



**Estimación de la Resistencia del Concreto con el Método SonReb en Obras Civiles
de la Ciudad de Neiva**

Daniel Eduardo Vergara Vergara

Fabián Camilo Falla Naranjo

Juan Pablo Alba Camacho

Director:

M.Sc. Camilo Andrés Chinome Giraldo

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ciencias y Tecnologías

Maestría en Patología de la Construcción

14 de octubre de 2025

Resumen

El presente trabajo tiene como propósito evaluar la resistencia a compresión del concreto, empleando el método SonReb como alternativa a los ensayos destructivos tradicionales. En la práctica, los métodos destructivos resultan costosos, lentos y, en muchos casos, alteran los elementos estructurales. En cambio, los ensayos no destructivos (END), y en particular el SonReb —que combina la esclerometría y la velocidad de pulso ultrasónico (UPV)—, permiten obtener resultados rápidos, económicos y sin causar daño a la estructura.

El estudio se desarrolló en la ciudad de Neiva, aplicando el método en treinta cilindros de concreto con edades mayores a veintiocho días, recolectados en diferentes obras civiles. Se utilizaron un esclerómetro digital Silver Schmidt OS8200 y un equipo ultrasónico IWIN-U910, bajo las normas ASTM C805, ASTM C597 y ASTM C39 para la verificación destructiva. A partir de los resultados obtenidos, se ajustaron ecuaciones SonReb y se evaluó su precisión mediante regresión múltiple, linealización logarítmica y análisis de coeficiente de determinación (R^2).

Los resultados muestran que el método SonReb puede ser una herramienta confiable para la estimación no destructiva de la resistencia del concreto, siempre que se calibre y valide bajo condiciones locales, considerando los materiales y procedimientos constructivos de la región. En consecuencia, este trabajo busca aportar evidencia técnica que respalde el uso del método SonReb en Neiva, promoviendo diagnósticos más precisos, intervenciones menos invasivas y una cultura de evaluación estructural basada en END, fortaleciendo así la capacidad técnica local en el campo de la patología de la construcción.

Abstract

This study aims to evaluate the in-situ compressive strength of concrete, using the SonReb method as an alternative to traditional destructive testing. In practice, destructive methods are expensive, slow, and often alter structural elements. In contrast, non-destructive testing (NDT), and particularly the SonReb method—which combines rebound hammer testing and ultrasonic pulse velocity (UPV)—allows obtaining fast, economical results without causing damage to the structure.

The research was carried out in the city of Neiva, applying the method to thirty concrete cylinders older than twenty-eight days, collected from different civil works. A Silver Schmidt OS8200 digital rebound hammer and an IWIN-U910 ultrasonic device were used under ASTM C805, ASTM C597, and ASTM C39 standards for destructive verification. Based on the results obtained, SonReb equations were adjusted and their accuracy was evaluated through multiple regression, logarithmic linearization, and coefficient of determination (R^2) analysis.

The results show that the SonReb method can be a reliable tool for the non-destructive estimation of concrete strength, provided it is calibrated and validated under local conditions, considering the materials and construction practices of the region. Consequently, this study seeks to provide technical evidence supporting the use of the SonReb method in Neiva, promoting more accurate diagnoses, less invasive interventions, and a culture of structural evaluation based on NDT, thus strengthening local technical capacity in the field of construction pathology.

Glosario

ACI (American Concrete Institute): Entidad internacional que establece normas y guías técnicas para el diseño, construcción, evaluación y control de calidad del concreto estructural. Sus recomendaciones son referencia en la práctica profesional en Colombia.

Agregado: Material granular natural o triturado, clasificado como fino o grueso, que se utiliza como componente del concreto. Su granulometría, forma y densidad influyen directamente en la resistencia y durabilidad del material.

Análisis de regresión múltiple: Procedimiento estadístico empleado para determinar la relación entre una variable dependiente (por ejemplo, la resistencia a la compresión) y dos o más variables independientes (como la velocidad ultrasónica y el índice de rebote).

ASTM (American Society for Testing and Materials): Organismo que desarrolla normas técnicas internacionales. En el campo del concreto, define los procedimientos de ensayo más utilizados, como la esclerometría (ASTM C805), el ultrasonido (ASTM C597) y la compresión (ASTM C39).

Calibración (del método SonReb): Etapa de ajuste de las ecuaciones empíricas del método SonReb a las condiciones locales. Se realiza correlacionando los resultados de los ensayos no destructivos con los valores obtenidos mediante ensayos destructivos de referencia.

Carbonatación: Proceso químico en el que el dióxido de carbono del aire reacciona con el hidróxido de calcio del concreto, disminuyendo su alcalinidad y endureciendo superficialmente el material. Este fenómeno puede afectar la lectura del martillo de rebote.

Cilindro de concreto (probeta): Elemento moldeado, usualmente de 15 x 30 cm, empleado en ensayos destructivos para determinar la resistencia a la compresión del concreto según normas técnicas nacionales o internacionales.

Concreto: Material compuesto por cemento, agua, agregados y aditivos, que al fraguar y endurecer desarrolla alta resistencia a la compresión. Es el principal material estructural utilizado en edificaciones de concreto reforzado.

Curado: Conjunto de acciones destinadas a mantener la humedad y la temperatura adecuadas del concreto recién vaciado, permitiendo una hidratación adecuada del cemento y el desarrollo óptimo de la resistencia.

Durabilidad: Capacidad del concreto para conservar sus propiedades físicas y mecánicas frente a agentes ambientales, químicos o mecánicos durante su vida útil de servicio.

Ensayos destructivos (ED): Pruebas que determinan la resistencia o propiedades del concreto mediante la aplicación de cargas hasta la falla de la muestra, como los ensayos de compresión en cilindros o núcleos extraídos de la estructura.

Ensayos no destructivos (END): Técnicas de evaluación que permiten determinar propiedades del concreto sin alterar su integridad, empleadas en diagnóstico estructural y control de calidad. Incluyen la esclerometría y el ultrasonido.

Esclerometría (martillo de rebote): Ensayo no destructivo que evalúa la dureza superficial del concreto midiendo la altura de rebote de un émbolo metálico. El valor obtenido se denomina índice de rebote y se correlaciona con la resistencia a la compresión.

Homogeneidad: Grado de uniformidad en la composición del concreto. Una buena homogeneidad garantiza una propagación más constante del pulso ultrasónico y una respuesta estructural más uniforme.

Índice de rebote (R): Valor numérico obtenido en el ensayo de esclerometría, que expresa la dureza superficial del concreto y se utiliza como parámetro indirecto para estimar su resistencia.

Linealización: Transformación matemática que convierte una relación no lineal (como la del método SonReb) en una forma lineal mediante logaritmos, con el fin de facilitar su análisis estadístico.

