

Influence of Thermal Waters Replacing 10%, 20% and 50% of Drinking Water on the Compressive Strength of Concrete

Eddson Mostacero Alva¹; Simon Narva Guevara²

¹Universidad Privada del Norte, Perú, N00316185@upn.pe, N00298500@upn.pe

Abstract- Concrete is one of the most widely used materials in construction due to its versatility, low cost, and durability, with its compressive strength being a key factor that can be affected by the type, quantity, and quality of water used. Given the growing scarcity of fresh water, the need arises to evaluate alternative sources such as thermal waters. The partial substitution of potable water with thermal water in proportions of 10%, 20%, and 50% was analyzed to determine its influence on the compressive strength of a concrete mix designed for $f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$. The results showed differentiated behavior depending on the substitution proportion. Specifically, the 20% and 50% thermal water substitutions recorded higher compressive strength values across all testing periods, surpassing the control group. In contrast, the 10% substitution yielded lower strengths than the reference sample. These findings highlight that the use of thermal water in concrete production cannot be generalized without a prior analysis of its chemical composition. Therefore, it is essential to complement its use with an appropriate mix design and rigorous quality control to ensure the structural integrity of the concrete.

Keywords-- concrete, compressive strength, thermal waters.

I. INTRODUCCIÓN (HEADING 1)

El concreto es el material de construcción más utilizado en la ingeniería civil debido a su resistencia mecánica, durabilidad y versatilidad estructural. Entre sus componentes, el agua de mezclado cumple una función esencial en las reacciones de hidratación del cemento, influyendo directamente en la trabajabilidad, el tiempo de fraguado y el desarrollo de la resistencia a la compresión. Las normas técnicas recomiendan el uso de agua potable; sin embargo, la creciente escasez de este recurso ha impulsado la evaluación de fuentes alternativas de agua para la producción de concreto.

En la región Cajamarca, específicamente en el distrito de Los Baños del Inca, existe una importante disponibilidad de aguas termales, las cuales presentan características físico-químicas particulares, como elevadas temperaturas y la presencia de sales disueltas [1]. Estos componentes pueden modificar la cinética de hidratación del cemento y la microestructura del concreto endurecido, generando incertidumbre respecto a su uso en mezclas de concreto sin un análisis técnico previo.

Investigaciones previas sobre el empleo de aguas no convencionales en la elaboración de concreto evidencian que su efecto sobre la resistencia mecánica depende principalmente de la composición química del agua y del porcentaje de sustitución empleado. En algunos casos, sustituciones parciales han mostrado resultados aceptables, mientras que porcentajes elevados pueden generar disminuciones en la resistencia a la compresión.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de la sustitución parcial del agua potable por agua termal en proporciones de 10 %, 20 % y 50 % sobre la resistencia a la compresión del concreto con una resistencia de diseño de $f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$. Para ello, se elaboraron especímenes de concreto bajo condiciones controladas de laboratorio y se realizaron ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados obtenidos aportan evidencia técnica para determinar la viabilidad del uso de aguas termales como recurso alternativo en la producción de concreto, promoviendo prácticas constructivas sostenibles y el uso racional del recurso hídrico.

II. MATERIALES Y METODOS

El tipo de investigación es descriptiva porque vamos a describir el procedimiento y los pasos a seguir, puesto que se analizan datos obtenidos de laboratorio [2].

Así mismo, se optó por un enfoque cuantitativa buscando la objetividad y basándose en un patrón ya definido para la realización de los ensayos, con el fin de garantizar la fiabilidad y precisión en los análisis efectuados. Para llevar a cabo esta investigación, se cumplieron tres requisitos esenciales: la manipulación de una variable independiente, la medición del efecto de esta variable independiente sobre la variable dependiente, y validez de la situación experimental [3]. En esta investigación, se tuvo una variable independiente que consistió en el tipo de agua utilizada en la elaboración del concreto, y se midió el impacto de esta variable independiente por medio del cálculo de la resistencia a compresión del concreto. La resistencia a la compresión del concreto dependió del tipo de agua con que se elaboró el mismo.

Con el fin de garantizar la coherencia científica del estudio, se optó por emplear un diseño de mezcla de concreto desarrollado siguiendo la metodología establecida por American Concrete Institute (ACI 211, 1997), procedimiento que permite determinar las proporciones óptimas entre los materiales constituyentes, cemento, agregado fino, agregado grueso y agua para obtener un concreto con una resistencia a la compresión de diseño de $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ (20.6 MPa), conforme a los criterios técnicos descritos a continuación:

- Cemento Portland Tipo I.
- Agua (relación $a/c = 0.558$)
- Agregado grueso
 - Piedra chancada angular
 - Tamaño Máximo Nominal de 3/4"

