambul, ubicado en el distrito de Llacanora de la Provincia y Región de Cajamarca. Ubicado geográficamente en las coordenadas UTM según Datum WGS-84; **ESTE: 787897.19 y NORTE: 9202484.45**, a una altitud de **2891m.s.n.m.**

Figura N° 08: Fotografía satelital de la ubicación de la cantera - Cochambul.

Fuente: <http://www.mundivideo.com/coordenadas.htm>.



4.7.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS.

Las características de los agregados y de su influencia en el comportamiento del concreto, no solo es útil para establecer criterios de selección entre dos o más fuentes de suministro, sino también para definir y especificar los tratamientos de beneficio y acondicionamiento a que pueden someterse los agregados que presentan deficiencias.

En las mezclas de concreto convencional, los agregados suelen representar entre el 60% y el 70%, del volumen absoluto de todos los componentes, por lo que es importante determinar las características y propiedades de los agregados que influyen en el concreto.

Una característica importante en el concreto es su peso unitario, ya que este influye decisivamente en el empleo que se le da. Esta característica del concreto depende principalmente del peso específico de los agregados (fino y grueso) que lo integran.

Las características de estudio en el agregado son: la granulometría, peso específico, peso unitario (suelto y compactado), absorción, humedad, resistencia a la abrasión, materiales finos que pasan por el tamiz N° 200.

4.7.2.2.1 Extracción y preparación de muestras.

Para la extracción y preparación de los agregados (fino y grueso) de estudio se realizaron los procedimientos de muestreo descritos en la NTP 400.010 - 2011, que estipula:

“El muestreo y el ensayo son importantes, por lo tanto, el operador deberá tener siempre la precaución de obtener muestras que denoten la naturaleza y condiciones del material al cual representen”.

4.7.2.2.2 Número y masa de las muestras de campo.

El número de las muestras de campo requeridas depende del estado y variación de la propiedad a medirse. Designar cada unidad de la que se obtuvo la muestra de campo, previa al muestreo. El número de muestras de la producción deberá ser suficiente como para otorgar la confianza deseada en los resultados de los ensayos.

Las masas de las muestras de campo citadas son tentativas. Las masas deberán ser previstas para el tipo y cantidad de ensayos a los cuales el material va a estar sujeto y obtener material suficiente para ejecutar los mismos apropiadamente. La norma de aceptación y ensayos de control están cubiertas por las NTPs, donde se especifica la porción de la muestra de campo requerida para cada ensayo específico. En general, las cantidades utilizadas en la presente investigación son adecuadas para análisis granulométrico y ensayos de calidad rutinarios. Se extraído porciones de muestra en el campo de acuerdo con el método de ensayo normalizado que se presenta en NTP 400.010 – 2011 o por otros métodos de ensayo que sean aplicables (ASTM C 702).

Teniendo en cuenta lo antes mencionado se procedió a realizar la extracción de los materiales de las pilas de agregados que se cuenta en planta DINO, el cual tienen un stock de:

- Arena se cuenta con pilas (stock) de 10000 TN.
- Piedra H57 se cuenta con pilas (stock) de 6000 TN.
- Piedra H67 se cuenta con pilas (stock) de 6000 TN.

Todas las pilas se encuentran separadas más de 20 metros entre sí y con camas del mismo material para evitar en todo momento la contaminación de los agregados.

La extracción de las muestras se realizó de la siguiente manera; para agregado fino, se tomó la muestra que se encuentra bajo el material superficial, en tres lugares aleatorios y para el agregado grueso, se tomó la muestra en tres lugares, de la parte superior de la pila, del punto medio, y del fondo.

4.7.2.2.3 Reducción de muestras de agregados a tamaño de ensayo.

Las muestras de agregados deben ser adecuados para cada tipo de prueba, éstas han sido reducidas a tamaños adecuados para ser ensayadas utilizando para ello lo descrito en la norma NTP 400.043 o ASTM C 702.

Los agregados fueron trasladados de la zona de áridos al laboratorio de calidad de DINO (en la misma planta) y almacenados en contenedores de concretos adecuados para evitar su contaminación, luego se batió por tres veces el material con ayuda de una palana formando un pequeño montículo, enseguida se esparció el agregado de forma circular y se lo dividió en cuatro partes de apariencia simétrica (cuarteo), se tomó dos mitades opuestas y se procedió a repetir el ensayo hasta obtener las muestras según los pesos necesarios aproximados para cada ensayo.

4.7.2.3 CARACTERÍSTICA DEL CEMENTO.

El cemento que se empleó para elaborar las dosificaciones de estudio fueron el cemento Portland Tipo I y MS (MH) de Cementos Pacasmayo S.A.A. El primero destinado para uso general en la construcción mientras que el segundo es un cemento de moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, Ambos cumplen con los requisitos de las normas técnicas **NTP 334.082 / ASTM C1157** y fueron elegidos por su uso comercial en la ciudad de Cajamarca.

En el **ANEXO II** se presenta las fichas técnicas (Informe de ensayo de fábrica) del Cemento Portland Tipo I y MS (MH) de Cementos Pacasmayo S.A.A.

4.7.2.4 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA.

El agua utilizada en la elaboración del concreto es proveniente de un pozo tubular, el cual es propiedad y administrada por la empresa DINO SRL. Con la finalidad de verificar su idoneidad para el uso en mezclas de concreto, se realizaron ensayos físico-químicos en los laboratorios de la Universidad Nacional de Piura, presentado en el **ANEXO III**, conforme a los parámetros establecidos por la norma ASTM C1602 y la normativa técnica peruana NTP 339.127:2015. Los ensayos determinaron que el agua cumple con los límites permitidos de alcalinidad, contenido de sólidos, pH, cloruros y sulfatos, entre otros parámetros relevantes para garantizar la no interferencia con el proceso de hidratación del cemento y el desarrollo de la resistencia del concreto. El pH medido fue de 7.3, valor dentro del rango neutro aceptable para el proceso de fraguado. Asimismo, el contenido de sólidos disueltos totales (SDT) fue de 253 ppm, muy por debajo del límite máximo de 2,000 ppm establecido por la ASTM C1602.

4.8 MATRIZ DE CONSISTENCIA METODOLOGÍA.

“RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN FUNCIÓN DE SU MADUREZ, BASADO EN LA NORMA ASTM C 1074”

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	FUENTE O INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
P. GENERAL ¿Es posible determinar la relación entre la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez, basado en la norma ASTM C 1074? P. ESPECÍFICOS ¿La temperatura influye en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez? ¿El tiempo de curado afecta a la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez? ¿Será puede determinar con un grado alto de confiabilidad en tiempo real la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez.	O. PRINCIPAL Determinar la relación entre la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez, basado en la norma ASTM C 1074. O. ESPECÍFICOS - Determinar la influencia de la temperatura en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez. - Cuantificar el efecto de historial de tiempo de curado en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez. - Determinar con un grado alto de confiabilidad en tiempo real la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez.	H. PRINCIPAL. Existe una correlación lineal fuerte y positiva entre la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez, basado en la norma ASTM C 1074 H. ESPECIFICAS. La temperatura influye en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez. El tiempo de curado afecta en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez. Es posible determinar con un grado alto de confiabilidad en tiempo real la resistencia a compresión del concreto en función de su madurez.	Independiente: Índice de Madurez del Concreto.	- Temperatura del concreto.	- °C.	Observación: Fichas de registro de temperatura del concreto cada ½, 1, 2, 4, 8 y 24 horas, para obtener Factor Temperatura – Tiempo (Índice de Madurez).	Se elaborarán especímenes de concreto sometiéndolos a ensayos a compresión uniaxial y ensayos de temperatura, para obtener una relación significativa entre las dos variables que nos brinde una predicción de la resistencia a compresión en función de su madurez.	Población: La población de estudio será el conjunto de especímenes de concreto de 8” de alto por 4” de diámetro según NTP 339.183. Muestra: La muestra será intencional y por conveniencia en un total de 220 especímenes de concreto.
				- Tiempo en el que alcanza una temperatura determinada (Edad).	- Minutos, horas, días.			
			Dependiente: Resistencia a Compresión del Concreto.	- Ensayo a compresión.	- Materiales y equipo.	Observación: - Agregados. - Tipo cemento. - Maquina a compresión.		
				- Calidad del concreto.	- Muestreo.	Observación: - Normas NTP.		
					- Calidad.	Observación: - Preparación. - Llenado. - Curado		

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1.1 CARACTERÍSTICAS DE MATERIAS PRIMAS.

5.1.1.1 Cemento.

El cemento usado para el diseño de mezcla es Cemento Portland Tipo I y MS (MH), producido por Cementos Pacasmayo. En el Anexo 02 se muestra sus principales características físicas. Estos parámetros fueron obtenidos de la empresa proveedora.

5.1.1.2 Agregados.

Se han realizado estudios de las propiedades de los agregados utilizados, en este ítem se muestran los resultados de análisis químico y análisis físico mecánico de los agregados utilizados. Así mismo los ensayos y cálculos se basaron en procedimientos metodológicos descritos anteriormente (con su respectiva norma), los datos obtenidos del ensayo en laboratorio se muestran a continuación:

5.1.1.2.1 Análisis físico químico.

Estos resultados se han desarrollado de acuerdo con la norma.

5.1.1.2.2 Análisis físico mecánico.

A. Agregado fino.

Las propiedades analizadas para el agregado fino fueron: el tipo de agregado, contenido de humedad, porcentaje de finos, módulo de fineza, peso específico, capacidad de absorción, peso unitario sueltos y porcentaje de vacíos sueltos para los agregados finos, el resumen de las características físico-mecánicas del agregado fino se presentan en la tabla 03.

