

Resistencia a compresión a 14 días de hormigón dosificado por proporciones volumétricas y por asistencia de inteligencia artificial

Compressive strength at 14 days of concrete proportioned by volumetric ratios and by artificial-intelligence assistance

RESUMEN

La dosificación por proporciones volumétricas sigue siendo el procedimiento dominante en la construcción informal y de pequeña escala en Ecuador, pese a que su capacidad real para alcanzar la resistencia especificada rara vez se verifica en obra. El objetivo de este estudio fue cuantificar experimentalmente la resistencia a compresión y la respuesta esfuerzo-deformación, a 14 días de edad, de tres mezclas de hormigón destinadas a una resistencia especificada de $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$: una dosificada mediante la proporción volumétrica tradicional 1:2:3 y dos dosificadas a partir de recomendaciones generadas por un asistente de inteligencia artificial. Se elaboraron seis cilindros normalizados de $150 \times 300 \text{ mm}$, dos por mezcla, con medición volumétrica por balde, mezclado manual, compactación por varillado en tres capas y curado por humedecimiento periódico. Los especímenes se ensayaron a compresión con registro continuo de carga y desplazamiento, obteniéndose entre 4 595 y 7 262 lecturas por probeta. La mezcla tradicional alcanzó una resistencia media de 8,27 MPa ($84,4 \text{ kg/cm}^2$), equivalente al 40,2 % de la resistencia especificada, mientras que las mezclas asistidas por inteligencia artificial alcanzaron 11,11 MPa y 11,41 MPa, esto es, 54,0 % y 55,4 % respectivamente. El incremento medio atribuible a las mezclas asistidas fue del 36,1 %, pero ninguna de las tres se aproximó al valor esperable a 14 días, estimado en torno a 18,0 MPa. La dispersión entre probetas gemelas osciló entre el 3,1 % y el 13,6 %. Se concluye que la ventaja relativa de una dosificación no garantiza el cumplimiento del diseño estructural y que, bajo condiciones de ejecución no controladas, ambos procedimientos resultan insuficientes sin verificación experimental sistemática.

PALABRAS CLAVE: hormigón, resistencia a la compresión, dosificación volumétrica, curva esfuerzo-deformación, control de calidad, ensayo de materiales, inteligencia artificial

ABSTRACT

Volumetric proportioning remains the dominant practice in small-scale and informal construction in Ecuador, even though its actual capacity to reach the specified strength is seldom verified on site. This study aimed to experimentally quantify the compressive strength and the stress-strain response, at 14 days of age, of three concrete mixtures targeting a specified strength of $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$: one proportioned by the traditional 1:2:3 volumetric ratio and two proportioned from recommendations produced by an artificial-intelligence assistant. Six standard $150 \times 300 \text{ mm}$ cylinders were cast, two per mixture, using bucket-based volumetric measurement, manual mixing, rodded compaction in three layers and curing by periodic wetting. Specimens were tested in compression with continuous load and displacement acquisition, yielding between 4,595 and 7,262 readings per cylinder. The traditional mixture reached a mean strength of 8.27 MPa (84.4 kg/cm^2), that is, 40.2 % of the specified strength, whereas the AI-assisted mixtures reached 11.11 MPa and 11.41 MPa, corresponding to 54.0 % and 55.4 % respectively. The mean increase attributable to the assisted mixtures was 36.1 %, yet none of the three approached the value expected at 14 days, estimated at about 18.0 MPa. Scatter between twin specimens ranged from 3.1 % to 13.6 %. The study concludes that the relative advantage of one proportioning route does not guarantee compliance with the structural design and that, under uncontrolled execution conditions, both procedures are insufficient without systematic experimental verification.

KEYWORDS: concrete, compressive strength, volumetric proportioning, stress-strain curve, quality control, materials testing, artificial intelligence.

TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y CONOCIMIENTO

Recepción: 30/07/2026

Aceptación: 04/08/2026

Publicación: 31/12/2026

AUTOR/ES

 **Lucio Diego**
 **Arévalo Toalombo Bryan Elian**
 **Jaramillo Tobar Santiago Raúl**
 **Jiménez López Mathias Omar**
 **Córdova Vayas Giovanny David**
 **Puma Lazo Noe Stalyn**

 dlucio2@indoamerica.edu.ec
 barevalo5@indoamerica.edu.ec
 sjaramillo9@indoamerica.edu.ec
 mjimenez44@indoamerica.edu.ec
 gcordova3@indoamerica.edu.ec
 npuma@indoamerica.edu.ec

 Universidad Tecnológica Indoamérica.
Universidad Tecnológica Indoamérica.
Universidad Tecnológica Indoamérica.
Universidad Tecnológica Indoamérica.
Universidad Tecnológica Indoamérica.

 Ambato – Ecuador
 Ambato – Ecuador
 Ambato – Ecuador
 Ambato – Ecuador
 Ambato – Ecuador

CITACIÓN:

Lucio, D., Arévalo, B., Jaramillo, S., Jiménez, M., Córdova, G. & Puma, N. (2026). Resistencia a compresión a 14 días de hormigón dosificado por proporciones volumétricas y por asistencia de inteligencia artificial. Revista InnovaSciT. 4 (2), p. 618 – 629.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material estructural de mayor consumo en la construcción ecuatoriana y su desempeño depende, en primer lugar, de la proporción con que se combinan cemento, agregado fino, agregado grueso y agua. En obras de gran escala esa proporción se establece por peso, con control de humedad de los agregados y verificación en laboratorio; en cambio, en la vivienda de pequeña escala y en la autoconstrucción predomina la dosificación por volumen aparente, medida con baldes, carretillas o paladas. La relación 1:2:3 constituye el caso más difundido de este procedimiento y suele asociarse, en la práctica y en la enseñanza técnica, con una resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, valor que la Norma Ecuatoriana de la Construcción (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2015) establece como mínimo habitual para elementos de hormigón estructural.

Esa asociación, sin embargo, se sostiene sobre supuestos que la obra rara vez cumple. El método volumétrico no controla la relación agua/cemento, que es la variable de mayor peso sobre la resistencia final; no corrige el esponjamiento del agregado fino húmedo, que puede modificar de manera sustancial la masa real de arena incorporada; y no considera las densidades aparentes específicas de los materiales disponibles en cada región. Neville (2012) y Mehta y Monteiro (2014) coinciden en que la resistencia a compresión responde principalmente a la relación agua/cemento y al grado de compactación, de modo que una proporción volumétrica nominalmente correcta puede producir hormigones de resistencias muy dispares según cómo se ejecute. Whwah et al. (2025) confirmaron experimentalmente esta dependencia al documentar el descenso sistemático de la resistencia conforme aumenta la relación agua/cemento en dieciocho mezclas con distintos contenidos de agregado fino.

Las consecuencias de una ejecución deficiente no son menores. Gagg (2014), en su análisis histórico de fallos del hormigón como material de ingeniería, atribuye una proporción considerable de los casos estudiados a errores de dosificación, mezclado y curado antes que a deficiencias del diseño estructural. Yip et al. (2023) mostraron, además, que la energía de fractura varía de forma marcada entre grados de hormigón, lo que implica que una pérdida de resistencia respecto de la especificada no solo reduce la capacidad portante, sino que altera el modo en que el material disipa energía. A ello se añade una dimensión ambiental: dado que la producción de cemento concentra la mayor parte de las emisiones asociadas al hormigón (He et al., 2019), una mezcla que no alcanza su resistencia de diseño desperdicia también el costo ambiental del cemento empleado.