- Módulo de finura = 7.498
- Peso unitario suelto = 1430 (kg/m³)
- Peso unitario compactado = 1580 (kg/m³)
- Peso específico = 2680 (kg/m³)
- % de Absorción = 2.80
- % de agua = 1.70
- Arena gruesa
 - Módulo de finura = 3.573
 - Peso unitario suelto = 1620 (kg/m³)
 - Peso unitario compactado = 1720 (kg/m³)
 - Peso específico = 2595 (kg/m³)
 - % de Absorción = 5.70
 - % de agua = 2.50

Se definió cuatro grupos de prueba

- 1) Grupo Control (GP): 100% agua potable (09 probetas)
- 2) Grupo AT-10: 10% agua termal + 90% agua potable (09 probetas)
- 3) Grupo AT-20: 20% agua termal + 80% agua potable (09 probetas)
- 4) Grupo AT-50: 50% agua termal + 50% agua potable (09 probetas)

TABLA I
DISEÑO DE MEZCLA POR GRUPO

Tipo de mezcla	Proporción de diseño			
	Cemento (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado grueso (kg)	Agua (lt)
Agua potable 100% (MP)	19.268	46.115	45.011	Agua Potable
				10.779
Agua termal 10 % + Agua potable 90%	19.268	46.115	45.011	Agua Termal
				0.000
Agua termal 20% + Agua potable 80%	19.268	46.115	45.011	Agua Potable
				9.701
Agua termal 50% + Agua potable 50%	19.268	46.115	45.011	Agua Termal
				1.078
TOTAL	77.072	184.458	180.044	Agua Potable
				8.623
				Agua Termal
				2.156
				Agua Potable
				5.389
				Agua Termal
				5.389
				-
				43.116

Nota: Con el propósito de garantizar el llenado completo de los moldes, se incorporó un factor de desperdicio del 10% en la dosificación de los materiales cemento, agregado fino, agregado grueso y agua durante el proceso de pesaje en laboratorio.

Para cada grupo se elaboraron nueve probetas cilíndricas de 15 cm x 30 cm realizando los ensayos de resistencia a compresión a las edades de 7, 14 y 28 días (cuatro probetas por cada periodo con tres muestras significativas). En total, se fabricaron 36 probetas cilíndricas.

Materiales Utilizados

Cemento: Se empleó cemento Portland Tipo I de la marca de mayor distribución en la ciudad de Cajamarca. Se comprobó su buen estado antes del uso, asegurando que no

presentara grumos ni humedad y que su fecha de fabricación fuera reciente (menor a 30 días).

Agregados: Los agregados fueron obtenidos de la cantera Baños del Inca, situada en el cauce del río Chonta. Previamente, se llevaron a cabo ensayos de caracterización para evaluar sus propiedades.

Agua Potable: Se empleó agua de suministro municipal proveniente de la red de distribución pública de Cajamarca, cuyas propiedades fisicoquímicas y microbiológicas se encuentran dentro de los parámetros de aceptabilidad definidos por la Norma Técnica Peruana NTP 339.088, que regula los requisitos de calidad del agua de mezcla para uso en concreto.

Agua Termal: La muestra fue captada directamente en el punto de emergencia hidrotermal de afloramiento natural localizado en el complejo geotérmico de los Baños del Inca, evitando así alteraciones en su composición físico-química originada por el flujo ascendente subterráneo.

Preparación del Agua Termal

Para los grupos AT-10, AT-20 y AT-50 se permitió que el agua termal se enfriara de forma natural hasta 18°C antes de mezclarse con el agua potable. Este proceso de enfriamiento tomó aproximadamente 06 horas bajo las condiciones ambientales de Cajamarca (temperatura promedio de 15°C).

A lo largo de este período, las muestras fueron almacenadas en recipientes herméticos de superficie limpia e impermeabilizada, medida adoptada con el propósito de prevenir tanto la contaminación por agentes externos como la reducción volumétrica por evaporación, garantizando así la integridad fisicoquímica del agua y la precisión en la dosificación de la mezcla.

Elaboración de probetas Preparación del Laboratorio

El Laboratorio de Concreto – Kaolyn Ingenieros S.A.C. sirvió como centro principal de nuestras actividades experimentales. Se realizó una limpieza exhaustiva de todos los equipos utilizados: la mezcladora de tambor rotatorio, los moldes cilíndricos metálicos, las varillas de compactación y demás herramientas auxiliares.

Se comprobó que los moldes se encontraran en óptimas condiciones, libres de deformaciones o signos de corrosión. Además, se aplicó una fina capa de desmoldante en las superficies internas y en la base de cada molde, garantizando así un adecuado retiro de las probetas tras el fraguado.

Pesaje y Corrección por Humedad

El proceso de dosificación se llevó a cabo con exactitud metrológica, empleando una balanza digital debidamente calibrada con una resolución de lectura de 1 gramo (0.001 kg), lo que garantizó la precisión en la cuantificación másica de cada componente de la mezcla.

Un aspecto fundamental, que con frecuencia se pasa por alto, es que los agregados rara vez se encuentran en condición de saturación superficial seca (SSS) al momento de su utilización, ya que siempre conservan cierto grado de humedad.