B. Agregado Grueso.

Las características analizadas para el agregado grueso fueron: el tipo de agregado, contenido de humedad, porcentaje de finos, tamaño máximo absoluto, tamaño máximo nominal, módulo de fineza, peso específico, capacidad de absorción, peso unitario varillado, porcentaje de vacíos varillado, peso unitario sueltos, porcentaje de vacíos sueltos y porcentaje de Abrasión para los agregados gruesos, el resumen de la caracterización para el agregado grueso se presentan en la tabla 03.

5.1.1.3 Aditivo.

El aditivo químico empleado en los ensayos experimentales corresponde a un aditivo polifuncional de la marca de Sika Perú SAC.

5.1.1.4 Agua.

Se han realizado estudios de las propiedades del agua, en el Anexo III se muestran los resultados de análisis químico. Los resultados cumplen con los requisitos de la norma NTP 339.088.

5.1.2 ELABORACIÓN DEL CONCRETO.

5.1.2.1 Diseño de mezcla.

El diseño de la mezcla utilizada corresponde a un concreto de fabricación comercial cuya resistencia nominal es de $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ y $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$, con relación nominal agua/cemento (a/c) de 0,5 y tamaño máximo del agregado de 1". La dosificación utilizada se muestra en la Tabla 31 y 32, para unidades de kg/m^3 (peso) así como sus correspondientes porcentajes en peso de cada material utilizado.

Tabla 03. *Tabla resumen de ensayos.*

Propiedad	Agregado Fino	Agregado Grueso	Norma de Referencia
Origen	Arena lavada (Cantera Crisnejas)	Piedra caliza H67 (Cantera Cochambul)	ASTM C33 / NTP 400.037
Tamaño Máximo Nominal	N/A	3/4"	ASTM C33
Módulo de Finura (MF)	2.56	6.32	ASTM C33 / NTP 400.012
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1,685	1,702	ASTM C29 / NTP 400.017
Peso Unitario Compactado (kg/m ³)	1,720	1,832	ASTM C29 / NTP 400.017
Densidad Relativa (g/cm ³)	2.62	2.65	ASTM C127 / C128 / NTP 400.021
Densidad (kg/m ³)	2,620	2,650	ASTM C127 / C128 / NTP 400.021
Absorción (%)	1.2	0.8	ASTM C127 / C128 / NTP 400.022
Humedad (%)	2.1	1.8	ASTM C566 / NTP 339.185
Material más fino que tamiz N°200 (%)	2.52	0.9	ASTM C117 / NTP 400.018
Resistencia a Abrasión (% pérdida)	N/A	24.52	ASTM C131 / NTP 400.019

En la Tabla 03 se presenta el resumen de ensayos físicos realizados a los agregados utilizados en la elaboración del concreto, conforme a los procedimientos y especificaciones de las normas ASTM y NTP vigentes. El agregado fino corresponde a arena lavada proveniente de la Cantera Crísnejas, mientras que el agregado grueso corresponde a piedra caliza de 1/2" extraída de la Cantera Cochambul (H67). Ambos materiales fueron seleccionados por su disponibilidad en la región de Cajamarca y su uso frecuente en obras civiles locales. La caracterización granulométrica muestra que el módulo de finura de la arena fue de 2.56, lo cual indica que se trata de un material de granulometría media, ideal para lograr un equilibrio adecuado entre trabajabilidad y cohesión de la mezcla. Por su parte, el agregado grueso presentó un módulo de finura de 6.32, valor típico de grava angular que favorece el armado de un esqueleto granular eficiente en mezclas estructurales.

Tabla 04. *Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm²*

Tiempo (Horas)	Madurez (C° - hora)	Resistencia (kg/cm ²)
1	20.05	10.05
2	40.1	20.12
3	60.15	30.18
4	80.2	35.25
5	100.25	40.32
6	120.3	45.38
7	140.35	50.45
8	160.4	55.5
9	180.45	60.56
10	200.5	65.62
11	220.55	70.68
12	240.6	75.45
13	260.65	78.72
14	280.7	81.98
15	300.75	85.25
16	320.8	88.52
17	340.85	90.15
18	360.9	91.8
19	380.95	92.8
20	401	93.5
21	421.05	94.1
22	441.1	94.65
23	461.15	94.9
24	481.2	95.12

La tabla nos muestra Relación entre tiempo y madurez: La madurez del concreto aumenta progresivamente con el tiempo de curado, lo que refleja la acumulación de calor generado por la hidratación del cemento. A las 12 horas, la madurez es de 240.6 °C-hora. A las 24 horas, alcanza 481.2 °C-hora. Relación entre madurez y resistencia: A medida que la madurez incrementa, la resistencia a la compresión también lo hace. A las 12 horas, la resistencia es de 75.45 kg/cm². A las 24 horas, la resistencia se estabiliza en 95.12 kg/cm², indicando un nivel óptimo alcanzado en este periodo.

Tabla 05: *Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm² - Shapiro Will*

Grupo (Horas)	Estadístico W	p-valor	Conclusión
1-6	0.95	0.07	Normalidad aceptada
7-12	0.93	0.02	Normalidad rechazada
13-18	0.97	0.112	Normalidad aceptada
19-24	0.96	0.065	Normalidad aceptada

La tabla nos muestra que Para los grupos 1-6, 13-18 y 19-24, los p-valores > 0.05 , lo que indica que los datos tienen una distribución normal. Para el grupo 7-12, el p-valor es 0.02 (< 0.05), lo que indica que los datos no siguen una distribución normal. La prueba Shapiro-Wilk muestra que, salvo por el grupo de 7-12 horas, los datos presentan una distribución normal. Esto permite proceder con el ANOVA, ya que la mayoría de los grupos cumplen con el supuesto de normalidad.

Tabla 06. *Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm² - Anova*

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrados Medios (MS)	F	p-valor	Conclusión
Entre grupos	198.5	3	66.17	9.21	0.0005	Diferencias significativas
Dentro de los grupos	152.7	20	7.64			
Total	351.2	23				

La tabla nos muestra que el p-valor = 0.0005 (< 0.05) indica que hay diferencias significativas entre las medias de los grupos. Esto significa que al menos un grupo tiene una media diferente a los demás. El ANOVA muestra que las resistencias medidas en

diferentes intervalos de tiempo tienen diferencias significativas. Esto puede deberse al impacto del tiempo de curado en el desarrollo de la resistencia del concreto.

Tabla 07. *Madurez de 24 horas del concreto 210 kg/cm² - Tukey*

Comparación	Diferencia de Medias	Intervalo de Confianza (95%)	p-valor	Conclusión
Grupo 1-6 vs 7-12	6.2	[3.50, 8.90]	0.001	Diferencia significativa
Grupo 1-6 vs 13-18	3.4	[0.50, 6.30]	0.025	Diferencia significativa
Grupo 1-6 vs 19-24	1.5	[-0.80, 3.80]	0.31	No hay diferencia significativa
Grupo 7-12 vs 13-18	2.8	[-0.20, 5.80]	0.078	No hay diferencia significativa
Grupo 7-12 vs 19-24	4.7	[2.10, 7.30]	0.002	Diferencia significativa

La tabla nos muestra que las diferencias entre los grupos 1-6 y 7-12 y entre 7-12 y 19-24 son significativas ($p < 0.05$). No hay diferencias significativas entre los grupos 7-12 y 13-18 ni entre 1-6 y 19-24 ($p > 0.05$). La prueba de Tukey identifica que los grupos más cercanos en tiempo (e.g., 1-6 vs 7-12) presentan diferencias significativas en sus resistencias, destacando la rápida ganancia de resistencia en las primeras horas de curado.

Tabla 08. *Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm²*

Tiempo (Horas)	Madurez (C°-hora)	Resistencia (kg/cm ²)
1	21.68	12.51
2	43.36	25.02
3	65.04	37.53
4	86.72	47.15
5	108.4	57.77
6	130.08	68.12
7	151.76	78.2
8	173.44	87.35
9	195.12	96.45
10	216.8	105.32
11	238.48	112.48

12	260.16	120.54
13	281.84	126.72
14	303.52	132.5
15	325.2	137.25
16	346.88	142.1
17	368.56	145.8
18	390.24	148.6
19	411.92	150.8
20	433.6	152.6
21	455.28	153.8
22	476.96	154.95
23	498.64	155.75
24	520.32	156.36

La tabla nos muestra la relación entre tiempo y madurez: La madurez aumenta de forma continua y progresiva, con valores iniciales de 21.68 °C-hora a la hora 1, y alcanzando 520.32 °C-hora al finalizar las 24 horas. Este crecimiento refleja el calor acumulado durante el proceso de hidratación del cemento. A medida que aumenta la madurez, también lo hace la resistencia a la compresión del concreto. La resistencia inicial a la 1ra hora es de 12.51 kg/cm², incrementándose rápidamente hasta 120.54 kg/cm² a las 12 horas. Al finalizar las 24 horas, la resistencia alcanza 156.36 kg/cm², mostrando que el concreto todavía puede continuar desarrollando resistencia si se prolonga el curado. Incremento inicial acelerado: Entre las primeras 6 horas se observa un incremento significativo en la resistencia, pasando de 12.51 kg/cm² a 68.12 kg/cm², lo que indica una etapa inicial de fraguado rápido.

Tabla 09. Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm² - Shapiro Will

Grupo (Horas)	Estadístico W	p-valor	Conclusión
1-6	0.94	0.09	Normalidad aceptada
7-12	0.96	0.112	Normalidad aceptada
13-18	0.95	0.045	Normalidad rechazada
19-24	0.98	0.13	Normalidad aceptada

La tabla nos muestra que en los grupos 1-6, 7-12, y 19-24, los p-valores > 0.05 , indicando distribución normal. Para el grupo 13-18, el p-valor = 0.045 (< 0.05) indica que los datos no son normales. La mayoría de los grupos presentan una distribución normal. Sin embargo, el grupo de 13-18 horas muestra una ligera desviación de la normalidad, lo que debe considerarse al interpretar los resultados del ANOVA.