Modelo empírico: Ecuación derivada de resultados experimentales que relaciona los valores de los ensayos no destructivos con la resistencia a la compresión del concreto.

Módulo de elasticidad: Relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria dentro del rango elástico del material. En el concreto, este parámetro se asocia con su rigidez y con la velocidad de propagación del pulso ultrasónico.

Neiva: Ciudad del sur de Colombia donde se contextualiza esta investigación. Sus condiciones de materiales y prácticas constructivas locales inciden directamente en la calibración del método SonReb.

NTC (Norma Técnica Colombiana): Conjunto de estándares elaborados por ICONTEC para regular los métodos de ensayo, control de calidad y especificaciones de materiales en el país. Incluye normas relevantes como la NTC 3692 (esclerometría) y la NTC 4325 (ultrasonido).

Patología de la construcción: Campo de la ingeniería que estudia los mecanismos de deterioro, las causas de las fallas y las estrategias de diagnóstico, mantenimiento y rehabilitación de edificaciones.

Pulso ultrasónico: Onda acústica de alta frecuencia que se transmite a través del concreto para determinar su velocidad de propagación, la cual depende de la densidad, elasticidad y homogeneidad del material.

Rehabilitación estructural: Conjunto de acciones técnicas dirigidas a restablecer o mejorar la capacidad resistente de una estructura afectada por deterioro, fallas o envejecimiento de los materiales.

Relación agua/cemento (a/c): Proporción entre el peso del agua y el del cemento en una mezcla. Es un factor determinante en la resistencia, durabilidad y permeabilidad del concreto.

Resistencia a la compresión (f'_c): Capacidad del concreto para soportar cargas axiales sin fallar. Es la propiedad mecánica más utilizada para evaluar la calidad y el desempeño del material.

RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux): Organización internacional que fomenta la investigación y normalización de métodos de ensayo de materiales de construcción, incluyendo el desarrollo del método SonReb.

SonReb (SONic + REBound): Método combinado que integra la velocidad de pulso ultrasónico (SON) y el índice de rebote esclerométrico (REB) para estimar de forma no destructiva la resistencia a la compresión del concreto in situ.

Transductores: Dispositivos electrónicos que convierten energía eléctrica en energía acústica (y viceversa), utilizados para emitir y recibir las ondas ultrasónicas durante el ensayo de velocidad de pulso.

Ultrasonido (UPV – Ultrasonic Pulse Velocity): Ensayo no destructivo que mide la velocidad con la que un pulso ultrasónico atraviesa el concreto, permitiendo inferir su densidad, homogeneidad y posible presencia de defectos internos.

Velocidad de pulso ultrasónico (V): Relación entre la distancia recorrida por la onda ultrasónica y el tiempo que tarda en atravesar el concreto. Se expresa en m/s y es un indicador de la calidad y compacidad del material.

Contenido

Estimación de la Resistencia del Concreto con el Método SonReb en Obras Civiles de la Ciudad de Neiva.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	2
Glosario.....	3
Introducción	9
1. Planteamiento del problema.....	10
2. Justificación	12
3. Objetivos	13
3.1 Objetivo general.....	13
3.2 Objetivos específicos	14
4. Marco teórico	14
4.1 Resistencia a la compresión del concreto	14
4.2 Ensayos no destructivos (NDT) en concreto.....	15
4.3 Ensayo de esclerometría (martillo de rebote)	15
4.4 Ensayo de ultrasonido (UPV).....	16
4.5 Método SonReb: fundamentos y antecedentes	17
4.6 Calibración y aplicaciones del método SonReb.....	18
4.7 Aplicación del método SonReb en contextos locales.....	19
5. Metodología	19
5.1 Muestras de estudio.....	20
5.2 Equipos de medición (ensayos no destructivos)	20
5.3 Procedimiento experimental.....	21
5.4 Modelos evaluados y correlaciones SonReb	23
5.5 Fundamento físico del modelo combinado	24
5.6 Linealización y análisis estadístico	25
5.7 Aplicación práctica del modelo	26
5.8 Tratamiento estadístico y control de calidad de los datos.	26
6. Resultados y análisis de resultados	28
6.1 Presentación de los resultados experimentales	28
6.2 Evaluación de modelos internacionales SonReb	29

6.3 Calibración local del modelo SonReb.....	31
6.4 Comparación numérica y análisis estadístico.....	32
6.5 Evaluación del nivel de confiabilidad del modelo SonReb.....	36
6.6 Evaluación integral de la confiabilidad del modelo SonReb calibrado.....	36
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	42
7.1 Conclusiones.....	42
7.2 Recomendaciones.....	44
7.3 Perspectivas futuras.....	45
Referencias.....	46
Anexo A. Fichas técnicas de equipos de medición.....	50
A.1 Esclerómetro digital Silver Schmidt OS8200 (Proceq / Screening Eagle)	50
A.2 Equipo ultrasónico IWIN-U910 (IWIN Testing)	50

Introducción

El diagnóstico preciso de la resistencia del concreto en edificaciones existentes es un aspecto esencial dentro de la patología de la construcción, pues permite establecer el estado real de los elementos estructurales y tomar decisiones informadas en procesos de rehabilitación, mantenimiento o reforzamiento. Tradicionalmente, la resistencia a compresión se determina mediante ensayos destructivos (DT) en cilindros extraídos o fabricados para control de calidad; sin embargo, estos métodos implican costos elevados, tiempos de ejecución prolongados y, en algunos casos, afectación parcial de los elementos evaluados. En la ciudad de Neiva existen más de 45.000 edificaciones con más de 20 años de antigüedad, de las cuales el 62 % fueron construidas antes de la adopción plena de la NSR-10, por lo que muchas no cuentan con registros de control de calidad del concreto. Asimismo, se estima que más del 50 % de las edificaciones residenciales del casco urbano no han sido sometidas a procesos formales de evaluación estructural desde su construcción (Alcaldía de Neiva, 2023; DANE, 2023; Secretaría de Planeación Municipal, 2023). Estas cifras evidencian una alta proporción de estructuras potencialmente vulnerables que requieren métodos de diagnóstico más eficientes y representativos de las condiciones reales del material.

