

Gary Hugo

T 2 Evaluación del polvo de aluminio en las propiedades físico – mecánicas del concreto expuesto al congelamiento y deshiel...

 Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:534904686

Fecha de entrega

1 dic 2025, 4:06 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

1 dic 2025, 4:09 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

T 2 Evaluación del polvo de aluminio en las propiedades físico – mecánicas del concreto expuest....docx

Tamaño del archivo

2.0 MB

49 páginas

10.398 palabras

58.886 caracteres

18% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 16%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
91 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 5% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 16% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Trabajos entregados	Universidad Peruana Union on 2025-09-15	13%
2	Internet	repositorio.upao.edu.pe	<1%
3	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2025-05-06	<1%
4	Internet	repositorio.unap.edu.pe	<1%
5	Internet	qdoc.tips	<1%
6	Internet	www.blastvalve.com	<1%
7	Internet	nanopdf.com	<1%
8	Trabajos entregados	uni on 2025-01-03	<1%
9	Internet	www.jstage.jst.go.jp	<1%
10	Publicación	Sanchez Garcia, Eva Maria. "Hormigon ligero con nanosilice y aridos de plastico y ...	<1%
11	Internet	astr.ro	<1%

12	Trabajos entregados	Universidad Continental on 2024-07-22	<1%
13	Internet	ciet.ncert.gov.in	<1%
14	Internet	renati.sunedu.gob.pe	<1%
15	Internet	www.grundbichler.at	<1%
16	Publicación	"Belitic Calcium Sulfoaluminate Concrete Runway", ACI Concrete International, 2...	<1%
17	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2025-08-17	<1%
18	Internet	www.selmq.net	<1%
19	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2018-05-02	<1%
20	Trabajos entregados	Universidad Peruana Union on 2025-09-12	<1%
21	Trabajos entregados	uncedu on 2025-02-04	<1%
22	Internet	www.yumpu.com	<1%
23	Internet	m.media-amazon.com	<1%
24	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
25	Internet	www.research.manchester.ac.uk	<1%

26	Internet	www.researchgate.net	<1%
27	Trabajos entregados	Griffth University on 2025-06-10	<1%
28	Trabajos entregados	Submitted on 1693005444259	<1%
29	Trabajos entregados	Universidad Católica San Pablo on 2023-06-16	<1%
30	Trabajos entregados	Universidad Continental on 2025-10-05	<1%
31	Internet	eprints.ucm.es	<1%
32	Internet	repositorio.urp.edu.pe	<1%
33	Internet	tel.archives-ouvertes.fr	<1%
34	Trabajos entregados	uncedu on 2025-08-18	<1%
35	Internet	www.bibliotecaforestal.ufv.br	<1%

Evaluación del polvo de aluminio en las propiedades físico – mecánicas del concreto expuesto al congelamiento y deshielo en Macusani.

RESUMEN

El concreto empleado en zonas expuestas a temperaturas bajas experimenta un deterioro acelerado como consecuencia de los ciclos de congelación y descongelación, lo que origina agrietamiento prematuro y compromete su estabilidad estructural. Ante esta problemática, la presente investigación examinó la aplicación de polvo de aluminio en las características físico-mecánicas del material cementicio expuesto a ciclos de congelación y descongelación en Macusani, determinando su incidencia en las propiedades físicas y mecánicas, así como el porcentaje óptimo como incorporador de aire. Se diseñaron seis mezclas con una resistencia especificada (f'_c) de 210 kg/cm²: un concreto patrón sin aditivos, Se evaluaron cuatro dosificaciones de polvo de aluminio (0.05%, 0.075%, 0.10% y 0.15% respecto al peso del cemento) para determinar la dosificación óptima. Se incluyó una mezcla de referencia con 0.05% del aditivo comercial Chema Air para comparar el desempeño. A estas se les evaluaron sus propiedades en estado fresco, incluyendo asentamiento, contenido de humedad, peso unitario y contenido de aire. Posteriormente, los especímenes se sometieron a curado y a ciclos de congelamiento y deshielo, para determinar su resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. La dosificación de 0.05% de polvo de aluminio optimizó el concreto, aumentando la resistencia a la compresión en 6.74% respecto al patrón. Este mejoramiento se debe a una reducción de la densidad (de 2232 a 2184 kg/m³) y un aumento del aire (de 2% a 6%), lo que mejora la durabilidad. Sin embargo, dosificaciones mayores, aunque reducen más la

densidad, comprometen severamente la trabajabilidad, disminuyendo el asentamiento. Se concluye que 0.05% es la dosis idónea al ofrecer el mejor equilibrio entre propiedades. Esta dosificación mejora la resistencia y la estructura interna, manteniendo una trabajabilidad aceptable. El polvo de aluminio representa una solución costo-efectiva, demostrando potencial como alternativa a los aditivos convencionales.

Palabras clave: aditivo incorporador de aire, congelamiento y deshielo, contenido de aire, polvo de aluminio, resistencia a la compresión.

Evaluation of Aluminum Powder on the Physical-Mechanical Properties of Concrete Exposed to Freeze-Thaw Cycles in Macusani

ABSTRACT

Concrete used in regions exposed to low temperatures faces accelerated deterioration from freeze-thaw cycles, which generates premature cracking and compromises its structural durability. In response to this problem, the present study evaluated the use of aluminum powder on the physical-mechanical properties of concrete exposed to freeze-thaw cycles in Macusani, determining its impact on physical and mechanical properties, as well as the optimal percentage as an air-entraining agent. Six mixtures were designed with a specified compressive strength (f_c) of 210 kg/cm²: a control concrete without additives. Four aluminum powder dosages were evaluated (0.05%, 0.075%, 0.10%, and 0.15% with respect to cement weight) to determine the optimal dosage. A reference mixture with 0.05% of the commercial air-entraining admixture Chema Air was included for performance comparison. These were evaluated for their properties in the fresh state, including slump, moisture content, unit weight, and air content. Subsequently, the specimens were subjected to curing and freeze-thaw cycles to determine their compressive strength at 7, 14, and 28 days. The 0.05% aluminum powder dosage optimized the concrete, increasing compressive strength by 6.74% compared to the control. This improvement is attributable to a reduction in density (from 2232 to 2184 kg/m³) and an increase in air content (from 2% to 6%), which enhances durability. However, higher dosages, although they reduce density further, severely compromise workability, decreasing slump. It is concluded that 0.05% is the optimal dosage as it

offers the best balance between properties. This dosage improves strength and internal structure while maintaining acceptable workability. Aluminum powder represents a cost-effective solution, demonstrating potential as an alternative to conventional air-entraining admixtures.

Key words: air-entraining admixture; freeze-thaw cycles; air content; aluminum powder; compressive strength.

INTRODUCCIÓN

La literatura reciente demuestra que el polvo de aluminio y otros residuos industriales representan una alternativa relevante para modificar las propiedades físico-mecánicas del concreto en diversos contextos de aplicación. Investigaciones como la de Xu et al. (2024) concluyen que la adición de polvo de aluminio contribuye a mejorar la resistencia de concretos de alto desempeño sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo, favoreciendo la densificación estructural y reduciendo las retracciones. Este resultado ha sido confirmado en diversos ambientes donde el concreto se enfrenta a tensiones térmicas extremas, consolidando al polvo de aluminio como aditivo de interés tanto académico como profesional. Sin embargo, Maaze et al. (2016) señalan que el aumento progresivo de polvo de aluminio en concretos aireados puede generar una disminución significativa de la resistencia a compresión, a la par que incrementa la porosidad y reduce la densidad. Estos hallazgos ponen de relieve la importancia de una dosificación adecuada, ya que el manejo de la cantidad de agente aireante repercute en el balance entre durabilidad y seguridad estructural. Zeyad et al. (2024) profundizan sobre el potencial de combinación de polvo de aluminio con agentes puzolánicos, permitiendo la fabricación de concretos livianos de elevada resistencia, particularmente útiles en ambientes fríos y expuestos a congelamiento, donde es fundamental el control riguroso de la proporción de aire incorporado.

La acción de aditivos expansivos basados en aluminio, según lo establecido por Kuziak et al. (2021), depende marcadamente del tipo de cemento empleado, lo que se traduce en variaciones notables tanto en la porosidad como en la resistencia de los materiales bajo condiciones de congelamiento. Este aspecto se

complementa con el trabajo de Jongprateep et al. (2018), quienes demostraron que el polvo de aluminio actúa como agente generador de poros, afectando la microestructura y la resistencia mecánica de concretos porosos, una característica crítica en regiones sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo. Además, estudios recientes documentan avances complementarios. Zhang et al. (2023) analizan el mejoramiento de la resistencia a congelamiento en materiales alcalinos activados mediante transformaciones microestructurales; Shon et al. (2018) investigan concretos celulares basados en aluminio; y Xu et al. (2024) documenta el uso de residuos de cloruro de aluminio polimérico en bloques de concreto, confirmando la pertinencia de estos enfoques en la mejora de la durabilidad ante condiciones adversas.

En este escenario, el polvo de aluminio emerge como un agente aireante alternativo de bajo costo, cuya acción se basa en la reacción con el hidróxido de calcio de la pasta para generar una estructura celular, aspecto validado por Kuziak et al. (2021). El empleo de subproductos de aluminio como agente espumante no solamente cubre requerimientos técnicos, sino que también ofrece beneficios económicos y ambientales, optimizando la gestión de residuos industriales y promoviendo soluciones más sostenibles, tal como lo demuestran los resultados de Liu et al. (2017) y recientes revisiones sectoriales. Es importante subrayar que la dosificación de aluminio es un parámetro crítico. Un exceso puede comprometer el desempeño mecánico del concreto, mientras que una cantidad insuficiente limitaría los efectos positivos esperados sobre la durabilidad y la resistencia en condiciones de congelamiento y deshielo.