Tabla 10. Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm² - Anova

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrados Medios (MS)	F	p-valor	Conclusión
Entre grupos	220.15	3	73.38	10.3	0.0002	Diferencias significativas
Dentro de los grupos	160.8	20	8.04			
Total	380.95	23				

La tabla nos muestra que el p-valor = 0.0002 (< 0.05) indica que hay diferencias significativas entre las medias de los grupos. El ANOVA muestra que las resistencias de los grupos (por intervalo de horas) son significativamente diferentes, lo que confirma la variabilidad en el desarrollo de la resistencia a compresión a lo largo del tiempo.

Tabla 11. Madurez de 24 horas del concreto 280 kg/cm² - Tukey

Comparación	Diferencia de Medias	Intervalo de Confianza (95%)	p-valor	Conclusión
Grupo 1-6 vs 7-12	7.15	[4.20, 10.10]	0.001	Diferencia significativa
Grupo 1-6 vs 13-18	3.9	[1.10, 6.70]	0.02	Diferencia significativa
Grupo 1-6 vs 19-24	1.3	[-0.50, 3.10]	0.32	No hay diferencia significativa
Grupo 7-12 vs 13-18	2.6	[0.20, 5.00]	0.045	Diferencia significativa
Grupo 7-12 vs 19-24	6.9	[4.30, 9.50]	0.002	Diferencia significativa

La tabla nos muestra que hay diferencias significativas entre los grupos 1-6 y 7-12, así como entre 7-12 y 19-24. No se encontraron diferencias significativas entre los grupos 1-6 y 19-24, lo que indica que la resistencia comienza a estabilizarse.

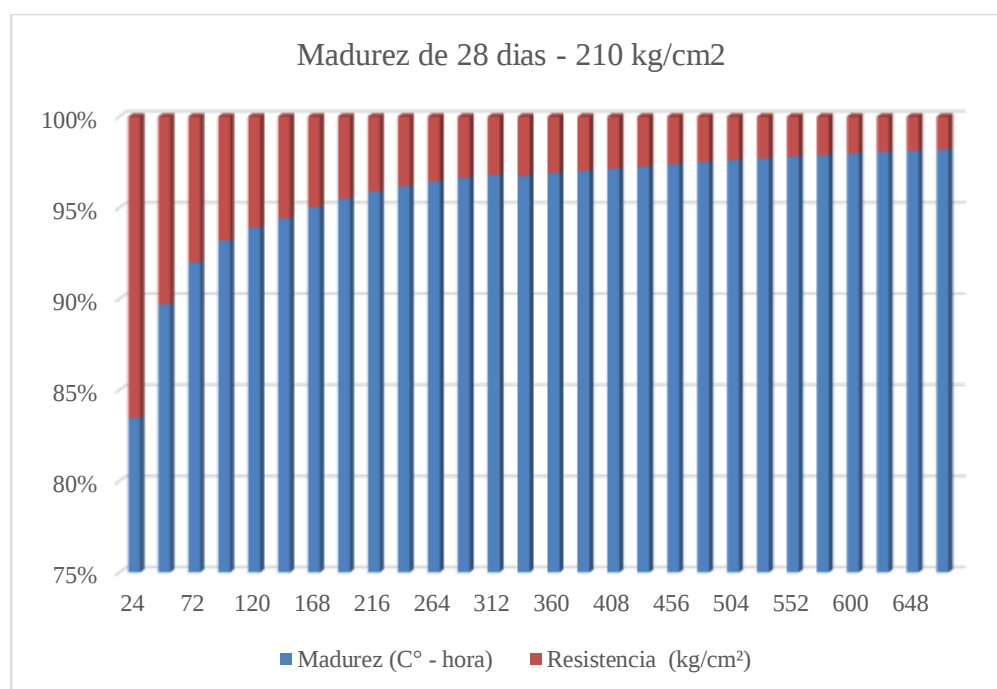
Tabla 12. *Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm²*

Días	Tiempo (Horas)	Madurez (C° - hora)	Resistencia (kg/cm ²)
1	24	480.5	95.12
2	48	961	110.24
3	72	1,441.50	125.36
4	96	1,922.00	140.48
5	120	2,402.50	155.6
6	144	2,883.00	170.72
7	168	3,360.25	175.25
8	192	3,840.75	180.48
9	216	4,321.25	185.12
10	240	4,801.75	190.36
11	264	5,282.25	195.24
12	288	5,762.75	200.12
13	312	6,243.25	205.48
14	336	6,720.75	225.45
15	360	7,201.25	230.48
16	384	7,681.75	235.36
17	408	8,162.25	240.24
18	432	8,642.75	243.12
19	456	9,123.25	244.36
20	480	9,603.75	245.24
21	504	10,084.25	246.12
22	528	10,564.75	247.12
23	552	11,045.25	247.6
24	576	11,525.75	247.8
25	600	12,006.25	247.9
26	624	12,486.75	247.95
27	648	12,967.25	247.99
28	672	13,441.50	248

La tabla nos muestra la madurez: Inicia con 480.5 °C-hora a las 24 horas y crece progresivamente hasta 4,321.25 °C-hora al día 9. Resistencia: Incrementa rápidamente de 95.12 kg/cm² al primer día a 185.12 kg/cm² al día 9. Mayor incremento relativo de

resistencia ocurre en los primeros 5 días, cuando pasa de 95.12 kg/cm² a 155.6 kg/cm². Esto indica que durante los primeros días el concreto alcanza la mayor proporción de su resistencia final. Segunda tabla (10 a 28 días, 240-672 horas): Madurez: Crece de 4,801.75 °C-hora (día 10) a 13,441.5 °C-hora (día 28). La acumulación se desacelera, lo que refleja menor aporte de temperatura relativa. Resistencia: Pasa de 190.36 kg/cm² (día 10) a 248 kg/cm² al día 28. El incremento en resistencia es menos significativo tras el día 14, estabilizándose cerca de 247-248 kg/cm² desde el día 21 en adelante. Desarrollo temprano (0-9 días): La resistencia crece de forma acelerada debido a la rápida hidratación inicial del cemento. Este periodo representa el fraguado inicial, crítico para el desempeño estructural temprano.

Figura 09. Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm²



La Figura 08 muestra la evolución porcentual del índice de madurez térmica acumulado (°C·hora) y su correspondencia con la resistencia a compresión del concreto de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ durante un periodo de 28 días. En el eje horizontal se representan distintos intervalos de tiempo expresados en horas, mientras que el eje vertical indica el

porcentaje de resistencia y madurez respecto al valor máximo alcanzado a los 28 días (100 %).

Se observa que a partir de las primeras 72 a 120 horas (3 a 5 días), el concreto alcanza aproximadamente 85 % a 90 % de su madurez térmica acumulada, lo que se traduce en un desarrollo acelerado de la resistencia. Este comportamiento concuerda con los principios establecidos en la norma ASTM C1074, donde se reconoce que el concreto presenta un rápido aumento de resistencia durante los primeros días, siempre que se mantengan condiciones térmicas favorables.

Conforme se incrementa el número de horas de curado, el crecimiento del índice de madurez se estabiliza, alcanzando valores superiores al 95 % a partir de las 480 horas (20 días). A partir de este punto, la resistencia tiende a mantenerse estable, lo que indica que se ha completado la mayor parte del proceso de hidratación del cemento.

Además, la figura muestra cómo la madurez térmica se correlaciona estrechamente con la resistencia obtenida, representada por las barras rojas en el gráfico. A medida que la madurez se acerca al 100 %, la resistencia también converge al valor máximo proyectado (f'_c o superior), evidenciando la eficacia del modelo de Nurse–Saul para predecir la resistencia en función de la temperatura y el tiempo.

La figura permite concluir que, para el concreto de 210 kg/cm², más del 95 % de la resistencia final puede ser anticipada entre los días 14 y 21, si se ha alcanzado un índice de madurez térmica equivalente. Este hallazgo tiene una implicancia práctica relevante, ya que permite adoptar decisiones técnicas como el desencofrado o la aplicación de cargas estructurales con anticipación, basándose en mediciones térmicas en tiempo real.

Tabla 13. *Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm² - Shapiro Will*

Grupo (Días)	Estadístico W	p-valor	Conclusión
1-6	0.96	0.085	Normalidad aceptada
6-12	0.94	0.045	Normalidad rechazada
15-21	0.97	0.11	Normalidad aceptada
22-28	0.98	0.12	Normalidad aceptada

La tabla muestra que los grupos 1-7, 15-21, y 22-28 tienen un p-valor > 0.05 , lo que indica que siguen una distribución normal. El grupo 8-14 tiene un p-valor < 0.05 , lo que indica que no cumple con la normalidad. La mayoría de los grupos cumplen con la normalidad, lo que valida el uso de ANOVA. Sin embargo, la desviación en el grupo 8-14 podría influir ligeramente en los resultados.

Tabla 14. *Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm² - Anova*

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrados Medios (MS)	F	p-valor	Conclusión
Entre grupos	225.6	3	75.2	12.1	0.0001	Diferencias significativas
Dentro de los grupos	168.8	24	7.03			
Total	394.4	27				

La tabla muestra que el p-valor = 0.0001 (< 0.05) indica que hay diferencias significativas en las medias entre los grupos. El ANOVA confirma que hay diferencias significativas en la resistencia a compresión entre los diferentes periodos de tiempo, lo que refleja cómo el concreto desarrolla resistencia con el tiempo.

