

Comparative Study of Compressive Strength: Imported Cement vs. Local Manufacturing Cements in Honduras

Mario Luciano Coello Zúniga^{1†}; Mauro José Torres Aguilar¹; Julio César López Zerón¹

¹Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;
maurojose@unitec.edu, jclopezeron@unitec.edu

Abstract– Objective: The entry of diverse cement brands into the Honduran market necessitates rigorous quality verification. This study evaluates and compares the mechanical performance of an Imported Cement (IC) from Asia versus two established brands produced locally: a Multinational Cement (MC) and a National Cement (NC). **Methodology:** The research followed ASTM C109 standards, fabricating 50 mm mortar cubes for each brand. Specimens were subjected to compressive strength tests at curing ages of 3, 7, and 28 days to determine the strength development curve. **Results:** Experimental data indicated that the IC achieved the highest average compressive strength of 1,998.00 psi at 28 days, surpassing the MC (1,648.73 psi) and the NC (1,704.17 psi). **Conclusions:** The comparative analysis demonstrates that the imported alternative exceeds the mechanical performance of local brands under the tested conditions, providing a technical baseline for cost-benefit decisions in local construction projects.

Keywords– Hydraulic Cement, Compressive Strength, ASTM C109, Construction Materials.

Estudio Comparativo de Resistencia a la Compresión: Cemento Importado vs. Cementos de Manufactura Local en Honduras

Mario Luciano Coello Zúniga^{1†}; Mauro José Torres Aguilar¹; Julio César López Zerón¹

¹Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Tegucigalpa, Honduras;
maurojose@unitec.edu, jclopezeron@unitec.edu

Resumen– Objetivo: La introducción de diversas marcas de cemento al mercado hondureño exige una verificación rigurosa de calidad. Este estudio evalúa y compara el desempeño mecánico de un Cemento Importado (CI) de procedencia asiática frente a dos marcas establecidas de producción local: un Cemento Multinacional (CM) y un Cemento Nacional (CN). **Metodología:** La investigación se rigió por la normativa ASTM C109, fabricando cubos de mortero de 50 mm para cada marca. Los especímenes fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión a edades de curado de 3, 7 y 28 días para determinar la curva de desarrollo de resistencia. **Resultados:** Los datos experimentales indicaron que el CI alcanzó la mayor resistencia promedio a la compresión de 1,998.00 psi a los 28 días, superando al CM (1,648.73 psi) y al CN (1,704.17 psi). **Conclusiones:** El análisis comparativo demuestra que la alternativa importada excede el desempeño mecánico de las marcas locales bajo las condiciones ensayadas, proporcionando una base técnica para decisiones de costo-beneficio en proyectos de construcción.

Palabras clave– Cemento Hidráulico, Resistencia a la Compresión, ASTM C109, Materiales de Construcción.

I. INTRODUCCIÓN

El cemento constituye uno de los insumos fundamentales de la industria de la construcción, por su rol determinante en el desempeño mecánico y la durabilidad de morteros y concretos. En el mercado hondureño, el cemento Portland de Uso General (UG) ha sido históricamente abastecido por dos proveedores dominantes, configurando un escenario de alta concentración en oferta y, por ende, de influencia significativa sobre precios y decisiones de compra en el sector [1].

Desde inicios de 2018 se incorporó una tercera alternativa correspondiente a un cemento importado de procedencia asiática (CI), comercializado localmente en sacos de 42.5 kg y distribuido en volúmenes relevantes mediante logística marítima a través de infraestructura portuaria del sur del país. En términos comerciales, esta alternativa se posicionó con un precio de venta aproximadamente 10% inferior al cemento UG producido localmente, lo cual puede traducirse en ahorros apreciables en obras con consumos elevados [1].

Considerando que Honduras, generalmente comercializa alrededor de 2.4 millones de toneladas anuales de cemento UG, la incorporación de CI podría representar un cambio

potencialmente relevante en el mercado por su capacidad de captación de demanda [2].

No obstante, al momento de su introducción, la disponibilidad de información técnica pública sobre el desempeño mecánico del CI en condiciones comparables a los cementos de producción local era limitada. En ese contexto, la presente investigación aborda dicha brecha mediante un estudio comparativo de la resistencia a la compresión simple de morteros elaborados con tres (3) alternativas: Cemento Importado (CI), Cemento Multinacional con producción local (CM) y Cemento Nacional de capital y producción hondureña (CN). El análisis se orienta a generar evidencia experimental que contribuya a la toma de decisiones técnicas y a la reducción de incertidumbre en la selección del tipo de cemento UG, concluyendo a partir de resultados de ensayo y su comparación entre las tres categorías evaluadas.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A. Antecedentes

El mercado hondureño del cemento hidráulico de uso general (GU/UG) ha estado dominado históricamente por dos productores con plantas en distintas regiones del país, con una distribución territorial de participación que, con el tiempo, se ha vuelto menos marcada debido a la expansión de redes logísticas y comerciales. En términos de oferta, este contexto se ha caracterizado por una alta concentración del suministro, lo que influye en el comportamiento de precios y en las decisiones de compra del sector construcción [1]. Adicionalmente, registros nacionales reportan volúmenes relevantes de producción y comercialización de cemento, evidenciando la magnitud del mercado local [2].