La durabilidad del concreto en infraestructuras expuestas a condiciones climáticas extremas es un factor crítico que determina su vida útil. En regiones

1 altoandinas y zonas de clima severo, los ciclos de congelamiento-deshielo (C-D) representan uno de los mecanismos de deterioro más agresivos para este material. La evidencia experimental disponible en la literatura técnica demuestra que la incorporación de aire en la matriz cementicia mejora significativamente la resistencia del concreto frente a este fenómeno de degradación, gracias a la generación de un sistema adecuado de vacíos que proporciona el espacio necesario para acomodar la expansión del agua al congelarse, evitando daños internos y fracturas prematuras. Eriksson et al. (2021) confirmaron mediante modelado higo-termo-mecánico que el concreto con aire incorporado puede prevenir el daño siempre que se mantenga la saturación de los poros por debajo de niveles críticos específicos para cada mezcla. Más allá del contenido total de aire, se ha evidenciado que la distribución y el tamaño de los poros resultan determinantes; estudios como el de Shon et al. (2018) concluyen que la durabilidad del concreto no depende de la porosidad total, sino de la calidad y la organización de la microestructura, enfatizando que el número de huecos de aire menores de 300 μm juega un papel fundamental en la reducción del daño por congelamiento-deshielo. Este hallazgo ha orientado el desarrollo de mezclas especializadas que favorecen la generación de sistemas de poros finos y bien distribuidos, lo que es esencial para aliviar las presiones hidráulicas del agua durante la congelación y garantizar el desempeño a largo plazo de las estructuras.

Además, investigaciones recientes han reportado que factores como la relación agua-cemento, la incorporación de aditivos químicos y el desarrollo de tecnologías avanzadas, incluyendo nanopartículas y residuos industriales como el polvo de aluminio, contribuyen significativamente a perfeccionar la estabilidad de los poros y la capacidad del concreto para resistir los ciclos de congelamiento-

deshielo. Estos avances confirman la tendencia global hacia el uso de materiales más eficientes y sostenibles en contextos extremos, alineando la ingeniería civil con las demandas de la economía circular y la reducción del impacto ambiental (Abbas y Muntean, 2025).

A nivel histórico, la durabilidad frente al congelamiento y deshielo ha sido objeto de diversos enfoques experimentales y teóricos. Xu et al. (2024), Tebbal y Rahmouni (2019) y Zeyad et al. (2024) ofrecen evidencia sobre el valor del polvo de aluminio como modificador de la matriz del concreto, reportando beneficios en ambientes altoandinos y costeros. Por otro lado, Calle Zelaya (2019) documenta en casos peruanos la utilidad práctica del polvo de aluminio para incrementar la durabilidad y reducir la densidad del concreto; Aktiawal y Alam (2021) discuten la necesidad de ajustar la proporción de cemento y agente aireante para compensar la reducción en resistencia a compresión y trabajabilidad. Kothari et al. (2020) y Agor et al. (2023) subrayan el papel de estos aditivos para fortalecer la economía circular, mejorar la sostenibilidad y diversificar el portafolio de materiales empleables en entornos extremos. No obstante, junto con resultados alentadores, persisten vacíos experimentales respecto a la dosificación óptima y al comportamiento en condiciones singulares como las de Macusani, donde la altitud y las condiciones climáticas extremas exigen desarrollos locales adaptados.

En el ámbito nacional, Quille Mamani y Vilca Noa (2022) señalan que en la región de Puno, específicamente en Macusani (situada a 4,345 m s.n.m.), las estructuras de concreto exhiben un deterioro prematuro inducido por las severas oscilaciones térmicas. Ante este escenario, la adopción de soluciones comerciales se encuentra limitada por el elevado costo de los aditivos convencionales, por lo que la evaluación de alternativas como el polvo de aluminio se convierte en una

3
5
necesidad tanto técnica como social. Por consiguiente, la presente investigación establece como objetivo principal evaluar el efecto de la adición de polvo de aluminio sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto sometido a ciclos de congelamiento y deshielo en Macusani, proponiendo como objetivos específicos analizar su impacto en las propiedades físicas y mecánicas, así como establecer la dosificación óptima del polvo de aluminio como agente incorporador de aire en la mezcla.

1
1
Asimismo, se plantea como hipótesis que la incorporación de polvo de aluminio modifica significativamente las propiedades físico-mecánicas del concreto sometido a ciclos de congelamiento-deshielo (C-D) en la región, estimando que existe una proporción óptima del aditivo que maximiza la durabilidad y optimiza el desempeño del material bajo estas condiciones. El diseño experimental establece como variable independiente el tipo de aditivo, comparando el polvo de aluminio con el aditivo comercial Chema Entrampaire. Como variables dependientes se definen la resistencia a compresión, el asentamiento, la densidad y el contenido de aire en la mezcla, buscando establecer relaciones claras entre la modificación química de la matriz del concreto y su comportamiento frente a las condiciones extremas de Macusani.

24
5
La metodología empleada en la presente investigación corresponde al tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo y un diseño experimental que permite evaluar objetivamente el efecto del polvo de aluminio como agente aireante. Se utilizaron 180 especímenes (cilindros de 10 × 20 cm) distribuidos en seis grupos según la dosificación de polvo de aluminio (0%, 0.05%, 0.075%, 0.10% y 0.15%) y un grupo con aditivo comercial Chema Air (0.05%), aplicando un muestreo intencional (no probabilístico) por juicio. En la primera fase se llevaron a cabo los ensayos de

14 asentamiento, contenido de aire y densidad, y posteriormente las pruebas de resistencia a la compresión se efectuaron a los 7, 14 y 28 días. Los ensayos se ejecutaron bajo las normas técnicas correspondientes y utilizando procedimientos estandarizados (ASTM C666, métodos A y B), Con la finalidad de evaluar el desempeño del concreto modificado bajo condiciones simuladas de congelamiento y deshielo, aportando así evidencia experimental relevante y contextualizada a la ingeniería de materiales en ambientes altoandinos.

METODOLOGÍA

1 Se implementó un estudio experimental, guiado por un enfoque cuantitativo, con el propósito de analizar cómo la incorporación de polvo de aluminio como agente generador de aire afecta las propiedades físico-mecánicas del concreto 4 sometido a ciclos de congelamiento y deshielo. Se elaboraron 180 especímenes cilíndricos (10 cm × 20 cm) distribuidos en seis grupos: control (sin aditivo), referencia comercial (0.05% Chema Air) y cuatro experimentales con polvo de aluminio (0.05%, 0.075%, 0.10% y 0.15% respecto al peso del cemento). Las 8 propiedades en estado fresco (asentamiento, contenido de aire y peso unitario) se evaluaron inmediatamente después de preparar cada mezcla conforme a ASTM C143, C231 y C138. Los especímenes fueron sometidos a ciclos de congelamiento-deshielo diferenciados por edad: a 7 y 14 días mediante Procedimiento B de ASTM C666 en laboratorio (congelamiento en aire a -18°C y deshielo en agua a +4°C con 35 y 70 ciclos respectivamente), y a 28 días mediante Procedimiento A en condiciones reales de Macusani (congelamiento y deshielo en agua con 140 ciclos). 1 Tras completar los ciclos prescritos, se evaluó la resistencia a la compresión

siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C39 utilizando máquina de compresión, permitiendo identificar la dosificación óptima que equilibra resistencia, durabilidad y trabajabilidad del concreto en ambiente altoandino.

2.1. Diseño experimental

El presente estudio se ejecutó mediante una metodología cuantitativa y de carácter experimental para evaluar el comportamiento del concreto con incorporadores de aire bajo ciclos de congelamiento y deshielo. Se elaboraron 180 probetas de geometría cilíndrica (10 cm de diámetro × 20 cm de altura) distribuidos en seis grupos de estudio: un grupo control sin aditivos), un grupo de referencia comercial con 0.05% de Chema Air, y cuatro grupos experimentales con dosificaciones de polvo de aluminio (0.05%, 0.075%, 0.10% y 0.15% respecto al peso del cemento).

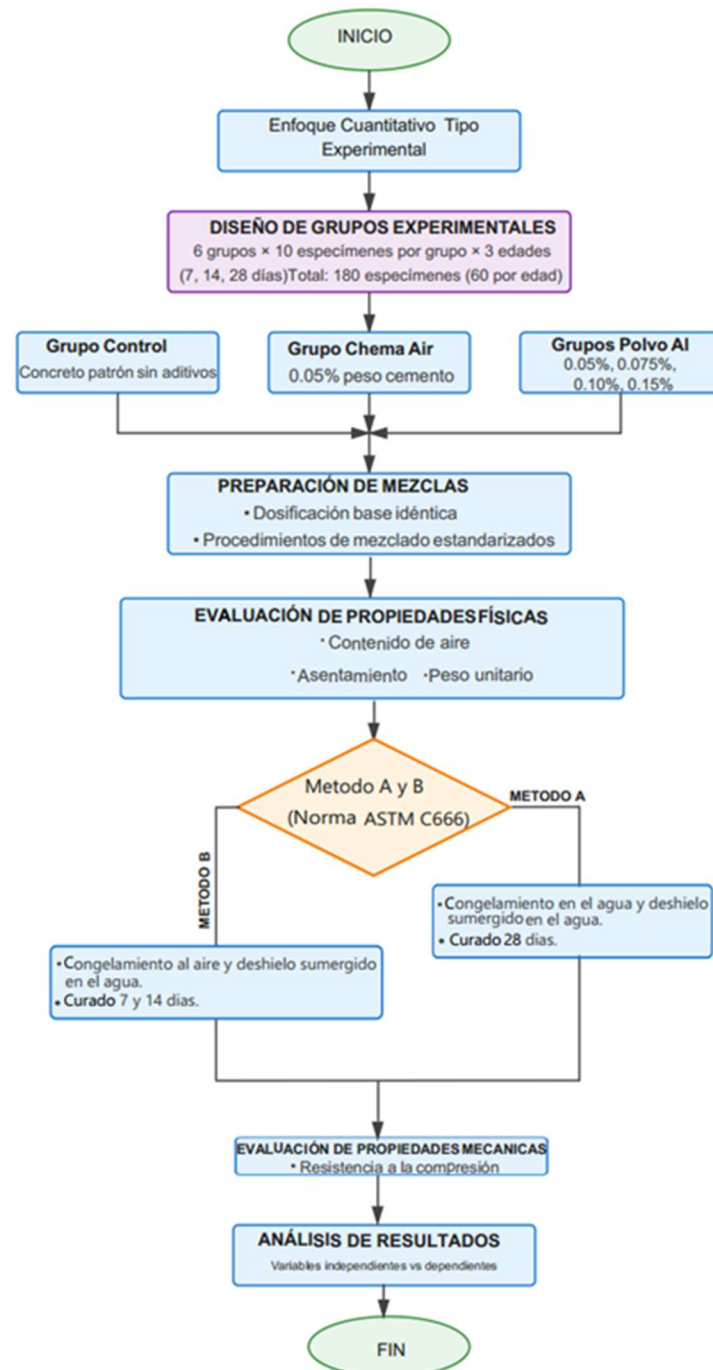
Tras la preparación de las mezclas, se procedió a medir las características en estado fresco (contenido de aire, asentamiento y peso unitario), posterior a lo cual los especímenes fueron sometidos a curado diferenciado según la edad. Los especímenes de 7 y 14 días fueron expuestos al Procedimiento B de ASTM C666 en laboratorio (congelamiento en aire frío a -18°C seguido de deshielo en agua a +4°C), mientras que los especímenes de 28 días fueron evaluados mediante el Procedimiento A en condiciones reales de Macusani (congelamiento y deshielo completo en agua a -18°C y +4°C respectivamente).

