

Relación entre resistencia a compresión en cilindros de concreto y los rebotes con esclerómetro digital

Correlation between compressive strength" of concrete cylinders and rebounding with digital sclerometer

<https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.22.1342>

*José Rodrigo Hernández Ávila*¹
*Álvaro Rafael Orozco Herazo*²
*Daniel José Almanza Mercado*³
*Javier Ramírez Montoya*⁴
Universidad de Sucre, Colombia

RESUMEN

El presente artículo describe la relación entre la resistencia a la compresión y las lecturas de rebotes de un esclerómetro digital silver Schmidt PC tipo N marca Proceq, sobre cilindros de concreto con una edad de 28 días y resistencias de diseño de 21 MPa utilizando como agregado fino el proveniente del río Sinú (Lorica, Córdoba) y agregado grueso de cantera (Tolúviejo, Sucre) con el fin de utilizar el instrumento esclerométrico para estimar las resistencias de estructuras de concreto que tengan los materiales anteriormente mencionados.

Palabras clave: Esclerómetro, Resistencia a compresión, Cilindros, Lorica, Tolúviejo.

ABSTRACT

This paper describes the relationship between compressive strength and rebound readings of a Proceq digital silver Schmidt PC type N brand sclerometer on concrete cylinders with an age of 28 days and 21 MPa design strengths using as fine aggregate the one coming from the Sinú River (Lorica, Córdoba) and as thick aggregate the one from the quarry (Tolúviejo, Sucre) in order to use the sclerometric instrument to estimate the resistances of concrete structures that have the aforementioned materials.

Keywords: Sclerometer, Compressive Strength, Cylinders, Lorica, Tolúviejo.

1. *Magíster en Estructuras. Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil. jose.hernandez@unisucra.edu.co*

2. *Ingeniero Agrícola. Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.*

3. *Ingeniero Civil. Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.*

4. *Magíster en Ciencias Estadísticas. Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.*

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de los ensayos no destructivos tiene aplicaciones a la construcción, su uso está cada vez más en el estudio de estructuras de hormigón, por ser mínima la afectación a su funcionamiento, por ejemplo para el caso de los puentes, los cuales fuera de servicio pueden ocasionar importantes repercusiones económicas y/o sociales [1].

Teniendo en cuenta la necesidad de emplear medidas en campo y laboratorio de manera no destructiva. Los ensayos de resistencia de especímenes de concreto por el método del esclerómetro se han constituido en un método no destructivo rápido para estimar las resistencias de estructuras de concreto. Siendo un aparato sólido, de funcionamiento seguro, manejo muy sencillo que permite realizar ensayos no destructivos tanto en laboratorio como en obras [2].

En esta investigación se tuvieron en cuenta las lecturas obtenidas en el esclerómetro y la resistencia a la compresión, dando como resultado una relación entre sí, lo cual es muy importante para control de calidad del concreto.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los ensayos para obtener la resistencia a la compresión del concreto son realizados para evaluar la calidad del concreto a edades tempranas para así proyectar la resistencia a edades más avanzadas. El esclerómetro o martillo de rebote Schmidt es un ensayo no destructivo que mide la dureza de una superficie que proporciona un rápido y sencillo medio para verificar la uniformidad del concreto a través de la lectura del número del rebote, como también estima la resistencia del concreto.

Actualmente, se cuenta con métodos de prueba que son limitados para medir la resistencia del concreto a edades tempranas, además de una herramienta esclerométrica, la cual es práctica, no destructiva, rápida y confiable en la que el constructor o supervisor pueda apoyarse para conocer en campo y de manera aproximada, la resistencia y evolución del concreto.

Los medios de medición, estimación o comparación de la resistencia del concreto en la estructura incluyen: el martillo de rebote (esclerómetro), la prueba de penetración, la prueba de arrancamiento (*pullout*), los cilindros de ensayo elaborados en el lugar, el ensayo de testigos (núcleos extraídos, coraciones) y las pruebas de carga del elemento estructural.

Los ensayos esclerométricos son utilizados para el control de calidad de los materiales, como una alternativa para la estimación de la resistencia a la compresión sin tener que destruir el elemento estructural de concreto.

Los materiales deben ser caracterizados para constituir una mezcla que cumpla con las recomendaciones de las Normas Técnicas Colombianas. Para los agregados se tiene que determinar por medio de ensayos el módulo de Finura NTC 77, Masa unitaria suelta y compacta NTC 92, Densidad aparente y Absorción NTC 237, Densidad aparente, Densidad saturada superficialmente suelta y absorción NTC 176, Tamaño máximo y Tamaño máximo Nominal NTC 77.