A inicios de 2018 se incorporó una tercera alternativa correspondiente a un cemento importado de procedencia asiática (CI), distribuido localmente a través de canales comerciales con presencia creciente en la zona centro y sur del país. Este producto se comercializa como cemento de uso general y ha ganado tracción en el mercado, principalmente por una estrategia de precio al consumidor inferior respecto a las alternativas locales (CM y CN), con variación según escala de compra [1]. En la práctica, esta diferencia de precio puede

incidir en la preferencia del consumidor, particularmente en proyectos con consumos altos de cemento.

Desde una perspectiva técnica, el reto principal asociado a la introducción de CI no radica en su presencia comercial, sino en la limitada disponibilidad de información técnica local publicada que permita comparar su desempeño, bajo condiciones controladas, frente a los cementos producidos localmente (CM y CN). En consecuencia, se han generado percepciones y comentarios en el sector que no necesariamente están respaldados por evidencia experimental verificable, lo cual incrementa la incertidumbre en la selección del material. Un elemento adicional observado en el entorno comercial es que, mientras que en productos locales suele indicarse explícitamente la referencia a normas técnicas de desempeño en el etiquetado, en CI dicha referencia puede no presentarse con el mismo nivel de claridad; esta observación se incluye únicamente como factor que podría influir en la percepción del usuario, sin que ello constituya una certificación, descalificación o veredicto de cumplimiento normativo.

En otros países se han realizado estudios comparativos entre cementos comerciales, combinando caracterizaciones físicas y ensayos mecánicos para concluir sobre diferencias de desempeño y líneas de investigación complementarias [3]. En línea con estos antecedentes, el presente trabajo se enfoca en una propiedad mecánica clave de control de calidad para morteros: la resistencia a la compresión.

B. Definición del problema y alcance

El CI presenta un periodo relativamente reciente de introducción al mercado nacional y, en consecuencia, no se dispone de suficientes estudios locales publicados que permitan caracterizar comparativamente su desempeño mecánico en morteros frente a CM y CN. Debido a limitaciones operativas habituales en laboratorios académicos (equipamiento, disponibilidad de ensayos y alcance de recursos), no se plantea realizar la totalidad de pruebas contempladas en una especificación de desempeño integral (p. ej., ASTM C1157), sino ejecutar un programa experimental controlado centrado en ensayos de compresión simple en morteros, manteniendo condiciones de fabricación uniformes entre los tres cementos para minimizar sesgos por dosificación o materiales [4], [5].

E. Justificación y contribución esperada

La investigación busca aportar evidencia experimental inicial para reducir la incertidumbre técnica asociada a la selección de cementos de uso general en el contexto local, especialmente ante la incorporación de una alternativa importada con presencia creciente en el mercado. Dado que la resistencia a la compresión constituye un indicador fundamental en el control de calidad de morteros y concretos, el estudio ofrece resultados comparativos que pueden servir como referencia técnica para usuarios, profesionales y futuros

investigadores. Asimismo, el trabajo pretende promover una toma de decisiones más informada, basada en desempeño medible y no únicamente en criterios de costo.

III. METODOLOGÍA

El desarrollo experimental se basó en los lineamientos de la norma ASTM C109/C109M (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars), adaptando las condiciones de los agregados para simular un escenario de control comparativo interno. El enfoque fue cuantitativo experimental, buscando determinar la variabilidad de la resistencia mecánica en función de la procedencia del aglomerante [5].

A. Enfoque y diseño del estudio

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, con diseño experimental de laboratorio bajo condiciones controladas. El alcance del estudio es comparativo: se evaluó la resistencia a la compresión simple de morteros elaborados con tres categorías de cemento de uso general;

- ✓ Cemento Importado (CI): Procedencia asiática.
- ✓ Cemento Multinacional (CM): Marca internacional de producción local.
- ✓ Cemento Nacional (CN): Marca de capital y producción hondureña;

...manteniendo constante la dosificación, el agregado fino y las condiciones de fabricación. Los resultados se interpretan como evidencia comparativa bajo un protocolo replicable, y no como certificación, clasificación o verificación de conformidad normativa de los cementos.