Después de completar los ciclos congelación-descongelación especificados, fue evaluada la resistencia a la compresión conforme a ASTM C39 como propiedad mecánica fundamental. Este análisis permitió correlacionar el efecto de cada

dosificación de aditivo con el comportamiento del concreto, identificando la formulación óptima que equilibra resistencia, contenido de aire, asentamiento y peso unitario.

Figura 1

Flujograma del proceso experimental.



Nota. Se fabricaron 180 especímenes distribuidos en 6 grupos $\times$ 10 especímenes $\times$ 3 edades de curado. Para el presente artículo se reportan principalmente los resultados a 28 días de curado, mientras que los datos obtenidos a 7 y 14 días se utilizaron para la evaluación comparativa del desarrollo de resistencia y el control de tendencias de las propiedades mecánicas.

2.2. Polvo de aluminio

Para inducir la expansión de la mezcla, se empleó polvo de aluminio reciclado, procedente de residuos de viruta generados en talleres de carpintería metálica. El acondicionamiento del material comprendió una fase inicial de secado para la remoción de humedad, seguida de un proceso de conminución manual mediante el uso de mortero. Con el fin de estandarizar la granulometría, el producto obtenido se sometió a un tamizado a través de la malla N.º 200, garantizando un tamaño de partícula inferior a 75 μm . Este protocolo de preparación se implementó con el propósito de asegurar una reactividad química óptima y favorecer la distribución homogénea del agente expansivo en la matriz de concreto.

Figura 2

Proceso de tamizado y cuantificación de polvo de aluminio mediante balanza de precisión.



La Figura 2 ilustra el proceso de clasificación granulométrica del aluminio, en el cual el material pulverizado se procesa a través de un tamiz N.º 200 (con apertura de 75 µm) acoplado a un recipiente receptor metálico. Esta operación tiene como finalidad segregar y recolectar exclusivamente la fracción de partículas finas, necesaria para garantizar la reactividad adecuada en la dosificación de las mezclas de concreto.

1 La investigación desarrollada por Liu et al. (2017) establece un antecedente técnico significativo, al validar la viabilidad del uso de polvo de aluminio con un tamaño de partícula promedio de aproximadamente 80 µm como agente generador de gas. Esto, a pesar de que dicho material exhibe una cinética de reacción inferior en contraste con el polvo de grado industrial de 45 µm empleado como referencia de control.

Por consiguiente, dado que la granulometría del material utilizado en esta investigación es inferior a 75 µm, su finura supera a la del residuo validado por Liu et al. (2017), aspecto que respalda teóricamente su idoneidad y sugiere una reactividad potencial superior para la aplicación prevista. Aunque el alcance del presente trabajo no contempló la caracterización química instrumental del polvo, su empleo se fundamenta en la literatura técnica existente, la cual documenta ampliamente la capacidad del aluminio finamente dividido para actuar como agente aireante. Este efecto se atribuye a la reacción química con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, proceso que genera gas hidrógeno y promueve la expansión de la matriz.

1 Según Shabbar et al. (2017), el aluminio en polvo actúa como agente espumante al reaccionar con el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 formado durante la

hidratación del cemento, produciendo burbujas de gas hidrógeno H_2 que generan poros finos en la matriz cementicia.

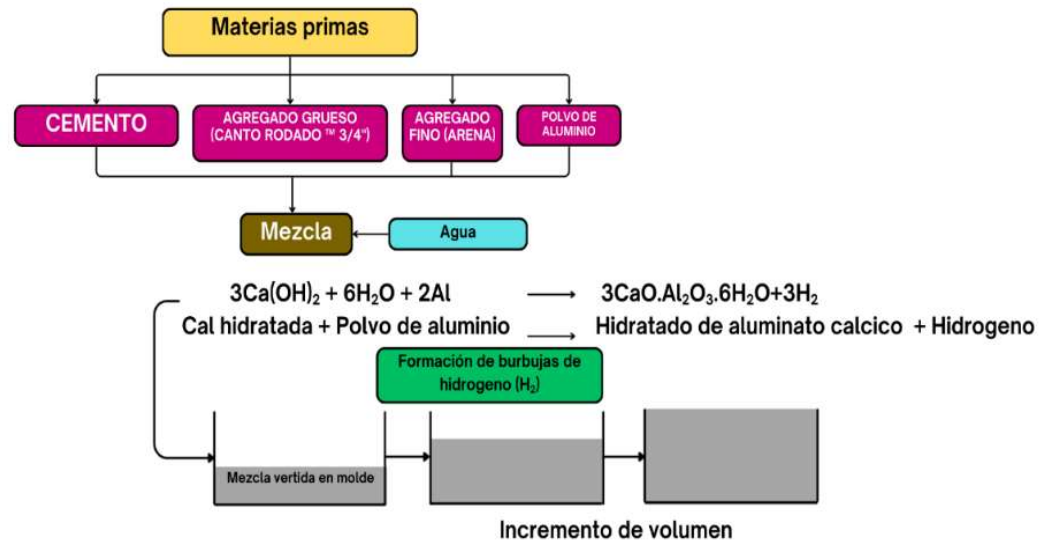
1 La efectividad del proceso de aireación está condicionada por la reactividad del polvo de aluminio, parámetro que depende fundamentalmente de la finura de sus partículas. La reacción de este agente con la matriz cementicia impacta directamente en las propiedades físico-mecánicas del material: a medida que se incrementa la dosificación, se registra una reducción proporcional en la densidad, acompañada de un aumento en la porosidad. Este cambio microestructural conlleva, inevitablemente, una disminución en el desempeño mecánico, afectando variables críticas como la resistencia a compresión, resistencia a flexión y módulo de elasticidad.

30 Al respecto, Elrahman et al. (2020) afirman que el polvo de aluminio presenta una elevada reactividad en entornos alcalinos, proceso químico que desencadena la liberación de gas hidrógeno y la consecuente formación de vacíos en el interior de la matriz cementicia. Asimismo, estos autores destacan que la cinética de dicha reacción se intensifica conforme se reduce el tamaño de partícula, lo cual evidencia la importancia crítica del control granulométrico como mecanismo para regular la morfología y distribución de la estructura porosa generada.

1 Desde una perspectiva fisicoquímica, el aluminio metálico experimenta una reacción en el entorno altamente alcalino de la pasta de cemento, interactuando con el hidróxido de calcio liberado durante la fase de hidratación. Esta interacción química propicia la liberación de gas hidrógeno, dando lugar a la formación de una estructura celular porosa en la matriz. Dicho mecanismo puede describirse, de forma simplificada, mediante las siguientes ecuaciones químicas:

Figura 3

Reacción química de cal hidratada y polvo de aluminio para incorporación de aire.



Nota. Diagrama esquemático del mecanismo de expansión inducido por polvo de aluminio. La hidratación del cemento libera hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), creando un entorno alcalino en el que el aluminio (Al) reacciona para generar gas hidrógeno (H_2) y aluminatos cálcicos hidratados. El aprisionamiento de las burbujas de H_2 durante la etapa de colado ocasiona el incremento volumétrico de la mezcla en estado fresco. Adaptado de Shon et al. (2018b).

El esquema sintetiza la preparación del concreto convencional al que se incorpora polvo de aluminio. Tras dosificar cemento, agregados gruesos y finos, y añadir el aluminio, el ingreso de agua inicia la hidratación del cemento y la formación de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

El esquema sintetiza la metodología empleada para la elaboración de concreto modificado con polvo de aluminio. Tras la dosificación de los componentes sólidos (cemento, agregados finos y gruesos) y la incorporación del agente de aluminio, la adición del agua de mezcla desencadena simultáneamente

1 el proceso de hidratación del cemento y la liberación de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

El mecanismo de reacción propuesto coincide con lo reportado por Paikara y Gyawali (2023), quienes documentaron que la generación de hidrógeno (H_2) se manifiesta de manera acelerada entre 5 y 10 minutos posteriores a la incorporación del polvo de aluminio. Este proceso da lugar a la formación de burbujas con un diámetro aproximado de $33\ \mu\text{m}$, siempre que el pH del medio oscile entre 9 y 12. Asimismo, dichos autores validaron la estequiometría de la reacción representada por la ecuación: $2\text{Al} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$, determinando una tasa de producción de hidrógeno del 3,7% en relación con el peso del aluminio empleado, lo cual equivale a $46\ \text{g H}_2/\text{L}$ en volumen.

1 Además del tamaño de partícula, la pureza y la reactividad del agente espumante son factores determinantes en su desempeño. La efectividad del polvo de aluminio, por ejemplo, está directamente ligada a la pureza del metal, ya que, como señalan Kuziak et al. (2021), la acción expansiva del polvo de aluminio depende de la pureza del metal, ya que la presencia de óxidos en la superficie puede retrasar o limitar la liberación de hidrógeno durante la reacción con el hidróxido de calcio.

Aunque la presente investigación no contempló la ejecución de ensayos cuantitativos para certificar la pureza elemental del material, se asumió una elevada concentración de aluminio metálico, premisa basada en la naturaleza de los residuos de mecanizado provenientes de la carpintería metálica. Con el objeto de potenciar la reactividad química.

La incorporación de polvo de aluminio a la mezcla cementicia provoca una reacción química con el hidróxido de calcio, liberando gas hidrógeno que genera burbujas de aire microscópicas. Estas burbujas quedan atrapadas en la matriz del concreto, formando una estructura porosa que mejora su comportamiento frente a ciclos de congelamiento y descongelamiento (Shon et al., 2018b)

Tabla 1

Propiedades del polvo de aluminio como agente incorporador de aire: valores adoptados y justificación.