Como alternativa, los métodos no destructivos (END) ofrecen ventajas significativas al permitir evaluaciones rápidas, económicas y sin daño a las estructuras. Entre ellos, el método combinado SonReb, que integra el ensayo de rebote esclerométrico con la medición de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), ha mostrado una alta capacidad para correlacionar las propiedades dinámicas del material con su resistencia a compresión. Diversos modelos matemáticos propuestos en la literatura relacionan el índice de rebote, la velocidad ultrasónica y la resistencia a compresión, presentando variabilidad en su exactitud según los materiales, procedimientos constructivos y condiciones de curado. En proyectos de diagnóstico estructural realizados en Neiva y municipios cercanos, se han detectado variaciones de hasta 10 MPa entre la resistencia esperada y la medida mediante extracción de núcleos (Morales & Gutiérrez, 2020), lo cual confirma la necesidad de métodos de estimación más precisos y adaptados a los materiales locales. Además, los ensayos destructivos tradicionales pueden aumentar los costos de diagnóstico en un 30 a 40 % y generar daños irreversibles en los elementos estructurales (American Concrete Institute [ACI], 2019d), lo que limita su uso en estructuras en servicio o patrimoniales.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el desempeño de diferentes correlaciones SonReb reportadas en la literatura para estimar la resistencia a compresión de concretos provenientes de obras de la ciudad de Neiva, con edades superiores a 28 días, a fin de identificar los modelos que presenten el mejor ajuste frente a los resultados de ensayos destructivos. Estas condiciones refuerzan la necesidad de disponer de técnicas de evaluación no destructiva calibradas a las características constructivas y materiales de la región, de modo que se promueva la implementación de metodologías confiables, sostenibles y técnicamente validadas para el diagnóstico estructural en el contexto local.

1. Planteamiento del problema

En la ciudad de Neiva, la evaluación de la resistencia del concreto en estructuras civiles enfrenta diversas limitaciones técnicas y operativas. Los métodos tradicionales, como la extracción de núcleos, aunque precisos, resultan costosos, invasivos y pueden afectar la integridad de los elementos estructurales. Además, su aplicación se restringe en contextos como hospitales o bienes de interés cultural (BIC), debido a criterios de conservación y continuidad del servicio (ACI, 2019). En obras nuevas, los ensayos sobre probetas estándar tampoco garantizan la representatividad de las condiciones reales de colocación y curado, ya que los resultados dependen de factores como la relación agua/cemento, el tipo y dosificación del cemento, la calidad y granulometría de los agregados, el curado y la edad del concreto (ACI, 2019).

En los núcleos extraídos, la variabilidad del material —edad, humedad, temperatura, tipo y tamaño de agregado—, junto con las condiciones de toma, como el daño por perforación, la ubicación respecto al refuerzo y la geometría del testigo, pueden introducir sesgos frente a los valores de referencia (ACI, 2019). En cuanto a los ensayos no destructivos (NDT), la esclerometría presenta sensibilidad frente a la carbonatación, la rugosidad, la humedad y la orientación del impacto; mientras que la velocidad de pulso ultrasónico (UPV) depende del contenido de humedad, el tipo de agregado, la geometría y las condiciones de acoplamiento de los transductores. Por ello, el uso individual de cada método presenta limitaciones que exigen calibración y una interpretación cuidadosa (ASTM International, 2018, 2022; ACI, 2019; Malhotra & Carino, 2004; Breysse, 2019).

Ante este panorama, el método combinado SonReb se plantea como una alternativa no destructiva para estimar la resistencia a compresión del concreto “in situ”. Este enfoque integra

la esclerometría y la velocidad de pulso ultrasónico, permitiendo mejorar la precisión de las estimaciones sin causar daño a los elementos evaluados. Sin embargo, su aplicación en la ciudad de Neiva es prácticamente inexistente debido a la falta de estudios de calibración y validación en el contexto local. Aunque la región cuenta con condiciones favorables —como cierta homogeneidad de los agregados y una industria de materiales consolidada—, no se dispone de modelos empíricos calibrados que permitan aplicar SonReb con precisión y confiabilidad, lo que perpetúa la dependencia de métodos más costosos y riesgosos (ACI, 2019; Breysse, 2019; Malhotra & Carino, 2004).

La literatura técnica latinoamericana ya reporta modelos SonReb contrastados, como las ecuaciones de RILEM (1993) y Tanigawa et al. (1984), que presentan errores menores al 4 % frente a ensayos destructivos, lo que confirma su viabilidad técnica y ofrece bases para nuevas calibraciones. No obstante, estos modelos requieren validación local antes de su aplicación en Neiva, debido a la sensibilidad del método frente a materiales, procedimientos constructivos y condiciones de ensayo particulares del contexto (Hernández Oroza & Cuetara Ricardo, 2023).

Finalmente, la falta de conocimiento técnico sobre el método SonReb y la escasa capacitación profesional en ensayos no destructivos representan una brecha significativa en las prácticas de evaluación estructural de la región. Esta situación genera consecuencias como decisiones erróneas en mantenimiento y reforzamiento, sobrecostos por intervenciones innecesarias y un mayor riesgo de fallas estructurales derivadas de estimaciones inexactas de la resistencia del concreto. Por tanto, comprender las implicaciones estructurales y funcionales asociadas a dichas deficiencias resulta esencial para dimensionar el alcance del problema y justificar la necesidad de este estudio.

La ausencia de una caracterización confiable de la resistencia real del concreto tiene implicaciones directas sobre la seguridad estructural y la funcionalidad de las edificaciones. Concretos con resistencia inferior a la especificada o con alta variabilidad entre elementos pueden presentar disminución del módulo de elasticidad, fisuración temprana, pérdida de rigidez y reducción de la capacidad portante ante cargas gravitacionales o sísmicas. Estas deficiencias también favorecen la penetración de agentes agresivos —como cloruros o dióxido de carbono—, acelerando procesos de corrosión del acero y disminuyendo la durabilidad del sistema estructural (ACI, 2019b; Cifuentes & Medina, 2015). En contextos urbanos como Neiva, donde existen numerosas edificaciones con más de dos décadas de servicio y registros limitados de control de

calidad, esta pérdida progresiva de capacidad resistente representa un riesgo técnico y económico considerable.

De ahí la importancia de contar con metodologías no destructivas calibradas localmente, como el método SonReb, que permitan estimar con mayor precisión la resistencia efectiva del concreto y sustentar decisiones oportunas de mantenimiento, reforzamiento o rehabilitación (RILEM Technical Committee NDT 4, 1993). La validación del método SonReb en Neiva contribuirá al fortalecimiento de la capacidad técnica regional en diagnóstico estructural, permitiendo decisiones más precisas y sostenibles en el mantenimiento, rehabilitación y conservación de edificaciones.

En este contexto, surge la necesidad de formular la siguiente pregunta de investigación, que orienta el desarrollo del presente estudio:

¿Qué tan eficaz y confiable es la correlación entre los resultados de los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) y de rebote esclerométrico, integrados en el método SonReb, para estimar la resistencia a compresión del concreto en comparación con los ensayos destructivos tradicionales, bajo las condiciones constructivas y materiales locales de la ciudad de Neiva?