B. Muestreo y manejo de las muestras de cemento

Debido a la magnitud de la población (consumo nacional de sacos de 42.5 kg), no se realizó muestreo probabilístico, ya que el propósito del estudio no fue generalizar resultados a toda la población de cemento comercializado, sino comparar el desempeño mecánico relativo entre categorías bajo condiciones controladas. En este contexto se utilizó un muestreo dirigido, conforme al criterio metodológico para investigaciones experimentales con restricciones de generalización estadística [7].

Para el muestreo del material se aplicó el procedimiento de la norma ASTM C183 [6]. Se extrajeron dos muestras de 10 lb por cada categoría de cemento (CI, CM y CN). Las muestras se depositaron en contenedores plásticos sellados para preservar sus condiciones hasta la ejecución de los ensayos.

C. Dosificación, materiales y preparación de especímenes

Los especímenes se fabricaron como cubos de mortero de 50×50×50 mm (2×2×2 in), empleando moldes estándar. La dosificación se mantuvo idéntica para las tres categorías con el fin de evitar sesgos atribuibles a proporciones o materiales;

relación cemento-arena 1:2.75 en peso y relación agua-cemento (a/c) de 0.64.

El mezclado se realizó mecánicamente siguiendo los tiempos de reposo y batido especificados por la normativa para asegurar la homogeneidad de la pasta. Posteriormente, la mezcla fue vertida en moldes metálicos estancos en dos capas, apisonando cada capa para eliminar vacíos de aire y garantizar la consolidación.

Es importante destacar una modificación controlada respecto al estándar: en lugar de utilizar arena de sílice graduada estándar (Ottawa Sand), se empleó arena procesada de fábrica (triturada) adquirida de un lote único y homogeneizado. Esta decisión metodológica asegura que, si bien los valores absolutos de resistencia pueden diferir de los certificados de fábrica (que usan arena Ottawa), la validez comparativa se mantiene intacta, ya que el agregado aportó la misma influencia a las tres marcas, eliminando el sesgo por materiales [5], [10].

D. Programa experimental y tamaño muestral

Se ensayaron tres edades: 3, 7 y 28 días. Para cada combinación “categoría de cemento–edad”, se fabricaron 10 especímenes, totalizando:

3 categorías (CI, CM, CN) $\times$ 3 edades (3, 7, 28 días) $\times$ 10 especímenes = 90 cubos.

Este esquema de réplicas permitió comparar tendencias y promedios por edad, conservando un número uniforme de especímenes para cada categoría.

E. Curado y Ensayo

Tras 24 horas de fraguado inicial en cámara húmeda, los especímenes se desmoldaron y sumergieron inmediatamente en tanques de agua saturada con cal (hidróxido de calcio) para evitar la lixiviación, manteniéndose a temperatura ambiente controlada hasta el momento del fallo.

F. Ensayo de compresión simple

La resistencia a la compresión se determinó mediante ensayo de compresión simple, acorde con el procedimiento ASTM C109. Para cada espécimen se registró la carga máxima aplicada (P) y se calculó la resistencia (f_c), y los resultados se reportaron en unidades psi (lb/pulg²), conforme al registro experimental del estudio.

G. Tratamiento y análisis de datos

Para cada categoría de cemento y edad de ensayo se calculó la resistencia promedio a la compresión.

Posteriormente, se comparó el desempeño relativo CI–CM–CN por edad y se evaluó la consistencia de la ganancia de resistencia en el tiempo, verificando que el comportamiento siguiera una tendencia de incremento progresivo típica en morteros de cemento hidráulico. El análisis se presenta con enfoque comparativo y descriptivo, alineado con el objetivo general del estudio.

IV. RESULTADOS

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron monitoreando el desarrollo de la resistencia mecánica a edades tempranas (3 y 7 días) y a la edad estándar de diseño (28 días). A continuación, se detalla el comportamiento de cada aglomerante.

A. Desarrollo de Resistencia Temprana (3 y 7 Días)

En la etapa inicial, crítica para el desencofrado y manejo de elementos, se observó un comportamiento diferenciado. A los 3 días, el Cemento Importado (CI) y el Cemento Nacional (CN) mostraron un desempeño similar, con 1,184.64 psi y 1,167.69 psi respectivamente, mientras que el Cemento Multinacional (CM) inició con una resistencia menor de 947.90 psi.

Para 7 días, la tendencia se mantuvo, con el CI liderando la ganancia de resistencia (1,339.58 psi), seguido de cerca por el CN (1,320.57 psi), evidenciando una cinética de hidratación acelerada en comparación con el CM (1,136.48 psi).

B. Resistencia Final (28 Días)

Al cumplir el periodo de curado normativo de 28 días, todas las muestras mostraron el incremento logarítmico esperado. Sin embargo, se consolidó la superioridad mecánica del aglomerante importado bajo las condiciones de este ensayo. La Fig. 1 resume la comparativa final: el Cemento Importado (CI) alcanzó un pico promedio de 1,998.00 psi. Esto representa una resistencia 17.2% superior respecto al Cemento Nacional (1,704.17 psi) y un 21.2% superior respecto al Cemento Multinacional (1,648.73 psi).