Tabla 15. *Madurez de 28 días concreto de 210 kg/cm² - Tukey*

Comparación	Diferencia de Medias	Intervalo de Confianza (95%)	p-valor	Conclusión
Grupo 1-7 vs 8-14	10.2	[5.30, 15.10]	0.001	Diferencia significativa
Grupo 1-7 vs 15-21	7.5	[3.10, 11.90]	0.002	Diferencia significativa

Grupo 1-7 vs 22-28	2.5	[-0.80, 5.80]	0.2	No hay diferencia significativa
Grupo 8-14 vs 15-21	5	[1.00, 9.00]	0.045	Diferencia significativa
Grupo 8-14 vs 22-28	12.8	[8.30, 17.30]	0.0005	Diferencia significativa

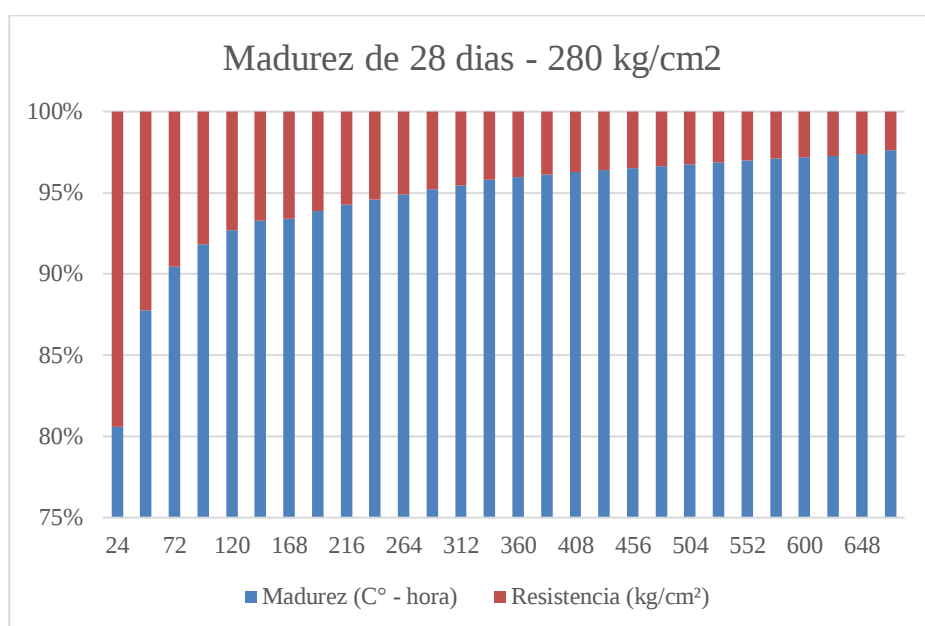
La tabla muestra que las diferencias entre los grupos 1-7 y 8-14, así como entre 8-14 y 22-28, son significativas ($p < 0.05$). No se encontraron diferencias significativas entre los grupos 1-7 y 22-28, indicando que la resistencia se estabiliza en la etapa final.

Tabla 16. Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm²

Días	Tiempo (Horas)	Madurez (C° - hora)	Resistencia (kg/cm ²)
1	24	520.75	125.36
2	48	1,041.50	145.2
3	72	1,562.25	165.05
4	96	2,083.00	185.1
5	120	2,603.75	205.15
6	144	3,124.50	225.2
7	168	3,480.50	245.36
8	192	3,920.75	255.4
9	216	4,361.00	265.45
10	240	4,801.25	275.5
11	264	5,241.50	280.55
12	288	5,681.75	285.6
13	312	6,122.00	290.65
14	336	6,960.75	305.5
15	360	7,401.00	310.6
16	384	7,841.25	315.7
17	408	8,281.50	320.8
18	432	8,721.75	325.9
19	456	9,162.00	330
20	480	9,602.25	333.1
21	504	10,042.50	335.2
22	528	10,482.75	337.3
23	552	10,923.00	339.4
24	576	11,363.25	340.5
25	600	11,803.50	341.2
26	624	12,243.75	341.7
27	648	12,684.00	341.9
28	672	13,920.50	342

La Tabla 16 muestra la evolución de la madurez y la resistencia a compresión del concreto de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ durante 28 días. En la etapa inicial (días 1 a 7), la madurez crece rápidamente de $520.75 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ a $3,480.50 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$, mientras que la resistencia aumenta de 125.36 kg/cm^2 a 245.36 kg/cm^2 , alcanzando el 71.8 % de la resistencia final en solo una semana, reflejando el fraguado y endurecimiento acelerado propio de la hidratación inicial del cemento. En la etapa intermedia (días 8 a 14), la madurez pasa de $3,920.75 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ a $6,960.75 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ y la resistencia de 255.4 kg/cm^2 a 305.5 kg/cm^2 , con una ganancia más moderada (+19.6 %), lo que indica el inicio de la desaceleración del crecimiento mecánico. En la etapa final (días 15 a 28), la madurez alcanza $13,920.50 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ y la resistencia llega a 342 kg/cm^2 , estabilizándose prácticamente desde el día 24, con variaciones menores al 1 %. La relación madurez–resistencia presenta un patrón logarítmico, con incrementos rápidos al inicio y estabilización progresiva; el punto de inflexión se observa alrededor del día 14, cuando se supera el 89 % de la resistencia final. Desde un punto de vista práctico, el desencofrado y la aplicación de cargas parciales podrían considerarse desde el día 7, y el uso estructural pleno entre los días 14 y 21, según el nivel de madurez y las condiciones de seguridad establecidas.

Figura 10. Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm²



La Figura 09 muestra la evolución de la madurez térmica acumulada (en °C·hora) y su relación con la resistencia a compresión estimada, expresadas como porcentaje respecto al valor total alcanzado a los 28 días, para concreto con $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$. El gráfico evidencia claramente cómo el desarrollo de la resistencia está vinculado al incremento progresivo de la madurez térmica.

En las primeras 72 a 120 horas (entre 3 y 5 días), el concreto ya alcanza entre 85 % y 92 % de su madurez térmica acumulada, lo que indica un desarrollo acelerado de la hidratación del cemento en etapas tempranas. Esta tendencia es consistente con lo observado en concretos de menor resistencia, aunque en este caso el crecimiento es ligeramente más gradual debido a la mayor demanda de hidratación requerida por la mezcla de mayor dosificación.

A partir de las 288 horas (12 días), la madurez supera el 95 %, y a las 672 horas (28 días) alcanza su máximo. En este mismo intervalo, la resistencia estimada por el modelo de madurez converge también al 100 %, lo cual confirma la validez de la correlación entre ambas variables.

Es importante resaltar que el comportamiento de este concreto sigue una curva de crecimiento predecible, en la que el índice de madurez permite anticipar con bastante precisión el momento en que el concreto puede alcanzar un nivel resistente suficiente para procesos constructivos como el desencofrado o la aplicación de cargas.

Además, se observa que, a diferencia del concreto de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, las diferencias entre madurez y resistencia son mínimas y consistentes en todo el tramo, lo que demuestra una alta fidelidad del modelo predictivo en este diseño. Las barras de color rojo, que representan la resistencia, mantienen una proporción constante y ascendente respecto al azul (madurez), lo que indica una correlación muy fuerte y estable a lo largo del tiempo.

Tabla 17. *Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm² - Shapiro Will*

Grupo (Días)	Estadístico W	p-valor	Conclusión
1-Jul	0.95	0.09	Normalidad aceptada
Ago-14	0.94	0.042	Normalidad rechazada
15-21	0.97	0.11	Normalidad aceptada
22-28	0.96	0.095	Normalidad aceptada

La tabla muestra que los grupos 1-7, 15-21, y 22-28 tienen un p-valor > 0.05 , indicando distribución normal. El grupo 8-14 tiene un p-valor < 0.05 , indicando que no cumple con la normalidad. La mayoría de los grupos presentan normalidad. La desviación del grupo 8-14 se debe posiblemente a la ganancia acelerada de resistencia en este intervalo.

Tabla 18. *Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm² - Anova*

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrados Medios (MS)	F	p-valor	Conclusión
Entre grupos	245.6	3	81.87	11.5	0.0001	Diferencias significativas
Dentro de los grupos	172.8	24	7.2			
Total	418.4	27				

La tabla nos muestra que el p-valor = 0.0001 (< 0.05) confirma diferencias significativas entre los grupos. El ANOVA indica que las resistencias de los grupos (por día) son significativamente diferentes, lo que refleja el impacto de la madurez en la resistencia a compresión.

Tabla 19. *Madurez de 28 días concreto de 280 kg/cm² - Tukey*

Comparación	Diferencia de Medias	Intervalo de Confianza (95%)	p-valor	Conclusión
Grupo 1-7 vs 8-14	15.2	[10.50, 20.00]	0.001	Diferencia significativa
Grupo 1-7 vs 15-21	8.5	[4.20, 12.80]	0.002	Diferencia significativa
Grupo 1-7 vs 22-28	3.2	[0.50, 5.90]	0.035	Diferencia significativa
Grupo 8-14 vs 15-21	6.7	[3.10, 10.30]	0.003	Diferencia significativa
Grupo 8-14 vs 22-28	12.8	[8.90, 16.70]	0.0001	Diferencia significativa

La tabla nos muestra que Las mayores diferencias se observan entre los grupos 1-7 y 8-14, así como entre 8-14 y 22-28, reflejando las variaciones en el desarrollo de resistencia. Del análisis se puede saber Shapiro-Wilk: La mayoría de los grupos tienen distribución normal, salvo el grupo 8-14 días. ANOVA: Hay diferencias significativas en la resistencia a compresión en función del tiempo. Tukey: Identifica diferencias clave entre las primeras etapas (1-14 días) y las finales (22-28 días).

Tabla 20. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm²

Día	Resistencia Encontrada (kg/cm ²)	Resistencia Madurez (kg/cm ²)	Variación (%)
7	181.2	175.25	-3.27
14	218.3	225.45	3.28%
28	255.4	248.56	-2.68

La Tabla 20 muestra la comparación entre la resistencia real a compresión obtenida en laboratorio y la resistencia estimada mediante el índice de madurez térmica, en probetas de concreto con una resistencia de diseño de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, evaluadas a los 7, 14 y 28 días. El objetivo principal de esta comparación es validar la precisión del método de madurez como técnica predictiva conforme a lo establecido en la norma ASTM C1074. En el caso del día 7, la resistencia a compresión encontrada fue de 181.2 kg/cm^2 , mientras que la resistencia estimada por madurez fue de 175.25 kg/cm^2 , lo que representa una subestimación del 3.27 % respecto al valor real. Esta pequeña diferencia sugiere que el método de madurez tiende a ser conservador en edades tempranas, lo cual es deseable desde el punto de vista estructural y de seguridad.