Propiedad	Valor Adoptado	Autores	Justificación
Tamaño de partícula	< 75 µm	Liu, Y., Ma, S., Wei, L., y Chen, H. (2017)	Liu et al. validaron polvo residual de ~80 µm como agente espumante efectivo. El material < 75 µm usado en este estudio presenta mayor finura, sustentando su idoneidad y reactividad potencial
Reactividad	Alta en medio alcalino	Elrahman, M. A., Chung, S. Y., Sikora, P., Rucinska, T., y Stephan, D. (2020)	"El polvo de aluminio es altamente reactivo en medios alcalinos, liberando hidrógeno que origina vacíos dentro de la matriz cementicia; la intensidad aumenta al disminuir el tamaño de partícula"
Mecanismo de reacción	$2\text{Al} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2$	Shabbar, R., Neduri, K., y Wilson, W. (2017)	El aluminio reacciona con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado durante la hidratación, produciendo H_2 que genera poros finos en la matriz
Método de aplicación	Expansión química autónoma	Shon, C. S., Lee, D., Kim, J. H., y Chung, C. W. (2018)	"A diferencia del método mecánico que requiere generador de espuma, el método químico resulta autónomo al incorporarse directamente a la mezcla"

Nota. A pesar de que el presente estudio no incluyó la caracterización química cuantitativa del material utilizado, la literatura especializada respalda la viabilidad técnica de emplear polvo de aluminio de características análogas,

validándolo como un agente eficaz para la incorporación de aire en matrices cementicias.

2.3. Preparación de mezclas

La elaboración del concreto se ejecutó aplicando un diseño de mezcla optimizado atendiendo a los parámetros de ambiente controlado, considerando la relación agua/cemento, la naturaleza del aditivo generador de aire y los pesos húmedos ajustados de cada dosificación. La composición incluyó cemento Portland Tipo IP (marca Rumi), agregados grueso y fino, agua y, conforme a cada conjunto de experimentación, el aditivo generador de aire Chema Entrampaire o polvo de aluminio en variadas concentraciones. La Tabla 1 expone los pesos húmedos empleados en cada formulación.

Conforme al esquema metodológico diseñado, se llevaron a cabo simultáneamente tanto el proceso de curado como la implementación de los ciclos de congelación y descongelación, apegándose a los lineamientos de los protocolos A y B detallados en la norma ASTM C666. En el caso de los especímenes con edades de 7 y 14 días se empleó el Procedimiento B en laboratorio, consistente en ciclos alternados de congelamiento en aire frío a -18°C seguido de deshielo en agua a $+4^{\circ}\text{C}$. Para las probetas de 28 días se empleó el Procedimiento A en condiciones reales de Macusani, consistente en mantener las muestras completamente sumergidas en agua durante ciclos alternados de congelamiento y deshielo ($+4^{\circ}\text{C}$), reproduciendo así fielmente las condiciones climáticas extremas de la región altoandina.

Tabla 2
Cantidades de materiales utilizados en cada mezcla.

Descripción	Patrón	Aditivo				
		Chema	Polvo de Aluminio	Polvo de Aluminio	Polvo de Aluminio	Polvo de Aluminio
		0.05%	0.05%	0.075%	0.10%	0.15%
Cemento Rumi	381 kg	381 kg	381 kg	381 kg	381 kg	381 kg
Agua	181 L	181 L	181 L	181 L	181 L	181 L
Agregado Grueso	1026 kg	1026 kg	1026 kg	1026 kg	1026 kg	1026 kg
Agregado Fino	610 kg	610 kg	610 kg	610 kg	610 kg	610 kg
Aditivo	---	0.19 Kg	---	---	---	---
Polvo de Aluminio	---	---	0.19 Kg	0.29 Kg	0.38 Kg	0.57 Kg

La Tabla 2 expone las dosificaciones en estado húmedo empleadas en la formulación de mezclas para todos los grupos experimentales. El diseño de mezcla se mantuvo constante en todos los casos, con una dosificación estandarizada de cemento Portland Tipo IP (381 kg), agregado grueso (1026 kg), agregado fino (610 kg) y agua (181 L), lo que permite aislar el efecto del tipo de aditivo incorporador de aire como variable independiente. Según el grupo experimental, se adicionó Chema Entrampaire (0.05%) y polvo de aluminio en variadas concentraciones (0.05%, 0.075%, 0.10% y 0.15% respecto al peso del cemento).

Las cantidades de polvo de aluminio aplicadas (0.05%, 0.075%, 0.10% y 0.15%) se seleccionaron basándose en evidencia de estudios previos. Jongprateep et al. (2018) evaluó porcentajes comprendidos entre 0.05% y 0.20% en concreto aireado sometido a ciclos de congelamiento-deshielo, demostrando que pequeñas

adiciones de aluminio generan un incremento controlado de poros de aire, mejorando la resistencia frente a daño por congelación. Sin embargo, cuando estos porcentajes se exceden significativamente, se corre el riesgo de comprometer las propiedades mecánicas. En consecuencia, la selección de dosificaciones en el presente estudio busca mantener un equilibrio crítico entre la incorporación de aire (necesaria para durabilidad en ciclos congelamiento-deshielo) y la conservación de propiedades resistentes (necesarias para seguridad estructural). Los datos presentados en la Tabla 1 demuestran que la incorporación de aluminio en pequeñas dosis es técnicamente viable, facilitando lograr una adecuada proporción entre la introducción de aire y el mantenimiento de características de resistencia, en concordancia con investigaciones previas.

2.4. Ensayo de congelamiento y deshielo

El mecanismo de congelamiento-deshielo se origina cuando el agua intersticial presente en la red de poros cambia a estado sólido, provocando una expansión volumétrica aproximadamente un 9% de su volumen en estado líquido. Este cambio de fase genera grandes esfuerzos de tracción internos en la estructura del material que pueden provocar fracturas microscópicas, y posteriormente, al subir la temperatura y deshielo el agua, dichos esfuerzos se liberan parcialmente, pero el daño acumulativo persiste.

Este proceso repetitivo de cambio de fase origina esfuerzos internos en la estructura del material que, de manera progresiva, conducen a la aparición de microfisuras, a la disminución de la resistencia mecánica y a un deterioro superficial apreciable. La severidad del daño está determinada principalmente por el contenido

de agua absorbida, el nivel de saturación y el número de ciclos de congelamiento-deshielo a los que es expuesto el concreto.

Tabla 3

Definiciones de clima frío según normativas internacionales para concreto.

Fuente	Definición de Clima Frío	Condiciones y Medidas Clave
Reglamento Nacional de Edificaciones NTE E.060 – Concreto Armado (5.12)	Clima frío cuando el promedio de temperatura ambiente es $\leq 5^{\circ}\text{C}$ por tres días consecutivos o $\leq 10^{\circ}\text{C}$ en 12 horas, excluyendo periodos donde promedios superen 10°C .	Mantener temperatura del concreto $> 10^{\circ}\text{C}$ durante curado si ambiente $< 5^{\circ}\text{C}$; aplicar medidas específicas de protección y curado.
Norma ACI 306, Cold Weather Concreting (Sección 1.2)	Clima frío cuando se registran o pronostican temperaturas ambientales inferiores a 4°C durante el período de protección; período frío cuando la media diaria $< 5^{\circ}\text{C}$ por más de tres días y no supera 10°C por más de la mitad del día.	Control estricto de la temperatura del concreto para evitar daños por congelamiento temprano y garantizar el desarrollo de resistencia.
ASTM C666	Esta norma no define el concepto de clima frío; sin embargo, establece dos métodos de ensayo para evaluar la resistencia del concreto frente a ciclos acelerados de congelamiento-deshielo Método A (congelación y deshielo en agua) y Método B (congelación en aire, deshielo en agua).	Facilita la determinación de la resistencia del concreto frente a los efectos del congelamiento y deshielo según condiciones simuladas en laboratorio.

Tabla 4

Metodología de ensayo para determinar la durabilidad ante la acción cíclica de congelamiento y deshielo, regida por los lineamientos de la ASTM C666.

Etapa	Acción Principal	
	A (Congelación y deshielo en agua)	B (Congelación en aire y deshielo en agua)
Preparación de Muestra	Moldeado y Curado Estándar de Probetas de Concreto	
Saturación Inicial	Sumergir la probeta en agua hasta la saturación total	
Ciclo de Congelamiento	Congelar probetas sumergidas en agua a $\leq -18^{\circ}\text{C}$	Congelar probetas expuestas al aire frío a $\leq -18^{\circ}\text{C}$
Ciclo de Deshielo	Elevar temperatura del agua a $+4^{\circ}\text{C}$ (probetas siguen sumergidas)	Sumergir probetas en agua a $+4^{\circ}\text{C}$ (deshielo controlado)
Repetición de Ciclos	Realizar -25 hasta 300 ciclos	

La Tabla 4 presenta el protocolo de ensayos implementado para analizar la respuesta del concreto frente a los ciclos de hielo y deshielo, adoptando una metodología mixta que integra pruebas aceleradas en laboratorio y monitoreo en condiciones de exposición natural. Los especímenes de 7 y 14 días fueron sometidos a ciclos acelerados en laboratorio mediante el Procedimiento B de ASTM C666 (congelamiento en aire a -18°C seguido de deshielo en agua a $+4^{\circ}\text{C}$), permitiendo obtener resultados comparativos tempranos sobre el efecto del aditivo en edades iniciales. Por otro lado, los especímenes de 28 días fueron evaluados mediante el Procedimiento A de ASTM C666 en condiciones reales de Macusani (congelamiento y deshielo completamente sumergidos en agua), reproduciendo

más fielmente las condiciones climáticas extremas del ambiente altoandino donde el concreto permanece en alta humedad durante gran parte del año.

Tabla 5

Programa experimental de ensayos de resistencia y durabilidad por edad de curado.

Serie de probetas	Proceso	Qué analiza	Comparación posible	Observaciones adicionales
7 y 14 días	Congeladora,	Comportamiento		6 diseños
	ciclos ASTM	temprano frente a	Resistencia/comportamiento	evaluados; cada
	C666	heladas	frente a daño térmico precoz	diseño con 20
	Procedimiento B	simuladas		testigos
28 días	Curado y			6 diseños
	exposición en	Resistencia en	Resistencia en clima natural,	evaluados; cada
	Macusani	condición real	sin aceleración	diseño con 10
	(condición real, obra)			testigos
	Procedimiento A)			

Figura 4

Protocolo de ensayo ASTM C666: (a) fases de congelamiento, (b) monitoreo de temperatura, (c) validación y (d) deshielo.