2. Justificación

El conocimiento preciso de la resistencia del concreto en estructuras es fundamental para garantizar su seguridad, durabilidad y desempeño ante cargas gravitacionales y sísmicas, especialmente en una ciudad como Neiva, ubicada en una región clasificada con amenaza sísmica intermedia-alta según el reglamento NSR-10. En edificaciones nuevas, el concreto colocado en los elementos estructurales puede presentar variaciones significativas respecto al concreto ensayado en probetas estandarizadas, debido a factores como la segregación, el curado deficiente o variaciones en la dosificación durante la obra. Por otro lado, en estructuras existentes —muchas de ellas sin registros técnicos—, el conocimiento de la resistencia del concreto es aún más complejo, ya que implica recurrir a métodos destructivos como la extracción de núcleos, los cuales resultan costosos, invasivos y pueden debilitar los elementos evaluados.

En este contexto, el método SonReb surge como una técnica no destructiva, económica y potencialmente confiable, que permite estimar la resistencia a compresión del concreto “in situ”, combinando los beneficios del ensayo de rebote y la velocidad de pulso ultrasónico. No obstante,

el simple uso del método no es suficiente desde una perspectiva investigativa. El valor de esta investigación radica en evaluar la efectividad del método SonReb bajo condiciones reales y particulares de la ciudad de Neiva, caracterizadas por el uso de agregados locales, prácticas constructivas específicas y una relativa homogeneidad en los materiales, factores que inciden directamente en la precisión de los resultados.

La propuesta del estudio no se limita a aplicar el método, sino a validar su precisión, confiabilidad y aplicabilidad local mediante la comparación directa de sus resultados con ensayos destructivos (probetas). De este modo, se busca determinar si el SonReb puede ser considerado una alternativa técnica válida para el diagnóstico estructural y el control de calidad en obras de la región.

La investigación permitirá establecer correlaciones, proponer modelos de ajuste y definir márgenes de error aceptables, sentando bases para su uso sistemático por parte de profesionales e instituciones técnicas del Huila. Al no encontrarse estudios previos que documenten esta técnica en la ciudad, el trabajo también contribuirá con evidencia empírica que fortalezca las prácticas de inspección estructural y fomente el uso de tecnologías no destructivas en el país.

En conjunto, este trabajo contribuirá al fortalecimiento de la capacidad técnica regional en diagnóstico estructural y a la consolidación de metodologías de evaluación más seguras, económicas y sostenibles. Asimismo, aportará conocimiento científico aplicable al ejercicio profesional de la ingeniería civil, en coherencia con los objetivos de desarrollo urbano y la resiliencia estructural promovida por la Universidad Santo Tomás y las políticas de infraestructura del departamento del Huila.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la eficacia y confiabilidad del método SonReb para estimar la resistencia a compresión del concreto en obras civiles de la ciudad de Neiva, mediante su comparación con ensayos destructivos.

3.2 Objetivos específicos

Caracterizar las condiciones constructivas y los materiales locales que influyen en la estimación de la resistencia del concreto mediante el método SonReb en obras civiles de la ciudad de Neiva.

Utilizar el método SonReb en especímenes cilíndricos de concreto fresco elaborados en obras nuevas, considerando las principales variables de mezcla, curado y exposición que inciden en la estimación de la resistencia a compresión.

Evaluar la correlación entre los resultados obtenidos mediante el método SonReb y los valores de resistencia determinados en ensayos de compresión de cilindros de concreto, considerando su grado de concordancia y margen de error.

Evaluar la eficacia y confiabilidad del método SonReb en el contexto local como herramienta de diagnóstico estructural no destructivo en la ciudad de Neiva.

4. Marco teórico

El presente marco teórico tiene como propósito fundamentar conceptualmente el estudio sobre la estimación de la resistencia del concreto utilizando el método SonReb, en el contexto específico de la ciudad de Neiva. Para ello, se abordan las bases científicas relacionadas con la resistencia a compresión del concreto, así como los fundamentos, ventajas y limitaciones de los métodos no destructivos más representativos: la esclerometría y el ultrasonido. Posteriormente, se desarrolla el enfoque teórico del método SonReb como técnica combinada, analizando investigaciones previas, modelos empíricos y su nivel de precisión. Finalmente, se presenta una reflexión sobre la necesidad de validar esta técnica en condiciones locales, considerando las particularidades de los materiales y procedimientos constructivos de la región.

4.1 Resistencia a la compresión del concreto

La resistencia a compresión es una de las propiedades más relevantes del concreto, al ser un parámetro básico en el diseño estructural y en la evaluación del desempeño de edificaciones existentes. Se define como la capacidad del material para soportar cargas axiales sin experimentar fallas. Esta propiedad depende de múltiples factores, entre ellos el tipo de cemento, la calidad de los agregados, la relación agua/cemento, el curado y la edad del concreto.

De acuerdo con la literatura técnica (NRMCA, s.f.), la resistencia se mide tradicionalmente mediante ensayos destructivos sobre especímenes cilíndricos moldeados en condiciones controladas. No obstante, diversos autores (Chandak & Kumavat, 2020) han señalado que estos ensayos no siempre reflejan el comportamiento real del concreto colocado en obra, especialmente en contextos donde las condiciones de colocación y curado no son ideales.

4.2 Ensayos no destructivos (NDT) en concreto

Los métodos no destructivos permiten estimar propiedades mecánicas del concreto sin alterar significativamente la integridad del elemento evaluado. Según (Malhotra & Carino, 2004), los ensayos no destructivos son técnicas aplicadas al concreto para evaluar sus propiedades sin causar daños significativos. La importancia de estos ensayos surge de la necesidad de comprobar la calidad del concreto empleado en obra y, de esta manera, realizar diagnósticos confiables en estructuras existentes, especialmente cuando no es factible efectuar ensayos destructivos o en edificaciones de conservación o interés cultural.

Sus principales ventajas son la rapidez de ejecución, el bajo costo y la posibilidad de realizar un número elevado de mediciones en diferentes puntos de la estructura. Sin embargo, presentan limitaciones en la precisión de los valores obtenidos, razón por la cual deben correlacionarse con ensayos destructivos para validar los resultados (ASTM, 2019).

4.3 Ensayo de esclerometría (martillo de rebote)

La esclerometría, también conocida como ensayo con martillo de Schmidt, evalúa la dureza superficial del concreto midiendo la altura de rebote de un émbolo accionado contra la superficie. Este valor se correlaciona con la resistencia a compresión mediante ecuaciones empíricas. Este ensayo está contemplado en la norma técnica colombiana NTC 3692 y en la norma ASTM C805.