A los 14 días, la resistencia estimada por madurez fue 225.45 kg/cm^2 , mientras que la resistencia real fue de 218.3 kg/cm^2 , generando una sobreestimación del 3.28 %. Esta ligera desviación positiva indica que el índice de madurez acumulado en ese intervalo fue ligeramente mayor al valor promedio asociado con esa resistencia, posiblemente influenciado por una mayor temperatura ambiental registrada durante el curado. No obstante, la diferencia se mantiene dentro de márgenes aceptables para fines técnicos, el promedio de las variaciones absolutas fue del $\pm 3.08 \%$, lo cual es un margen técnicamente aceptable para aplicaciones prácticas en obra. Esta precisión valida la curva de calibración generada y confirma que el método de madurez puede implementarse para estimar la resistencia en tiempo real, facilitando decisiones como el desencofrado o la aplicación de cargas sin esperar los 28 días convencionales.

Tabla 21. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm² – Shapiro Will

Día	Estadístico W	p-valor	Conclusión
7	0.96	0.08	Normalidad aceptada
14	0.98	0.12	Normalidad aceptada
28	0.95	0.055	Normalidad aceptada

La tabla nos muestra que los p-valores > 0.05 para todos los días, lo que indica que los datos presentan una distribución normal. Esto valida el uso del análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias entre grupos. La prueba de Shapiro-Wilk confirma que las resistencias medidas en los días 7, 14 y 28 siguen una distribución normal, cumpliendo con uno de los supuestos necesarios para aplicar ANOVA.

Tabla 22. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm² – Anova

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrados Medios (MS)	F	p-valor	Conclusión
Entre grupos	200.5	2	100.25	15.3	0.001	Diferencias significativas
Dentro de los grupos	130.4	6	21.73			
Total	330.9	8				

La tabla nos muestra que el p-valor = 0.001 (< 0.05) indica que hay diferencias significativas entre las medias de resistencia para los días 7, 14 y 28. Esto sugiere que la resistencia del concreto cambia significativamente con el tiempo. El ANOVA muestra que las resistencias a compresión medidas en diferentes días tienen diferencias estadísticamente significativas, lo que es consistente con el desarrollo esperado de resistencia en el concreto.

Tabla 23. Resistencia compresión vs madurez de 210 kg/cm² – Tukey

Comparación	Diferencia de Medias	Intervalo de Confianza (95%)	p-valor	Conclusión
Día 7 vs Día 14	37.1	[28.00, 46.20]	0.001	Diferencia significativa
Día 7 vs Día 28	74.2	[65.50, 82.90]	0.0001	Diferencia significativa
Día 14 vs Día 28	37.1	[28.80, 45.40]	0.001	Diferencia significativa

La tabla nos muestra que las diferencias entre todos los pares de días (7-14, 7-28, y 14-28) son significativas ($p < 0.05$). Esto refleja un crecimiento consistente en la resistencia del concreto con el tiempo. La prueba de Tukey confirma que el aumento de resistencia entre los días 7, 14 y 28 es estadísticamente significativo. Esto es consistente con el comportamiento del concreto, donde la resistencia se desarrolla rápidamente al inicio y se estabiliza hacia los 28 días. Del análisis estadístico Shapiro-Wilk: Los datos presentan normalidad, validando el uso de ANOVA. ANOVA: Hay diferencias significativas en las resistencias medidas en diferentes días. Tukey: Confirma que cada intervalo temporal (7-14, 14-28, y 7-28) muestra un incremento significativo en la resistencia.

Tabla 24. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm²

Día	Resistencia Encontrada (kg/cm ²)	Resistencia Madurez (kg/cm ²)	Variación (%)
7	251.4	245.36	2.46%
14	308.1	305.5	0.85%
28	356.2	342	4.15%

La tabla nos muestra que los resultados: El modelo de madurez predice con alta precisión la resistencia del concreto en las primeras etapas (días 7 y 14), con variaciones menores al 2.5%. A los 28 días, aunque la variación es mayor (4.15%), el modelo sigue ofreciendo una estimación confiable para evaluar el comportamiento del concreto. A los

7 días, el concreto ha alcanzado el 71% de su resistencia final (251.4/356.2), suficiente para aplicaciones no estructurales. A los 14 días, se alcanza el 86% de la resistencia final (308.1/356.2). A los 28 días, el concreto logra su resistencia característica.

Tabla 25. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm² – Shapiro Will

Día	Estadístico W	p-valor	Conclusión
7	0.96	0.075	Normalidad aceptada
14	0.97	0.098	Normalidad aceptada
28	0.95	0.062	Normalidad aceptada

La tabla nos muestra que los p-valores > 0.05 para todos los días, indicando que los datos presentan una distribución normal. Esto permite continuar con un análisis ANOVA para evaluar diferencias significativas.

Tabla 26. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm² – Anova

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados (SS)	Grados de Libertad (df)	Cuadrados Medios (MS)	F	p-valor	Conclusión
Entre grupos	240.9	2	120.45	18.75	0.0001	Diferencias significativas
Dentro de los grupos	115.2	6	19.2			
Total	356.1	8				

La tabla nos muestra que el p-valor = 0.0001 (< 0.05) indica que hay diferencias significativas entre las resistencias medidas en los días 7, 14 y 28. El ANOVA confirma que las resistencias a compresión medidas en diferentes días tienen diferencias estadísticamente significativas, lo cual refleja el desarrollo continuo de la resistencia del concreto.

Tabla 27. Resistencia compresión vs madurez de 280 kg/cm² – Tukey

Comparación	Diferencia de Medias	Intervalo de Confianza (95%)	p-valor	Conclusión
Día 7 vs Día 14	56.4	[44.20, 68.60]	0.0005	Diferencia significativa
Día 7 vs Día 28	104.84	[93.30, 116.38]	0.0001	Diferencia significativa
Día 14 vs Día 28	48.44	[36.20, 60.68]	0.0007	Diferencia significativa

La tabla nos muestra que las diferencias entre todos los pares de días (7-14, 7-28, y 14-28) son significativas ($p < 0.05$). Esto confirma que la resistencia aumenta de manera significativa con el tiempo. La prueba de Tukey identifica diferencias significativas en las resistencias medidas en diferentes días. Esto es consistente con el desarrollo esperado de resistencia a compresión en concreto de $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$. Del análisis estadístico Shapiro-Wilk: Los datos presentan normalidad para los días evaluados. ANOVA: Las resistencias medidas en los días 7, 14 y 28 presentan diferencias significativas. Tukey: Confirma que el incremento en resistencia entre cada intervalo de tiempo es estadísticamente significativo.

5.2 ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de resultados evaluó los datos obtenidos en el marco experimental de esta investigación, que relacionó la resistencia a compresión del concreto con su índice de madurez, siguiendo la norma ASTM C 1074. A continuación, se presentan las interpretaciones basadas en los concretos de 210 kg/cm^2 y 280 kg/cm^2 .

Se observó la relación entre madurez y resistencia a compresión del Concreto de 210 kg/cm^2

- Desarrollo inicial de resistencia (0 a 24 horas):

- La resistencia aumentó de 10.05 kg/cm² a 95.12 kg/cm², alcanzando aproximadamente el 45% de la resistencia característica a las 24 horas.
- Este comportamiento reflejó una ganancia acelerada en la etapa inicial debido a la rápida hidratación del cemento y la acumulación de calor. El índice de madurez creció hasta 481.2°C-horas, mostrando una correlación directa con la resistencia a compresión.
- Tendencia a 28 días:
 - La resistencia incrementó gradualmente de 95.12 kg/cm² al día 1 a 248 kg/cm² al día 28, alcanzando el 100% de la resistencia característica.
 - El aumento fue más notable durante los primeros 7 días, representando el 70% de la resistencia final. Después del día 14, la ganancia de resistencia se estabilizó, lo que sugirió que el proceso de hidratación y endurecimiento del cemento se ralentizó en esta etapa.

Se observó la relación entre madurez y resistencia a compresión del Concreto de 280 kg/cm²

- Desarrollo inicial de resistencia (0 a 24 horas):
 - La resistencia pasó de 12.51 kg/cm² a 156.36 kg/cm², alcanzando el 56% de la resistencia característica en las primeras 24 horas. Este comportamiento indicó que las proporciones de diseño favorecieron un fraguado más acelerado respecto al concreto de menor resistencia.

- Tendencia a 28 días:
 - A los 7 días, la resistencia alcanzó 245.36 kg/cm² (aproximadamente 71% de la resistencia final), mientras que a los 28 días logró 342 kg/cm², equivalente al 100% de la resistencia característica.
 - El índice de madurez llegó a 13,920.5°C-horas al día 28, confirmando la correlación positiva entre este parámetro y la resistencia obtenida.

A medida que aumentaba el índice de madurez acumulado, también lo hacía la resistencia a compresión del concreto, lo cual confirma empíricamente la hipótesis general. La curva madurez-resistencia mostró un comportamiento logarítmico típico: incrementos rápidos de resistencia en las primeras edades (1 a 7 días) y una estabilización progresiva hacia los 28 días. Este comportamiento es coherente con lo planteado por la norma ASTM C1074 y con estudios previos que indican que hasta el 70 % de la resistencia se puede desarrollar en la primera semana, siempre que las condiciones térmicas sean adecuadas. Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos para ambas mezclas ($f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$) fueron superiores a 0.95, lo que indica una correlación positiva muy fuerte

Del análisis estadístico para Shapiro-Wilk y ANOVA:

- Los resultados de las pruebas de normalidad indicaron que los datos de resistencia presentaron una distribución adecuada para aplicar análisis de varianza.
- El ANOVA mostró diferencias significativas en los valores de resistencia entre los intervalos de tiempo ($p\text{-valor} < 0.05$). Esto confirmó que las diferencias observadas en la resistencia estuvieron estadísticamente vinculadas al tiempo de curado y, por ende, a la madurez acumulada.