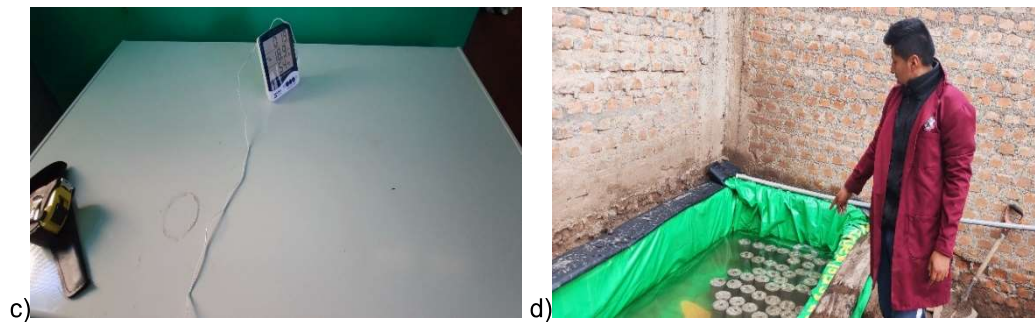


Tabla 6

Detalle del protocolo diario para ciclos de congelamiento-deshielo según ASTM C666.

	Hora inicio	Hora fin	Duración	Proceso aplicado	Descripción
			(horas)		
1	5:00 am	8:00 am	3	En la congeladora	Inicia congelamiento (-18°C)
2	8:00 am	11:00 am	3	Poza de curado	Deshielo en agua (+4°C)
3	11:00 am	2:00 pm	3	En la congeladora	Segundo ciclo de congelamiento
4	2:00 pm	5:00 pm	3	Poza de curado	Segundo deshielo
5	5:00 pm	8:00 pm	3	En la congeladora	Tercer ciclo de congelamiento

2.5. Protocolo de ensayo para ciclos rápidos de congelamiento y deshielo (ASTM C666) – Simulación en Ciudad de Macusani

Para esta investigación, el Procedimiento A de la norma ASTM C666 se aplicó en la ciudad de Macusani para evaluar la resistencia del concreto frente a los efectos del congelamiento-deshielo. El procedimiento contempla la exposición cíclica de especímenes a temperaturas alternadas de congelación y deshielo, conservándolos en estado de saturación total a lo largo del ensayo.

Cada ciclo inicia con el enfriamiento de las muestras hasta aproximadamente -18°C en una cámara climatizada, seguido de la etapa de descongelación en agua a una temperatura cercana a $+4^{\circ}\text{C}$. Este contacto constante con el agua garantiza la completa saturación de las cavidades internas del concreto, simulando las condiciones más severas a las que el material puede estar expuesto en climas fríos y húmedos como el de Macusani, según se consigna en el cuadro siguiente.

Tabla 7

Registro histórico de temperaturas mínimas en Macusani, Puno.

Año / Evento	Temp. mínima registrada Macusani
6 de julio de 1968	-28.2°C (record nacional)
Invierno (años recientes)	-12°C a -15°C
Mazocruz (Puno, histórico)	-18°C
Dic. 2023 / Ene. 2024	-2.0°C a -2.2°C (promedio)

Figura 5

Ensayos de ciclos de congelamiento-deshielo según ASTM C666 procedimiento A: (a) preparación de probetas cilíndricas; (b) fase de deshielo en agua controlada a $+4^{\circ}\text{C}$ con termostato.



El procedimiento A de la norma ASTM C666, aplicado en la ciudad de Macusani, el procedimiento implica la exposición cíclica de los especímenes de concreto a fases alternas de congelación y deshielo, manteniéndolas completamente sumergidas en agua durante todo el proceso. En cada ciclo, las muestras se exponen a un ambiente controlado donde la temperatura desciende hasta aproximadamente -18°C para simular el congelamiento, seguido por una fase de descongelación en agua a una temperatura cercana a $+4^{\circ}\text{C}$, controlada mediante termostato.

Tabla 8
Registro histórico de temperaturas mínimas en Macusani, Puno.

Ciclo	Hora inicio	Hora fin	Duración (horas)	Proceso aplicado	Descripción detallada
1	1:00 PM	4:00 PM	3	Congelamiento en agua	Probeta sumergida en agua; temperatura desciende para simular congelamiento.
2	4:00 PM	7:00 PM	3	Deshielo en agua	Probeta sumergida en agua; se utiliza equipo de termostato para elevar la temperatura hasta 4°C (deshielo).
3	7:00 PM	10:00 PM	3	Congelamiento en agua	Probeta sumergida en agua; temperatura vuelve a descender para simular otro ciclo de congelamiento.
	10:00 PM	1:00 AM	3	Deshielo en agua	Probeta sumergida en agua; termostato aumenta temperatura del agua hasta 4°C (segundo ciclo de deshielo).
	1:00 AM	4:00 AM	3	Congelamiento en agua	Probeta sumergida en agua; temperatura desciende nuevamente (tercer ciclo de congelamiento).

2.6. Cantidad de ciclos de congelamiento-deshielo aplicados

Durante las primeras etapas del ensayo, tras completar periodos de curado de 7 y 14 días, los especímenes fueron sometidos a una carga térmica de 35 y 70 ciclos de congelamiento y deshielo respectivamente. Este protocolo posibilita evaluar la respuesta temprana del material sometido a ciclos de congelamiento-deshielo, contrastando el desempeño de la formulación control con las mezclas que incorporan diversas proporciones de polvo de aluminio.

En la última fase, correspondiente a probetas de 28 días, se aplicaron un total de 140 ciclos para cada diseño experimental. Esta cantidad simula condiciones severas acumulativas de exposición y permite evaluar el desempeño resistente y la vida útil del material frente a la acción deletérea del congelamiento-deshielo, aportando información sobre el desempeño esperado para cada composición.

Tabla 9
Ciclos de congelamiento y deshielo.

Ítem	Descripción	7 días	14 días	28 días
		Ciclos	Ciclos	Ciclos
01	Patrón	35	70	140
02	+ 0.05 % Chema Air	35	70	140
03	+ 0.05 % polvo de aluminio	35	70	140
04	+ 0.075 % polvo de aluminio	35	70	140
05	+ 0.10 % polvo de aluminio	35	70	140
06	+ 0.15 % polvo de aluminio	35	70	140

Shon et al. (2018) demuestran que la resistencia a congelamiento-deshielo (H-D) no depende únicamente de la porosidad total, sino del tamaño y distribución de los vacíos internos: los huecos de aire menores de 300 μm son críticos para evitar daño por congelación. La evidencia experimental disponible identifica un límite crítico de comportamiento ante la exposición a ciclos de congelamiento-deshielo. Las formulaciones sin incorporación de aire, pese a mostrar mayor densidad y resistencia en edades tempranas, manifiestan deterioro acelerado con valores de módulo dinámico relativo (RDME) por debajo del 70% y pérdida de masa más pronunciada. En contraste, los sistemas que desarrollan microburbujas de distribución homogénea (diámetro < 300 μm) exhiben índices de durabilidad notablemente más elevados.

RESULTADOS

3.1. Resistencia a la compresión (NTP 339.034)

Los valores obtenidos en los ensayos de compresión de los cilindros de concreto mostraron variaciones en función de la dosificación del aditivo. Los grupos evaluados correspondieron a: concreto patrón y concreto con adición de Chema Entrampaire (0.05%) como referencia, concreto con incorporación de polvo de aluminio en dosificaciones de 0.05, 0.075, 0.10 y 0.15%. Los especímenes fueron evaluados a los 7, 14 y 28 días de edad, fundamentándose en investigaciones precedentes que constituyeron referentes esenciales para establecer el comportamiento del polvo de aluminio en relación con la resistencia a compresión del concreto.

Con el propósito de garantizar resultados confiables y análisis precisos, la evaluación de la resistencia del concreto debe realizarse a los 28 días de edad, momento en el cual el material alcanza aproximadamente el 100% de su resistencia final. Por esta razón, ensayar las muestras en este período es una prioridad.

En la tabla 9 adjunta se consignan los resultados de la evaluación de resistencia a la compresión que representan el valor promedio obtenido de 10 especímenes cilíndricos ensayados para cada dosificación en las edades especificadas (7, 14 y 28 días).

Tabla 10

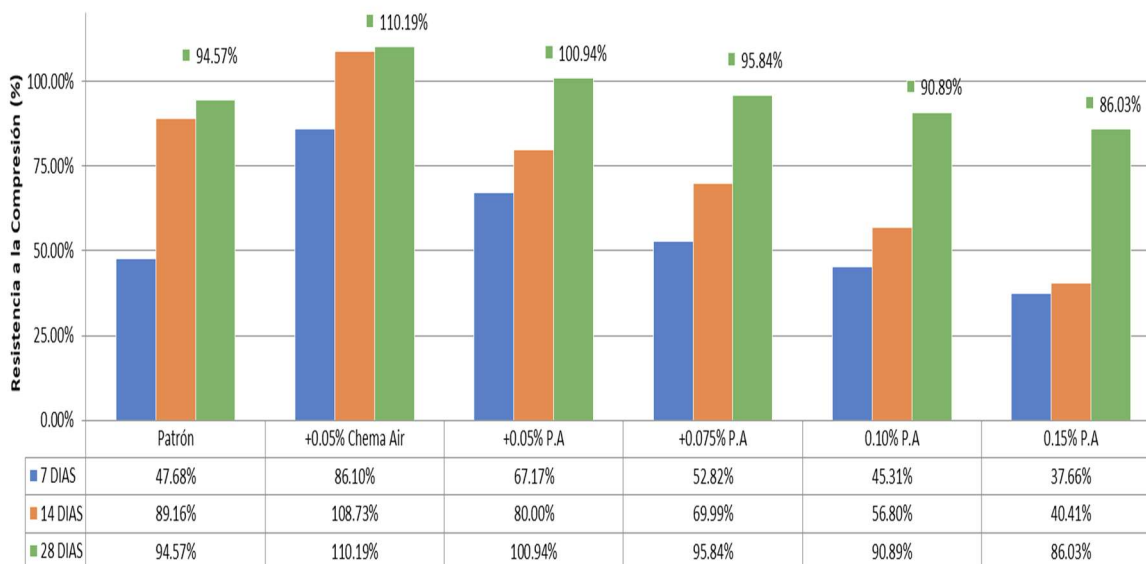
Variación de la resistencia mecánica del concreto ante la incorporación de porcentajes variables de aditivo y polvo de aluminio.

Dosificación	Diseño de Mezcla	7 días	14 días	28 días
	<i>F'c (Kg/cm²)</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>Kg/cm²</i>
Patrón	210	100.12	187.23	198.60
+0.05% Chema Air	210	180.80	228.33	231.39
+0.05% P. A	210	141.06	167.99	211.98
+0.075% P. A	210	110.92	146.98	201.27
+0.10% P. A	210	95.15	119.29	190.87
+0.15% P. A	210	79.08	84.87	180.67

Nota. P.A. = Polvo de aluminio.