En consecuencia, con el fin de mantener la relación agua/cemento (w/c) de diseño dentro de los márgenes establecidos, se realizaron correcciones por contenido de humedad de manera sistemática, previo al inicio de cada jornada de mezclado, siguiendo los procedimientos estipulados en las normativas vigentes para el ajuste de proporciones en diseño de mezclas.

Proceso de Mezclado

Se optó por realizar el mezclado en tandas pequeñas, con volumen suficiente para la elaboración de nueve probetas por grupo (equivalente a un saco de cemento, aproximadamente 0.25 m³). Esta estrategia permitió un mejor control del proceso y una mayor uniformidad en las mezclas.

Secuencia de mezclado

- 1) Se colocó el agregado grueso en la mezcladora junto con aproximadamente el 30% del agua total, mezclando durante 30 segundos.
- 2) Posteriormente, se añadió la arena y se continuó el mezclado por 1 minuto adicional.
- 3) Con la mezcladora en funcionamiento, se incorporó el cemento de manera gradual durante 30 segundos.
- 4) Seguidamente, se añadió el agua restante (ya sea la combinación de agua potable y termal o solo agua potable en el grupo control), mezclando durante 3 minutos más.
- 5) Se permitió un reposo de 2 minutos para estabilizar la mezcla.
- 6) Finalmente, se mezcló nuevamente por 2 minutos adicionales.

El tiempo total de mezclado fue de aproximadamente 9 minutos.

Moldeo de Probetas

El moldeo fue llevado a cabo por personal especializado, cumpliendo rigurosamente con los procedimientos establecidos en la norma ASTM C192 [4]. Para cada probeta se siguió la siguiente metodología:

- 1) Los moldes se llenaron en tres capas de altura aproximadamente uniforme.
- 2) Cada capa fue compactada con 25 golpes de una varilla de acero de 5/8" de diámetro, distribuyendo los impactos de manera homogénea.
- 3) Se golpearon suavemente las paredes externas del molde con un martillo de goma (entre 10 y 15 golpes por capa) para eliminar las burbujas de aire atrapadas.
- 4) La superficie superior se niveló utilizando una plancha metálica, mediante movimientos de aserrado.
- 5) Identificación y Curado Inicial.

Cada probeta fue identificada con un marcador permanente en una etiqueta plástica adherida al molde:

- Código del grupo (GP, AT-10, AT-20, AT-50)
- Número de probeta (3 probetas por 4 grupos)
- Fecha de elaboración – 18 de octubre del 2025.
- Edad de ensayo prevista (7, 14 y 28 días)

Las probetas permanecieron en sus moldes durante las primeras 24 horas, cubiertas con plástico húmedo y almacenadas en el cuarto de curado del laboratorio a temperatura de 20°C ± 2°C.

Transcurridas 24 horas desde el moldeo, se procedió al desmolde de las probetas, una etapa que genera cierta expectativa, ya que permite comprobar si el proceso previo se realizó correctamente.

El desmolde del grupo control (GP) se desarrolló con total normalidad: las probetas se liberaron fácilmente tras aflojar los tornillos laterales de los moldes.

No obstante, se observaron diferencias en los grupos elaborados con agua termal. En particular, las probetas del grupo AT-50 ofrecieron mayor resistencia al desmolde, y al extraerlas se notó una superficie ligeramente más rugosa y de un tono gris más oscuro en comparación con las del grupo control. Esta variación no representó un defecto, sino una diferencia visual apreciable.

Una vez realizado el desmolde, todas las probetas fueron inmediatamente sumergidas en una piscina de curado de acero inoxidable, que contenía agua saturada con hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), con el fin de mantener un pH superior a 12 y prevenir la lixiviación del calcio presente en el concreto.

Las probetas fueron dispuestas en el fondo del tanque, manteniendo una separación uniforme entre ellas para permitir una adecuada circulación del agua. La profundidad del agua se mantuvo en aproximadamente 15 cm por encima de las probetas. Observaciones Durante el Curado.

Se estableció un protocolo de observación diaria durante los primeros 7 días, y posteriormente, a los 14 días hasta completar los 28 días de curado. A lo largo del proceso se registraron las siguientes observaciones:

Registro de Temperatura y Humedad

Mantuvimos un registro continuo de las condiciones ambientales del laboratorio:

- Temperatura promedio: 15°C (rango: 12°C - 22°C).
- Humedad relativa promedio: 68% (rango: 62% - 75%).
- Temperatura del agua de curado: 22.5°C (rango: 21°C - 24°C).

Cajamarca tiene un clima relativamente estable durante estos meses, lo que fue beneficioso para mantener condiciones controladas.