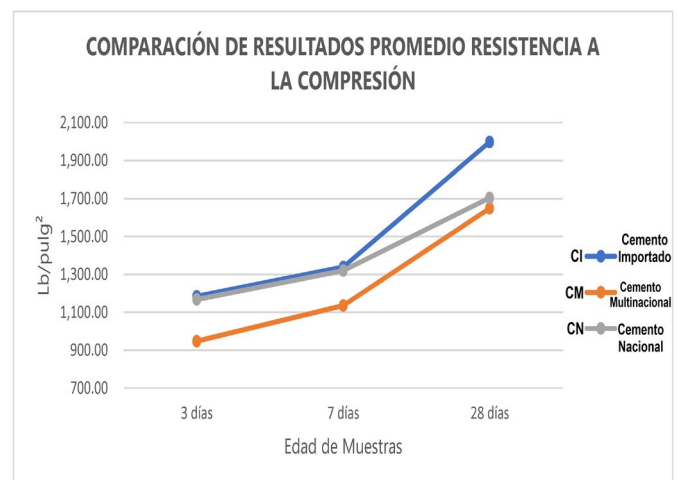


Fig. 1. Comparación de resistencia a la compresión promedio (psi) a los 28 días de edad.

V. DISCUSIÓN

A. Lectura técnica del comportamiento mecánico observado

Los resultados evidencian un comportamiento coherente con la evolución típica de resistencia del mortero de cemento

hidráulico: incremento progresivo a 3, 7 y 28 días para CI, CM y CN. Esto sugiere que, dentro del marco experimental aplicado, no se presentaron anomalías de hidratación evidentes (p. ej., pérdida de resistencia con el tiempo), sino una ganancia consistente asociada al avance de los productos de hidratación.

A 28 días, CI presenta la mayor resistencia promedio (1,998.00 psi), seguido por CN (1,704.17 psi) y CM (1,648.73 psi). En magnitudes relativas, CI supera a CN en aproximadamente 17.24% y a CM en 21.18%, mientras que CN supera a CM en 3.36%. Este patrón indica que la diferencia principal se concentra entre CI y los cementos de producción local, mientras que CN y CM muestran un desempeño más cercano entre sí a 28 días.

B. Evolución temporal y “perfil” de ganancia de resistencia

Al comparar la fracción de resistencia temprana respecto a la resistencia a 28 días, CN muestra una proporción relativamente alta de resistencia temprana (aprox. 68.5% a 3 días y 77.5% a 7 días respecto a su valor a 28 días), mientras que CI y CM alcanzan proporciones menores a edades tempranas (CI: ~59.3% a 3 días y ~67.0% a 7 días; CM: ~57.5% a 3 días y ~68.9% a 7 días). Esto puede interpretarse como un perfil donde CN desarrolla una porción relevante de su resistencia en edades tempranas, con un crecimiento posterior menos pronunciado, mientras que CI y CM muestran una ganancia más marcada hacia edades mayores.

Desde el punto de vista de materiales, diferencias en finura, proporción de clinker, distribución granulométrica y composición mineralógica (p. ej., relación C3S/C2S), así como el tipo y cantidad de adiciones minerales, pueden modificar tanto el desarrollo temprano como tardío de la resistencia. En el presente trabajo, al mantener constante la dosificación (cemento-arena y a/c), dichas diferencias intrínsecas del cemento son las candidatas más plausibles para explicar variaciones relativas en resistencia promedio.

C. Alcance, control de variables y comparabilidad de resultados

Un aspecto metodológico relevante es que el estudio se diseñó con propósito comparativo y controlado: misma relación cemento-arena (1:2.75), misma relación a/c (0.64), mismo agregado fino local (un solo lote) y mismo esquema de edades y réplicas. Esto fortalece la interpretación relativa CI–CM–CN, ya que reduce el sesgo por variables externas a la categoría de cemento.

No obstante, se enfatiza que, al emplearse arena local en lugar de arena normalizada, así como una relación a/c fija para todas las categorías, los valores absolutos de resistencia deben leerse con cautela y no como base para clasificación o verificación de cumplimiento normativo. En otras palabras, el estudio responde a la pregunta “¿cómo se comportan comparativamente bajo este protocolo controlado?” y no a “¿cumple o no cumple una especificación de desempeño?”.