Figura 6

Comportamiento a compresión del concreto con adiciones de polvo de aluminio y Chema Air a diferentes tiempos de curado.



Los resultados evidenciaron que la incorporación de polvo de aluminio generó una reducción progresiva de la resistencia a compresión a los 28 días de edad. Para dosificaciones entre 0,05 y 0,15 % de P.A, los valores promedio descendieron desde 211,98 hasta 180,67 kg/cm²

Linger y Wang, (2021), Ensayó cilindros 6"×12" con 0,01–0,07 % de polvo de aluminio (respecto al cemento) y mostró que al aumentar el aluminio la resistencia a compresión a 28 días disminuye; el efecto se atribuye a la expansión gaseosa (H₂) y al consiguiente aumento de poros. Adicionalmente, se demostró que la restricción de la expansión volumétrica (confinamiento) reduce la disminución de resistencia, lo cual indica que el deterioro se origina en la porosidad inducida y no en alteraciones químicas perjudiciales de la matriz cementicia.

Raj y John (2019) determinaron que la incorporación de polvo de aluminio reduce la resistencia a compresión debido al aumento de la porosidad y la

1 disminución de la densidad. La dosificación de 0.50 % de aluminio alcanzó el valor máximo local (21.12 MPa) entre las formulaciones con este aditivo; no obstante, todas las mezclas resultaron inferiores a la de referencia (40.00 MPa). Los autores proponen como dosificación óptima 0.25 % de Al.

32 En relación con los resultados experimentales, Raj y John (2019) reportan el siguiente comportamiento del aluminio a 28 días sin ceniza volante (FA): la mezcla de referencia (0 % Al) alcanzó 40.00 MPa; la dosificación de 0.25 % registró 17.30 MPa; 0.50 % obtuvo 21.12 MPa; 0.75 % presentó 18.10 MPa; y 1.00 % exhibió 14.08 MPa, con densidades que disminuyeron de 2119 a un rango de 1736–1785 kg/m³. En consecuencia, cualquier adición de aluminio provoca una reducción de la resistencia a compresión (f_c) respecto a la mezcla control, observándose una tendencia de disminución progresiva conforme se incrementa el porcentaje del aditivo.

1 Raj y John (2019) reportan en su estudio que la resistencia a compresión experimentó una disminución continua conforme aumentó la proporción de aluminio: desde 11,8 MPa con 0,05 % hasta 10,4 MPa con 0,10 %, descendiendo a 8,266 MPa con 0,15 % y finalmente a 6,666 MPa con 0,20 %. Por consiguiente, la dosificación de 0,05 % de Al se estableció como el nivel óptimo que alcanza aproximadamente 12 MPa, en tanto que porcentajes mayores comprometen la resistencia a compresión debido al incremento de porosidad derivado de la reacción de liberación de gas del aluminio.

1 Raj y John (2019) reportan en su estudio que la resistencia a compresión experimentó una disminución continua conforme aumentó la proporción de aluminio: desde 11,8 MPa con 0,05 % hasta 10,4 MPa con 0,10 %, descendiendo

1 a 8,266 MPa con 0,15 % y finalmente a 6,666 MPa con 0,20 %. Por consiguiente, la dosificación de 0,05 % de Al se estableció como el nivel óptimo que alcanza aproximadamente 12 MPa, en tanto que porcentajes mayores comprometen la resistencia a compresión debido al incremento de porosidad derivado de la reacción de liberación de gas del aluminio.

Para concretos con incorporación de aire que emplean proporciones elevadas de aluminio (0.25-1.0%), estudios precedentes han registrado reducciones significativas de la resistencia a compresión, con valores que descendieron desde 53 MPa hasta 18.6 MPa. Este comportamiento corrobora que porcentajes mayores de aluminio generan un aumento de la porosidad**, deteriorando consecuentemente la resistencia mecánica a compresión del concreto** (Shabbar et al., 2017).

1 Tang Van et al. (2019) documentaron una disminución significativa de la resistencia a la compresión conforme aumentaba el contenido de aluminio, variando desde 52,7 MPa (0%) hasta 20,5 MPa (1,0%), fenómeno que coincidió con una reducción de la densidad seca (de 2190 a 1485 kg/m³) y un incremento en la porosidad (de 8,95 a 24,44%). Esta pérdida de capacidad resistente se atribuye a la mayor fracción de vacíos resultante de la reacción entre el aluminio y el hidróxido de calcio, la cual libera hidrógeno gaseoso y airea la matriz cementicia, comportamiento corroborado por un ajuste lineal a los 28 días ($f'c = 47,82 - 29,28 \cdot x$) que indica que dosificaciones iguales o superiores al 0,50% reducen la resistencia al entorno de 20–26 MPa.

Figura 7

El ensayo de compresión axial se ejecuta según el siguiente procedimiento: (a) aplicación de carga axial en la probeta cilíndrica utilizando equipo de prensado hidráulico tipo Forney; (b) medición de los parámetros.

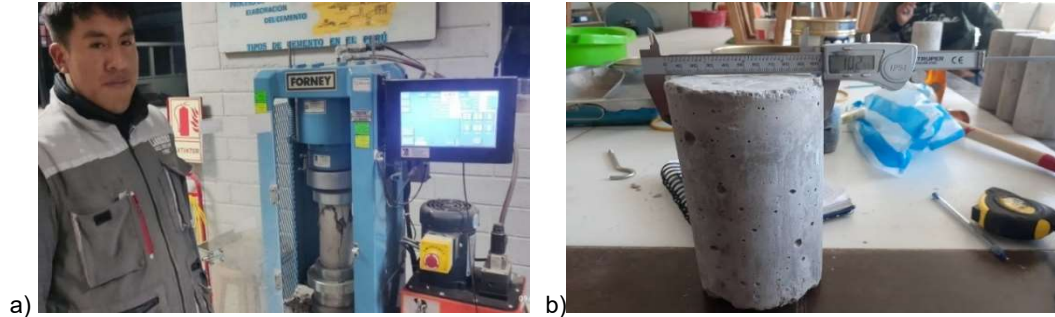
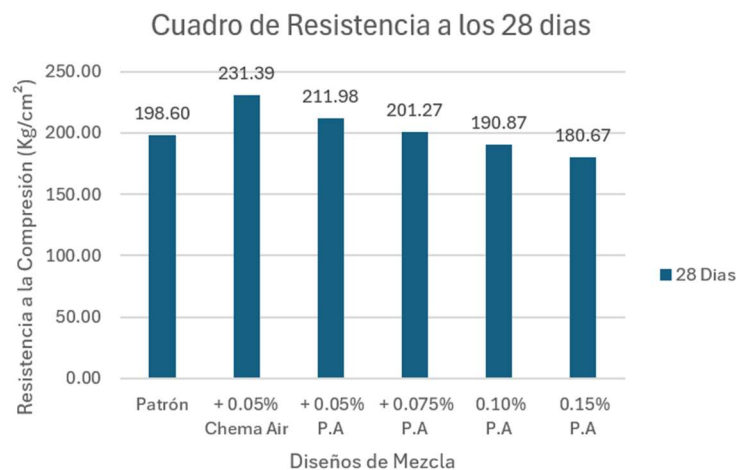


Figura 6

Resultados y tendencia de resistencia a la compresión a edad de 28 días.

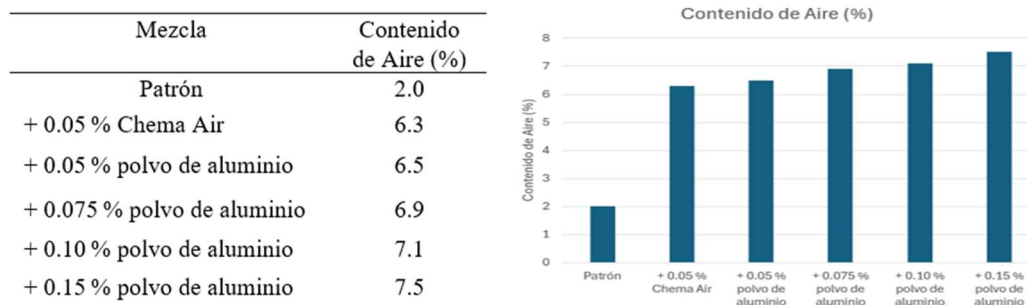


3.2. Contenido de aire (NTP 339.083)

La característica de contenido de aire en el concreto constituye una medida del volumen de vacíos presentes en la matriz. Esta medida se denota mediante un valor porcentual (%) y representa un parámetro de gran importancia que incide directamente en la durabilidad, trabajabilidad y capacidad de resistencia del material.

Figura 8

Efecto de la dosificación de polvo de aluminio y chema entrampaire sobre el contenido de aire del concreto en estado fresco.



Los datos de contenido de aire medidos en la figura evidencian que el aditivo Chema Entrampaire así como el polvo de aluminio originan un incremento notable en la porosidad del hormigón en estado fresco, si bien mediante mecanismos diferentes. En tanto que el Chema Air consigue estabilizar microcavidades de aire alcanzando un 6,3%, el polvo de aluminio produce concentraciones incrementales superiores, de 6,5% hasta 7,5%, atribuible a la reacción de tipo químico que emite gas e introduce cavidades en la matriz. Este comportamiento coincide con lo señalado por estudios sobre concretos aireados, donde se destaca que la creación de sistemas de vacíos de aire está directamente vinculada a reacciones químicas internas y a la conectividad de los poros (Sharafutdinov et al., 2019).

Durante este estudio fue evidenciado que el polvo de aluminio acrecienta de manera progresiva el contenido de aire del hormigón en estado fresco conforme se incrementa su dosis, lo cual genera una mayor cantidad de vacíos internos. Este fenómeno es concordante con lo reportado por Paikara y Gyawali, (2023), quienes indican que la adición de polvo de aluminio origina la formación de burbujas al interior del hormigón como consecuencia de procesos químicos, reduciendo la densidad global del material y originando una estructura celular.

Figura 9

Ensayo de contenido de aire según NTP 339.083.



Nota. Imagen registrada durante la ejecución del ensayo de contenido de aire en hormigón fresco mediante medidor de presión tipo A, conforme a la norma ASTM C231.

La Figura 8 presenta el ensayo de contenido de aire ejecutado con la olla de Washington, de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM C231. La mezcla sometida a evaluación corresponde a la formulación que incorpora 0,10% de polvo de aluminio. Durante la prueba, el equipo permitió registrar con precisión el volumen de aire presente en el hormigón fresco, generado por la reacción del aditivo metálico. El resultado experimental evidencia que el aluminio produce un incremento significativo en la porosidad inicial del material, manifestado en un mayor porcentaje de aire incorporado.