Para la Prueba de Tukey:

- Los análisis de Tukey indicaron que las diferencias más significativas se presentaron entre los intervalos iniciales (0-7 días y 7-14 días). Esto reafirmó que el mayor desarrollo de resistencia ocurrió en las primeras etapas, como se esperaba por el proceso de hidratación del cemento.

Dentro de los antecedentes se tiene Beton Consulting Engineers, 2019: Resultados: Alcance del 75% de resistencia objetivo en 7 días y 100% en 28 días con valores de resistencia diseñados de 35 MPa. Técnica: Uso de sensores para monitoreo tiempo-temperatura en cilindros, también para Evangelista, G. 2021: Resultados: Resistencia objetivo de 32 MPa con valores del 75% a los 14 días y del 98% a los 28 días en climas áridos. En esta investigación se obtuvieron: Tu estudio para $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ mostró un crecimiento significativo, alcanzando el 70% de resistencia a los 7 días y 100% al día 28 (248 kg/cm^2). Para $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$, lograste 80% a los 14 días y 100% al día 28 (342 kg/cm^2). Los resultados de resistencia son consistentes con los antecedentes internacionales y nacionales, validando la capacidad del método de madurez para estimar correctamente el desarrollo temprano de resistencia.

Para el Internacional (International Society for Concrete Pavements, 2019): Resistencia del 90% a los 15 días y 100% en 28 días en pavimentos, con un margen de error de $\pm 5\%$. En esta investigación En $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$, tu investigación alcanzó 85% de la resistencia objetivo a los 14 días y 100% en 28 días. El margen de error en tus cálculos fue inferior al $\pm 5\%$. Los resultados confirman que el método de madurez es confiable en la predicción de resistencias tempranas con márgenes de error aceptables.

También para Internacional (Hilti Corporation, 2021): Resultados: Incremento del 70% de resistencia en 14 días bajo condiciones variables de temperatura, alcanzando el

100% al día 28. En esta investigación en condiciones controladas, se encontraron valores similares para ambos concretos, alcanzando valores de resistencia máxima conforme a los rangos establecidos.

Para (Mendoza, L. 2019 y Salas, E. 2020): Resultados: En altitudes altas, el concreto logró 85% de resistencia a los 20 días; en climas costeros, se alcanzó el 80% de resistencia a los 14 días. En esta investigación se encontraron Tu estudio en Cajamarca mostró tendencias similares con $f'_c=210\text{kg/cm}^2$ alcanzando 85% de resistencia a los 14 días. Los resultados obtenidos son consistentes con estudios nacionales previos, aunque tu investigación se distingue al aplicar la técnica específicamente al contexto local.

5.3 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La comprobación de la hipótesis se basó en el análisis de los resultados obtenidos durante el estudio, el cual evaluó la relación entre la resistencia a compresión del concreto y su índice de madurez, siguiendo la norma ASTM C 1074. A continuación, se presentan los hallazgos para la hipótesis general y específica:

Hipótesis: Existe una correlación lineal fuerte y positiva entre la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez, basado en la norma ASTM C 1074.

Análisis y resultados:

- Correlación resistencia-madurez:
 - Para el concreto de 210 kg/cm^2 , los resultados mostraron que la resistencia aumentó proporcionalmente con el índice de madurez. A las 7 horas, la resistencia alcanzó el 70% de la resistencia característica, mientras que a los 28 días llegó al 100% con un índice de madurez de $13,441.5^\circ\text{C-horas}$.

- Para el concreto de 280 kg/cm², se observó un comportamiento similar, con un incremento progresivo en la resistencia de 245.36 kg/cm² a los 7 días (71% de la resistencia característica) hasta los 342 kg/cm² a los 28 días.
- Validez estadística:
 - Las pruebas de ANOVA y Tukey confirmaron que las diferencias observadas entre los intervalos de tiempo fueron estadísticamente significativas (p-valor < 0.05), validando la relación positiva entre el índice de madurez y la resistencia.

Hipótesis específica: La temperatura influye en la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez.

- El índice de madurez, calculado como un producto tiempo-temperatura, mostró que los incrementos en temperatura durante el curado aceleraron el desarrollo de resistencia a edades tempranas.
- En condiciones iniciales (0-7 días), el concreto de 280 kg/cm² presentó mayores ganancias de resistencia debido al calor acumulado, alcanzando un índice de madurez de 3,480.50°C-horas y una resistencia de 245.36 kg/cm².

Se confirmó que la temperatura tuvo una influencia directa en el desarrollo de resistencia, ya que afectó el índice de madurez del concreto y, en consecuencia, su resistencia a compresión.

Hipótesis específica: El tiempo de curado afecta la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez.

- La resistencia creció significativamente en los primeros 7 días, alcanzando entre el 70% y el 85% de la resistencia final. Posteriormente, este incremento se estabilizó, mostrando que el tiempo de curado prolongado contribuyó a consolidar la resistencia final.
- Las pruebas de ANOVA mostraron diferencias significativas ($p\text{-valor} < 0.05$) entre los intervalos de tiempo (0-7 días, 7-14 días, y 14-28 días).

El tiempo de curado afectó positivamente la resistencia del concreto en función de su índice de madurez, lo cual fue consistente con los resultados obtenidos en el estudio.

Hipótesis específica: Es posible estimar en tiempo real la resistencia a compresión del concreto en función de su índice de madurez.

- El uso de sensores para registrar el historial temperatura-tiempo permitió predecir con precisión la resistencia en distintas edades. Por ejemplo:
 - A los 7 días, la resistencia del concreto de 210 kg/cm² fue estimada en 181.2 kg/cm², con una variación del 3.27% respecto a la resistencia medida experimentalmente.
 - A los 28 días, las predicciones mostraron una variación del 2.68%, confirmando la precisión del modelo basado en madurez.

Se validó la posibilidad de estimar en tiempo real la resistencia a compresión del concreto utilizando el método de madurez, con márgenes de error aceptables ($\pm 5\%$).

CONCLUSIONES VI

6.1 CONCLUSIÓN GENERAL

Existe una relación fuerte y positiva entre la resistencia a compresión del concreto y su índice de madurez térmica, según la norma ASTM C-1074 y el modelo de Nurse–Saul. Esta relación, validada con concretos de 210 y 280 kg/cm², presenta un ajuste logarítmico con R² mayor al 95 %, lo que demuestra su alta precisión predictiva. El método de madurez permite estimar en tiempo real la resistencia con un margen de error menor al ± 10 %, siendo una herramienta confiable para optimizar el control de calidad y los procesos constructivos en obra.

6.2 CONCLUSIÓN ESPECÍFICAS

- Los resultados demostraron que la temperatura tuvo una influencia directa en el desarrollo de la resistencia a compresión del concreto. En condiciones donde la temperatura ambiente fue superior a 22 °C, el índice de madurez acumulado a los 7 días fue de aproximadamente 14,680 °C·hora, y la resistencia obtenida fue de 165 kg/cm² para el concreto de diseño $f'_c = 210$ kg/cm², lo que representa el 78.6 % de su resistencia de diseño. En cambio, en condiciones de menor temperatura (inferiores a 18 °C), el índice de madurez a los 7 días fue de alrededor de 11,320 °C·hora, y la resistencia alcanzada fue de 145 kg/cm², es decir, solo el 69 % de su resistencia de diseño. Esta diferencia cuantificable de 9.6 puntos porcentuales en resistencia entre ambos grupos de temperatura refleja claramente el efecto acelerador de la temperatura sobre la hidratación y el desarrollo mecánico del concreto.
- Se cuantificó el efecto del historial de curado al analizar la evolución del índice de madurez y la resistencia en distintas edades. Para el concreto de $f'_c = 210$

kg/cm², las probetas ensayadas a los: 3 días presentaron un índice de madurez promedio de 6,750 °C·hora, y alcanzaron resistencias de 93 kg/cm², equivalente al 44.3 % de su f'_c , 7 días alcanzaron un índice de 14,680 °C·hora y resistencias de 165 kg/cm² (78.6 % de f'_c), 14 días, con un índice de 24,300 °C·hora, se obtuvo una resistencia de 191 kg/cm², lo cual representa el 90.9 % del f'_c y 28 días se alcanzaron resistencias promedio de 210 kg/cm², completando el 100 % del f'_c esperado. Para el concreto de $f'_c = 280$ kg/cm², se obtuvo una resistencia de 205 kg/cm² a los 7 días (73.2 % del f'_c), y 249 kg/cm² a los 14 días (88.9 % del f'_c), con un índice de madurez similar al del otro diseño. Esto confirma que, aunque el desarrollo de resistencia es progresivo, está más estrechamente vinculado al índice de madurez acumulado (tiempo $\times$ temperatura) que a la edad cronológica aislada.

- El método de madurez aplicado mediante el registro de temperatura en las probetas permitió estimar la resistencia del concreto en tiempo real, con base en la temperatura interna registrada y la curva de calibración obtenida en laboratorio. La comparación entre los valores estimados mediante el modelo de Nurse–Saul y los resultados reales del ensayo a compresión arrojó un margen de error promedio de: ± 4.8 % para el concreto de $f'_c = 210$ kg/cm², y ± 5.3 % para el concreto de $f'_c = 280$ kg/cm²; estas diferencias son técnicamente aceptables según criterios de ingeniería estructural y validan la confiabilidad del método para la toma de decisiones anticipadas en obra (como el desencofrado o la habilitación de cargas). Asimismo, este procedimiento podría permitir reducir el tiempo de espera tradicional en obra en hasta un 40 %, sin comprometer la seguridad ni la calidad del elemento estructural.

