



Estudio comparativo de las propiedades del concreto curado en laboratorio y en obra

Estudo comparativo das propriedades do concreto curado em laboratório e em obra

ROMERO, J. R. H.¹; FIGUEIREDO, E. J. P.²; MARCONDES, E. C.³; LACERDA, N. A T.⁴

jose.romero@neomixconcreto.com.br^{1,2}; eduardo.marcondes@newmixengenharia.com.br³; natielle.lacerda@neomixconcreto.com.br⁴.

¹ Engenharia Civil, UNIP, Ribeirão Preto, Brasil y Pós Graduação em Patologia em Obras Civis, IDD, São Paulo, Brasil.

² PPGE/UFCAT, Catalão, Brasil y Mestrado em Construção Civil da UFMG, Belo Horizonte, Brasil.

³ Engenharia Civil, Centro Universitário Moura Lacerda, Ribeirão Preto, Brasil.

⁴ Engenharia Civil, UNIP – Universidade Paulista, Ribeirão Preto, Brasil.

Información

Palabras-clave:

Curado del hormigón

Resistencia a la compresión

Módulo de elasticidad

Absorción capilar

Control tecnológico

Palavras-chave:

Cura do concreto

Resistência à compressão

Módulo de elasticidade

Absorção capilar

Controle tecnológico

Resumen:

Este estudio analiza el impacto de las condiciones de curado en las propiedades del concreto, enfocándose en entornos controlados de laboratorio versus sitios de construcción reales. Las muestras moldeadas se dividieron en dos grupos: uno curado según NBR 5738 en el laboratorio y el otro sometido a las mismas condiciones que la estructura construida en el campo. Después de 28 días, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión (NBR 5739), módulo de elasticidad (NBR 8522) y absorción de agua capilar (NBR 9779). Los resultados demostraron pérdidas promedio de hasta 40% en resistencia y 50% en módulo de elasticidad en muestras curadas en el sitio. La absorción de agua capilar también fue mayor en el campo, lo que indica mayor porosidad. Los datos refuerzan la importancia del curado técnicamente planificado, especialmente en contextos con variabilidad climática y presiones ejecutivas. El estudio contribuye a la mejora del control tecnológico del concreto en la construcción civil.

Resumo:

Este estudo analisa o impacto das condições de cura nas propriedades do concreto, com foco em ambientes controlados de laboratório versus canteiros de obras reais. Amostras moldadas foram divididas em dois grupos: um curado de acordo com a NBR 5738 em laboratório e o outro submetido às mesmas condições da estrutura construída em campo. Após 28 dias, foram realizados ensaios de resistência à compressão (NBR 5739), módulo de elasticidade (NBR 8522) e absorção capilar de água (NBR 9779). Os resultados mostraram perdas médias de até 40% na resistência e 50% no módulo de elasticidade nas amostras curadas em campo. A absorção capilar de água também foi maior em campo, indicando maior porosidade. Os dados reforçam a importância do planejamento técnico da cura, especialmente em contextos com variabilidade climática e pressões construtivas. Este estudo contribui para o aprimoramento do controle tecnológico do concreto na construção civil.

1. Introducción

La durabilidad y el rendimiento mecánico de las estructuras de hormigón armado dependen de diversos factores intrínsecos al material y a las condiciones ambientales a las que están expuestas. Entre estos factores, la etapa de curado del hormigón, a menudo subestimada en los proyectos de construcción, desempeña un papel decisivo en la evolución de las propiedades físicas y mecánicas del material. El proceso de hidratación del cemento, que subyace a la resistencia y la cohesión de la matriz cementosa, requiere el mantenimiento de un ambiente húmedo y térmicamente estable, especialmente durante los primeros días tras el hormigonado. Si se descuida, el curado puede comprometer significativamente el rendimiento de la estructura a lo largo de su vida útil, favoreciendo manifestaciones patológicas tempranas y comprometiendo la seguridad del edificio.