Respecto a las mezclas [3], menciona que “el diseño de mezclas es un aspecto muy importante para determinar la cantidad de cemento, agregados y agua, tal como lo expresa el método ACI 211”.

Para medir la resistencia a la compresión al concreto se deben realizar los procedimientos de las Normas NTC 550 y NTC 673, las cuales describen los métodos de elaboración y ensayo de los especímenes. Para la utilización de la Máquina de compresión de cilindros Figura 1, esta debe cumplir los requisitos de la Norma ASTM E 74.



Figura 1. Máquina a compresión

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos que se realizan al concreto deben seguir las normas técnicas colombianas establecidas así: NTC 454: Concreto Fresco, Toma de Muestras, NTC 673: Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros Normales de Concreto, NTC 550: Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Obra, NTC 1377: Toma de cilindros en el laboratorio, para evaluar la resistencia del concreto se evalúan los resultados mediante la Norma Técnica Colombiana NTC 2275.

En 1950 se diseñó el primer esclerómetro para la medición no destructiva del hormigón. Patentado con el nombre Schmidt, su valor de rebote “R” permite medir la dureza de este material. Se ha convertido en el procedimiento más utilizado, a nivel mundial, para el control no destructivo en hormigón. Además se emplean para evaluar la uniformidad del hormigón *in situ*, delinear zonas de hormigón deteriorado o de baja calidad o estimar el desarrollo de resistencias *in situ*.

El esclerómetro digital es un sistema avanzado y completamente automático para la estimación de la resistencia a compresión del concreto, que calcula automáticamente la media, mediana, el valor del rebote (R), y la resistencia a la compresión del concreto, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Esclerómetro digital

Fuente: Proceq Silver Schmidt, 2016

Respecto a la dureza superficial de distintos materiales [4], menciona que “los resultados del esclerómetro a diferentes escalas, indican la misma tendencia para estructuras de concreto, pero en superficies de yeso la tendencia de la resistencia es menor”.

La textura puede influir no solo en la fase de concreto fresco, si no que puede tener significativos efectos en la fase temprana de endurecimiento del concreto y especialmente en concretos sometidos a la flexión, ya que los agregados con superficies rugosas, pueden formar enlaces más resistentes con la pasta de cemento en comparación con las de superficie suave, “una textura más rugosa parece ayudar a la formación de un enlace físico más fuerte entre la pasta de cemento y agregados. En una edad más avanzada, con un enlace químico más fuerte entre la pasta y el agregado, este efecto puede no ser tan importante” [5].

Además, el peso unitario también es un indicador del tipo de granulometría que posea el agregado como tal, ya que entre mejor sea la granulometría, menor serán los espacios vacíos que quedarán entre cada partícula, lo cual aumentara el valor de peso unitario del material y será un buen indicador de la calidad de este material [6].

Los procedimientos estadísticos nos proporcionan medios valiosos para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia y la información derivada de estos procedimientos también sirve para reafirmar criterios y especificaciones de diseño. “Para que estos procedimientos sean válidos, los datos deben derivarse de muestras obtenidas en el curso del desarrollo de un plan de muestreo al azar, diseñado para reducir la escogencia de las muestras por parte de quien las toma [3].

Los experimentos con mezclas son diseños en que los factores son los componentes o ingredientes de la mezcla. “Las variables de respuesta dependen de las proporciones con que participan los ingredientes en la mezcla y no de la cantidad de mezcla” [7].

“El diagnóstico de estructuras de hormigón en los trabajos de auscultación, no generan afectaciones importantes al funcionamiento de la estructura afectada, ni a su integridad estructural, permitiendo realizar estimaciones de su vida residual” [8].

“Un ensayo de evaluación por el BAM (*Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung*, Instituto Federal Alemán para la Investigación y el Ensayo de Materiales) en Berlín ha mostrado que el Silver Schmidt presenta menos dispersión en el alcance completo que el martillo clásico” [9].

“El ensayo esclerométrico no altera la resistencia, estética, la funcionalidad de la estructura y se puede operar tanto en horizontal como en vertical sin problemas sobre una superficie completamente lisa” [10].

Según estudios realizados [10], se permite analizar la posibilidad de aplicación de un sencillo método de calibración de los ensayos, para determinar la resistencia del hormigón en estudios de patología o en el caso de que no se posean datos fiables sobre la dosificación y características del material.