La literatura reciente ha explorado cómo variaciones en los componentes de la mezcla alteran el comportamiento mecánico. Pinto et al. (2026) documentaron que la sustitución del agua de amasado por leche modifica de forma medible la resistencia a compresión según la edad de curado, lo que confirma la sensibilidad del sistema cementante a la calidad del agua incorporada. Pinto-Almeida, Abril-Camino y Abril-Camino (2025) demostraron, en

hormigones con ceniza volcánica elaborados con la dosificación de uso corriente en Baños, Tungurahua, que la retención de resistencia puede coexistir con una reducción del módulo de elasticidad, es decir, que dos mezclas de resistencia similar no son necesariamente equivalentes en rigidez. En el ámbito de los materiales tradicionales, Pinto-Almeida, Jordán-Buenaño et al. (2025) cuantificaron el aporte de fibras naturales en adobe ecuatoriano, evidenciando la utilidad de los ensayos normalizados para validar prácticas constructivas locales.

De manera paralela, la inteligencia artificial se ha incorporado al estudio del hormigón por dos vías diferenciadas. La primera es predictiva: modelos de aprendizaje automático entrenados con bases de datos de mezclas estiman la resistencia a compresión a partir de las variables de dosificación y la edad de curado, con precisiones elevadas (Elshaarawy et al., 2024; Xiao et al., 2025). Esta línea se ha extendido a hormigones con agregado reciclado (Duan, 2024), a columnas confinadas con polímeros reforzados con fibra (Cui et al., 2024) y a la caracterización de materiales de construcción con tierra mediante modelos ligeros de aprendizaje profundo (Pinto-Almeida y Jordán-Buenaño, 2026). En todos estos casos la herramienta se valida frente a resultados experimentales antes de emplearse.

La segunda vía es generativa y opera de un modo distinto: el usuario describe el objetivo de resistencia y los materiales disponibles, y un asistente conversacional devuelve proporciones y una relación agua/cemento sugerida en segundos, sin que la respuesta venga acompañada de una medida de su incertidumbre. Jelodar (2025) documenta la rápida incorporación de estas herramientas a la educación, la capacitación y la práctica de la construcción, junto con las limitaciones que arrastran. En dominios afines de la ingeniería civil se han evaluado con criterio experimental: Kumar (2024) analizó su aplicación a problemas geotécnicos, Kim, D. et al. (2024) las integraron a modelación numérica, Kim, S. et al. (2025) automatizaron cálculos de capacidad portante mediante ingeniería de instrucciones y Kim, T. et al. (2025) verificaron su capacidad para implementar modelos de elementos finitos. La conclusión común de esos trabajos es que el resultado requiere comprobación independiente.

Ese vacío es el que aborda el presente estudio. Mientras la vía predictiva ha sido ampliamente validada y la vía generativa ha sido evaluada en cálculo estructural y geotécnico, no se dispone de evidencia experimental que compare, bajo condiciones reales de obra menor, una dosificación sugerida por un asistente generativo frente a la regla volumétrica tradicional. La pregunta que permanece abierta es si una dosificación obtenida por esta vía produce hormigones mecánicamente distintos de los que genera la regla 1:2:3 cuando ambas se ejecutan con los mismos materiales, el mismo procedimiento de mezclado y el mismo curado.

El objetivo del presente estudio es cuantificar experimentalmente la resistencia a compresión y la respuesta esfuerzo-deformación, a 14 días de edad, de tres mezclas de hormigón diseñadas para $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$: una dosificada por la proporción volumétrica

tradicional 1:2:3 y dos dosificadas a partir de recomendaciones generadas por un asistente de inteligencia artificial, elaboradas y curadas bajo condiciones de obra equivalentes.

MÉTODOS MATERIALES

La investigación siguió un enfoque cuantitativo, de diseño experimental comparativo con tres condiciones y dos réplicas por condición. El trabajo se desarrolló durante el período académico abril-agosto de 2026 en la Universidad Tecnológica Indoamérica, sede Ambato (Ecuador), en el marco de la asignatura Ensayo de Materiales de la carrera de Ingeniería Civil, con la participación de estudiantes del tercer nivel organizados en equipos de trabajo.