D. Implicaciones prácticas y ruta de caracterización integral

En términos prácticos, los resultados ofrecen un insumo inicial para toma de decisiones informada: bajo un esquema de laboratorio controlado, CI exhibió mayores resistencias promedio, mientras que CN y CM resultaron cercanos a 28 días. Sin embargo, la selección técnica de cemento para aplicaciones estructurales no debe basarse únicamente en resistencia a compresión del mortero. Se recomienda complementar con ensayos físicos y de desempeño (p. ej., finura, tiempo de fraguado, densidad, consistencia, y desempeño bajo especificaciones aplicables), así como evaluación de durabilidad según el entorno de exposición y requisitos del proyecto.

E. Análisis estadístico complementario

Con el fin de fortalecer la comparación entre CI, CM y CN, se realizó un análisis estadístico descriptivo e inferencial de los resultados de resistencia a compresión del mortero para tres tipos de cemento (CI, CM y CN) y tres edades de curado (3, 7 y 28 días), con n=10 especímenes por combinación.

La tabla I muestra los estadísticos descriptivos de mayor relevancia que fueron considerados en el análisis de los datos obtenidos de forma experimental, y la tabla II presenta un resumen sobre el intervalo de confianza sobre la base de la resistencia a la compresión

TABLA I
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (PSI)

Categoría	3 días (psi) (Media $\pm$ SD ^a , CV% ^b)	7 días (psi) (Media $\pm$ SD ^a , CV% ^b)	28 días (psi) (Media $\pm$ SD ^a , CV% ^b)
CI	1,184.64 $\pm$ 156.64 (13.22%)	1,339.58 $\pm$ 72.04 (5.38%)	1,998.00 $\pm$ 209.58 (10.49%)
CM	947.90 $\pm$ 43.00 (4.54%)	1,136.48 $\pm$ 100.49 (8.84%)	1,648.73 $\pm$ 185.60 (11.26%)
CN	1,167.69 $\pm$ 110.92 (9.50%)	1,320.57 $\pm$ 91.39 (6.92%)	1,704.17 $\pm$ 139.86 (8.21%)

n = 10 especímenes por combinación (cemento–edad).

^aSD = desviación estándar muestral.

^bCV = (SD/Media)·100.

TABLA II
INTERVALO DE CONFIANZA (95%) DE LA MEDIA DE RESISTENCIA A LA
COMPRESIÓN (PSI)

Tipo	3 días: Media (IC95%)	7 días: Media (IC95%)	28 días: Media (IC95%)
CI	1,184.64 (1,072.59–1,296.69)	1,339.58 (1,288.05–1,391.11)	1,998.00 (1,848.08–2,147.92)
CM	947.90 (917.14–978.66)	1,136.48 (1,064.59–1,208.37)	1,648.73 (1,515.96–1,781.50)
CN	1,167.69 (1,088.34–1,247.04)	1,320.57 (1,255.19–1,385.95)	1,704.17 (1,604.12–1,804.22)

n = 10.

IC 95% calculado como Media $\pm$ t(0.975, 9)·(SD/ $\sqrt{n}$), con t(0.975, 9) = 2.262.

Unidades: psi.

Con el propósito de fortalecer la lectura técnica de los resultados y evitar interpretaciones basadas únicamente en promedios, se incorporan estadísticos descriptivos de dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación, CV%) y la precisión de la estimación de la media mediante

intervalos de confianza (IC 95%). Esta aproximación permite evaluar simultáneamente: (i) tendencia central (media), (ii) variabilidad intra-grupo (SD y CV), y (iii) grado de incertidumbre asociado a la media muestral (IC95%), antes de proceder a pruebas formales de hipótesis.

En la tabla I (Media $\pm$ SD; CV%), se observa que la dispersión relativa de los resultados varía entre categorías y edades. En términos generales, los CV se ubican en un rango aproximado de 4.5% a 13.2%, lo cual es compatible con un programa experimental de laboratorio con replicación ($n = 10$) y control de dosificación.

A 3 días, CM presenta la menor variabilidad (CV $\approx$ 4.54%), lo que sugiere un comportamiento temprano particularmente uniforme bajo las condiciones de ensayo; en contraste, CI muestra mayor dispersión relativa (CV $\approx$ 13.22%), indicando que, a edad temprana, sus resultados tienden a fluctuar más alrededor de la media. A 7 días, la variabilidad se reduce en CI (CV $\approx$ 5.38%) y se mantiene moderada en CN (CV $\approx$ 6.92%), mientras que CM exhibe una dispersión mayor (CV $\approx$ 8.84%), lo que puede asociarse a diferencias en la evolución de hidratación o sensibilidad del material a condiciones de fabricación/curado, aun manteniendo constantes la dosificación y el agregado fino. A 28 días, los CV se sitúan alrededor de 8%–11% para las tres categorías, lo que es consistente con un comportamiento donde el valor medio se incrementa, pero persiste una variabilidad natural propia del material y del ensayo.