La utilización extensiva del hormigón como material principal en la construcción, hace necesario el monitoreo del estado en que se encuentran las estructuras y poder proyectar un plan de mantenencias y reparaciones coordinadas con usos futuros y posibilidades de rehabilitación o transformaciones [11].

3. METODOLOGÍA

Con el propósito de comparar las resistencias de concreto de los métodos del estudio se tomaron 30 muestras, teniendo en cuenta la potencia de la prueba fijada a priori de 0,8, para la hipótesis de comparación de medias. Además, se plantea la relación de las resistencias mediante un modelo estadístico de regresión, validando los supuestos de dicho modelo apoyándose en las estrategias de transformaciones. El análisis se aplica a las pruebas efectuadas a un mismo tipo de mezcla, que se ha producido de manera consecutiva y en condiciones similares durante los 28 días.

Sobre cada uno de estos cilindros se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y lectura del esclerómetro digital. El contenido de humedad de la muestra afecta los resultados de los ensayos propuestos, por lo que se establece un tratamiento similar para todas las probetas que consiste en un curado sumergido de la muestra, la cual se sacó un día antes de la falla, es decir para los 28 días, los cilindros estuvieron 27 días sumergidos y se secaron al aire libre durante 1 día, de esta manera, obediendo a cada una de las normas de ensayos establecidas en el manual de INVÍAS y así con todos los especímenes.

Las pruebas esclerométricas se realizaron con un esclerómetro digital cuyo rebote y resistencia se

registra automáticamente. “En los cilindros se marcaron los puntos de impacto tratando de elegir la superficie de prueba de acuerdo a la representatividad del área por evaluar, en función de su alta porosidad o textura rugosa” [9].

“Para determinar la resistencia a compresión se deben realizar 20 golpes por cilindro” [12]. Los cuales se le aplicarán a cada 90° de forma vertical dejando una separación de 2,5 cm; las lecturas que se registrarán automáticamente en el aparato mostraron la media, mediana, y máxima de los rebotes en cada uno de los cilindros.

El esclerómetro digital se calibró en un yunque de calibración para controlar el buen funcionamiento del esclerómetro, La calibración del equipo se realizó antes de proceder al ensayo sobre el concreto. El yunque se colocó sobre el suelo, en un lugar preparado para recibir la barra de percusión. El émbolo del esclerómetro debe dar sobre el yunque, y las medidas de número de rebote deben ser comprendidas entre 88 ± 5 , con lo que se verifica que la calibración sea correcta. Si, a pesar de un ajuste exacto, el número de rebotes indica un valor fuera del rango de verificación, es probable que el equipo esté sucio y debe ser limpiado. Cada equipo debe someterse a un control periódico de calibración después de cada 2000 impactos sobre el concreto. Se recomienda que los impactos sean siempre horizontales para no afectar la velocidad de salida del émbolo y así no obtener resultados erróneos, en el caso del esclerómetro digital la corrección por posición ya viene integrada como una herramienta en la calibración del equipo.

Se realiza el análisis de varianza (ANOVA) de la regresión para construir un modelo estadístico que describa el comportamiento de la resistencia de la compresión y, frente a una variable independiente X. Además, se hacen pruebas para determinar la significancia entre las medias de los rebotes del esclerómetro y la máquina, ilustrando los resultados mediante gráficas de dispersión y de distribución de probabilidad, en conjunto de pruebas no paramétricas de Kruskal Wallis para confirmar los resultados. Teniendo en cuenta que los P-valores asociados (menores que 0.05 si se opera a un nivel de significancia del 5 %) corresponden a efectos significativos. Se evalúa el modelo de regresión final mediante el análisis de los residuales, con base en la independencia, normalidad y homogeneidad.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente se ilustran los resultados mediante gráficos de dispersión y de tendencia, luego se presentan las pruebas de bondad de ajuste para establecer la distribución que se ajusta a los datos y luego se utilizan para estudiar el comportamiento de la correlación de las variables en el estudio. Finalmente se presenta un modelo tentativo que describa el comportamiento de la resistencia a compresión frente a los rebotes del esclerómetro de manera significativa.