Se establecieron tres mezclas con una misma resistencia especificada de diseño, $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (20,6 MPa). La primera, denominada mezcla tradicional, se dosificó mediante la relación volumétrica 1:2:3 (cemento : arena : ripio), correspondiente a seis partes totales, siguiendo el procedimiento difundido en la práctica constructiva local. La segunda y la tercera, denominadas mezcla A y mezcla B, se dosificaron a partir de proporciones sugeridas por un asistente conversacional de inteligencia artificial al que se le indicó la resistencia objetivo y los materiales disponibles. Los tres equipos emplearon cemento Portland, arena y ripio de la misma procedencia y agua potable de red.

La medición de los materiales se realizó por volumen aparente, utilizando un balde de capacidad constante como unidad de medida, sin corrección por humedad ni por densidad aparente de los agregados. El mezclado se ejecutó de forma manual en carretilla: primero la mezcla en seco de cemento y arena hasta obtener coloración uniforme, luego la incorporación del agregado grueso y, finalmente, la adición gradual de agua desde el centro de la masa hasta alcanzar una consistencia plástica evaluada visualmente. La cantidad de agua no se registró de manera independiente, por lo que la relación agua/cemento efectiva no forma parte de las variables controladas.

Cada equipo elaboró dos cilindros normalizados de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, con un volumen unitario de $5\,298,75 \text{ cm}^3$ y un área transversal de $176,71 \text{ cm}^2$. El llenado se realizó en tres capas de espesor aproximadamente igual, compactadas por varillado con barra de acero distribuido sobre toda la superficie, y el enrasado se ejecutó con regla metálica. Los especímenes permanecieron en reposo durante las primeras 24 horas y posteriormente se curaron mediante humedecimiento periódico, conforme al procedimiento de elaboración y curado en obra descrito en la NTE INEN 1576 (2011).

A los 14 días de edad, los seis cilindros se ensayaron a compresión axial en prensa con adquisición continua de carga y desplazamiento del cabezal, siguiendo los lineamientos generales de la NTE INEN 1573 (2010) y de la norma ASTM C39/C39M-21 (2021). El sistema registró entre 4 595 y 7 262 lecturas por probeta, con un intervalo de muestreo de 0,01 s. El esfuerzo axial se calculó como el cociente entre la carga instantánea y el área transversal nominal, y la deformación axial aparente como el cociente entre el desplazamiento del cabezal

y la altura nominal de 300 mm. Todas las curvas se corrigieron desplazando el origen al primer registro válido, con el fin de eliminar el desfase de carga y desplazamiento inicial del equipo.

El tratamiento de los datos consistió en la identificación del esfuerzo máximo corregido de cada probeta, del tiempo y de la deformación aparente asociados a ese máximo, y en el cálculo de la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación por mezcla. Los resultados se contrastaron con la resistencia especificada de diseño y con el valor esperable a 14 días, estimado en el 87,5 % de f'_c , es decir, aproximadamente 18,0 MPa, de acuerdo con las curvas convencionales de desarrollo de resistencia reportadas por Kosmatka et al. (2004).

Deben explicitarse tres limitaciones metodológicas que condicionan el alcance de los resultados. Primera, el desplazamiento registrado corresponde al recorrido del cabezal de la prensa y no a un extensómetro adherido al espécimen, por lo que incorpora el asiento inicial y la deformabilidad del propio sistema de ensayo; en consecuencia, las deformaciones se reportan como aparentes y no se calcula el módulo de elasticidad, cuyo valor carecería de significado material. Segunda, el tamaño muestral es de dos especímenes por mezcla, suficiente para describir tendencias pero no para inferencia estadística. Tercera, las proporciones exactas de las mezclas A y B no fueron registradas de forma documental durante la práctica, de modo que este trabajo compara procedimientos de dosificación y no composiciones específicas conocidas.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los seis especímenes desarrollaron curvas completas con rama ascendente, pico definido y rama descendente con retención de carga residual. En la Tabla 1 se presentan los valores individuales obtenidos para cada cilindro.

Tabla 1.

Resultados individuales de los seis cilindros ensayados a 14 días.