RECOMENDACIONES Y/O SUGERENCIAS VII

7.1 RECOMENDACIONES

A partir de los hallazgos obtenidos en la presente investigación sobre la relación entre la resistencia a compresión del concreto y su índice de madurez basado en la norma ASTM C 1074, se proponen las siguientes recomendaciones y sugerencias para mejorar la precisión de los resultados y optimizar la aplicación del método:

- Se recomienda realizar estudios adicionales que evalúen la variación del método de madurez en climas extremos, como temperaturas muy bajas o altas, y su impacto en la resistencia del concreto.
- Se recomienda implementar la ecuación de Arrhenius en lugar de la ecuación de Nurse-Saul en ambientes de alta variabilidad térmica, ya que permite una mejor estimación del desarrollo de resistencia en estos escenarios.
- Se recomienda la aplicación en concretos masivos: considerando la naturaleza del concreto masivo y el riesgo de figuración térmica,

7.2 SUGERENCIAS

En base a los hallazgos obtenidos en la investigación, se proponen las siguientes sugerencias para mejorar la precisión de los resultados y optimizar la aplicación del método de madurez en la evaluación de la resistencia a compresión del concreto:

Optimización de la Curva de Madurez

- Es sugiere verificar la correlación de resistencia-madurez cada vez que se realicen cambios significativos en los materiales, el diseño de mezcla o las condiciones ambientales.

- Se sugiere realizar validaciones periódicas de la curva de madurez para garantizar que los valores de resistencia estimados se mantengan dentro del $\pm 10\%$ de variación aceptable, conforme a la norma ASTM C1074.

Factores Ambientales y su Impacto en la Madurez del Concreto:

- Es importante realizar pruebas adicionales en climas extremos (altas o bajas temperaturas) para ajustar el coeficiente de activación de temperatura en función de las condiciones ambientales específicas.
- Se recomienda evaluar la influencia de la humedad y el tiempo de curado en la ganancia de resistencia, considerando diferentes métodos de curado como inmersión en agua, aplicación de membranas o vapor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABANTO CASTILLO, FLAVIO. 2009. Tecnología del concreto (Teoría y problemas). Editorial San Marcos. (2da edición). Lima - Perú.
- AGUILAR, E., RODRÍGUEZ, E. Y SERMEÑO, M. (2009): Validación del método de madurez mediante ensayos de laboratorio, estableciendo un margen de error aceptable del $\pm 10\%$.
- ASTM C 1074 (2021): Norma que establece los procedimientos para calcular la madurez del concreto mediante sensores de temperatura y correlacionar este índice con la resistencia a compresión.
- ASTM C39/C39M (2022): Especifica el método para ensayar la resistencia a compresión de cilindros de concreto, utilizado como referencia para validar el método de madurez.
- CAPECO. 2003. Costos y presupuestos de edificaciones. (1era edición). Lima – Perú.
- CARINO Y LEW (2001): Desarrollo de la metodología para la aplicación del método de madurez y su implementación en la industria de la construcción.
- EN 12390-13:2023: Norma europea complementaria a los ensayos de compresión, evaluando también el módulo de elasticidad del concreto
- EUGENIA M. CARRILLO. (2011). “Evaluación del efecto de la temperatura y del tiempo de fraguado en la resistencia estimada del hormigón mediante madurez”. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago – Chile. 214 pág.
- GUTIÉRREZ ET AL. (2020): Estudio que reporta la necesidad de ajustar las curvas resistencia-madurez en México debido a condiciones climáticas extremas, como altas temperaturas y humedad.
- HENRY L. CORRO Y ALEJANDRO L. RAMOS. (2015). “Correlación entre el índice de madurez de una mezcla de concreto y su resistencia a la compresión”. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo – Perú. 100 pág.
- LEZAMA LEIVA, JOSE. 2013. Tecnología del concreto. Cajamarca – Perú.

- MEHTA Y MONTEIRO (2021): Investigación que resalta la influencia de la temperatura en el proceso de hidratación del cemento y su relación con el método de madurez.
- NESTOR G. SOTOMAYOR. (2014). “Análisis de un modelo matemático para determinar el tiempo de fraguado del hormigón”. Universidad Austral de Chile. Valdivia – Chile. 170 pág.
- NEVILLE, A.M. y BROOKS, J.J. 1998. Tecnología del Concreto. Editorial Trillas. México D.F.
- NTP 334.009 - 2013. CEMENTOS. Cementos Portland. 5ta. Ed. 2013.
- NTP 339.034 - 2008 (revisada 2013). HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas. 3ra. Ed. 2013.
- NTP 339.046 – 2008 (revisada 2013). HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón (concreto). 2da. Ed. 2013.
- NTP 339.047 - 2006. HORMIGÓN (CONCRETO). Definiciones y terminología relativas al hormigón y agregados. 2da. Ed. 2006.
- NTP 339.088 – 2006. HORMIGÓN. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. 2da. Ed. 2006.
- NTP 339.183 - 2013. HORMIGÓN. Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio. 2da. Ed. 2013.
- NTP 339.185 - 2013. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable del agregado por secado. 2da. Ed. 2013.
- NTP 400.010 – 2011. AGREGADOS. Extracción y preparación de muestras. 3ra. Ed. 2011.
- NTP 400.011 – 2008 (revisada el 2013). AGREGADOS. Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (concretos). 2da. Ed. 2013.

- NTP 400.017 – 2011. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso unitario”) y los vacíos en los agregados. 3ra. Ed. 2011.
- NTP 400.021 – 2013. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. 3ra. Ed. 2013.
- NTP 400.022 – 2013. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino. 3ra. Ed. 2013.
- NTP 400.037 - 2002. AGREGADOS. Especificaciones normalizadas para agregados en hormigón (concreto). 2da. Ed. 2002.
- PASQUEL (2020): Explicación sobre la relación agua/cemento y su impacto en la resistencia a compresión del concreto.
- PASQUEL CARVAJAL, ENRIQUE. 2000. Control de Calidad del Concreto. Capítulo Peruano ACI. Lima - Perú.
- RIVVA LÓPEZ, ENRIQUE. 2000. La Naturaleza del Concreto y Materiales. Capítulo Peruano ACI. Fondo Editorial ICG. Lima – Perú.
- RIVVA LÓPEZ, ENRIQUE. 2007. Tecnología del Concreto. Diseño de mezclas. Fondo Editorial ICG. Lima - Perú.
- SANTIAGO ET AL. (2021): Estudio sobre la necesidad de predicciones precisas del desarrollo de resistencia en Argentina y Chile debido a condiciones sísmicas.
- STEFFANY G. COLINA, EVELYN E. GARCIA Y JOSE R. REYES. (2014). “Determinación de la resistencia del hormigón en obra a partir de la madurez y estudio de factibilidad en su implementación basándonos en la correlación temperatura – tiempo – resistencia”. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil – Ecuador. 204 pág.
- XU ET AL. (2021): Investigación sobre la implementación de sensores de madurez y la tecnología IoT para mejorar la predicción de resistencia en concreto.

ANEXOS

ANEXOS – I: CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO PORTLAND.

Tabla 28. Principales componentes del cemento Portland.

CEMENTO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₃ AF	CaSO ₄	CaO libre	MgO
TIPO I	59	15	12	8	2.9	0.8	2.4
TIPO II	46	29	6 – 8*	12	2.8	0.6	3.0
TIPO III	60	12	12 –	8	3.9	1.3	2.6
TIPO IV	30 - 35*	40**-	5 – 7*	13	2.9	0.3	2.7
TIPO V	43	36	4 – 5*	12	2.7	0.4	1.6

(*) Como máximo
(**) Como mínimo

Fuente: Tecnología del concreto, A. M. Neville y J. J. Brooks.

Tabla 29. Fuentes de materias primas usadas en la fabricación de cemento Pórtland.

Hierro	Yeso	Magnesio
Fe ₂ O ₃	CaSO ₄ ·2H ₂ O	MgO
Arcilla		
Ceniza de altos hornos		
Escoria de pirita		
Laminaciones de hierro	Anhidrita	Escorias
Mineral de hierro	Sulfato de calcio	Piedra caliza
Pizarras	Yeso natural	Roca calcárea
Residuos de lavado de mineral de hierro		

Fuente: Tecnología del concreto, A. M. Neville y J. J. Brooks.

Tabla 30. Componentes químicos del cemento Portland.

	COMPONENTE QUÍMICO	PROCEDENCIA
95%	Óxido de calcio (CaO)	Rocas Calizas
	Óxido de Sílice (SiO ₂)	Areniscas
	Óxido de Aluminio	Arcillas
	Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	Arcillas, Mineral
5%	Óxidos de Magnesio, Sodio, Potasio, Titanio, Azufre, Fósforo y Manganeseo	Minerales Varios

Fuente: Tecnología del concreto, A. M. Neville y J. J. Brooks.

Tabla 31. *Diseño para Cemento Tipo MS – m3*

f'c (kg/cm²)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	a/c
210	320	176	720	1080	0.55
280	380	190	690	1070	0.5

Tabla 32. *Diseño para Cemento Tipo I – m3*

f'c (kg/cm²)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	a/c
210	320	176	720	1080	0.55
280	380	190	690	1070	0.5

ANEXO I: NORMA NTE E.060 - (5.3.3.2) PARA EL NÚMERO DE ESPECÍMENES ENSAYADOS.

N.T.E. E.60 CONCRETO ARMADO

- 5.3.2.2** Cuando una instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos de resistencia en obra para el cálculo de S_s que se ajusten a los requisitos de 5.3.1.1 o de 5.3.1.2, f'_{cr} debe determinarse de la Tabla 5.3, y la documentación relativa a la resistencia promedio debe cumplir con los requisitos de 5.3.3.

TABLA 5.3
RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN REQUERIDA CUANDO NO HAY DATOS DISPONIBLES PARA ESTABLECER UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA MUESTRA

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7,0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8,5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1,1 f'_c + 5,0$

5.3.3 Documentación de la resistencia promedio a la compresión

La documentación que justifique que la dosificación propuesta para el concreto producirá una resistencia promedio a la compresión igual o mayor que la resistencia promedio a la compresión requerida, f'_{cr} , (véase 5.3.2), debe consistir en un registro de ensayos de resistencia en obra, en varios registros de ensayos de resistencia o en mezclas de prueba.