Si bien es una técnica económica y de fácil aplicación, diversos estudios (Kouddane et al., 2022) advierten que sus resultados pueden verse afectados por la carbonatación, la humedad, la textura superficial y la orientación del impacto. Por ello, su uso como técnica única para la estimación de resistencia presenta limitaciones, pudiendo verse influenciado además por factores como el tipo de material, el proceso constructivo, la proximidad a refuerzos de acero y la naturaleza del agregado. Se recomienda realizar este ensayo antes de extraer núcleos, de manera

que los valores puedan correlacionarse posteriormente. Asimismo, es aconsejable efectuar varias mediciones para obtener un valor promedio representativo.

4.4 Ensayo de ultrasonido (UPV)

El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico, regulado por la NTC 4325 y las normas BS 1881 Parte 203 y ASTM C597, consiste en medir la velocidad con que un pulso ultrasónico atraviesa el concreto. Esta velocidad depende de factores como la densidad, la homogeneidad y la calidad del material. Una mayor velocidad indica un concreto más denso y homogéneo, lo que se asocia con una mayor resistencia a compresión.

La velocidad del pulso ultrasónico se determina mediante la expresión:

$$V = L / t$$

donde V es la velocidad del pulso ultrasónico (m/s), L la longitud del trayecto recorrido (m) y t el tiempo (s).

A pesar de sus ventajas, el ultrasonido puede verse influenciado por la presencia de humedad, el tipo de agregado y las condiciones de acoplamiento de los transductores. La ubicación del acero de refuerzo también afecta las lecturas, ya que el metal altera la propagación del pulso; por ello, la NTC 4325 (numeral 7.6) recomienda realizar un escaneo previo para identificar las armaduras. Asimismo, la disposición de los transductores —directa, semidirecta o indirecta— influye en la confiabilidad del resultado, siendo la directa la más precisa. Finalmente, la longitud de la trayectoria y el tamaño de los agregados deben considerarse para evitar distorsiones en la velocidad medida.

De acuerdo con la NTC 4325 (numeral 11), los valores obtenidos deben correlacionarse con los ensayos de compresión en cilindros o núcleos, ya que por sí solos solo representan velocidades. En consecuencia, el uso combinado de esta técnica con otras mediciones incrementa la confiabilidad del diagnóstico estructural.

De acuerdo con la NTC 4325 (numeral 7), el ensayo puede realizarse bajo tres configuraciones principales:

- **Transmisión directa:** los transductores se ubican en caras opuestas del elemento, permitiendo que la onda atravesase completamente la sección. Es la disposición más precisa y recomendada cuando se tiene acceso a ambos lados del elemento.

- **Transmisión semidirecta:** los transductores se colocan en caras adyacentes, de modo que el pulso atraviesa el concreto en diagonal. Esta disposición se usa cuando no es posible acceder a caras opuestas, conservando una buena precisión.
- **Transmisión indirecta o superficial:** ambos transductores se ubican sobre la misma cara del elemento. Es la técnica menos precisa, aunque útil en estructuras donde solo una superficie está disponible.

La medición directa es la más precisa y confiable porque:

- La onda ultrasónica recorre la menor distancia posible, reduciendo atenuaciones y reflexiones.
- La señal detectada es más nítida y estable, lo que permite una determinación más exacta del tiempo de tránsito (t).
- El cálculo de la velocidad ($V = L/t$) es más representativo de la calidad interna del concreto y no solo de su superficie.
- Minimiza errores por acoplamiento, geometría o interferencias de bordes.

En nuestra investigación, se eligió la medición directa se eligió porque:

1. Las probetas y muestras de concreto permitían acceso por ambas caras, cumpliendo las condiciones geométricas y de tamaño necesarias para una lectura directa.
2. El objetivo era calibrar una ecuación local SonReb, por lo que se requería la mayor precisión posible en la medición de la velocidad ultrasónica, eliminando incertidumbres de configuración.
3. Se buscó garantizar la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados al comparar diferentes muestras en condiciones controladas.
4. Al ser una etapa de calibración experimental, se privilegió la precisión del ensayo sobre la representatividad de campo; las configuraciones indirectas podrán evaluarse en futuras aplicaciones.

4.5 Método SonReb: fundamentos y antecedentes

El método SonReb integra los resultados del ultrasonido (SON) y la esclerometría (REB) para estimar de manera más precisa la resistencia del concreto. Fue desarrollado en Europa en las décadas de 1960 y 1970 y formalizado a través de recomendaciones de organismos como la

RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages). Los primeros ensayos combinaron el rebote esclerométrico —técnica utilizada desde la década de 1950— y la velocidad de pulso ultrasónico —aplicada en concreto desde finales de los años cuarenta—.

El método SonReb busca compensar las limitaciones individuales de cada técnica, generando modelos de correlación empírica a partir de la integración de ambas variables (rebote y velocidad de pulso). Su principal fortaleza es la posibilidad de obtener mayor precisión en la estimación de la resistencia del concreto.

Diversos estudios han demostrado la utilidad del método. Chandak y Kumavat (2020) reportaron errores menores al 6 % al aplicar SonReb en estructuras con concreto convencional. Hernández Oroza y Cuetara Ricardo (2023) evidenciaron en Cuba que modelos ajustados al contexto local, como los propuestos por RILEM y Tanigawa, alcanzan errores inferiores al 4 % cuando se utilizan agregados y cementos regionales. Kouddane et al. (2022) destacan que el éxito del método depende de su calibración con datos reales obtenidos en campo, los cuales permiten formular modelos específicos de mayor capacidad predictiva.

Crespo y Morales (2016) desarrollaron adaptaciones del método SonReb en proyectos de rehabilitación estructural en España, destacando la importancia de calibrar las ecuaciones con muestras testigo extraídas de la obra para lograr correlaciones más representativas del material en sitio.

4.6 Calibración y aplicaciones del método SonReb

La importancia del método SonReb radica en la posibilidad de establecer ecuaciones empíricas del tipo:

$$f_c = a + bR + cV$$

o expresiones logarítmicas y polinómicas que combinan el índice de rebote (R) y la velocidad ultrasónica (V). El uso conjunto de ambas variables mejora la estimación de la resistencia en comparación con la aplicación individual de cada ensayo. Sin embargo, estas ecuaciones deben correlacionarse con los resultados de ensayos destructivos, como los realizados en núcleos o cilindros, para validar su precisión.

La calibración consiste en correlacionar los valores de SON y REB con los resultados de resistencia obtenidos en ensayos destructivos. Para ello, se emplean cilindros moldeados y curados en condiciones controladas, o núcleos extraídos directamente de la obra.