Cil.	Mezcla	Registros	F máx. (kN)	σ máx. (MPa)	σ máx. (kg/cm ²)	ϵ ap. en el pico (%)	t al pico (s)
1.1	Tradicional 1:2:3	4 595	157,76	8,81	89,9	0,867	39,67
1.3	Tradicional 1:2:3	6 322	147,61	7,73	78,9	0,436	33,53
1.4	IA – mezcla A	5 735	203,49	10,87	110,8	0,366	46,25
1.5	IA – mezcla A	4 766	219,52	11,36	115,8	0,395	47,65
1.6	IA – mezcla B	7 262	230,02	12,50	127,5	0,420	52,88
1.7	IA – mezcla B	5 544	175,79	10,32	105,2	0,556	50,66

Fuente: Autores (2026).

La síntesis por mezcla, incluida en la Tabla 2, muestra que la mezcla tradicional alcanzó una resistencia media de 8,27 MPa, equivalente a 84,4 kg/cm² y al 40,2 % de la resistencia especificada. Las mezclas asistidas por inteligencia artificial alcanzaron medias de 11,11 MPa y 11,41 MPa, correspondientes al 54,0 % y al 55,4 % de f'_c . Considerados en conjunto los cuatro cilindros de las mezclas asistidas, la media se sitúa en 11,26 MPa (114,8 kg/cm²), un 36,1 % por encima de la media de la mezcla tradicional.

Tabla 2.

Síntesis por mezcla: resistencia media, dispersión y relación con la resistencia especificada.

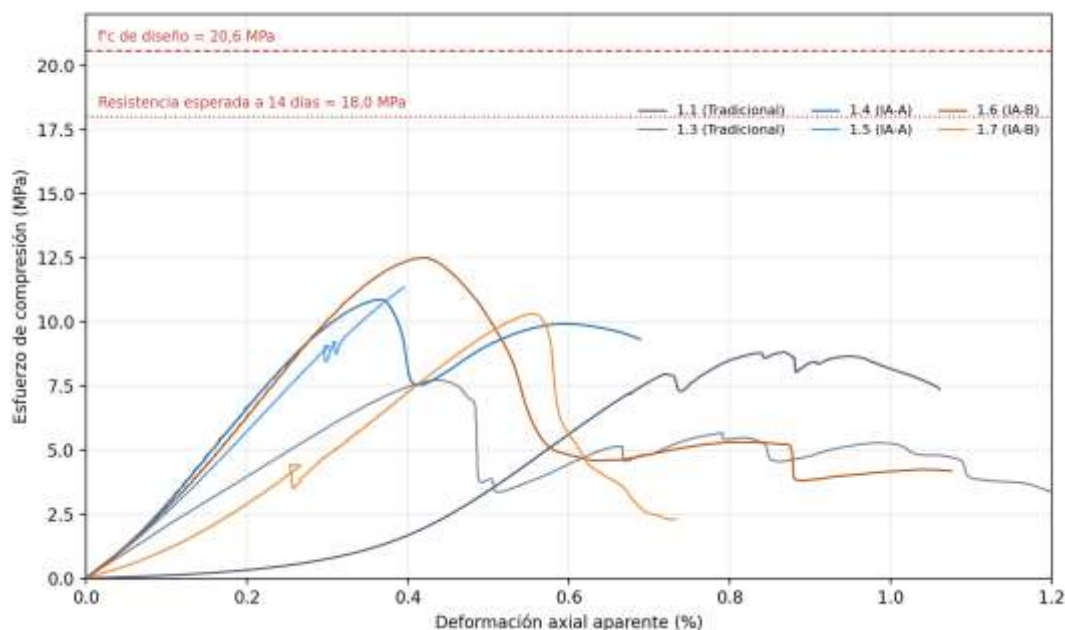
Mezcla	n	Media (MPa)	Media (kg/cm ²)	Desv. est. (MPa)	CV (%)	% de f'c	ε ap. media en el pico (%)
Tradicional 1:2:3	2	8,27	84,4	0,76	9,2	40,2	0,652
IA – mezcla A	2	11,11	113,3	0,35	3,1	54,0	0,381
IA – mezcla B	2	11,41	116,3	1,55	13,6	55,4	0,488
IA (conjunto)	4	11,26	114,8	0,93	8,3	54,7	0,434

Fuente: Autores (2026).