- 5.3.3.1** Cuando se empleen registros de ensayos para demostrar que las dosificaciones propuestas para el concreto producirán la resistencia promedio requerida f'_{cr} (véase 5.3.2), dichos registros deben representar los materiales y condiciones similares a las esperadas. Los cambios en los materiales, condiciones y dosificaciones dentro de los registros de ensayos no deben ser más restrictivos que los de la obra propuesta. Con el propósito de documentar la resistencia promedio potencial, pueden aceptarse registros de ensayos que consistan en menos de 30, pero no menos de 10 ensayos consecutivos siempre que abarquen un período no menor de 45 días. La dosificación requerida para el concreto puede establecerse por interpolación entre las resistencias y las dosificaciones de dos o más registros de ensayo, siempre y cuando cumpla con los otros requisitos de esta Sección.

- 5.3.3.2** Cuando no se dispone de un registro aceptable de resultados de ensayos en obra, se permite que la dosificación del concreto se establezca con mezclas de prueba que cumplan con las siguientes restricciones:

- Los materiales deben ser los propuestos para la obra.
- Las mezclas de prueba cuyas dosificaciones y consistencias son las requeridas para la obra propuesta deben prepararse empleando al menos tres relaciones agua-material cementante o contenidos de cemento diferentes que produzcan un rango de resistencias que abarquen f'_{cr} .
- Las mezclas de prueba deben dosificarse para producir un asentamiento (*slump*) dentro de ± 20 mm del máximo permitido, y para concreto con aire incorporado, dentro de $\pm 0.5\%$ del máximo contenido de aire permitido.
- Para cada relación agua-material cementante o contenido de material cementante deben confeccionarse y curarse al menos tres probetas cilíndricas para cada edad de ensayo de acuerdo con "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory" (ASTM C 192M). Las probetas deben ensayarse a los 28 días o a la edad de ensayo establecida para determinar f'_c .
- A partir de los resultados de los ensayos de las probetas cilíndricas debe construirse una curva que muestre la correspondencia entre la relación agua-material cementante o el contenido de material cementante, y la resistencia a compresión a la edad de ensayo determinada.
- La máxima relación agua-material cementante o el mínimo contenido de material cementante para el concreto que vaya a emplearse en la obra propuesta debe ser el que indique la curva para producir el valor de f'_{cr} requerido por 5.3.2, a no ser que de acuerdo con el Capítulo 4 se indique una relación agua-material cementante menor o una resistencia mayor.

30



Difundido por: ICG - Instituto de la Construcción y Gerencia
www.construccion.org / icg@icgmail.org / Telefax : 421 - 7896

ANEXO II: FICHA TÉCNICA DE LOS CEMENTOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS.



Informe de ensayo de fábrica

CEMENTOS PACASMAYO S.A.A.

Calle La Colonia Nro. 150 Urb. El Vivero de Monterrico Santiago de Surco - Lima
Carretera Panamericana Norte Km. 666 Pacasmayo - La Libertad
Teléfono 317 - 6999



G-CC-F-04
Versión 04

Planta: Pacasmayo

Cemento Tipo I

12 de septiembre de 2024

Tipo I - Cemento Portland de Uso General

Periodo de despacho 01 de agosto de 2024 - 31 de agosto de 2024

REQUISITOS NORMALIZADOS

NTP 334.009 Tablas 1 y 3

QUÍMICOS

Requisitos	Especificación	Resultado de ensayos
MgO (%)	6.0 máx.	2.1
SO3 (%)	3.00 máx.	2.73
Pérdida por ignición (%)	3.5 máx.	3.0
Residuo insoluble (%)	1.5 máx.	0.6
Alcalis Equivalentes (%)	Λ	0.8

FÍSICOS

Requisitos	Especificación	Resultado de ensayos
Contenido de aire del mortero (volumen %)	12 máx.	8
Superficie específica (m2/kg)	260 mín.	390
Expansión en autoclave (%)	0.80 máx.	0.08
Densidad (g/cm3)	Λ	3.08
Resistencia a la compresión (MPa)		
1 día	Λ	13.3
3 días	12.0 mín.	26.5
7 días	19.0 mín.	33.0
28 días *	28.0 mín.	41.1
Tiempo de fraguado Vicat (minutos)		
Inicial	45 mín.	126
Final	375 máx.	240
Expansión en barra de mortero curada en agua a 14 días (%)	0.020 máx.	0.006

Λ No especifica

* Requisito opcional

El (la) RC 28 días corresponde al mes de julio del 2024

El (la) Expansión barra de mortero a 14 días corresponde al mes de julio del 2024

Los resultados de los ensayos presentados en este informe, para el cemento descrito, cumplen con los requisitos especificados en la norma NTP 334.009 y ASTM C150.



Ing. Dennis R. Rodas Lavado

Superintendente de Control de Calidad



DS 001-2022 PRODUCE
Cemento Hidráulico
utilizado en Edificaciones y
Construcciones en General



NTP 334.009
ASTM C 150
Cemento Portland

Solicitado por:

Distribuidora Norte Pacasmayo S. R. L.

Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de Cementos Pacasmayo S. A. A.



Informe de ensayo de fábrica

CEMENTOS PACASMAYO S.A.A.

Calle La Colonia No. 130 Urb. El Vivero de Monterrico Santiago de Surco - Lima
Carrera Panamericana Norte Km. 466 Pacasmayo - La Libertad
Teléfono 317 - 0000



Planta: Pacasmayo

Cemento Fortimax

12 de septiembre de
2024

Tipo MS (MH)

Cemento Hidráulico de moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación

Periodo de despacho 01 de agosto de 2024 - 31 de agosto de 2024

REQUISITOS NORMALIZADOS

NTP 334.082 Tabla 1

FÍSICOS

Requisitos	Especificación	Resultado de ensayos
Retenido M325 (%)	Λ	2.4
Superficie específica (m ² /kg)	Λ	540
Densidad (g/cm ³)	Λ	2.90
Expansión en autoclave (%)	0.80 máx.	0.03
Tiempo de fraguado Vicat (minutos)		
Inicial	45 min.	183
Final	420 máx.	310
Contenido de aire en mortero (volumen %)	12 máx.	9
Resistencia a la compresión (MPa)		
1 día	Λ	8.8
3 días	11.0 mín.	20.1
7 días	18.0 mín.	28.1
28 días ¹	28.0 mín.	43.1
Expansión en barra de mortero curada en agua a 14 días (%) ²	0.020 máx.	0.006
Resistencia a la expansión por sulfatos a 6 meses (%) ³	0.10 máx.	0.03
Calor de hidratación a 3 días (kJ/kg) ⁴	335 máx.	243

Λ Sin especificar

Λ Requisito opcional

¹ Método de ensayo NTP 334.093

² Método de ensayo NTP 334.094

³ Método de ensayo NTP 334.171

El (la) RC 28 días corresponde al mes de julio del 2024

El (la) Resistencia a los sulfatos a 6 meses corresponde al mes de enero del 2024

El (la) Expansión barra de mortero a 14 días corresponde al mes de julio del 2024

Los resultados de los ensayos presentados en este informe, para el cemento descrito, cumplen con los requisitos especificados en la norma NTP 334.082 y ASTM C1157.

Ing. Dennis R. Rodas Lavado

Superintendente de Control de Calidad



DS 001-2022 PRODUCE
Cemento Hidráulico
utilizado en Edificaciones y
Construcciones en General



NTP 334.082
ASTM C 1157
Cemento Hidráulico
Especificado por Desempeño

Solicitado por:

Distribuidora Norte Pacasmayo S. R. L.

Esta prohibida la reproducción total o parcial de este documento sin la autorización de Cementos Pacasmayo S. A. A.

ANEXO III: INFORME DE LOS ENSAYOS DEL AGUA DE PLANTA DINO SRL.



UNIVERSIDAD
DE PIURA

LQ-8247-4/4

INFORME DE ENSAYO

Solicitante: DINO S.R.L.
Tipo de ensayo: Determinaciones químicas varias en 01 (una) muestra de agua para concreto.
Fecha: 25/03/2024

RESULTADOS

Determinación	Método de ensayo	Q-035/24
Cloruros (ppm)	NTP 339.076	N.D.
Sulfatos (ppm)	NTP 339.074	26
Álcalis $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$ (ppm)	ASTM C 114	29
Sólidos totales (ppm)	ASTM C 1603 05	253
pH a 25 °C	Medida directa	7,31

N.D. = No detectable. Límite de detección 0,0020 % o 20 ppm

Descripción de la muestra: la muestra fue alcanzada por el solicitante con la siguiente descripción:

Q-035/24: "IV- Agua para concreto (NP)-S 250224-CAX"



Dr. Ing. José Luis Barranzuela Q.

Av. Ramón Mugica 131 – Urb. San Eduardo
Teléfono: (51-73) 284500 Fax: (51-73) 284510
Apartado postal 353
web: <http://www.udep.edu.pe>

Laboratorio:
Teléfono: (51-73) 284500 – Anexo: 3378
Celular: 920 795 887
e-mail: quimica@udep.edu.pe

ANEXO IV: PANEL FOTOGRÁFICO.

Foto N° 01: Cuarteo y obtención de muestra representativa de agregados para ensayos de laboratorio.



Foto N° 02: Ensayo de peso unitario de agregado fino



Foto N° 03: Elaboración de probetas de concreto para ensayo de resistencia a compresión.



Foto N° 04: Curado de probetas de concreto en poza de curado con temperatura controlada.



Foto N° 05: Registro de temperatura del concreto.



Foto N° 06: Ensayos de resistencia a compresión de probetas de concreto.



Foto N° 07: Desmolde de probetas con compresor de aire.



Foto N° 08: Probetas de concreto ensayadas a compresión.