En Latinoamérica, varios investigadores han explorado adaptaciones del método SonReb a contextos locales. En México, Bravo (2018) lo aplicó en edificaciones patrimoniales con más de cincuenta años de antigüedad, encontrando que la carbonatación acumulada y la porosidad del concreto dificultaban la correlación con los ensayos destructivos. En Perú, Chávez (2020) realizó comparaciones en puentes, demostrando que las variaciones en la calidad y origen de los agregados exigen ajustes específicos. En Colombia, Barrios (2021) trabajó con concretos de alta resistencia (superiores a 35 MPa), proponiendo nuevas ecuaciones de correlación que amplían el rango de aplicabilidad del método frente a los modelos europeos iniciales.

La RILEM también ha promovido la aplicación del método SonReb en grandes obras de infraestructura, como puentes y estructuras sometidas a ambientes marinos, demostrando su adaptabilidad a distintos contextos constructivos y ambientales.

4.7 Aplicación del método SonReb en contextos locales

En Colombia, la aplicación del método SonReb ha sido muy limitada y, en el caso particular de Neiva, no se registran antecedentes formales sobre estudios comparativos que evalúen su eficacia frente a ensayos destructivos. Esta ausencia de validación local representa una limitación técnica importante, especialmente considerando la influencia que pueden tener los agregados, cementos y prácticas constructivas en la respuesta del concreto.

Por tanto, se hace necesario desarrollar investigaciones que permitan verificar la eficacia del método SonReb con materiales y procedimientos locales, definir márgenes de error aceptables y proponer modelos de correlación adaptados al contexto regional.

5. Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y diseño experimental, siguiendo la clasificación metodológica propuesta por (Hernández Sampieri, Fernández-Collado y Baptista, 2014), orientada a validar la eficacia y confiabilidad del método SonReb para la estimación de la resistencia a compresión del concreto en obras civiles

de la ciudad de Neiva. Este capítulo describe las características de las muestras, los equipos empleados, los procedimientos experimentales y el método de análisis utilizado.

5.1 Muestras de estudio

Las muestras de concreto utilizadas corresponden a cilindros recolectados de un mínimo de tres obras civiles en ejecución dentro del área urbana de Neiva. En total se analizaron treinta especímenes, 30 de ellos con edades superiores a veintiocho días, seleccionados de los utilizados para control de calidad. Los cilindros presentan dimensiones normalizadas y fueron ensayados en las condiciones reales de curado y manipulación propias de cada proyecto.

No se contó con información precisa sobre la dosificación ni sobre las condiciones exactas de curado; sin embargo, esta variabilidad refleja de forma fiel las condiciones constructivas locales, lo que aporta representatividad al proceso de validación del método SonReb en el contexto regional. Metodológicamente, la selección de las muestras fue de tipo no probabilístico por conveniencia, ya que se eligieron de acuerdo con su disponibilidad y accesibilidad en obras activas de la ciudad, considerando que reflejan las condiciones constructivas reales del contexto local. Este tipo de muestreo es apropiado en estudios aplicados y experimentales de campo, donde el objetivo no es la generalización estadística sino la representatividad técnica del material (Hernández Sampieri et al., 2014).

5.2 Equipos de medición (ensayos no destructivos)

Para la aplicación de los ensayos no destructivos se utilizaron dos instrumentos principales. El primero corresponde al esclerómetro digital Silver Schmidt OS8200 (Proceq/Screening Eagle), el cual emplea un sistema óptico de medición de rebote (Q-value) que mejora la precisión y repetibilidad de los resultados respecto a los modelos analógicos. El dispositivo posee conectividad Bluetooth, capacidad de almacenamiento interno y aplicación de análisis mediante software dedicado. Cumple con los lineamientos establecidos en las normas ASTM C805 y EN 12504-2.

El segundo equipo utilizado fue el IWIN-U910 (IWIN Testing), instrumento portátil de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) diseñado para materiales no metálicos. Este equipo permite determinar la velocidad de propagación de ondas acústicas en el concreto, detectar grietas y evaluar su homogeneidad interna. Su configuración experimental se realizó en modo de transmisión directa, midiendo el tiempo de tránsito a lo largo del eje de cada cilindro. El ensayo

se ejecutó conforme a las especificaciones de la norma ASTM C597 y su equivalente colombiana NTC 4325.

Las fichas técnicas y especificaciones de ambos equipos se presentan en el Anexo A, donde se detallan sus características principales, rangos de medición y condiciones de uso durante la ejecución de los ensayos.

5.3 Procedimiento experimental

Cada muestra fue codificada e inspeccionada visualmente antes del ensayo. Se realizaron primero los ensayos no destructivos y, posteriormente, los ensayos destructivos de referencia.

En el ensayo esclerométrico se efectuaron doce impactos por cilindro, distribuidos equitativamente en la cara superior, inferior y lateral. Los valores atípicos como una diferencia en más de ± 6 unidades de rebote por fuera de la media fueron eliminados y se calculó el promedio del índice de rebote (I_n).

Imagen 1 y 2.

Ensayo de esclerometría



Fuente: Propia

En la prueba de ultrasonido se ejecutaron tres mediciones longitudinales por muestra, registrando el tiempo de tránsito y la longitud del trayecto, con lo que se determinó la velocidad promedio de pulso ultrasónico (V_p) en m/s.

Imagen 3 y 4.*Prueba de ultrasonido*

Fuente: Propia

Finalmente, los cilindros fueron sometidos a ensayo de compresión axial según la ASTM C39, obteniendo la resistencia a compresión f'_c (MPa). Este valor fue empleado como referencia para evaluar la precisión de las ecuaciones SonReb.

Imagen 5 y 6.*Ensayo de compresión axial según la ASTM C39*



Fuente: Propia

5.4 Modelos evaluados y correlaciones SonReb

El método SonReb combina los resultados del ensayo esclerométrico y del ultrasonido, generando ecuaciones empíricas que relacionan ambas variables con la resistencia a compresión del concreto. En esta investigación se evaluaron los modelos propuestos por diversos autores, presentados en la Tabla 1.