La Figura 1 permite comparar las seis curvas esfuerzo-deformación corregidas frente a las dos referencias de control: la resistencia especificada de 20,6 MPa y el valor esperable a 14 días, próximo a 18,0 MPa. Ninguna de las curvas se aproxima a esas referencias; el máximo absoluto registrado, 12,50 MPa en el cilindro 1.6, se sitúa un 30,6 % por debajo del valor esperable para la edad de ensayo.

Figura 1.

Curvas esfuerzo-deformación corregidas de los seis cilindros ensayados a 14 días, con las referencias de resistencia especificada y resistencia esperable a la edad de ensayo.



Fuente: Autores (2026).

El comportamiento de la rama ascendente diferencia con claridad los dos procedimientos de dosificación. Los cuatro cilindros de las mezclas asistidas alcanzaron su pico con deformaciones aparentes de entre 0,366 % y 0,556 %, con pendientes iniciales

comparables entre sí. En contraste, los cilindros de la mezcla tradicional presentaron ramas iniciales más tendidas: el espécimen 1.1 desarrolló una zona inicial marcadamente cóncava que retrasó el pico hasta una deformación aparente de 0,867 %, prácticamente el doble del promedio de las mezclas asistidas. Dado que la medición proviene del desplazamiento del cabezal, este tramo inicial refleja en buena medida el asiento del espécimen y la acomodación de las caras de apoyo, lo que sugiere irregularidades de enrasado o de planicidad en esa probeta más que una diferencia intrínseca de rigidez del material.

La dispersión entre probetas gemelas resultó desigual entre mezclas. La mezcla A presentó la mayor consistencia interna, con una diferencia de 0,49 MPa entre sus dos cilindros y un coeficiente de variación del 3,1 %. La mezcla tradicional registró un coeficiente del 9,2 % y la mezcla B alcanzó el 13,6 %, con una diferencia de 2,19 MPa entre especímenes elaborados a partir de la misma amasada. Esta última magnitud es especialmente relevante porque supera el 19 % de la media del par y advierte que, bajo medición volumétrica por balde, compactación manual y curado por humedecimiento, la variabilidad de ejecución puede ser del mismo orden que las diferencias atribuibles al método de dosificación.

Todas las probetas conservaron capacidad de carga después del pico, estabilizándose entre 3 y 5 MPa antes de finalizar el ensayo, lo que corresponde a la fricción residual entre los fragmentos confinados por los platos de la prensa y no debe interpretarse como ductilidad estructural del material. El tiempo transcurrido hasta el pico osciló entre 33,53 s y 52,88 s, siendo sistemáticamente mayor en las mezclas asistidas, en coherencia con su mayor capacidad de carga bajo una velocidad de aplicación similar. La retención de carga residual y la forma de la rama descendente son coherentes con la dependencia entre grado de hormigón y capacidad de disipación de energía descrita por Yip et al. (2023).

Interpretados en conjunto, los resultados admiten dos lecturas complementarias. Por una parte, las mezclas asistidas por inteligencia artificial produjeron un hormigón mecánicamente superior, con un incremento medio del 36,1 % respecto de la regla volumétrica tradicional, diferencia que excede la dispersión interna observada en dos de las tres mezclas. Por otra parte, y de manera más determinante para la práctica, ninguna de las tres mezclas se aproximó al desempeño esperable a 14 días para un hormigón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. El déficit común, de entre el 37 % y el 54 % respecto de los 18,0 MPa de referencia, apunta a factores compartidos por los tres equipos y ajenos al procedimiento de dosificación: la ausencia de control de la relación agua/cemento, la medición volumétrica sin corrección por humedad de los agregados, la compactación manual y un curado por humedecimiento periódico expuesto a las condiciones ambientales de Ambato. Este patrón coincide con la sensibilidad a la relación agua/cemento documentada por Whwah et al. (2025) y con el señalamiento de Gagg (2014) sobre el peso de los errores de ejecución en los fallos del hormigón.