De forma complementario, la tabla II (IC95% de la media) permite interpretar la “separación” entre categorías con base en la precisión de la media estimada (Media $\pm$ tSD/ $\sqrt{n}$).

En edades tempranas (3 y 7 días), los IC95% de CI y CN muestran un traslape amplio, lo cual es coherente con la proximidad de sus medias (diferencias de $\sim$ 17–19 psi), sugiriendo que su desempeño promedio a estas edades es comparable dentro de la incertidumbre experimental. Por el contrario, los IC95% de CM a 3 y 7 días quedan claramente por debajo de los intervalos de CI y CN (sin traslape), lo que indica que, en el marco de este programa, CM tiende a desarrollar resistencias tempranas inferiores respecto a CI y CN.

En términos prácticos, a 3 días CI supera a CM en $\sim$ 25.0% y CN supera a CM en $\sim$ 23.2%; a 7 días, CI supera a CM en $\sim$ 17.9% y CN en $\sim$ 16.2%, manteniéndose el patrón de diferencia temprana a favor de CI y CN.

A 28 días, el análisis por IC95% muestra un comportamiento particularmente relevante: el intervalo de CI se ubica completamente por encima de los intervalos de CN y CM, lo que respalda que CI alcanza resistencias promedio mayores a edad estándar de referencia (28 días) bajo este

protocolo. En términos relativos, CI supera a CN en $\sim$ 17.2% y a CM en $\sim$ 21.2%, con diferencias absolutas aproximadas de 294 psi (CI–CN) y 349 psi (CI–CM).

En cambio, los IC95% de CN y CM presentan traslape a 28 días, consistente con una diferencia promedio pequeña ($\sim$ 55 psi; $\sim$ 3.36%), lo cual sugiere que, a esta edad, CN y CM exhiben desempeños promedio cercanos bajo las condiciones de ensayo empleadas.

Es importante enfatizar que el traslape (o no traslape) de intervalos de confianza constituye una lectura preliminar de la separación entre medias, pero no reemplaza las pruebas formales de significancia. Por ello, seguidamente se analizan los resultados de la ANOVA aplicada, así como el compendio de comparaciones múltiples para confirmar estadísticamente si las diferencias observadas entre CI, CM y CN a cada edad son significativas y con qué magnitud, fortaleciendo así el respaldo cuantitativo del análisis comparativo.

Con el fin de verificar formalmente si las diferencias observadas entre categorías de cemento exceden la variabilidad experimental intra-grupo, se aplicó un ANOVA de un factor por edad (3, 7 y 28 días), tomando como factor el tipo de cemento (CI, CM y CN). Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas entre cementos en las tres edades evaluadas: 3 días ($F(2,27)=13.52$; $p<0.001$), 7 días ($F(2,27)=15.97$; $p<0.001$) y 28 días ($F(2,27)=10.79$; $p<0.001$).

Adicionalmente, los tamaños de efecto ($\eta^2\approx 0.44$ – 0.54) indican que una proporción alta de la variación total de la resistencia a compresión se explica por el factor “tipo de cemento”, lo cual respalda que las diferencias no son triviales desde el punto de vista práctico y no se deben únicamente a fluctuaciones del ensayo.

En coherencia con la lectura preliminar de los IC95% y la dispersión (CV%), el análisis post-hoc de Tukey permitió identificar los pares responsables de las diferencias globales. A 3 y 7 días, CI y CN no presentaron diferencias significativas entre sí, mientras que ambos exhibieron resistencias significativamente superiores a CM; este resultado es consistente con el hecho de que los IC95% de CI y CN se traslapan ampliamente entre sí, y que los IC95% de CM permanecen por debajo de los intervalos de las otras dos categorías en edades tempranas.

A 28 días, CI alcanzó resistencias significativamente superiores tanto a CM como a CN; en cambio, CM y CN no difirieron significativamente entre sí, lo cual coincide con el traslape observado entre sus IC95% a 28 días y con su diferencia media relativamente pequeña.

Para capturar el comportamiento global del conjunto de datos, se ejecutó además un ANOVA de dos factores (Edad y Cemento), el cual confirmó efectos principales significativos para “Edad” y “Cemento”, así como también una interacción

Edad×Cemento ($p=0.009$). Esta interacción sugiere que la magnitud del efecto del tipo de cemento depende de la edad de curado; en particular, las diferencias entre categorías no se mantienen constantes a través del tiempo, sino que se acentúan o atenúan según la etapa de ganancia de resistencia. Este hallazgo refuerza la interpretación previa: CI y CN tienden a comportarse de manera comparable en edades tempranas bajo el protocolo aplicado, mientras que a 28 días CI presenta una ventaja estadísticamente verificable frente a las categorías de producción local.