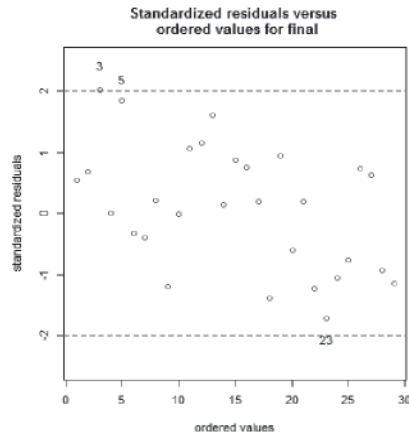
La Tabla 1 muestra los 30 valores que se utilizaron para dicho estudio en donde se aprecia la comparación entre la resistencia a compresión y los números de rebotes obtenidos.

Tabla 1. Datos ensayos

Ítem	Resistencia a Compresión (MPa)	Rebotes
1	16.68	28.23
2	15.90	27.88
3	16.56	26.45
4	16.27	28.73
5	15.90	26.48
6	15.31	28.83
7	14.43	28.68
8	14.89	28.03
9	16.24	29.98
10	15.46	28.53
11	15.55	27.33
12	15.39	27.18
13	15.29	26.60
14	16.07	28.53
15	15.85	27.63
16	15.48	27.68
17	15.34	28.28
18	15.29	29.95
19	15.06	27.33
20	16.07	29.33
21	15.01	28.18
22	16.25	30.03
23	16.13	30.48
24	15.55	29.68
25	16.64	29.63
26	15.97	27.83
27	16.00	27.95
28	16.69	29.83
29	16.73	30.05
30	19.51	30.30

Fuente: Elaboración propia

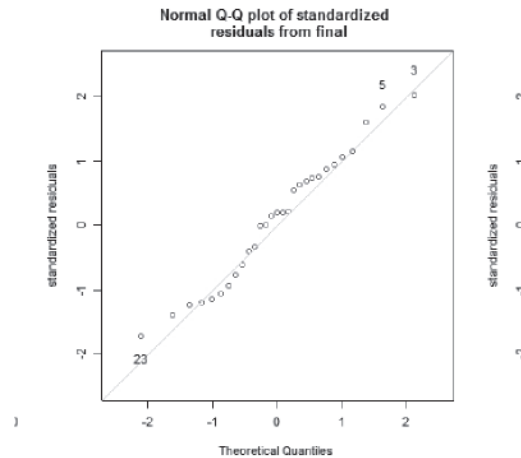
Para todos los resultados se trabajó con el software estadístico R. Rproyect [13], en este estudio se realizaron varias pruebas, inicialmente se hace la comprobación con el test de normalidad Shapiro-Wilk en los datos de resistencia a compresión y el rebote del esclerómetro, ajustándose al modelo exponencial, mediante la siguiente ecuación: Resistencia a compresión = $e^{(0.0006304 * \text{Rebote}^{2.5})}$; la cual cumple la mayor parte de los supuestos del modelo de regresión, gráficamente de la siguiente forma.



Gráfica 1. Supuestos resistencia y rebote (prueba de Durbin-Watson)

Fuente: Elaboración propia

La gráfica anterior nos muestra que los datos tienen una aleatoriedad en los residuales, lo cual prueba una tendencia dentro de un rango adecuado.

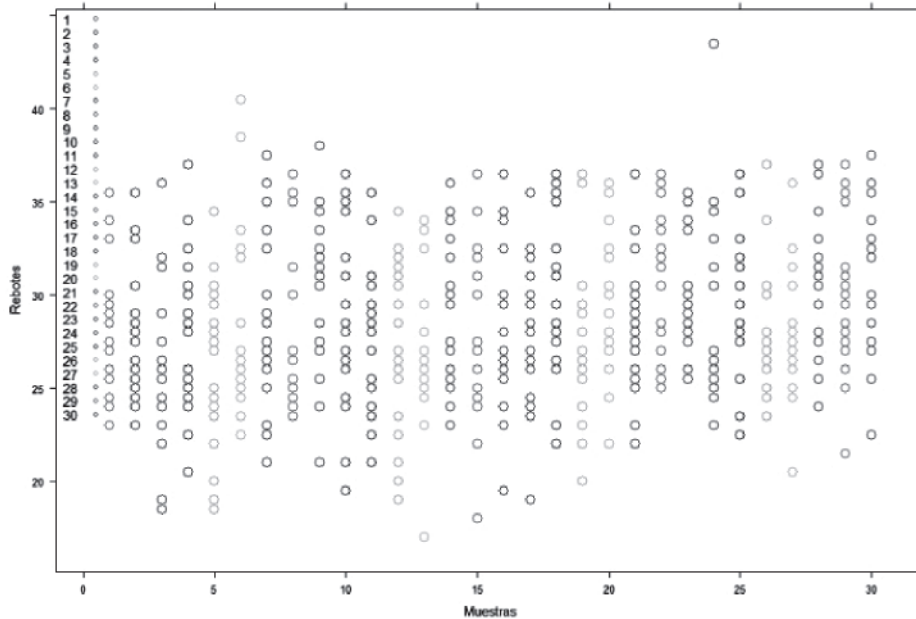


Gráfica 2. Supuestos resistencia y rebote (prueba de Shapiro-Wilk)