Conviene precisar el alcance de la comparación con la línea predictiva de la inteligencia

artificial. Los modelos de aprendizaje automático informados por Elshaarawy et al. (2024), Xiao et al. (2025), Duan (2024) y Cui et al. (2024) estiman la resistencia a partir de mezclas cuya composición y ejecución están documentadas y controladas, condición que no se cumple en obra menor. En el presente caso, la recomendación generativa operó sin conocer la humedad de los agregados ni el agua efectivamente incorporada, de manera que su aporte quedó acotado a la proporción nominal. Esta limitación es consistente con el requisito de verificación experimental que atraviesa los trabajos de Kumar (2024), Kim, D. et al. (2024), Kim, S. et al. (2025) y Kim, T. et al. (2025), y con la advertencia de Pinto-Almeida y Jordán-Buenaño (2026) sobre la dependencia que las herramientas computacionales mantienen respecto de los ensayos físicos. En términos prácticos, la brecha observada implica además un consumo de cemento que no se traduce en capacidad estructural, con el costo ambiental que ello conlleva (He et al., 2019).

CONCLUSIONES

El estudio cuantificó la resistencia a compresión a 14 días de tres mezclas de hormigón diseñadas para $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaboradas bajo condiciones equivalentes de obra. Las mezclas dosificadas con asistencia de inteligencia artificial alcanzaron medias de 11,11 MPa y 11,41 MPa frente a 8,27 MPa de la mezcla volumétrica tradicional 1:2:3, lo que representa un incremento medio del 36,1 %. La respuesta esfuerzo-deformación de las mezclas asistidas fue además más homogénea en su rama ascendente, con deformaciones aparentes en el pico entre 0,366 % y 0,556 %.

El hallazgo principal, sin embargo, no es la ventaja relativa de un procedimiento sobre otro, sino que ninguno de los dos condujo a un hormigón compatible con la resistencia especificada: las tres mezclas quedaron entre el 40,2 % y el 55,4 % de f_c cuando, a la edad de ensayo, debía esperar alrededor del 87,5 %. La ventaja relativa de una dosificación, por tanto, no equivale al cumplimiento del diseño estructural, y este trabajo aporta evidencia concreta de que ambas rutas resultan insuficientes cuando la ejecución no controla la relación agua/cemento ni la humedad de los agregados.

Desde el punto de vista práctico, los resultados desaconsejan asumir que la regla 1:2:3 garantiza por sí sola una resistencia de 210 kg/cm^2 en obra menor, y advierten que sustituirla por una recomendación automatizada mejora el desempeño sin resolver el problema de fondo. La implicación operativa es que la dosificación, cualquiera sea su origen, debe acompañarse de control de agua, corrección por humedad de agregados, compactación normalizada y curado sostenido.

Las limitaciones del estudio son claras: dos especímenes por mezcla, una única edad de ensayo, deformaciones medidas a partir del desplazamiento del cabezal y ausencia de registro documental de las proporciones exactas de las mezclas asistidas. Estas restricciones acotan los resultados al plano descriptivo y comparativo, sin pretensión de inferencia estadística.