La literatura técnica especializada destaca que el proceso de curado influye directamente en la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la durabilidad del hormigón, especialmente en entornos sujetos a intensas variaciones climáticas. Según Mehta y Monteiro (2014), incluso variaciones aparentemente pequeñas de humedad o temperatura ambiente pueden causar pérdidas de resistencia superiores al 30 %, dependiendo de la composición del hormigón y el tiempo de exposición. La Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT), mediante la norma NBR 5738 (2015), establece procedimientos estandarizados para el moldeo, curado y ensayo de muestras. Sin embargo, el cumplimiento de estos protocolos en la obra aún enfrenta barreras logísticas y culturales.

En el ámbito experimental, comparar muestras curadas en condiciones controladas de laboratorio con aquellas curadas directamente en obra es un método eficaz para evaluar el impacto del curado en las propiedades finales del hormigón. Este enfoque permite cuantificar las diferencias de

rendimiento y proporciona apoyo técnico para mejorar las prácticas de construcción en obra.

En este contexto, este estudio busca comparar las propiedades del hormigón curado en laboratorio con las obtenidas en obra, mediante ensayos de resistencia a la compresión axial, módulo de elasticidad estático y absorción capilar de agua, con el fin de evaluar el impacto de las condiciones reales de curado en el rendimiento del material.

2. Materiales y métodos

2.1 Diseño experimental y estrategia de comparación

Este estudio comparó el desempeño del hormigón sometido a dos regímenes de curado distintos: uno en condiciones ideales de laboratorio y otro en un entorno real de obra. Para ello, se moldearon probetas cilíndricas de hormigón durante el hormigonado, utilizando diseños de mezcla diseñados por el proveedor Neomix Concreto®.

Las muestras se dividieron en dos grupos equivalentes. El primer grupo se mantuvo en el laboratorio, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, de acuerdo con las directrices de la norma NBR 5738 (ABNT, 2015). El segundo grupo permaneció en obra, recibiendo el mismo tipo de curado aplicado al elemento estructural hormigonado, sin intervención adicional de los investigadores. Esta metodología permitió una simulación fiel de las condiciones reales de campo y una evaluación del impacto ambiental del proceso de curado.

Figura 1 – Curado húmedo con geotextil aplicado a losas estructurales. Esta técnica tradicional implica mantener la humedad constante en la superficie del hormigón, lo que promueve la hidratación del cemento y mitiga las grietas por retracción plástica.



Fuente: Romero, 2024.

Figura 2 – (a) Especímenes almacenados en el laboratorio, de acuerdo con la norma NBR 5738; (b) Especímenes conservados en obra, en las mismas condiciones de curado que la pieza estructural. La diferenciación de los ambientes de exposición permitió medir el efecto de las variables ambientales en el rendimiento final del material.



Fuente: Marcondes e Lacerda, 2024.

2.2 Propiedades evaluadas

Após Tras el período de curado estándar de 28 días, según las recomendaciones reglamentarias, las muestras de ambos grupos se sometieron a ensayos mecánicos y físicos. Se analizaron los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión axial, según la norma NBR 5739 (ABNT, 2018);
- Módulo de elasticidad estático, según la norma NBR 8522 (ABNT, 2021);
- Absorción de agua por capilaridad, según la norma NBR 9779 (ABNT, 2012).

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Unitec, en condiciones controladas y con equipos calibrados, lo que garantizó la fiabilidad de los resultados obtenidos. Todas las muestras pertenecían al mismo lote de hormigón, lo que garantizó la consistencia de la mezcla entre los grupos.

2.3 Condiciones ambientales y control

Durante el período de curado, se registraron datos de temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento en los lugares de almacenamiento de las muestras. Estas variables se monitorearon mediante sensores digitales (Figura 3) para identificar correlaciones entre el entorno y la evolución de las propiedades del hormigón. En particular, se buscó observar la evaporación potencial del agua de hidratación y su influencia en la resistencia mecánica final.

Figura 3 – Sistema digital de monitoreo de temperatura y humedad utilizado durante el curado del hormigón en campo. Los sensores permitieron el seguimiento de condiciones ambientales críticas y ayudaron a correlacionarlas con el rendimiento de la muestra.



Fuente: Romero, 2024.

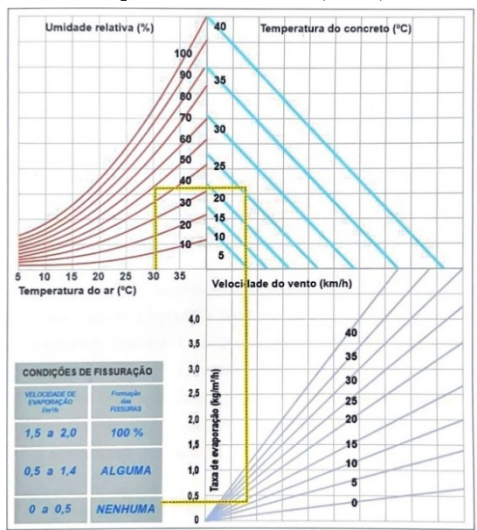
Figura 4 – Las muestras de prueba se exponen al sitio sin la protección adecuada. La falta de control de la humedad, el calor y los contaminantes compromete la precisión de las pruebas y la representatividad de las muestras.



Fuente: Lacerda, 2024.

La adopción de registros ambientales permitió no solo el seguimiento técnico del curado en campo, sino también un análisis comparativo con parámetros ideales de laboratorio, lo que permitió identificar discrepancias con posible impacto patológico. Como se ilustra en la Figura 5, una tasa de evaporación superior a 1,0 kg/m²/h representa un alto riesgo de agrietamiento por retracción plástica, lo que requiere medidas correctivas inmediatas durante el proceso de curado.

Figura 5 – Ábaco de Cánovas para estimar la tasa de evaporación del agua del hormigón en función de la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la temperatura superficial del hormigón. Adaptado de Cánovas (1988).



Fuente: Cánovas [7].

Entre las estrategias implementadas para mitigar los efectos climáticos adversos, destaca la instalación de carpas o cubiertas temporales sobre superficies hormigonadas. Esta solución protege el hormigón de la luz solar directa, las fluctuaciones bruscas de temperatura y las lluvias repentinas, garantizando un mejor curado incluso en exteriores.

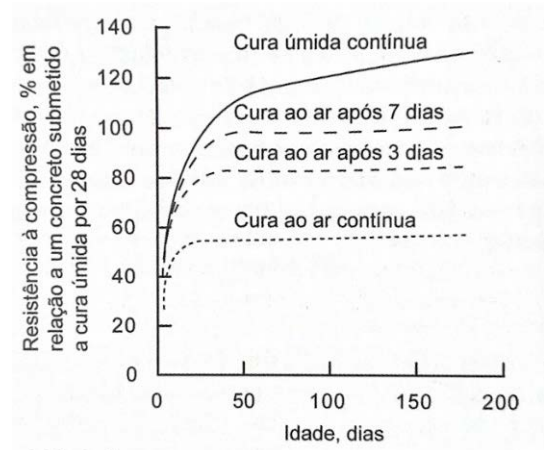
Figura 6 – Protección temporal con un techo móvil instalado sobre una pista de hormigón recién vertida en un proyecto a gran escala. Una estrategia eficaz para minimizar la pérdida de humedad por la radiación solar

directa y las fluctuaciones de temperatura.



Fuente: Romero, 2024.

Figura 7 – Evolución de la resistencia a la compresión en función del tipo y la duración del curado. El gráfico muestra el rendimiento relativo del hormigón sometido a curado continuo en húmedo, curado interrumpido y curado al aire, en comparación con el periodo estándar de curado en húmedo de 28 días.



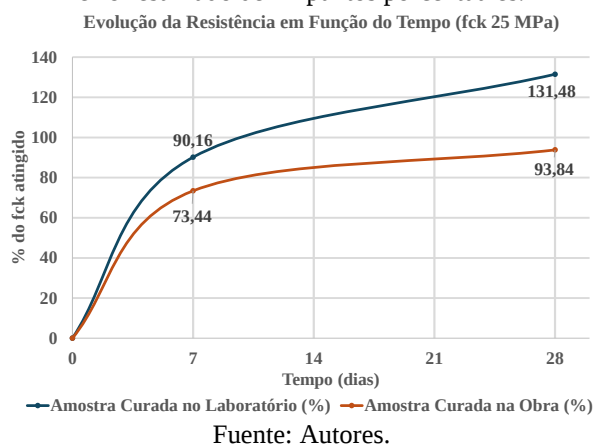
Fuente: Mehta e Monteiro [8]

3. Resultados

3.1 Resistencia a la compresión axial

Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión mostraron diferencias significativas entre las muestras curadas en laboratorio y las mantenidas en obra. La Tabla 1 del ANEXO A presenta los valores promedio obtenidos para diferentes mezclas de hormigón, lo que demuestra una tendencia consistente a una mayor resistencia en las muestras sometidas a curado controlado.

Figura 8 – Evolución de la resistencia a la compresión (en % de fck) a lo largo de 28 días, comparando muestras curadas en laboratorio y en obra para hormigón fck = 25 MPa - se observa un margen de error estimado de ± 2 puntos porcentuales.



3.2 Módulo de elasticidad estático (E)

La Tabla 2 del ANEXO B presenta los valores promedio del módulo de elasticidad estático (E) de las muestras ensayadas a los 28 días. Los resultados confirman que un curado inadecuado en obra resultó en una menor rigidez del hormigón, con pérdidas porcentuales significativas en todas las mezclas analizadas. (Figura 9 del ANEXO B).

3.3 Absorción de agua por capilaridad

La Tabla 3 del ANEXO C presenta los índices promedio de absorción de agua por capilaridad obtenidos para las diferentes mezclas. Si bien las diferencias entre los grupos no fueron tan pronunciadas como en las propiedades mecánicas, se observó una mayor variabilidad en las muestras curadas in situ, lo que indica una menor uniformidad y una mayor susceptibilidad a los agentes agresivos. (Figura 10 del ANEXO C).

4. Discusiones

4.1 Influencia del curado en las propiedades mecánicas

Los resultados confirman que las condiciones de curado inciden directamente en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón. Las muestras sometidas a curado en laboratorio mostraron un rendimiento significativamente superior,

con mejoras promedio de hasta un 40 % en la resistencia a la compresión y más del 50 % en el módulo de elasticidad, dependiendo de la mezcla analizada.

Estos hallazgos corroboran los estudios de Mehta y Monteiro (2014), que destacan la importancia de mantener una humedad y temperatura ideales durante los primeros días de curado para una formación eficiente de la matriz cementicia. En el ámbito de la construcción, la falta de un control estricto de factores climáticos como la radiación solar directa, las fluctuaciones de temperatura y el viento provoca una pérdida prematura de agua de hidratación, lo que compromete el desarrollo de la resistencia mecánica.

4.2 Absorción de agua y durabilidad.

Aunque la diferencia en las tasas de absorción de agua por capilaridad fue menos pronunciada que en los parámetros mecánicos, indica una mayor porosidad superficial en las muestras curadas en campo. Este factor es crucial, ya que una alta capilaridad se asocia con una mayor penetración de agentes agresivos, acelerando procesos de degradación como la carbonatación y el ataque de iones cloruro (CANÓVAS, 1988).

La dispersión de datos observada en las muestras in situ sugiere que el curado en este entorno no solo es menos eficiente, sino también menos uniforme, lo que puede comprometer la durabilidad de la estructura en su conjunto.

4.3 Normas y buenas prácticas como mitigadores de riesgos

La norma NBR 5738 (ABNT, 2015) establece requisitos claros para el moldeo, curado y transporte de probetas, los cuales se cumplieron rigurosamente en el caso de las muestras de laboratorio. En el caso de las muestras in situ, si bien el equipo técnico adoptó prácticas estándar de la industria, como el curado húmedo con mantas geotextiles, la falta de control micro climático resultó insuficiente para lograr el rendimiento esperado.

Este hallazgo refuerza la necesidad de una rigurosa adopción de normas técnicas y el uso de tecnologías auxiliares —como sensores de humedad, aditivos químicos y programas de curado personalizados— para garantizar la calidad final del hormigón en obra.

4.4 Consideraciones sobre sostenibilidad e innovación

Más allá de los aspectos técnicos, el estudio destaca oportunidades de innovación en el curado del hormigón. Métodos como el curado químico con compuestos formadores de película y el uso de aditivos con control reológico y retardantes de evaporación demuestran su viabilidad para mitigar los efectos de la meteorización. La introducción de prácticas sostenibles, como el uso de materiales reciclados en la formulación de aditivos y la reducción del consumo de agua durante el proceso de curado, también debería fomentarse como parte de la agenda de responsabilidad ambiental de la industria de la construcción.

5. Conclusiones

5.1 Evaluación de resultados

Los datos obtenidos muestran que el hormigón curado en condiciones controladas de laboratorio presentó un rendimiento técnico significativamente superior al del hormigón curado in situ. Las mayores discrepancias se observaron en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, con variaciones promedio de hasta el 40% y el 50%, respectivamente. La absorción de agua capilar también fue mayor en las muestras de campo, lo que indica una mayor porosidad y una menor durabilidad potencial.

A medida que se introducen nuevas tecnologías y materiales, las normativas deben adaptarse a estos cambios, garantizando la seguridad y la eficacia de las prácticas. La adaptación de los profesionales de la construcción a estos nuevos enfoques será crucial para el éxito de la industria. La resistencia al cambio, si bien es común, puede

representar un obstáculo importante, especialmente a la hora de adoptar prácticas sostenibles, cada vez más demandadas por el mercado. La implementación de aditivos reciclados y naturales en el curado del hormigón no es solo una cuestión de viabilidad económica, sino un paso necesario hacia una construcción más ética y responsable con el medio ambiente. Por lo tanto, el futuro del curado del hormigón está ligado a una transformación cultural dentro de la industria de la construcción. La clave de esta transformación es la voluntad de aprender, adaptarse y colaborar, construyendo un futuro más sostenible y eficiente para todos.

5.2 Relevancia del curado en el desempeño estructural

La etapa de curado ha demostrado ser crucial para la calidad final del hormigón. La falta de un control riguroso de las condiciones ambientales en obra comprometió la hidratación adecuada del cemento, reduciendo la cohesión de la matriz y la integridad microestructural. En consecuencia, las estructuras hormigonadas sin las prácticas adecuadas son más susceptibles a grietas, deformaciones y manifestaciones patológicas a lo largo de su vida útil.

5.3 Recomendaciones para el sector de la construcción

Para garantizar el rendimiento de diseño de las estructuras, se recomienda lo siguiente:

- Adopción sistemática de métodos de curado compatibles con las condiciones climáticas locales;
- Planificación específica de la etapa de curado en los cronogramas de construcción;
- Uso de tecnologías de monitoreo y aditivos adaptativos para asegurar la retención de humedad;
- Capacitación técnica de los equipos de construcción sobre buenas prácticas de curado y manejo de probetas.

5.4 Perspectivas futuras

La evolución de los métodos de curado, con el uso de sensores inteligentes, aditivos sostenibles y técnicas adaptativas, representa un camino prometedor para optimizar el rendimiento del hormigón incluso en condiciones adversas. La inversión en investigación e innovación, sumada al estricto cumplimiento de las normas técnicas, debería guiar las futuras prácticas de construcción hacia la durabilidad y la sostenibilidad.

6. Referencias

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- [2] ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- [3] ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- [4] ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- [5] ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2023.
- [6] ASTM International. ASTM C172/C172M-17 Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete, 2017. https://store.astm.org/c0172_c0172m-17.html, acesso em: outubro de 2024.
- [7] CÁNOVAS, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. Tradução de M. Celeste Marcondes e Beatriz Cannabrava. São Paulo: Pini, 1988.
- [8] MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo, Brasil: IBRACON. 3ª ed., p. 64, 2014.
- [9] ROMERO, J. R. H. Durabilidade do concreto. Universidade Paulista – UNIP, 2016
- [10] GHOSH, A.; GHOSH, S.; NAIR, S. (2021). Performance evaluation of concrete under different curing environments: A comparative study. Construction and Building Materials, 271, 121581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121581>
- [11] SIVAKUMAR, S.; THANGARAJ, R. (2022). Effect of curing methods on strength and durability of high-performance concrete: A review. Journal of Building Engineering, 46, 103760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103760>.
- [12] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12390-1: Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds. Brussels, 2021.
- [13] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12390-2: Testing hardened concrete - Part 2: Making and curing specimens for strength tests. Brussels, 2019.
- [14] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12390-3: Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Brussels, 2019.
- [15] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12390-13: Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression. Brussels, 2021.

ANEXO A

Tabela 1 – Valores promedio de resistencia a la compresión axial a los 7 y 28 días para el hormigón curado en laboratorio y en obra. Promedio de 50 muestras por grupo, según la norma NBR 5739 (ABNT, 2018). Se observa un margen de error estimado de ± 2 puntos porcentuales.

fck	fcj = 7 días			fcj = 28 días		
	Laboratorio	Obra	Diferencia	Laboratorio	Obra	Diferencia
(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)
25	22,54	18,36	23%	32,87	23,46	40%
30	30,77	27,93	10%	38,13	33,03	15%
35	31,58	27,02	17%	40,48	29,80	36%
40	33,44	32,84	2%	46,405	39,74	17%

Fuente: Autores.

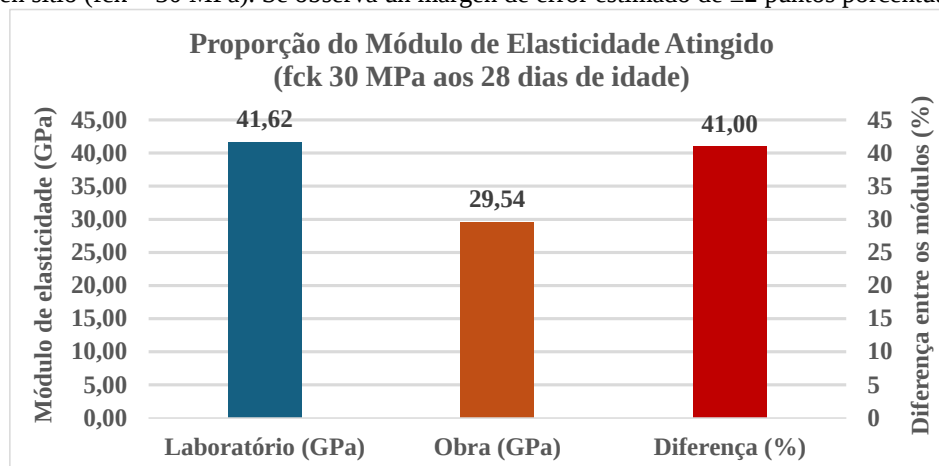
ANEXO B

Tabela 2 – Resultados promedio de la diferencia en el módulo de elasticidad estático entre muestras de construcción y de laboratorio, según la norma NBR 8522 – Hormigón – Determinación del módulo de elasticidad y la deformación por compresión. Promedio extraído de 50 muestras. Se observa un margen de error estimado de ± 2 puntos porcentuales.

fck	Módulo Estático de Elasticidad (E) – 28 días		
	Laboratorio	Obra	Diferencia
(MPa)	(GPa)	(GPa)	(%)
25	42,18	26,62	58,43%
30	41,62	29,54	40,89%
35	41,67	34,82	19,67%
40	47,92	38,64	24,04%

Fuente: Autores.

Figura 9 – Comparación gráfica del módulo de elasticidad estático promedio para muestras curadas en el laboratorio y en sitio (fck = 30 MPa). Se observa un margen de error estimado de ± 2 puntos porcentuales.



Fuente: Autores.

ANEXO C

Tabela 3 – Resultados promedio de la diferencia en el índice de absorción capilar entre muestras de construcción y de laboratorio, según la norma NBR 9779 – Mortero y hormigón endurecidos – Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Promedio extraído de 50 muestras. Se observa un margen de error estimado de ± 2 puntos porcentuales.

fck (MPa)	Tasa de absorción promedio cada 24 horas		
	Laboratorio (g/cm ²)	Obra (g/cm ²)	Diferencia (%)
25	0,39	0,46	18%
30	0,33	0,42	28%
35	0,32	0,38	20%
40	0,30	0,34	15%

Fuente: Autores.

Figura 10 – Evolución de la absorción de agua por capilaridad a lo largo del tiempo para hormigón fck = 25 MPa, en diferentes regímenes de curado. Se observa un margen de error estimado de $\pm 0,05$ puntos.