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 2 se nota que los valores de la prueba de independencia (0.05) y normalidad (0.5724) son aproximadamente mayores o iguales que 0.05, siendo una mejora de los resultados producidos en el modelo del fabricante.

Para ilustrar la estandarización del proceso de recolección se presenta la Gráfica 3, donde se nota que las mediciones tienen una distribución homogénea de los rebotes en todos los especímenes estudiados.



Gráfica 3. Homogeneidad de rebotes

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

La forma de la función de densidad probabilidad en las resistencias de la máquina y del esclerómetro resultan ser semejantes. Se obtuvo una buena ecuación entre el rebote dado por el esclerómetro y la resistencia con la máquina a compresión del concreto.

De otra parte, en el modelo de regresión propuesto para la obtención de las resistencias, el supuesto de independencia y normalidad se cumplen de manera significativa. Se debe tener presente en la recolección la no influencia de la utilización de un método frente al otro, es decir, metodología de muestras independientes, ya que en caso que exista efecto se podría considerar en muestra pareada.

También se debe tener cuidado en la ubicación y espaciamiento del esclerómetro en la medición de los rebotes con el impacto. Las mediciones del rebote estimadas con el esclerómetro y la resistencia a compresión son menores que los umbrales de control de dicha mezcla, se deben tener en cuenta muestras pilotos para el control y estandarización del proceso previo a la recolección final de información.

Con los resultados obtenidos se puede inferir que el esclerómetro es un dispositivo que estima de una manera óptima la resistencia a compresión de elementos de concreto. La aplicación en estudios de patología y vulnerabilidad de estructuras de concreto reforzado. Se pueden monitorear los elementos estructurales en cualquier momento y a un costo bajo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Ortega, N. M. RIPANI. "Experiencias en el empleo de ensayos no destructivos, en el análisis de estructuras de hormigón afectadas por diferentes situaciones patológicas" presentado en IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- [2] M. TOBÍO, J. "Esclerómetro rotativo automático", *Materiales de Construcción*, vol. 8, no. 086, pp.17-22, 1958.
- [3] D. Sánchez, *Tecnología del concreto y del mortero*, Bogotá, Colombia: Bhandar Editores, 2006.
- [4] P. Faria, V. Silva, y T. Madeira, "Natural hydraulic lime mortars with ceramic wastes for masonry", 9 th International Masonry Conference, Guimarães, Portugal, 2014.
- [5] P. Kumar Mehta, P. J. M. Monteiro, CONCRETE: Microstructure, Properties, and Materials, Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley. Third Edition. New york: McGraw-Hill, 2006.
- [6] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, Panarese, W. C. y J. Tanesi, Diseño y control de mezclas de concreto, Skokie, Illinois, EE.UU: Portland Cement Association, 2004.
- [7] H. Gutiérrez, *Análisis y diseño de experimentos*, México, DF: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [8] M. Tudela, "Informes de peritación de estructuras de hormigón armado mediante ensayos no destructivos, aplicación en caso práctico en edificio de Valencia". Trabajo de grado. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2014.
- [9] R. Rojas, *Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros a edades tempranas mediante el empleo del esclerómetro*, Trabajo de grado, Ingeniería Civil , Dpto, ing civil, Universidad Veracruzana, 2010.
- [10] A. D. Liniers, "Determinación de la resistencia del hormigón mediante ensayos no destructivos realizados con esclerómetro y ultrasonidos", *Informes de la Construcción*, vol. 33, no. 338, p.49-55, 1982.
- [11] V. Badilla Eyherregaray, "Correlación de diferentes métodos de detección no destructivos de anomalías en el hormigón: detección visual, resistividad eléctrica, velocidad ultrasónica y esclerómetro", Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [12] J. Brozovsky, "Comparson of Compressive Strenghts of Concrete Testing by Different of Sclerometers", *Procedia Engineering* vol. 65, no. 1, pp254-259, 2013.
- [13] Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. [Online]. Available on: <http://www.Rproject.org>. 2016.