Preparación para el ensayo

Extracción de Probetas

En cada una de las edades de ensayo (7, 14 y 28 días), fueron retiradas las tres probetas correspondientes de cada grupo con una anticipación de dos horas. Este intervalo permitirá que la humedad superficial se redujera parcialmente, manteniendo al mismo tiempo las probetas en condición de saturación superficial seca (SSS), tal como lo establece la norma estándar de ensayo.

Las probetas fueron colocadas en posición vertical sobre toallas absorbentes dentro del laboratorio y debidamente identificadas con su código correspondiente para garantizar una trazabilidad precisa.

Inspección Pre-Ensayo

Antes Previo a los ensayos, se efectuó una revisión visual y dimensional exhaustiva de cada probeta:

Inspección visual

- Se verificaron la ausencia de defectos importantes, como grietas, fisuras o descascaramientos.
- Se evaluaron la uniformidad del color y la textura superficial.
- Se revisaron la presencia de posibles signos de segregación o formación de nidos de abeja.

Inspección Dimensional

- Con ayuda de un vernier digital, se midieron:
- El diámetro en tres puntos distintos a lo largo de la altura (superior, medio e inferior).
- La altura en cuatro generatrices equidistantes.
- La perpendicularidad entre las caras superior e inferior.

Criterios de aceptación

- Variación de diámetro menor al 2% respecto al valor promedio.
- Variación de altura menor al 2% respecto al valor promedio.
- Desviación de perpendicularidad inferior a 0.5°, comprobada con escuadra de precisión.

Todas las probetas cumplirán con los requisitos establecidos. No obstante, se decidió incluirla en el ensayo para analizar su comportamiento estructural.

Refrentado de Caras

Las caras superior e inferior de las probetas deben ser planas y paralelas para asegurar una distribución uniforme de las tensiones durante el ensayo de compresión. Sin embargo, en la práctica, esto no siempre se consigue con precisión durante el proceso de moldeo.

El espesor del refrentado obtenido fue de 2 a 3 mm,

cumpliendo con el límite máximo de 5 mm indicado por la norma. Cabe resaltar que un refrentado excesivo puede fracturarse durante el ensayo y anular los resultados.

Población y muestra

Para nuestra investigación tomaremos 36, probetas cilíndricas de concreto diseñadas para una resistencia ($f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$), estas estarán elaboradas bajo Norma ACI 211.1 [5]. y curadas bajo condiciones controladas de laboratorio. Donde el agua potable será sustituida al 10%, 20% y 50% por las aguas termales de la fuente de Baños del Inca.

TABLA II
NÚMERO DE PROBETAS CILÍNDRICAS

Tipo de mezcla	Edad de los especímenes (días)			Numero de Probetas por grupo
	7	14	28	
Agua potable 100% (MP)	3	3	3	9
Agua termal 10 % + Agua potable 90%	3	3	3	9
Agua termal 20% + Agua potable 80%	3	3	3	9
Agua termal 50% + Agua potable 50%	3	3	3	9
Total				36

Descripción del lugar de estudio

El lugar de estudio se encuentra en Cajamarca Perú es donde se realizarán la prueba de estudio en el Laboratorio de Concreto – Kaolyn Ingenieros S.A.C., y las muestras se tomarán de las aguas termales de baños del inca.

Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

La técnica por usar sería la estadística descriptiva la que nos permite observación y recolectar información para los ensayos de las probetas y la resistencia a la compresión a los diferentes días de curado según el RNE.

- Se dividió la muestra y se recolectó el agua termal.
- Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua termal.
- Procedimientos para el diseño de mezclas de concreto utilizando agua potable y agua termal.
- Metodologías y exámenes de pruebas de densidad, revenimiento y resistencia, preparadas con agua potable y agua termal.
- Supervisión durante la producción de concreto, y los análisis se efectuaron con instrumentos calibrados.

Instrumentos

En esta investigación se emplearon instrumentos estructurados propios del área de laboratorio del Concreto. El principal fue la ficha de observación, entendida según como un formato con indicadores definidos que permite registrar información mediante la observación directa de un fenómeno [6].

La ficha se utilizó para recopilar datos sobre la elaboración del concreto con distintas fuentes de agua, con el objetivo de evaluar su efecto en la resistencia a la compresión del concreto con una dosificación de $f'c = 210$ kgf./cm² a los 28 días. Se observaron variables como tipo de agua, estado de los materiales, condiciones climáticas, homogeneidad de la mezcla y tiempos de fraguado.

Además, se emplearon fichas de laboratorio para registrar los resultados de los ensayos realizados, como granulometría, humedad, peso específico y resistencia del concreto. Estas fichas incluyeron campos como nombre del ensayo, fecha, resultados obtenidos y firmas de los responsables.

El tratamiento de los datos se realizó con el programa Microsoft Excel (versión para estudiantes), permitiendo calcular propiedades físicas de los agregados y procesar los resultados de resistencia del concreto a distintas edades.

TABLA III
REGISTRAR VARIABLES RELACIONADAS CON EL
COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ELABORADO CON
DIFERENTES TIPOS DE AGUA.