En términos de lectura técnica, estos resultados inferenciales aportan respaldo cuantitativo a la comparación, reduciendo la probabilidad de conclusiones basadas únicamente en promedios. Sin embargo, se recuerda que el alcance del estudio es comparativo bajo condiciones controladas (dosificación fija, arena local y protocolo uniforme), por lo que los hallazgos deben interpretarse como evidencia experimental relativa y no como certificación o veredicto de conformidad normativa [8]–[10].

En síntesis, el aporte central de este estudio es brindar evidencia comparativa local, reproducible y neutral, que reduzca incertidumbre técnica sin emitir juicios de conformidad o no conformidad normativa.

VI. CONCLUSIONES

1) El programa experimental se ejecutó bajo un esquema comparativo y controlado, manteniendo constantes la dosificación y los materiales para las tres categorías de cemento (CI, CM y CN). En particular, se utilizó una relación cemento–arena de 1:2.75, una relación agua–cemento (a/c) de 0.64 y moldes estándar de $50 \times 50 \times 50$ mm ($2 \times 2 \times 2$ in), alineado con el procedimiento base del ensayo de resistencia a compresión de morteros [5].

2) El muestreo dirigido se implementó con criterios operativos de laboratorio y con manejo de material conforme a prácticas de muestreo aplicables a cementos hidráulicos, con el objetivo de preservar condiciones comparables entre categorías y reducir sesgos por manipulación o contaminación de la muestra [6].

3) Para la fabricación de morteros se sustituyó la arena normalizada por arena local proveniente de un único lote, almacenada exclusivamente para los ensayos. Esta decisión constituye una desviación del esquema estándar asociado al método, pero al aplicarse de manera idéntica a CI, CM y CN, se preservó el principio de comparabilidad interna del estudio y se mantuvo la validez del análisis relativo bajo condiciones replicables [5].

4) Los resultados mostraron un incremento progresivo de resistencia a 3, 7 y 28 días para las tres categorías evaluadas,

coherente con el desarrollo esperado de resistencia del mortero a medida que avanza la hidratación, sin evidenciar comportamientos atípicos en la tendencia temporal bajo el protocolo aplicado [8].

5) En términos comparativos, a 28 días CI presentó la mayor resistencia promedio (1,998.00 psi), seguido por CN (1,704.17 psi) y CM (1,648.73 psi). Este orden de desempeño se mantiene dentro del alcance del estudio, que busca contrastar comportamiento mecánico relativo bajo dosificación constante y condiciones controladas, sin emitir conclusiones normativas de clasificación o conformidad [5].

6) El análisis estadístico complementario incorporado en la Discusión (descriptivos, IC95%, ANOVA y Tukey) respalda que las diferencias observadas no se explican únicamente por variabilidad experimental, sino que reflejan un efecto del tipo de cemento y su evolución con la edad de curado bajo el esquema experimental definido; no obstante, este respaldo estadístico no sustituye los requisitos de una evaluación integral de desempeño según especificaciones normativas [7].

7) Se concluye, por tanto, que los hallazgos deben interpretarse como evidencia experimental comparativa bajo un protocolo controlado y con limitaciones explícitas; para estudios que busquen certificar o clasificar cementos para uso estructural conforme a desempeño, es necesario complementar con el conjunto de ensayos exigidos por especificaciones aplicables y con condiciones estandarizadas completas [4], [14].

VII. RECOMENDACIONES

1) Alcance realista y diseño de investigación conforme a capacidad de laboratorio. Para investigaciones cuyo objetivo sea clasificar o calificar cementos bajo un marco normativo, se recomienda realizar una evaluación previa de capacidades (equipamiento, instrumentación, personal técnico y tiempo de laboratorio), ya que varias pruebas exigidas por normas ASTM requieren dispositivos especializados no disponibles en todos los entornos académicos. En contextos donde únicamente sea factible ejecutar compresión, el alcance debe formularse explícitamente como “comparativo bajo condiciones controladas” y no como verificación de conformidad o clasificación normativa [4], [14].

2) Complementar el estudio con ensayos físicos básicos cuando sea posible. Para fortalecer la caracterización del material, se recomienda incorporar, en la medida de la disponibilidad de equipo, ensayos de propiedades físicas relevantes para cementos hidráulicos, tales como finura (p. ej., permeabilidad al aire o tamiz), densidad y tiempos de fraguado. Estos ensayos permiten una interpretación más robusta de diferencias de resistencia a compresión, al

relacionar el desempeño mecánico con parámetros de fabricación y comportamiento del material [11], [12], [13].

3) Uso de materiales normalizados y control del agregado fino. Para estudios orientados a calificación conforme a ASTM C109, se recomienda utilizar arena normalizada (Ottawa sand), ya que dicha condición forma parte del método de referencia para comparar resultados con los valores esperados por la norma. [1] En caso de estudios comparativos (como el presente), si no se dispone de arena normalizada, se recomienda emplear arena local limpia y establecida bajo criterios de control (mismo lote, almacenamiento dedicado, condiciones de humedad controladas), garantizando que el agregado fino sea una variable constante en todas las mezclas [5], [10].