Este comportamiento es consistente con lo reportado por Sharafutdinov et al. (2019), quienes establecen que el aire incorporado en hormigón se genera tanto mediante aditivos aireantes tradicionales como por reacciones químicas internas que modifican la microestructura. En consecuencia, los hallazgos obtenidos en la

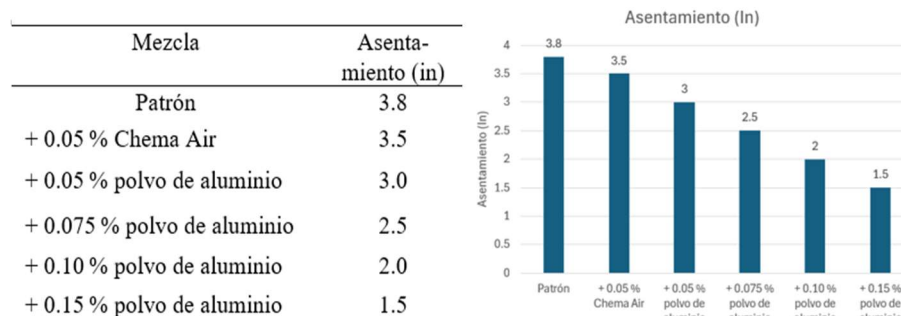
prueba confirman que la adición de polvo de aluminio produce un efecto comprobable y cuantificable en la formación de vacíos dentro de la mezcla.

3.3. Asentamiento (NTP 339.035)

El método de ensayo estándar de asentamiento permite determinar la consistencia y fluidez del material, constituyendo un indicador fundamental de la trabajabilidad del concreto en estado fresco. Esta propiedad refleja la capacidad de la mezcla para ser manipulada, colocada y compactada eficientemente, minimizando el riesgo de segregación de sus componentes constitutivos. La medición se efectúa mediante el procedimiento del cono de Abrams, el cual cuantifica el descenso vertical de la masa de concreto tras el desmolde de un cono truncado. En la Figura 9 se exponen los resultados obtenidos, correspondientes al promedio de los ensayos, precisando que se evaluó una muestra representativa por cada porcentaje de adición analizado.

Figura 10

Comportamiento de asentamiento de mezclas de concreto en estado fresco.



Nota. Valores expresados en pulgadas (in). Ensayo realizado según el método de asentamiento ASTM C143.

Los ensayos de asentamiento demostraron que el incremento progresivo del contenido de polvo de aluminio en la mezcla provocó una reducción sostenida en los valores registrados, comportamiento que indica una disminución directa en la trabajabilidad del concreto en estado fresco. Dicho fenómeno es atribuible a la interacción química del aluminio con el agua y los álcalis del cemento, reacción exotérmica que genera la liberación de gas hidrógeno (H_2). Este proceso induce la formación de microburbujas distribuidas en la matriz, modificando significativamente la reología y cohesión interna de la pasta cementicia. Por el contrario, la incorporación del aditivo aireante Chema Entrampaire generó una disminución moderada en la fluidez, dado que su mecanismo de acción se centra en la estabilización de un sistema de microburbujas de aire intencionalmente incorporado, preservando así la manejabilidad de la mezcla sin afectar sustancialmente su consistencia.

De acuerdo con Spurina et al. (2022), la adición de agentes incorporadores de aire optimiza tanto la estabilidad como la homogeneidad de la mezcla de concreto. No obstante, estos autores advierten que un exceso en el contenido de aire, que sobrepase el rango óptimo, puede comprometer la trabajabilidad del material, efecto que se acentúa particularmente en diseños de mezcla con bajas relaciones agua/cemento.

Figura 11

Asentamiento de mezclas de concreto en estado fresco.



1 En la mezcla dosificada con 0,075% de polvo de aluminio, ilustrada en la figura correspondiente, se observa una textura visiblemente más seca y con menor cohesión respecto al concreto patrón, característica indicativa de una disminución en la trabajabilidad. Si bien Shabbar et al. (2017) no cuantificaron el asentamiento en su estudio, sus hallazgos demuestran que el incremento en la dosis de aluminio eleva la porosidad y disminuye la densidad del material endurecido. Estos efectos estructurales pueden correlacionarse directamente con la reducción de la compactibilidad identificada durante la fase de estado fresco.

1 Dicha correlación indica que la sobreabundancia de aire, producto de la reacción del aluminio, afecta adversamente tanto la integridad microestructural del concreto endurecido como sus propiedades reológicas en estado fresco. Esto obstaculiza las operaciones de colocación y acabado superficial, deficiencia que se deduce cualitativamente a partir de la textura observada durante la ejecución del ensayo de asentamiento.

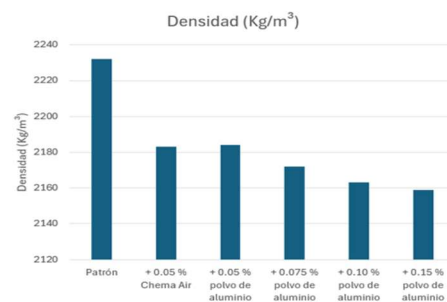
3.4. Densidad del concreto en estado fresco según NTP 339.046

Este método de ensayo establecido por el ASTM C-138, nos permite conocer la densidad (peso unitario) de los materiales ya sean compuestos o en forma de granel húmeda o compactada, los resultados de este proceso de ensayo se manejan en Kg/cm³ (ASTM,2017).

Figura 11

Peso unitario del concreto en estado fresco

Mezcla	Densidad (kg/m ³)
Patrón	2232
+ 0.05 % Chema Air	2183
+ 0.05 % polvo de aluminio	2184
+ 0.075 % polvo de aluminio	2172
+ 0.10 % polvo de aluminio	2163
+ 0.15 % polvo de aluminio	2159



1 Nota. Valores expresados en kilogramos por metro cúbico (kg/m³). Ensayo ejecutado conforme a la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.046.

1 El concreto patrón, sin incorporación de aditivos, registra una densidad de 2232 kg/m³. Tras la incorporación de 0.05% de aditivo incorporador de aire (AIA), la densidad se reduce a 2183 kg/m³, representando una disminución de 49 kg/m³. Esta reducción es atribuible a la presencia de burbujas de aire que incrementan el volumen de la mezcla sin aumentar su masa.

1 La adición de polvo de aluminio (PA) produce igualmente una reducción en la densidad del material. Con 0.05% de PA se registra una densidad de 2184 kg/m³ (disminución de 48 kg/m³); al incrementar la dosificación a 0.075%, 0.10% y 0.15%, la densidad desciende progresivamente a 2172, 2163 y 2159 kg/m³, respectivamente.

Estas reducciones, que alcanzan 73 kg/m³, demuestran el efecto expansivo del aluminio, el cual genera gas hidrógeno durante su proceso de reacción, originando porosidad en la matriz cementicia. Tanto el AIA como el PA reducen la densidad del hormigón, mejorando su trabajabilidad; sin embargo, esta modificación estructural implica una potencial disminución de la resistencia mecánica, aspecto que debe considerarse conforme a las exigencias técnicas de la edificación.

En concretos aireados, la densidad presenta una tendencia decreciente de forma consistente al incrementarse la concentración de polvo de aluminio, ocasionado por la gasificación que origina una estructura porosa de carácter celular. En la serie de ensayos de la densidad seca pasó de 2102 kg/m³ (0 % Al) a 1489 kg/m³ (1,0 % Al), confirmando la tendencia (Shabbar et al., 2017).

La reducida disminución de densidad registrada con 0.05% de aluminio explica las fluctuaciones en los valores de resistencia a la compresión. Este comportamiento resulta coherente con la tendencia establecida para concretos celulares, donde existe una relación inversamente proporcional entre densidad y porosidad que, consecuentemente, afecta la resistencia mecánica del material (Shon et al., 2018b).

Figura 12

Procedimiento de medición de densidad del concreto en estado fresco conforme a la norma NTP 339.046.



La imagen ilustra el procedimiento de medición de densidad del material en estado fresco, un procedimiento ejecutado según la norma NTP 339.046 (equivalente a ASTM C138) para determinar la densidad del material. La relevancia de este ensayo en la presente investigación es máxima, pues la densidad medida actúa como el indicador cuantitativo directo de la eficacia del polvo de aluminio

como agente aireante. Este principio es la base de estudios como el de Paikara y Gyawali, (2023), quienes establecen una correlación directa entre la dosificación de aluminio, la reducción de la densidad y la consecuente disminución de la resistencia mecánica. Por lo tanto, el ensayo no solo valida la correcta ejecución de la mezcla, sino que fundamenta la cadena causal entre la microestructura porosa generada en estado fresco y los atributos mecánicos del hormigón en su estado endurecido

DISCUSIÓN

2 La incorporación de polvo de aluminio ultrafino ($<75\ \mu\text{m}$, pasante malla N°200) demostró efectos sistemáticos en las propiedades físicas del concreto. La densidad en estado fresco experimentó una reducción gradual desde $2,232\ \text{kg/m}^3$ en el patrón hasta $2,184\ \text{kg/m}^3$ con 0.05% de aluminio (2.2% de reducción) y $2,159\ \text{kg/m}^3$ con 0.15% (3.3% de reducción). Esta tendencia, aunque consistente con lo reportado por Paikara y Gyawali (2023), muestra magnitudes considerablemente menores: mientras estos autores documentaron reducciones del 24.3% al 52% con dosificaciones de 0.6-1.2% de aluminio, las dosificaciones ultrabajas evaluadas en este estudio preservaron las características estructurales del concreto.

La pérdida de trabajabilidad observada con el incremento de dosificación de aluminio (asentamiento reducido de 3.8 pulgadas in en el patrón a 1.5 in con 0.15% Al) correlaciona con los hallazgos de Muthukumar y Rama-murthy (2015), quienes documentaron mediante ensayos de cono Marsh que el aluminio fino acelera la pérdida de fluidez, especialmente después de 10 minutos. Sin embargo, mientras ellos reportaron tiempos críticos de 10-15 minutos para el vaciado con dosificaciones $\geq 0.25\%$, nuestro estudio demuestra que con 0.05% de aluminio

ultrafino se mantiene trabajabilidad aceptable (3 in) permitiendo operaciones constructivas convencionales.