Las líneas de investigación que se abren incluyen la replicación del ensayo a 7, 14 y 28 días con al menos tres especímenes por edad y mezcla; el registro y control explícito de la relación agua/cemento y de la humedad de los agregados; la instrumentación con extensómetros que permita determinar el módulo de elasticidad de manera válida; y la documentación sistemática de las proporciones sugeridas por asistentes de inteligencia artificial, de modo que la comparación pueda establecerse entre composiciones conocidas y no únicamente entre procedimientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International. (2021). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39/C39M-21)*. West Conshohocken, Estados Unidos: ASTM International.
- Cui, R., Yang, H., Li, J., Xiao, Y., Yao, G., & Yu, Y. (2024). *Machine learning-based prediction of compressive strength in circular FRP-confined concrete columns*. *Frontiers in Materials*, 11, 1408670. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1408670>
- Duan, S. (2024). *Compressive strength prediction of fiber-reinforced recycled aggregate concrete based on optimization algorithms*. *Frontiers in Built Environment*, 10, 1509714. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1509714>
- Elshaarawy, M., Alsaadawi, M., & Hamed, A. (2024). *Machine learning and interactive GUI for concrete compressive strength prediction*. *Scientific Reports*, 14, 16694. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66957-3>
- Gagg, C. (2014). *Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis*. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114-140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., & Wang, Y. (2019). *Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production*. *Construction and Building Materials*, 211, 965-973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>
- Jelodar, M. (2025). *Generative AI, large language models, and ChatGPT in construction education, training, and practice*. *Buildings*, 15(6), 933. <https://doi.org/10.3390/buildings15060933>
- Kim, D., Kim, T., Kim, Y., Byun, Y., & Yun, T. (2024). *A ChatGPT-MATLAB framework for numerical modeling in geotechnical engineering applications*. *Computers and Geotechnics*, 169, 106237. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106237>
- Kim, S., Kim, D., & Youn, H. (2025). *Automating vertical bearing capacity calculations using Python: Prompt engineering of ChatGPT on API RP 2A*. *Developments in the Built Environment*, 21, 100628. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100628>
- Kim, T., Yun, T., & Suh, H. (2025). *Can ChatGPT implement finite element models for geotechnical engineering applications?* *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 49, 1747-1766. <https://doi.org/10.1002/nag.3956>
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Panarese, W. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto (14.^a ed.)*. Skokie, Estados Unidos: Portland Cement Association.
- Kumar, K. (2024). *Geotechnical parrot tales (GPT): Harnessing large language models in geotechnical engineering*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150, 02523001. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11828>

- Mehta, P., & Monteiro, P. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4.^a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Estructuras de hormigón armado (NEC-SE-HM)*. Quito, Ecuador: MIDUVI.
- Neville, A. (2012). *Properties of concrete* (5.^a ed.). Harlow, Reino Unido: Pearson Education Limited.
- NTE INEN 1573. (2010). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 1576. (2011). *Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Pinto, C., Zambrano, L., Apraez, J., Gómez, J., Zurita, M., & Buele, J. (2026). *Effect of replacing mixing water with milk on the compressive strength of concrete at different curing ages*. *Frontiers in Built Environment*, 12, 1865431. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2026.1865431>
- Pinto-Almeida, C., Abril-Camino, A., & Abril-Camino, D. (2025). *Mechanical performance of volcanic ash concrete showing modulus reduction with strength retention*. *Civil Engineering Journal*, 11(10), 4422-4435. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-10-024>
- Pinto-Almeida, C., & Jordán-Buenaño, N. (2026). *Lightweight deep learning for sustainable adobe construction: A block-level baseline aligned with circular economy principles and sustainable development goals*. *Frontiers in Built Environment*, 12, 1883353. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2026.1883353>
- Pinto-Almeida, C., Jordán-Buenaño, N., Armas-Robalino, N., Cáceres, B., Cajas-Corrales, J., Medina-Medina, R., & Buele, J. (2025). *Experimental analysis of ecuadorian adobe reinforced with natural fibers*. *Frontiers in Built Environment*, 11, 1697128. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1697128>
- Whwah, M., Al-Hussainy, H., Dulaimi, A., Bernardo, L., & Ribeiro, T. (2025). *Investigation of the effects of water-to-cement ratios on concrete with varying fine expanded perlite aggregate content*. *Journal of Composites Science*, 9(8), 390. <https://doi.org/10.3390/jcs9080390>
- Xiao, K., Zhang, H., Wei, S., Zhu, C., He, J., Zhu, S., & Yang, X. (2025). *Prediction of compressive strength of high-performance concrete based on multiple machine learning models*. *Frontiers in Materials*, 12, 1698248. <https://doi.org/10.3389/fmats.2025.1698248>
- Yip, C., Mohamad, H., & Ahmad, H. (2023). *Fracture energy measurement in different concrete grades*. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(2), 143-150.

<https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.02.014>

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles.

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior