

EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DEL SISTEMA DUAL DE CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN: COMPARACIÓN ENTRE CONTROL DE PRODUCCIÓN Y CONTROL DE RECEPCIÓN

Jorge del Pozo Martín¹, Antonio Aguado de Cea²,
Sergio Henrique Pialarissi Cavalaro³

¹ Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, jorgedelpozo@gmail.com

² Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, antonio.aguado@upc.edu

³ Loughborough University, Loughborough, United Kingdom, s.cavalaro@lboro.ac.uk

Resumen

El control de calidad del hormigón estructural en España se basa actualmente en un sistema dual que combina el control de producción realizado por el fabricante con el control de recepción efectuado en obra. Aunque este modelo ha constituido durante décadas la base del aseguramiento de la calidad del hormigón, la evolución tecnológica de los procesos de fabricación, trazabilidad y control plantea la necesidad de revisar su eficiencia desde una perspectiva de innovación en los procedimientos y modelos de gestión de la calidad.

El presente trabajo analiza la relación entre los resultados obtenidos en ambos controles mediante un estudio estadístico comparativo de los ensayos de resistencia a compresión a 28 días realizados sobre un mismo hormigón estructural durante un periodo de nueve meses. El conjunto de datos analizado comprende un total de 1.160 resultados experimentales, de los cuales 353 corresponden al control de producción y 807 al control de recepción.

Para evaluar la equivalencia estadística entre ambos controles se aplicaron contrastes de comparación de medias mediante las pruebas t de Student y t de Welch, una comparación de varianzas mediante la prueba F de Fisher y un contraste no paramétrico de Mann-Whitney para la comparación de medianas. Asimismo, se analizaron los estadísticos descriptivos y las distribuciones de frecuencia de ambas muestras.

Los resultados obtenidos indican que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las resistencias medidas en los controles de producción y de recepción, tanto en términos de medias como de medianas y dispersión. Los valores observados muestran un comportamiento estadístico equivalente, lo que sugiere que ambos conjuntos de datos pueden considerarse procedentes de una misma población.

Los resultados aportan evidencia empírica para replantear los modelos tradicionales de control de calidad del hormigón y constituyen una contribución al debate sobre la innovación en los procesos de aseguramiento de la calidad en construcción, orientada a mejorar la eficiencia del sistema sin comprometer la seguridad estructural.

Palabras Clave: Hormigón, Control de Calidad, Control de recepción, Control de producción.

1 Introducción

El control de calidad constituye un elemento fundamental en el proceso de ejecución de estructuras de hormigón, ya que permite verificar que el material suministrado cumple con las prestaciones especificadas en proyecto. Entre las propiedades del hormigón, la resistencia a compresión es el parámetro más utilizado para comprobar el cumplimiento de las especificaciones estructurales, siendo su determinación mediante ensayos normalizados una práctica ampliamente extendida en la normativa técnica internacional.

En la normativa española, el control de calidad del hormigón estructural se ha basado tradicionalmente en un sistema dual que combina dos tipos de control: el control de producción, realizado por el fabricante en la planta de hormigonado, y el control de recepción, efectuado en obra mediante la toma de muestras del hormigón fresco antes de su puesta en obra. Este modelo tiene su origen en la evolución histórica de la normativa española, donde inicialmente se estableció el control de recepción como principal mecanismo de verificación de la calidad del hormigón, incorporándose posteriormente el control de producción asociado al desarrollo del sector del hormigón preparado y a la implantación de sistemas de aseguramiento de la calidad en las centrales de fabricación.

La coexistencia de ambos sistemas de control ha sido objeto de debate en los últimos años. Por un lado, el control de producción tiene como objetivo garantizar la uniformidad del proceso de fabricación mediante procedimientos sistemáticos de verificación realizados por el propio fabricante. Por otro lado, el control de recepción pretende verificar en obra que el hormigón suministrado cumple las especificaciones del proyecto. Sin embargo, la realización de ambos controles sobre un mismo material puede generar duplicidades en los ensayos realizados, así como posibles discrepancias entre los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

En contraste con este enfoque, diversas normativas internacionales, como la norma europea EN 206, se basan principalmente en sistemas de control asociados al proceso de producción, especialmente cuando el fabricante dispone de sistemas certificados de control de calidad. En este contexto, surge la cuestión de si el sistema dual actualmente vigente en España aporta información adicional relevante para garantizar la calidad del hormigón o si, por el contrario, podría existir una cierta redundancia entre ambos controles.

El objetivo del presente trabajo es analizar empíricamente la relación entre los resultados obtenidos en el control de producción y en el control de recepción del hormigón mediante un estudio estadístico comparativo de los ensayos de resistencia a compresión a 28 días realizados sobre un mismo hormigón estructural. Para ello se analiza un conjunto de datos procedente de una obra con un elevado volumen de hormigón, aplicando diferentes técnicas estadísticas con el fin de evaluar si ambos conjuntos de resultados pueden considerarse estadísticamente equivalentes y, por tanto, si podrían proceder de una misma población estadística.

2 Marco normativo y estado del conocimiento

El control de calidad del hormigón estructural constituye un elemento esencial para garantizar la seguridad, durabilidad y fiabilidad de las estructuras. La verificación de las propiedades mecánicas del hormigón, y en particular de la resistencia a compresión, ha sido tradicionalmente el principal mecanismo utilizado para comprobar el cumplimiento de las especificaciones establecidas en los proyectos estructurales.

En España, el modelo de control del hormigón ha evolucionado a lo largo de las últimas décadas como consecuencia del desarrollo de la normativa técnica y de la progresiva industrialización del sector del hormigón preparado. Las primeras bases del control de calidad del hormigón se establecieron a comienzos de la década de 1970 mediante las recomendaciones publicadas por la Comisión Permanente del Hormigón, en las que se introdujo el concepto de resistencia característica y se definieron los principios para la aceptación o rechazo del material en función de los resultados de los ensayos realizados sobre probetas de hormigón endurecido.

A partir de estas recomendaciones iniciales, las sucesivas instrucciones de hormigón estructural incorporaron el denominado control de recepción, basado en la toma de muestras del hormigón suministrado a obra y en la realización de ensayos de resistencia a compresión a edades normalizadas. Este enfoque responde a un modelo de verificación directa del material que se coloca en la estructura y ha constituido durante décadas el principal mecanismo para comprobar el cumplimiento de las especificaciones del proyecto. [1]

Paralelamente, el crecimiento del sector del hormigón preparado y la aparición de centrales de fabricación especializadas condujeron a la implantación de sistemas de control de producción en las plantas de hormigonado. Este control tiene como objetivo garantizar la uniformidad del proceso de fabricación mediante la supervisión de los materiales constituyentes, la dosificación, los procesos de amasado y la realización sistemática de ensayos sobre muestras representativas de la producción. Con la implantación de estos sistemas, el control de calidad del hormigón pasó a abordarse no solo desde la verificación del producto final, sino también desde el control del propio proceso de fabricación.

Como consecuencia de esta evolución, el marco normativo español ha configurado un modelo en el que coexisten ambos tipos de control, tal y como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Normativa reguladora del control de calidad del hormigón

Año	Control de producción	Control de recepción
1972		EHPRE-72
1973		EH73
1976	Real decreto 1280/76	
1977	Circular 1/77	
1980		EH80
1982		EH82
1988		EH88
1995	Orden del 21.11.2001	
1998		EHE
2001	Orden del 21.12.1995	
2008		EHE-08
2019	Real decreto 163/2019	
2021		CodE21

Como se observa en la tabla 1, el doble sistema de control de calidad convive desde el año 1976, y se mantiene en la actualidad a pesar de la mejora en las condiciones de fabricación en las plantas, así como del transporte. Este doble control buscaba, por un lado, el control de producción es realizado por el fabricante en la planta de hormigonado con el objetivo de asegurar la uniformidad de la fabricación. Por otro lado, el control de recepción es efectuado en obra mediante la toma de muestras del hormigón fresco antes de su puesta en obra, siendo responsabilidad de la

dirección facultativa verificar que el hormigón suministrado cumple las especificaciones establecidas en el proyecto.

La coexistencia de estos dos sistemas de control ha dado lugar a un modelo dual de verificación de la calidad del hormigón, en el que se realizan ensayos similares sobre un mismo material en diferentes etapas del proceso constructivo. Aunque ambos controles persiguen objetivos complementarios, la realización de ensayos equivalentes puede generar duplicidades en los procedimientos de control, así como discrepancias ocasionales entre los resultados obtenidos en planta y en obra.

En contraste con este enfoque, diversas normativas internacionales han evolucionado hacia modelos basados principalmente en el control del proceso de producción y en la evaluación de la conformidad del producto suministrado. En particular, la norma europea EN 206 establece un sistema de control centrado en la responsabilidad del fabricante y en la implantación de sistemas de control de producción certificados, reduciendo la necesidad de controles adicionales cuando se dispone de mecanismos adecuados de aseguramiento de la calidad.

En este contexto, surge la cuestión de si el sistema dual de control actualmente vigente en España aporta información adicional relevante para garantizar la calidad del hormigón o si, por el contrario, podría existir una cierta redundancia entre los controles realizados en planta y los efectuados en obra. La evaluación empírica de esta cuestión requiere analizar comparativamente los resultados obtenidos en ambos sistemas de control mediante herramientas estadísticas adecuadas.

A pesar de la importancia práctica de este problema para el sector de la construcción, los estudios basados en datos reales de obra que analicen la relación entre los resultados del control de producción y del control de recepción son relativamente escasos. Por ello, el presente trabajo aborda esta cuestión mediante un estudio estadístico comparativo de los resultados de ambos sistemas de control obtenidos en una obra con un elevado volumen de hormigón estructural.

3 Materiales y métodos

3.1 Conjunto de datos analizado

El estudio se basa en el análisis de los resultados de los ensayos de resistencia a compresión a 28 días correspondientes a un hormigón estructural fabricado y suministrado durante la ejecución de una obra con un elevado volumen de hormigonado. El hormigón analizado corresponde a un HM-30, producido en central de hormigón preparado y suministrado a obra durante un periodo aproximado de nueve meses.

Se analizaron los resultados procedentes de los dos sistemas de control establecidos en la normativa española de hormigón: el control de producción, realizado por el fabricante en la planta de hormigonado, y el control de recepción, efectuado en obra mediante la toma de muestras del hormigón fresco antes de su puesta en obra. El conjunto de datos está formado por un total de 1160 resultados de resistencia a compresión a 28 días, distribuidos del siguiente modo:

- 353 resultados correspondientes al control de producción, cada uno de ellos obtenido como valor medio de tres probetas ensayadas.
- 807 resultados correspondientes al control de recepción, igualmente obtenidos como media de tres probetas ensayadas.

Los ensayos de resistencia se realizaron conforme a los procedimientos establecidos en la normativa técnica aplicable, utilizando probetas cilíndricas normalizadas y aplicando los métodos de fabricación, curado y ensayo definidos en las normas UNE correspondientes. Todos los resultados disponibles fueron incluidos en el análisis sin eliminar valores atípicos, con el fin de preservar la representatividad del comportamiento real de los datos obtenidos durante el proceso constructivo.

3.2 Metodología de análisis estadístico

El objetivo del análisis estadístico realizado es evaluar si los resultados obtenidos en el control de producción y en el control de recepción pueden considerarse procedentes de una misma población estadística. Para ello se aplicaron diferentes contrastes de hipótesis orientados a comparar las características estadísticas de ambas muestras.

En primer lugar, se realizó un contraste de igualdad de medias mediante la prueba t de Student para muestras independientes, considerando como hipótesis nula que las medias poblacionales de ambas muestras son iguales. Este contraste permite evaluar si existen diferencias significativas entre los valores medios de resistencia obtenidos en ambos sistemas de control.

Dado que la prueba t de Student asume igualdad de varianzas entre las poblaciones comparadas, se realizó previamente una prueba F de comparación de varianzas, con el fin de verificar si esta hipótesis se cumple. En caso de detectarse diferencias significativas entre las varianzas, se aplicó la prueba t de Welch, que permite comparar medias en muestras independientes sin asumir homogeneidad de varianzas.

Adicionalmente, se evaluó la hipótesis de normalidad de las muestras mediante pruebas de bondad de ajuste, con el objetivo de determinar la validez de los contrastes paramétricos aplicados. Para ello se emplearon las pruebas de Shapiro–Wilk y Kolmogorov–Smirnov, así como el análisis de los coeficientes de asimetría y curtosis de las muestras.

En el caso de no cumplirse la hipótesis de normalidad, se aplicó un contraste no paramétrico de Mann–Whitney (Wilcoxon) para comparar las medianas de ambas muestras. Este contraste permite evaluar si existen diferencias en la tendencia central de las poblaciones sin asumir una distribución estadística específica.

4 Resultados

4.1 Estadísticos descriptivos

En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo de los resultados de resistencia a compresión a 28 días correspondientes a los dos sistemas de control analizados. Los resultados del control de producción presentan una media de 36,22 MPa y una desviación estándar de 6,62 MPa, con valores comprendidos entre 14,15 MPa y 54,33 MPa. Por su parte, los resultados del control de recepción presentan una media de 36,49 MPa y una desviación estándar de 5,13 MPa, con un intervalo de valores entre 23,80 MPa y 54,27 MPa.

A partir de estos resultados se observa que los valores medios obtenidos en ambos controles son muy próximos entre sí, mientras que la dispersión de los resultados es ligeramente mayor en el control de producción. Estos valores iniciales sugieren una posible similitud entre ambos conjuntos de datos, que se analiza con mayor detalle mediante los contrastes estadísticos descritos a continuación.

4.2 Comparación de medias análisis estadístico

Para evaluar la posible existencia de diferencias significativas entre las medias de ambas muestras se aplicó un contraste de hipótesis mediante la prueba t de Student para muestras independientes. El resultado obtenido se muestra en la tabla 2. En la misma, como puede verse, el estadístico obtenido en la prueba fue $t = -0,756$ con un valor $p = 0,45$, lo que implica que no se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias para un nivel de significación del 5 %. Por tanto, no se detectan diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de resistencia obtenidos en el control de producción y en el control de recepción.

Tabla 2. Prueba t-Student para el contraste de igualdad de medias entre las muestras de control de producción y recepción

t-student	t	p
Varianzas iguales	-0,76	0,45

El intervalo de confianza del 95 % para la media de la resistencia a compresión del control de producción se sitúa entre 35,53 MPa y 36,92 MPa, mientras que para el control de recepción el intervalo se sitúa entre 36,14 MPa y 36,85 MPa. El intervalo de confianza para la diferencia de medias incluye el valor cero, lo que confirma la ausencia de diferencias significativas entre ambas muestras.

4.3 Comparación de varianzas

Con el fin de comprobar la hipótesis de igualdad de varianzas entre ambas muestras se aplicó una prueba F de comparación de varianzas [3,4]. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3. El resultado, un estadístico $F = 1,6647$ con un valor p inferior a 0,05, indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas de ambas muestras. El intervalo de confianza del 95 % para la razón de varianzas se sitúa entre 1,40 y 1,99, lo que confirma la existencia de una mayor dispersión en los resultados del control de producción.

Tabla 3. Prueba F de Fisher, para el contraste de igualdad de varianzas entre las muestras de control de producción y recepción

F-Fisher	F	p
Varianzas iguales	1,66	6,05E-9

Dado que la hipótesis de igualdad de varianzas no se cumple, se realizó un contraste adicional de medias mediante la prueba t de Welch, que no requiere asumir homogeneidad de varianzas.

4.4 Contraste de medias sin igualdad de varianzas

La aplicación de la prueba t de Welch permitió evaluar nuevamente la posible diferencia entre las medias de ambas muestras considerando varianzas diferentes [5,6]. El resultado obtenido se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Prueba t-Welch. Comparación de medias

t-Welch	t	p
Varianzas desiguales	-0,69	0,49

El valor del estadístico $t = -0,69$ con un valor $p = 0,49$, confirma que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de ambas muestras para un nivel de significación del 5 %. El intervalo de confianza del 95 % para la diferencia de medias incluye nuevamente el valor cero, reforzando la conclusión obtenida mediante la prueba t de Student.

4.5 Evaluación de la normalidad de las muestras

Para verificar la validez de los contrastes paramétricos aplicados se analizó la hipótesis de normalidad de ambas muestras mediante pruebas de bondad de ajuste y mediante el análisis de los coeficientes de asimetría y curtosis. En el caso del control de producción, las pruebas de Shapiro–Wilk [7] y Kolmogorov–Smirnov [8,9,10,11,12] no permiten rechazar la hipótesis de normalidad de la muestra.

Por el contrario, en el caso del control de recepción, el análisis de la asimetría muestra una desviación más significativa respecto a la normalidad. Los resultados de las pruebas de bondad de ajuste indican que la hipótesis de normalidad no puede asumirse con el mismo grado de confianza que en el caso anterior.

En la figura 1, para potenciar la formalización visual, se muestra el ajuste de las resistencias del control de recepción según una distribución normal que aparece en la curva de la figura, y su forma ratifica los resultados de las pruebas de bondad por la diferencia frente a la forma del histograma, motivando que en esta última muestra no se pueda asumir la hipótesis de normalidad y planteando por tanto la posibilidad de que los contrastes de medias no sean totalmente concluyentes.

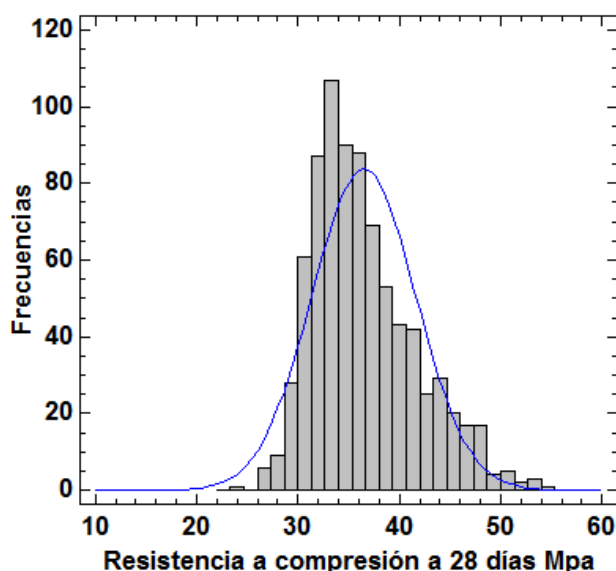


Figura 1. Histograma de los valores de resistencia a compresión a 28 días (MPa) en los ensayos de control de recepción y ajuste a una distribución normal

Como consecuencia de esta situación, se realizó adicionalmente un contraste no paramétrico para comparar la tendencia central de ambas muestras.

4.6 Comparación de medianas

Para comparar las medianas de ambas muestras sin asumir ninguna distribución estadística específica se aplicó la prueba no paramétrica de Mann–Whitney (Wilcoxon) [13]. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 5.

Tabla 4. Prueba t-Welch. Comparación de medias

Muestra	t	Rango promedio
Control de recepción	35,5	566,96
Control de producción	35,5	586,42

Como puede observarse en la tabla 5, la mediana de ambas muestras resultó ser la misma, 35,5 MPa. El estadístico de la prueba fue $W = 147215$, con un valor $p = 0,363$, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de ambas muestras con un nivel de confianza del 95 %. Este resultado confirma la conclusión obtenida mediante los contrastes paramétricos, indicando que la tendencia central de ambas muestras es estadísticamente equivalente. específica.

5 Discusión

Los resultados obtenidos muestran una elevada concordancia entre los valores de resistencia a compresión obtenidos en el control de producción y en el control de recepción. La ausencia de diferencias estadísticamente significativas en las medias y medianas de ambas muestras indica que ambos sistemas reflejan de forma consistente el comportamiento resistente del hormigón analizado.

Desde el punto de vista práctico, esta coincidencia resulta especialmente relevante porque ambos controles evalúan la misma propiedad mecánica del material mediante procedimientos de ensayo equivalentes. Los resultados sugieren que, al menos para el caso estudiado, ambos sistemas proporcionan información muy similar acerca de la calidad del hormigón suministrado.

La relevancia de esta cuestión trasciende el ámbito estrictamente estadístico. En un contexto en el que la innovación se orienta cada vez más hacia la optimización de procesos y la mejora de la productividad, la evaluación objetiva de procedimientos normativos consolidados constituye una herramienta útil para identificar oportunidades de mejora en los sistemas de aseguramiento de la calidad.

Aunque los resultados corresponden a una única obra y a un hormigón específico, el elevado volumen de datos analizado aporta una base empírica sólida para continuar investigando la relación entre ambos sistemas de control y valorar posibles mejoras en términos de eficiencia y racionalización de recursos.

Dado que ambos controles de calidad conducen a los mismos resultados, se propone mantener un control de producción en el que se realice un control similar al actual, es decir, la resistencia a compresión (o el que se especifique de forma contractual) más un control de recepción en obra, pero que aporte una información adicional a la que aporta el actual control de recepción, es decir, la resistencia de este hormigón una vez puesto en obra y fraguado. Se propone estudiar en el futuro los siguientes ensayos no destructivos reflejados en la tabla 5. Esta lista de ensayos propuestos son una vía de innovación sobre el control de calidad del hormigón.

Tabla 5. Ensayos no destructivos de caracterización del hormigón

Ensayo
Esclerometría (Ensayo de Rebote) [14,15,16,17]
Ultrasonidos [18,19]
Resistividad eléctrica [20]
Método de corrientes inducidas [21]
Sensores de control de temperatura y humedad durante el proceso de fraguado y endurecimiento [22,23]

6 Conclusiones

A partir del análisis realizado pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Los valores medios de resistencia obtenidos en el control de producción y en el control de recepción son estadísticamente equivalentes según los resultados de las pruebas t de Student y t de Welch.
- La comparación de medianas mediante la prueba de Mann-Whitney confirma la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre ambos conjuntos de datos.
- Los resultados obtenidos sugieren que ambos sistemas de control proporcionan información equivalente sobre el comportamiento resistente del hormigón analizado.
- La aplicación de herramientas estadísticas al análisis de procedimientos normativos consolidados permite identificar oportunidades de innovación orientadas a mejorar la eficiencia de los sistemas de aseguramiento de la calidad sin comprometer la seguridad estructural.
- Los resultados obtenidos constituyen una base objetiva para futuras investigaciones destinadas a profundizar en la optimización de los modelos de control de calidad del hormigón, así como en ensayos no destructivos sobre el hormigón puesto en obra y fraguado.

7 Referencias

- [1] Calavera, J. (1995). La inspección y ensayo. Organizaciones de control de calidad y laboratorios. Revista de Obras Públicas, 142(3348), 73–77.
- [2] Student. (1908). The probable error of a mean. Biometrika, 6(1), 1–25.
- [3] Snedecor, G. W. (1934). Calculation and interpretation of analysis of variance and covariance (Iowa State College Division of Industrial Science Monographs, Vol. 1). Iowa State College Press.
- [4] Fisher, R. A. (1923). «Statistical Tests of Agreement Between Observation and Hypothesis». Economica 3 (8): 139-147.
- [5] Welch, B. L. (1947). Generalization of "Student's" problem when several different population variances are involved. Biometrika, 34(1–2), 28–35.

- [6] Welch, B. L. (1938). The significance of the difference between two means when the population variances are unequal. *Biometrika*, 29(3–4), 350–362.
- [7] Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4), 591–611.
- [8] Kolmogorov, A. N. (1933). Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione. *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari, 4, 83–91.
- [9] Kolmogorov, A. N. (1941). Confidence limits for an unknown distribution function. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(4), 461–463.
- [10] Smirnov, N. V. (1939a). Sur les écarts de la courbe de distribution empirique. *Recueil Mathématique (Matematičeskii Sbornik)*, 6, 3–26.
- [11] Smirnov, N. V. (1939b). On the estimation of the discrepancy between empirical curves of distribution for two independent samples. *Bulletin Mathématique de l'Université de Moscou*, 2, 3–14.
- [12] Smirnov, N. V. (1948). Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. *The Annals of Mathematical Statistics*, 19(2), 279–281.
- [13] Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80–83.
- [14] Schmidt, E. (1950). The concrete test hammer (Der Beton-Prüfhammer). *Schweizerische Bauzeitung*, 68(28), 378.
- [15] Schmidt, E. (1951). Investigations with the new concrete test hammer for estimating the quality of concrete (Versuche mit dem neuen Beton-Prüfhammer zur Qualitätsbestimmung des Betons). *Schweizer Archiv für Angewandte Wissenschaft und Technik*, 17(5), 139.
- [16] Schmidt, E. (1954). The concrete sclerometer. In *Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing of Materials and Structures (Vol. 2, p. 310)*. RILEM.
- [17] Hannachi, S., & Guetteche, M. N. (2014). Review of the rebound hammer method estimating concrete compressive strength on site. In *Proceedings of the International Conference on Architecture and Civil Engineering (pp. 118–127)*. Dubai, United Arab Emirates.
- [18] Domingo, R., & Hirose, S. (2009, March). Correlation between concrete strength and combined nondestructive tests for concrete using high-early strength cement. In *Proceedings of the Sixth Regional Symposium on Infrastructure Development (pp. 12–13)*. Bangkok, Thailand.
- [19] Nobile, L. (2015). Prediction of concrete compressive strength by combined nondestructive methods. *Meccanica*, 50(2), 411–417.
- [20] Andrade, C., & D'Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, 1(2), 90–98.
- [21] He, D. (2024). Detecting the corrosion of a steel rebar using the eddy current testing method. *Standards*, 4(4), 286–299.
- [22] Ikumi, T., Cairó, I., Groeneveld, J., Aguado, A., & de la Fuente, A. (2024). Embedded wireless sensor for in situ concrete internal relative humidity monitoring. *Sensors*, 24(6), 1756.
- [23] González-López, G., Romeu, J., & Capdevila, S. (2020). Wireless sensing of concrete setting process. *Sensors*, 20(20), 5965.