10 El presente estudio identificó un comportamiento parabólico en la resistencia a compresión con respecto a la dosificación de aluminio. Con 0.05% se obtuvo un incremento del 6.7% (198.6 a 211.98 kg/cm²), excediendo el objetivo de diseño de 210 kg/cm². Tebbal et al. (2018), reportaron reducciones del 22% con MEDA-AIR, (Tebbal y Rahmouni, 2019) documentaron pérdidas del 52% con 5% de residuos de aluminio, y Shabbar et al. (2017) observaron que al incrementar de 0.25% a 1%, la resistencia cayó de 32.3 a 18.6 MPa con aumento de porosidad del 10% al 26%.

El análisis comparativo frente al incorporador comercial Chema Air (0.05%) demostró que dicho producto exhibió desempeño superior en resistencia, lo que indica que el mecanismo de estabilización de microcavidades generadas mediante agentes tensioactivos presenta mejor rendimiento que el proceso de gasificación mediante reacción química. No obstante, el polvo de aluminio presenta un equilibrio satisfactorio entre aireación y desempeño resistente, particularmente relevante para aplicaciones en concreto estructural sometido a ciclos de congelación-descongelación. Según lo documentado por Kuziak et al. (2021), el comportamiento del aluminio depende de manera crítica de la dosificación empleada: cuando se supera un límite específico, se originan cavidades de mayor dimensión que provocan una disminución proporcional en la resistencia.

19 La interacción que ocurre entre el polvo de aluminio con el hidróxido de calcio del cemento, confirmada por Raj y John (2019) y Paikara y Gyawali (2023), genera hidrógeno según el mecanismo establecido. Azarhomayun et al. (2022) identificaron que el aluminio opera en dos regímenes distintos: expansivo a dosis menores

de 0.002% sin generación significativa de aire, e incorporador de aire a dosis mayores de 0.05%. Este hallazgo fundamentó la selección del rango de dosificaciones evaluado, excluyendo valores menores a 0.05% que no generarían los vacíos requeridos para resistencia al congelamiento-deshielo.

Shon et al. (2018) establecieron concluyentemente que 'el número de vacíos de aire menores de 300 μm jugó un papel crítico en la reducción del daño por congelamiento-deshielo', independientemente del método de incorporación. Este principio, confirmado por el modelo teórico de Eriksson et al. (2021) mediante el factor λ_a , indica que la geometría del poro influye más que su tamaño absoluto en la formación del hielo. Aunque en el presente estudio no se caracterizó mediante ASTM C457 el tamaño real de los poros generados, la supervivencia visual de los especímenes tras 140 ciclos sugiere que el sistema de poros fue funcionalmente efectivo, si bien se requieren análisis cuantitativos posteriores para validar esta observación preliminar

Zhang et al. (2018) confirmaron la existencia de un contenido crítico de aire (4-5%) que mejora la durabilidad frente a congelamiento-deshielo y reduce la migración de cloruros sin afectar la resistencia, siempre que los vacíos sean pequeños y uniformemente distribuidos. Este hallazgo respalda nuestros resultados con 6.5% de aire incorporado mediante 0.05% de aluminio.

Las condiciones de Macusani (4,315 m.s.n.m.), con presión atmosférica reducida al 60% del nivel del mar, introducen variables no documentadas previamente en la literatura. Esta presión reducida podría facilitar la expansión del H_2 generado, explicando la mayor eficiencia del aluminio observada comparada con estudios realizados a nivel del mar (Tebbal et al., 2018; Azarhomayun et al., 2022).

Mientras investigaciones previas sobre concreto aireado buscan densidades de 400-1600 kg/m³ para aplicaciones no estructurales como paneles aislantes (Raj y John, 2019), el presente estudio mantiene deliberadamente densidades superiores a 2,100 kg/m³ para preservar la capacidad portante requerida en elementos estructurales, logrando resistencia a ciclos hielo-deshielo sin sacrificar la resistencia característica de 210 kg/cm².

Los resultados confirman la existencia de una ventana estrecha de dosificación óptima identificada en 0.05%, validando la hipótesis de que dosificaciones controladas de polvo de aluminio pueden ser más efectivas que cantidades mayores. Esta conclusión se fundamenta en que dosificaciones $\geq 0.2\%$ generan macroporosidad estructural-mente perjudicial, mientras que 0.05% produce microporosidad beneficiosa que no compromete la integridad del concreto. El umbral crítico identificado determina el cambio de comportamiento beneficioso a perjudicial, explicando las contradicciones aparentes en la literatura donde toda adición de aluminio se reporta como perjudicial cuando se evalúan solo dosificaciones altas.

El análisis económico comparativo de los diseños de concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ toma como base referencial el diseño convencional sin aditivos, valorizado en S/ 441.10 por m³. Este costo base resulta S/ 24.75 (5.31%) inferior al expediente técnico de S/ 465.85, estableciendo el punto de comparación para evaluar la viabilidad económica de las alternativas con incorporación de aire. La incorporación de Chema Air al 0.05% incrementó el costo a S/ 444.19 por m³, representando un sobre costo de S/ 3.09 (0.66%) respecto al convencional, aunque mantiene un ahorro de S/ 21.66 (4.65%) sobre el expediente técnico. Este incremento marginal se justifica por las propiedades mejoradas documentadas en el estudio. El polvo de

12

aluminio demostró una relación costo-beneficio excepcional en su dosificación óptima de 0.05%, con un costo de S/ 442.40 por m³. Esto representa apenas S/ 1.30 (0.28%) de incremento sobre el diseño convencional base, siendo la alternativa más económica entre todos los diseños mejorados. Considerando que esta dosificación generó un incremento del 6.7% en resistencia a compresión y resistencia verificada a 140 ciclos de congelamiento-deshielo, el sobre costo de 0.28% resulta insignificante frente a los beneficios técnicos obtenidos. Las dosificaciones superiores de aluminio mostraron incrementos progresivos pero moderados: 0.075% con S/ 443.05 (+0.42% sobre convencional), 0.10% con S/ 443.70 (+0.56%), y 0.15% con S/ 445.00 (+0.84%). Aunque todas mantienen costos inferiores al expediente técnico, el análisis confirma que la dosificación de 0.05% representa el punto óptimo donde se maximizan los beneficios técnicos con el mínimo impacto económico, validando su aplicabilidad práctica en proyectos de construcción donde la durabilidad en condiciones de congelamiento-deshielo es crítica.

CONCLUSIÓN

La investigación demostró que la adición de 0.05% de polvo de aluminio modifica sustancialmente las propiedades físico-mecánicas del concreto destinado a condiciones de congelamiento-deshielo en Macusani. Este porcentaje generó un sistema controlado de microburbujas que incrementó el contenido de aire del 2% al 6.5%, redujo la densidad de 2232 a 2184 kg/m³ y mantuvo el asentamiento en valores aceptables (3.5"), preservando así la trabajabilidad requerida para aplicaciones constructivas. En términos de resistencia mecánica, la dosificación

óptima produjo un incremento del 6.7% respecto al concreto patrón, alcanzando 211.98 kg/cm² a 28 días, valor que supera la resistencia de diseño especificada.

Sin embargo, dosificaciones superiores de polvo de aluminio (0.075-0.15%) generaron porosidad excesiva que comprometió progresivamente las propiedades mecánicas, confirmando que existe un umbral crítico de incorporación. Como referencia comparativa, el aditivo comercial Chema Air al 0.05% alcanzó 231.4 kg/cm² con 6.0% de contenido de aire, demostrando mayor eficiencia en la estabilización de burbujas, aunque con un costo considerablemente superior.

En consecuencia, se establece que 0.05% de polvo de aluminio constituye la dosificación óptima para concretos expuestos a condiciones extremas en Macusani, proporcionando el balance necesario entre resistencia mecánica, contenido de aire protector y viabilidad económica, representando así una técnica viable frente a soluciones comerciales convencionales.

A los 7 y 14 días de edad, se llevaron a cabo ensayos según el procedimiento B de la norma ASTM C666, sometiendo las muestras a ciclos de congelamiento en una congeladora capaz de alcanzar los -18 °C, seguidos de fases de deshielo en cura húmeda. Se aplicaron un total de 35 ciclos a los 7 días y 70 ciclos a los 14 días, lo que permitió evaluar la resistencia temprana del concreto frente a tensiones térmicas aceleradas y simular procesos de deterioro típicos de ambientes fríos intensos. Los resultados obtenidos en esta etapa fueron fundamentales para comparar el desempeño de los diferentes diseños de mezcla y detectar posibles vulnerabilidades en las primeras fases de curado.

Por otro lado, para examinar el comportamiento del concreto en condiciones más representativas del entorno real de la ciudad de Macusani, se realizó el procedimiento A de la misma normativa, manteniendo las probetas enteramente sumergidas en agua durante todo el proceso y simulando las variaciones naturales de temperatura de la zona. En este caso, se aplicaron hasta 140 ciclos de congelamiento y deshielo, permitiendo analizar la respuesta del material bajo máximas condiciones de saturación y frío, y aportando información clave para la determinación de criterios sobre durabilidad y adaptabilidad del concreto en regiones de alta exposición a heladas.

Se identifican tres áreas críticas que requieren investigación futura para completar la comprensión del comportamiento del concreto con polvo de aluminio. La primera comprende la caracterización termoacústica mediante determinación de conductividad térmica (ASTM C177) y absorción acústica (ASTM C423), propiedades que la literatura reconoce como ventajas inherentes del concreto celular pero que no fueron evaluadas en el presente estudio (Shabbar et al., 2017). La segunda área involucra la cuantificación rigurosa de durabilidad posterior a los ciclos de congelamiento-deshielo aplicados, específicamente la determinación del módulo de elasticidad dinámico relativo (RDM), factor de durabilidad (DF), pérdida de masa cuantificada y escalamiento superficial ante sales descongelantes (ASTM C672). Aunque los especímenes fueron sometidos a 140 ciclos, no se realizaron mediciones de degradación postexposición, métricas indispensables para validar el desempeño prolongado en ambientes altoandinos.

Adicionalmente, resulta imperativa la caracterización microestructural del sistema de vacíos conforme a ASTM C457 para diferenciar el microaire protector ($\leq 300 \mu\text{m}$) de los macroporos inefectivos originados durante el espumado. Shon et al. (2018) establecieron que la distribución y dimensión de vacíos constituye un factor más determinante que el contenido total de aire para la resistencia al congelamiento-deshielo. En consecuencia, la evaluación integral del sistema poroso mediante análisis de imagen y técnicas microscópicas debe complementar las métricas de resistencia mecánica obtenidas, proporcionando criterios cuantitativos para optimizar estos materiales en aplicaciones bajo condiciones climáticas extremas.