4) Planificación de recursos y control de sesgos por lote. Se recomienda calcular anticipadamente las cantidades de materiales secos (cemento y arena) requeridas para todo el programa experimental y adquirirlos en una sola compra o lote, con el fin de minimizar variaciones no controladas (cambios de granulometría, humedad o procedencia). Asimismo, se recomienda documentar de forma sistemática la trazabilidad de los insumos, el almacenamiento y las condiciones ambientales del laboratorio durante el periodo de fabricación y curado [9], [10].

5) Replicación, control de calidad y fortalecimiento estadístico. Para aumentar el poder de inferencia y la robustez frente a revisión por pares, se recomienda mantener o incrementar el número de especímenes por condición (cemento–edad) y reportar, además de la media, medidas de dispersión (SD y CV) e intervalos de confianza. Cuando sea posible, se recomienda aplicar pruebas de hipótesis con comparaciones múltiples (ANOVA y Tukey) y tamaños de efecto, así como reportar verificación de supuestos (normalidad y homocedasticidad) o emplear alternativas robustas si los supuestos no se cumplen [7].

6) Organización del trabajo experimental y gestión del tiempo. En programas con múltiples edades de ensayo y alto volumen de especímenes, se recomienda iniciar la etapa de planificación con suficiente antelación para ajustar el alcance en función de recursos disponibles, calendarizar ventanas de laboratorio, coordinar uso de equipos y asegurar tiempos de curado y ensayo consistentes. Adicionalmente, la ejecución en equipo mejora la trazabilidad del proceso, reduce errores operativos y fortalece el control de calidad en fabricación, curado y registro de datos [7].

7) Recomendación institucional para mejorar confiabilidad experimental. Para mejorar la calidad de futuras investigaciones experimentales, se recomienda fortalecer la infraestructura de laboratorio orientada al control de humedad y secado de materiales, así como establecer protocolos de segregación y etiquetado para evitar contaminación cruzada

entre muestras de distintos cursos o proyectos. Esta medida incrementa la confiabilidad de resultados y la reproducibilidad del trabajo científico en entornos educativos. [7]

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Nuestro más sincero y sentido agradecimiento, y sobre todo, profunda admiración para el Ingeniero Mario Luciano Coello Zúniga (†nov/2024), cuyo trabajo y dedicación dieron origen a esta investigación. Como estudiante visionario y, posteriormente, profesional de la ingeniería civil, aportó invaluable conocimientos y entusiasmo al estudio de la resistencia de los morteros de cemento, conformando las bases para la elaboración de este documento.

Su empeño en mantener altos estándares académicos y su entrega a la profesión continúan inspirándonos a difundir los resultados de su esfuerzo, honrando así su memoria.

Este artículo busca dar continuidad al legado que dejó en la comunidad técnica, reafirmando el compromiso con la excelencia y el avance científico que siempre caracterizó su trayectoria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Boquín, “Entrevista a profesional del sector construcción (Honduras),” 30-ene-2019.
- [2] Banco Central de Honduras (BCH), “Honduras en cifras,” 2017. [En línea]. Disponible: https://www.bch.hn/honduras_en_cifras.php. [Accedido: 31-jan-2026].
- [3] E. A. Cortés y J. E. Perilla, “Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de cuatro cementos comerciales Portland Tipo I,” Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2014.
- [4] ASTM International, “ASTM C1157: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement,” West Conshohocken, PA, USA, 2008.
- [5] ASTM International, “ASTM C109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars,” West Conshohocken, PA, USA, 2007.
- [6] ASTM International, “ASTM C183: Standard Practice for Sampling and the Amount of Testing of Hydraulic Cement,” West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [7] R. Hernández Sampieri, Metodología de la investigación, 6a ed. México, 2014.
- [8] A. M. Neville, Tecnología del Concreto, 1a ed. México: Pearson, 1999.
- [9] S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese y J. Tanesi, Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Skokie, IL, USA: Portland Cement Association, 2004.
- [10] D. Sánchez de Guzmán, Tecnología del Concreto y del Mortero, 5a ed. Bogotá, Colombia: Bhandar Editores, 2001.
- [11] ASTM International, “ASTM C188: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement,” West Conshohocken, PA, USA, 1995.
- [12] ASTM International, “ASTM C191: Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle,” West Conshohocken, PA, USA, 2006.
- [13] ASTM International, “ASTM C204: Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus,” West Conshohocken, PA, USA, 2007.
- [14] ASTM International, “ASTM C150: Standard Specification for Portland Cement,” West Conshohocken, PA, USA, 2012.