Ítem	Indicador observado	Descripción	Fecha
1	Tipo de agua utilizada	agua termal	18 oct. 2025
2	Temperatura ambiente	18 °C	18 oct. 2025
3	Estado de los agregados	Limpios y secos	18 oct. 2025
4	Tipo de cemento	Portland tipo I	18 oct. 2025
5	Homogeneidad de la mezcla	Buena	18 oct. 2025
6	Tiempo de fraguado	A 07, 14 y 28 días	18 oct. 2025

Procedimiento

Obtención y Caracterización de Materiales

El proceso experimental inició con la selección y caracterización de los materiales componentes del concreto, etapa fundamental para garantizar la calidad y consistencia de los resultados.

- Agregados: Se procedió a la extracción de agregados finos y gruesos de la cantera ubicada en Baños del Inca. Estos materiales fueron transportados al laboratorio de concreto Kaolyn Ingenieros S.A.C. RUC: 20529476931 bajo condiciones controladas para evitar contaminación o alteración de sus propiedades.
- Cemento: Se seleccionó cemento Portland Tipo I de la marca Pacasmayo, por cumplir con los estándares de la Norma Técnica Peruana (NTP) 334.009 [7]. para cementos hidráulicos.
- Agua: Se emplearon dos tipos de agua:
 - Agua potable: Proveniente de la red pública, cumpliendo con los límites establecidos en la NTP 399.010 [8]. para uso en concreto.
 - Agua termal: Extraída de fuentes naturales en Baños del Inca, cuya composición química fue analizada previamente para evaluar su posible influencia en las

propiedades del concreto.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión del concreto, llevado a los 07, 14 y 28 en el Laboratorio de Concreto de Kaolyn Ingenieros S.A.C., reflejan un desempeño claro y consistente entre las distintas mezclas evaluadas. Las probetas sometidas a carga permitieron identificar diferencias significativas en la capacidad resistente del material, especialmente en función del tipo de agua empleada en su elaboración. Cada espécimen mostró un comportamiento particular al alcanzar su carga máxima, proporcionando datos valiosos que no solo evidencian la calidad del concreto analizado, sino que también permiten comprender mejor cómo influyen ciertos factores como la composición del agua en el desarrollo de su resistencia inicial. Estos resultados constituyen un insumo fundamental para decisiones técnicas y la optimización de futuras formulaciones de mezcla dentro de proyectos. Las siguientes tablas muestran los resultados de resistencia a la compresión, haciendo los análisis a los 07, 14, y 28 días.

TABLA IV
FICHA DE LABORATORIO (A LOS 7 DÍAS).

Ítem	Días	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
100% (Agua Potable)	7	220.535	228.342	224.378
10% agua termal + 90% agua potable	7	204.322	186.170	196.372
20% agua termal + 80% agua potable	7	245.790	241.176	236.556
50% agua termal + 50% agua potable	7	276.499	272.789	266.337

A los 7 días, el concreto patrón (100% agua potable) registró una resistencia media de 224.42 kg/cm² como valor de referencia. La mezcla con 10% de agua termal mostró una reducción (media = 195.62 kg/cm²), mientras que las mezclas con 20% y 50% superaron al patrón, alcanzando medias de 241.17 y 271.88 kg/cm² respectivamente, siendo esta última la de mayor resistencia, lo que refleja un comportamiento no lineal con efecto positivo en edades tempranas a mayores proporciones de sustitución.

TABLA V
FICHA DE LABORATORIO (A LOS 14 DÍAS).

Ítem	Días	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
100% (agua potable)	14	225.509	233.492	229.439
10% agua termal + 90% agua potable	14	208.504	203.121	204.126
20% agua termal + 80% agua potable	14	266.808	262.035	255.091
50% agua termal + 50% agua potable	14	284.317	284.585	278.539

A los 14 días, el comportamiento de las mezclas siguió una tendencia más definida. El concreto patrón alcanzó una resistencia de 229.48 kg/cm², evidenciando un crecimiento moderado con respecto a los 7 días. La mezcla con 10% de

agua termal se mantuvo por debajo del patrón, con 205.25 kg/cm². En contraste, las mezclas con 20% y 50% de sustitución continuaron superando al concreto de referencia, registrando resistencias de 261.31 kg/cm² y 282.48 kg/cm² respectivamente, consolidando la tendencia positiva observada en la etapa anterior.

TABLA VI
FICHA DE LABORATORIO (A LOS 28 DÍAS).

Ítem	Días	Resistencia a la Compresión (Kg/cm ²)		
		Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
100% (agua potable)	28	217.775	234.096	231.322
10% agua termal + 80% agua potable	28	219.526	206.697	203.340
20% agua termal + 80% agua potable	28	265.928	259.141	256.673
50% agua termal + 50% agua potable	28	278.920	275.680	271.334

A los 28 días, edad de referencia para el diseño estructural, el concreto patrón registró una resistencia media de 227.73 kg/cm², manteniéndose relativamente estable frente a los resultados anteriores. La mezcla con 10% de agua termal mostró una leve mejora respecto a edades previas, alcanzando una media de 209.85 kg/cm², aunque sin lograr igualar al patrón. Por su parte, las mezclas con 20% y 50% de sustitución continuaron destacándose con resistencias medias de 260.58 y 275.31 kg/cm² respectivamente, confirmando la tendencia favorable que se venía observando desde los primeros días de evaluación.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de la resistencia a la compresión del concreto elaborado con distintas proporciones de sustitución de agua potable por agua termal (10%, 20% y 50%), evaluadas a los 7, 14 y 28 días de curado, con tres especímenes por grupo (n = 3). El análisis incluyó estadística descriptiva, coeficiente de variación y prueba t de muestras pareadas con estimadores del tamaño del efecto (d de Cohen y corrección de Hedges), procesado con IBM SPSS Statistics v.26.

TABLA VII
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR GRUPO EXPERIMENTAL Y EDAD DE CURADO.

Grupo experimental	Días	Media (kg/cm ²)	D.E.	C.V. (%)
100% agua potable (Control)	7	224,418	3,904	1,7%
10% agua termal. + 90% agua potable	7	195,621	9,099	4,7%
20% agua termal + 80% agua potable	7	241,174	4,617	1,9%
50% agua termal + 50% agua potable	7	271,875	5,142	1,9%
100% agua potable (Control)	14	229,480	3,992	1,7%
10% agua termal + 90% agua potable	14	205,250	2,862	1,4%
20% agua termal + 80% agua potable	14	261,311	5,892	2,3%
50% agua termal + 50% agua potable	14	282,480	3,416	1,2%

100% Agua Potable (Control)	28	227,731	8,733	3,8%
10% agua termal + 90% agua potable	28	209,854	8,542	4,1%
20% agua termal + 80% agua potable	28	260,581	4,793	1,8%
50% agua termal + 50% agua potable	28	275,311	3,806	1,4%

Los resultados demuestran que, en la totalidad de los grupos experimentales, el coeficiente de variación se mantuvo por debajo del umbral convencional del 5% establecido para ensayos de resistencia a la compresión del concreto [9], lo que confirma la homogeneidad estadística de las muestras. Los valores mínimos del C.V. se registraron en la mezcla con 50% de sustitución a los 14 días (C.V. = 1,2%), mientras que la mayor dispersión relativa se observó en la mezcla con 10% de agua termal a los 7 días (C.V. = 4,7%) y a los 28 días (C.V. = 4,1%). Aunque estos valores se encuentran dentro del rango aceptable, sugieren una ligera variabilidad en los mecanismos de interacción entre los compuestos iónicos del agua termal a baja concentración y las fases mineralógicas del cemento Portland.

En relación con la evolución de la resistencia mecánica media, se identifica un patrón sistemático: la sustitución del 50% de agua termal generó los valores de resistencia más elevados en los tres períodos de curado (271,875 kg/cm²; 282,480 kg/cm² y 275,311 kg/cm² a los 7, 14 y 28 días, respectivamente), superando en todos los casos los valores del grupo control. En contraste, la sustitución del 10% produjo resistencias inferiores al control en las tres edades evaluadas, con la diferencia más pronunciada a los 7 días (195,621 kg/cm²). La mezcla con 20% de sustitución exhibió un comportamiento mecánico intermedio favorable, con resistencias consistentemente superiores al grupo de referencia en todos los períodos analizados.

Desde una perspectiva técnica, la resistencia a la compresión alcanzada por el grupo control a los 28 días (227,731 kg/cm²) resulta congruente con los parámetros de diseño estructural típicos para concretos convencionales en la región, lo que valida la representatividad y confiabilidad del grupo de referencia utilizado en el estudio.

Para evaluar la significancia estadística de las diferencias entre cada grupo experimental y el control, se aplicó la prueba t de Student para muestras pareadas (bilateral, $\alpha = 0,05$), justificada por la recolección sistemática de datos bajo condiciones de curado homogéneas en cada período evaluado.

TABLA VIII
RESULTADOS DE LA PRUEBA T DE MUESTRAS EMPAREJADAS.
(* P < 0,05; ** P < 0,01)

Comparación	Dif. Medias	D.E.	t	p	Resultado
100% agua potable vs 10% agua termal (7d)	28,797	12,998	3,837	0,062	No significativo
100% agua potable vs 20% agua termal (7d)	-16,756	7,368	-3,939	0,059	No significativo
100% agua potable vs 50% agua termal (7d)	-47,457	7,472	-11,001	0,008	Significativo *

100% agua potable vs 10% agua termal (14d)	24,230	6,749	6,219	0,025	Significativo *
100% agua potable vs 20% agua termal (14d)	-31,831	8,326	-6,622	0,022	Significativo *
100% agua potable vs 50% agua termal (14d)	-53,000	5,127	-17,904	0,003	Significativo **
100% agua potable vs 10% agua termal (28d)	17,877	17,001	1,821	0,210	No significativo
100% agua potable vs 20% agua termal (28d)	-32,850	13,254	-4,293	0,050	Límite *
100% agua potable vs 50% agua termal (28d)	-47,580	11,774	-7,000	0,020	Significativo *

El análisis estadístico permitió identificar tres patrones de comportamiento diferenciados en función del porcentaje de sustitución del agua de mezclado:

Sustitución al 50% (agua termal/agua potable). Este nivel de reemplazo evidenció diferencias estadísticamente significativas con respecto al grupo control en los tres periodos de evaluación: a los 7 días ($t = -11,001$; $p = 0,008$), a los 14 días ($t = -17,904$; $p = 0,003$) y a los 28 días ($t = -7,000$; $p = 0,020$). En la totalidad de los casos, los especímenes experimentales exhibieron valores de resistencia a la compresión superiores a los del grupo de referencia, lo que demuestra que la incorporación del 50% de agua termal como agente de mezclado incrementa de manera consistente y estadísticamente verificable la capacidad resistente del concreto.

Sustitución al 20%. Los contrastes estadísticos a los 7 días ($p = 0,059$) y a los 28 días ($p = 0,050$) se sitúan en la zona limítrofe del nivel de significancia adoptado ($\alpha = 0,05$). La diferencia registrada a los 14 días resultó estadísticamente significativa ($t = -6,622$; $p = 0,022$). Este comportamiento sugiere que una proporción del 20% de agua termal ejerce un efecto favorable sobre la resistencia mecánica del concreto, si bien dicho efecto presenta mayor sensibilidad a la variabilidad inherente al proceso de hidratación en edades de curado tempranas y avanzadas.

Sustitución al 10%. En contraposición, este nivel de reemplazo generó diferencias significativas; no obstante, el signo positivo del estadístico indica que, en este período, el grupo control superó al experimental. A los 7 y 28 días, las diferencias no alcanzaron significancia estadística ($p = 0,062$ y $p = 0,210$, respectivamente). La tendencia global sugiere que una sustitución del 10% de agua termal no contribuye a la mejora de la resistencia a la compresión y podría, en determinadas condiciones, ejercer un efecto inhibitorio respecto al agua potable convencional.

Dado que la significancia estadística por sí sola no informa sobre la relevancia práctica de las diferencias observadas, se calcularon los estimadores del tamaño del efecto d de Cohen y la corrección de Hedges (g). Para muestras pequeñas ($n = 3$), la corrección de Hedges es preferible, ya que ajusta el sesgo estadístico inherente al tamaño muestral reducido [10].

TABLA IX
TAMAÑOS DEL EFECTO (D DE COHEN Y G DE HEDGES) CON INTERVALOS DE CONFIANZA AL 95%.

Comparación	d Cohen	g Hedges	IC 95%	Magnitud
100% agua potable vs 10% agua termal (7d)	2,216	1,768	Grande	-0,077 a 4,496
100% agua potable vs 20% agua termal (7d)	-2,274	-1,814	Grande	-4,602 a 0,059
100% agua potable vs 50% agua termal (7d)	-6,351	-5,068	Muy grande	-12,285 a -0,843
100% agua potable vs 10% agua termal (14d)	3,590	2,865	Grande	0,278 a 7,048
100% agua potable vs 20% agua termal (14d)	-3,823	-3,051	Grande	-7,486 a -0,331
100% agua potable vs 50% agua termal (14d)	-10,337	-8,248	Muy grande	-19,907 a -1,545
100% agua potable vs 10% agua termal (28d)	1,052	0,839	Grande	-0,486 a 2,474
100% agua potable vs 20% agua termal (28d)	-2,478	-1,978	Grande	-4,977 a 0,002
100% agua potable vs 50% agua termal (28d)	-4,041	-3,224	Grande	-7,897 a -0,380

La conjetura planteada se acepta de forma diferenciada según la proporción de sustitución evaluada.

La proporción del 10% no valida la hipótesis de manera consistente. Su influencia sobre la resistencia es negativa en todos los periodos y estadísticamente significativa solo a los 14 días ($p = 0,025$), con medias que descienden hasta 195.62 kg/cm² a los 7 días, comprometiendo el f'_c de diseño de 210 kgf/cm². La influencia existe, pero es desfavorable.

La proporción del 20% confirma la hipótesis favorablemente. Supera al control en todos los periodos con medias entre 241.17 y 261.31 kg/cm², alcanzando significancia a los 14 y 28 días ($p = 0,022$ y $p = 0,050$) y con efectos grandes (d hasta -3.823). Cumple holgadamente el f'_c objetivo.

La proporción del 50% confirma la hipótesis de forma plena y contundente. Registra diferencias significativas en los tres periodos ($p = 0,008$, $0,003$ y $0,020$), los mayores tamaños de efecto del estudio (d hasta -10.337) y supera el f'_c de diseño en todos los tiempos evaluados, alcanzando un incremento máximo del 23.1% sobre el control a los 14 días.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el efecto de la sustitución parcial del agua potable por agua termal en las propiedades mecánicas del concreto, medidas a través de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado.

La incorporación de agua termal en proporciones del 20% y 50% indujo incrementos estadísticamente significativos en la resistencia a la compresión respecto al diseño de mezcla patrón (100% agua potable). A los 7 días, la mezcla con 50% de agua termal alcanzó una resistencia media de 271,88 kg/cm², superando en un 21,15% al control (224,42 kg/cm²), diferencia que resultó estadísticamente

significativa según la prueba t de muestras emparejadas ($t = -11,001$; $gl = 2$; $p = 0,008$). Este comportamiento se mantuvo consistente en las edades de 14 y 28 días, con diferencias significativas en los pares correspondientes ($p < 0,05$), lo que sugiere que los minerales disueltos presentes en el agua termal posiblemente iones de calcio, magnesio o sílice activa ejercen un efecto acelerador e intensificador en la hidratación del cemento Portland.

En contraste, la sustitución del 10% de agua termal produjo resistencias inferiores al grupo control en todos los periodos de curado, con medias de 195,62 kg/cm², 205,25 kg/cm² y 209,85 kg/cm² a los 7, 14 y 28 días, respectivamente. Aunque la prueba de muestras emparejadas evidenció una tendencia hacia la significancia estadística a los 14 días ($t = 6,219$; $p = 0,025$).

Los coeficientes de variación (CV) calculados para todos los grupos experimentales fueron inferiores al 5%, oscilando entre 1,2% y 4,7%, lo que refleja una alta homogeneidad interna en las réplicas y valida la confiabilidad del proceso de elaboración de probetas cilíndricas bajo condiciones controladas.

Los tamaños del efecto estimados mediante la d de Cohen revelaron magnitudes elevadas en la mayoría de comparaciones (valores entre 2,2 y 10,3 en valor absoluto), confirmando que las diferencias observadas no solo son estadísticamente significativas sino también de relevancia práctica para la ingeniería estructural. La corrección de Hedges, aplicada dado el reducido tamaño muestral ($n = 3$ por grupo).

En síntesis, el agua termal en proporción del 50% representa la dosificación óptima identificada en este estudio, alcanzando resistencias a la compresión superiores al patrón en todas las edades de curado evaluadas. Estos hallazgos abren perspectivas promisorias para el aprovechamiento sostenible de recursos hídricos geotermiales en zonas andinas como la región Cajamarca.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo del presente estudio. En primer lugar, se reconoce el valioso apoyo académico y técnico de los docentes y asesores, cuya orientación fue fundamental en cada etapa de la investigación.

Asimismo, se agradece a la institución universitaria y al laboratorio de concreto Kaolyn Ingenieros S.A.C. por su valioso apoyo técnico y logístico durante el desarrollo de la presente investigación, su disposición para facilitar instalaciones, equipos y asistencia especializada fue fundamental para la correcta ejecución de los ensayos experimentales, permitiendo garantizar la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

De manera especial, se reconoce el apoyo del personal técnico y de laboratorio, cuya colaboración contribuyó

significativamente en la preparación de muestras, ejecución de pruebas y recopilación de datos.

Finalmente, se expresa un profundo agradecimiento a la familia y entorno cercano por su constante apoyo, motivación y comprensión durante el desarrollo del trabajo, los cuales fueron esenciales para la culminación exitosa de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] Guzmán, A., Díaz, G., Pari, W., y Benavides, J. (2003). Estudio hidrogeológico de las aguas termales del Complejo Turístico Baños del Inca y alrededores (Distrito de Baños del Inca, Provincia y Departamento de Cajamarca) [Informe técnico]. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Dirección de Geología Ambiental.
- [2] Hernández, R. (2003). Metodología de la investigación (3.ª ed.). McGraw-Hill.
- [3] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). INTERAMERICANA EDITORES S.A. de C.V.
- [4] ASTM International. (2019). ASTM C192/C192M-19: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0192_C0192M-19.
- [5] American Concrete Institute. (2002). ACI 211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (Reapproved 2002). American Concrete Institute.
- [6] Espinoza, E. E. (2010). Metodología de la investigación. Universidad Técnica de Machala.
- [7] Instituto Nacional de Calidad. (2005). NTP 334.009: Concreto. Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas. Instituto Nacional de Calidad.
- [8] Instituto Nacional de Calidad. (Año). NTP 399.010: Concreto. Muestreo del concreto fresco. Instituto Nacional de Calidad.
- [9] American Concrete Institute. (2002). ACI 214 R-11: Guía para la Evaluación de Resultados de Ensayos de Resistencia. American Concrete Institute.
- [10] Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.