Tabla 1

Formulaciones para estimar la resistencia del concreto mediante el método SonReb

Table 2. Formulations to define the R_{cub} with the SonReb method

Author	Year	Formulation	Units	Sample type	Correlation type	
Bellander [22]	1979	$R_{cub} = 0.00082 \cdot I_r^3 + 11.03 \cdot V_{us} - 32.7$	MPa, km/s	A	PL	(8)
Meynink, Samarin [23]	1979	$f_{cyl} = -24.1 + 1.24 \cdot I_r + 0.058 \cdot V_{us}^4$	[MPa, km/s]	B	PL	(9)
Giacchetti, Lacquaniti [26]	1980	$R_{cub} = 7.695 \cdot 10^{-11} \cdot V_{us}^{2.6} \cdot I_r^{1.4}$	MPa, m/s	C	PW	(10)
Bocca, Cianfrone [48]	1983	$R_{cub} = 2.765 \cdot 10^{-9} \cdot V_{us}^{2.487} \cdot I_r^{1.3114}$	kg/cm ² , m/s	A	PW	(11)
Samarin, Dhir [49]	1984	$f_{cyl} = -12 + 0.1 \cdot V_{us}^4 + 0.76 \cdot I_r$	MPa, km/s	B	PL	(12)
Gašparik [50]	1992	$R_{cub} = 0.0286 \cdot I_r^{1.246} \cdot V_{us}^{1.85}$	MPa, km/s	D	PW	(13)
RILEM [24]	1993	$R_{cub} = 9.27 \cdot 10^{-11} \cdot I_r^{1.4} \cdot V_{us}^{2.6}$	MPa, m/s	A	PW	(14)
Di Leo, Pascale [51]	1994	$R_{cub} = 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot V_{us}^{2.446} \cdot I_r^{1.058}$	MPa, m/s	B	PW	(15)
Arioğlu, Köylüoğlu [52]	1996	$R_{cub} = 0.00153 \cdot (I_r^3 \cdot V_{us}^4)^{0.611}$	MPa, km/s	D	PW	(16)
Ramyar Kol [53]	1996	$f_{cyl} = -39.57 + 1.532 \cdot I_r + 5.0614 \cdot V_{us}$	MPa, km/s	D	LN	(17)
Kheder [54]	1999	$R_{cub} = 0.0158 \cdot I_r^{1.1171} \cdot V_{us}^{0.4254}$	MPa, m/s	A	PW	(18)
Beconcini, Formichi [55]	2003	$f_{cyl} = 5.9 + 2.712 \cdot 10^{-15} \cdot I_r \cdot V_{us}^4$	MPa, m/s	C	PL	(19)
Caiaro <i>et al.</i> [56]	2003	$R_{cub} = 1.74 \cdot 10^{-7} \cdot I_r^{-0.0674} \cdot V_{us}^{2.36}$	MPa, m/s	A	PW	(20)
Del Monte <i>et al.</i> [57]	2004	$R_{cub} = 4.40 \cdot 10^{-7} \cdot (I_r^2 \cdot V_{us}^3)^{0.5634}$	MPa, m/s	C	PW	(21)
Menditto <i>et al.</i> [58]	2004	$R_{cub} = 0.00004 \cdot I_r^{1.88148} \cdot V_{us}^{0.80840}$	MPa, m/s	A	PW	(22)
Faella <i>et al.</i> (a) [59]	2009	$R_{cub} = 2.6199 \cdot 10^{-8} \cdot I_r^{0.5341} \cdot V_{us}^{2.2878}$	MPa, m/s	C	PW	(23)
Faella <i>et al.</i> (b) [59]	2009	$R_{cub} = 0.26511 \cdot I_r + 0.01385 \cdot V_{us} - 34.51583$	MPa, m/s	C	LN	(24)

Fuente: Tran et al. (2023).

Estas ecuaciones incluyen diferentes tipos de muestras (cilindros, cubos y núcleos extraídos), por lo que su desempeño varía dependiendo de las propiedades del concreto y las condiciones de medición. En este estudio se aplicaron todas las correlaciones seleccionadas a los resultados experimentales obtenidos en Neiva, con el fin de determinar cuáles presentan el mejor ajuste estadístico.

5.5 Fundamento físico del modelo combinado

El método SonReb integra la velocidad de pulso ultrasónico (V) y el índice de rebote (S) para estimar la resistencia a compresión (f'_c). Ambas magnitudes se relacionan con las propiedades elásticas del material. En el caso del ultrasonido, la velocidad depende de la densidad (ρ) y del módulo de elasticidad (E) del concreto, de acuerdo con la relación:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Dado que la densidad del concreto varía poco entre mezclas similares, la velocidad está principalmente influenciada por el módulo de elasticidad, el cual mantiene una relación de potencia con la resistencia a compresión. En consecuencia, la ecuación combinada del método SonReb adopta la forma general:

$$f_{ck} \propto V^{\alpha} \quad \text{y} \quad f_{ck} \propto S^{\beta}$$

Entonces es natural proponer una relación combinada que integre ambos efectos:

$$f_{ck} \propto V^b \cdot S^c$$

Este producto refleja que ambas variables actúan en conjunto, reforzando la estimación de la resistencia. Al introducir una constante de ajuste a para adaptar unidades y características locales, se obtiene la fórmula base:

$$f_{ck} = a \cdot V^b \cdot S^c$$

Donde:

f_{ck} = Resistencia a la compresión (MPa).

V = Velocidad del pulso ultrasónico (m/s).

S = Índice de rebote.

a, b, c = Constantes de calibración obtenidas a partir de ensayos experimentales.

5.6 Linealización y análisis estadístico

Para el análisis de regresión múltiple, la ecuación se linealiza aplicando logaritmos naturales:

$$\ln(f'_c) = \ln(a) + b \ln(V) + c \ln(S)$$

Con esta expresión se estiman las constantes a , b y c a partir de los datos experimentales mediante técnicas de regresión lineal. El proceso de análisis se desarrolló en las siguientes etapas:

Recolección de los datos experimentales de f'_c , V y S .

Cálculo de los logaritmos naturales de cada variable.

Aplicación de regresión lineal múltiple.

Obtención de los parámetros a , b y c , y evaluación del coeficiente de determinación (R^2).

La ecuación calibrada se utilizó para estimar la resistencia del concreto y comparar los resultados obtenidos con los valores experimentales, determinando el error relativo y el nivel de ajuste de cada modelo.

5.7 Aplicación práctica del modelo

Una vez establecida la ecuación calibrada, su aplicación práctica consiste en medir en obra la velocidad ultrasónica (V) y el índice de rebote (S), sustituir estos valores en la fórmula SonReb correspondiente y obtener una estimación confiable de la resistencia a compresión (f'_c) sin requerir ensayos destructivos.

Esta metodología puede aplicarse tanto en estructuras nuevas como existentes, siempre que las condiciones de superficie y accesibilidad permitan realizar las mediciones con los equipos indicados.

5.8 Tratamiento estadístico y control de calidad de los datos.

El tratamiento estadístico se realizó con el fin de obtener parámetros representativos del comportamiento del concreto en las muestras ensayadas, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos tanto en laboratorio como mediante los métodos no destructivos.

Se analizaron 30 muestras de concreto, obtenidas de diferentes elementos estructurales de obras ubicadas en la ciudad de Neiva. Para cada una de ellas se registraron los valores de:

- Resistencia a la compresión (f'_c) medida en laboratorio (MPa).
- Velocidad de pulso ultrasónico (V) medida con el equipo IWIN-U910 (km/s).
- Promedio del índice de rebote (S) medido con el esclerómetro Silver Schmidt OS8200 (adimensional).

Posteriormente, se calculó la resistencia estimada (f'_{c_est}) aplicando la fórmula calibrada obtenida en este estudio, que combina los resultados de los dos ensayos no destructivos:

$$f'_{c,est} = 0.3659 \times V^{0.2333} \times S^{1.0381}$$

5.8.1 Resultados estadísticos consolidados

Variable	Media ($\bar{x}$)	Desv. Est. (s)	Error Est. (SE)	IC ₉₅ % inferior	IC ₉₅ % superior	Unidad
Resistencia (f'_c) – laboratorio	36.1	3.99	0.7	34.6	37.6	MPa

Variable	Media ($\bar{x}$)	Desv. Est. (s)	Error Est. (SE)	IC ₉₅ % inferior	IC ₉₅ % superior	Unidad
Velocidad de pulso ultrasónico (V)	12.60	1.772	0.34	11.94	13.26	km/s
Índice de rebote (S)	47.27	3.127	0.50	45.90	48.23	—

5.8.2 Interpretación de los resultados

La resistencia promedio de las muestras es de 36.12 MPa, con una desviación estándar de 3.99 MPa, lo que indica una variabilidad moderada del material, coherente con las diferencias de edad, curado y procedencia del concreto en estructuras existentes.

La velocidad promedio de 12.60 km/s refleja una buena compacidad interna del concreto y un nivel de homogeneidad adecuado en las muestras ensayadas.

El índice de rebote promedio de 47.27 muestra una superficie endurecida y sin deterioro superficial significativo.

Los intervalos de confianza calculados permiten afirmar que los valores poblacionales verdaderos de las variables se encuentran dentro de los rangos indicados con un 95 % de certeza, evidenciando estabilidad estadística de los datos experimentales.

5.8.3 Comparación entre resistencia medida y resistencia estimada

El promedio de resistencia estimada mediante la fórmula calibrada ($f'_{c,est} = 36.06$ MPa) fue comparado con el promedio obtenido en laboratorio ($f'_{c,lab} = 36.12$ MPa).

La diferencia entre ambas medias es:

$$\text{Sesgo (bias)} = f'_{c,est} - f'_{c,lab} = 36.06 - 36.12 = -0.06 \text{ MPa}$$

Este valor representa un error relativo de apenas 0.17 %, lo que demuestra que el modelo SonReb calibrado reproduce fielmente la resistencia real del concreto dentro del rango experimental analizado.

En consecuencia, el modelo no presenta sesgo significativo y puede considerarse estadísticamente equilibrado entre los valores medidos y los estimados.

6. Resultados y análisis de resultados

6.1 Presentación de los resultados experimentales

El programa experimental incluyó la medición del índice de rebote (S) mediante esclerometría y la velocidad de pulso ultrasónico (V) en cilindros de concreto elaborados con materiales locales de Neiva.

A cada espécimen se determinó además la resistencia a compresión f'_c (medida) en laboratorio, con lo cual se obtuvieron tres conjuntos de datos correlacionables.

Los valores obtenidos experimentales de cada variable se observan en la tabla 6.1.

Los ensayos de rebote se realizaron con el esclerómetro Silver Schmidt OS8200, y las mediciones ultrasónicas con el equipo IWIN-U910. Las velocidades registradas oscilaron entre 4.64 y 15.22 Km/s y los valores de rebote entre 39 y 53, con resistencias a compresión entre 23.51 y 45.26 MPa.

La Tabla 6.1 resume los valores promedio representativos de cada variable.

ID Muestra	Resistencia (MPa)	Velocidad (km/s)	Promedio Indice de rebote
4	34.42	13.85	46.00
7	23.51	4.64	39.00
9	32.13	11.65	46.00
10	44.64	15.22	50.00
12	31.60	14.01	42.00
13	37.34	12.54	47.00
14	37.35	13.28	51.00
16	33.57	12.84	43.00
17	35.32	12.42	46.00
18	35.46	11.75	47.00
19	38.31	11.95	47.00
20	30.35	12.08	42.00
22	31.71	12.93	43.00
23	37.71	11.65	47.00
26	36.10	12.76	46.00
27	35.76	12.11	50.00
28	37.43	11.94	48.00
29	38.67	12.52	46.00
30	33.76	12.89	48.00
33	37.71	13.11	50.00
35	36.22	11.92	50.00
36	36.10	12.54	50.00
38	37.43	14.90	46.00
39	38.67	12.84	46.00
42	37.25	12.74	49.00
45	37.78	13.85	52.00
46	36.28	14.55	48.00
47	38.51	13.09	49.00
48	37.13	12.39	48.00
50	45.26	13.06	53.00

Fuente: Elaboración propia

6.2 Evaluación de modelos internacionales SonReb

Para contrastar los resultados, se aplicaron modelos propuestos por autores internacionales —entre ellos (Giacchetti & Lacquaniti, 1980), RILEM NDT (1993) y (Cristofaro et al. 2019)— que relacionan f'_c con V y S en forma potencial. Las fórmulas de referencia fueron tomadas de la literatura técnica.

Los valores obtenidos con las diferentes propuestas de formula del método SonReb se pueden observar en la tabla 6.2.

Al aplicar dichas ecuaciones a los datos experimentales de Neiva, los resultados estimados de f'_c presentaron desviaciones considerables (superiores al $\pm 25\%$), sin correlación aceptable con los valores reales.

Este comportamiento confirma que los modelos calibrados con agregados y cementos de otras regiones (Europa o Asia) no reflejan adecuadamente las propiedades de los concretos locales, cuya granulometría y módulo elástico difieren notablemente.

Tabla 6.2. Modelos SonReb internacionales seleccionados

ID Muestra	Promedio Rebotes	Velocidad	Velocidad	Resistencia	Resistencia	Bellander (1979)	Meynink, Samarin (1979)	Giacchetti, Lacquaniti (1980)
		(km/s)	(m/s)	(MPa)	Kk/cm2	Mpa	Mpa	Kg/cm2
4	46.00	13.85	13,849.77	34.42	350.94	199.88	2,166.96	959.00
7	39.00	4.64	4,637.90	23.51	239.73	67.10	51.10	44.27
9	46.00	11.65	11,647.51	32.13	327.68	175.59	1,100.42	611.33
10	50.00	15.22	15,223.88	44.64	455.20	237.72	3,153.41	1,378.26
12	42.00	14.01	14,009.22	31.60	322.19	182.57	2,261.98	869.83
13	47.00	12.54	12,544.70	37.34	380.72	190.80	1,470.56	764.09
14	51.00	13.28	13,275.11	37.35	380.88	222.50	1,840.42	992.44
16	43.00	12.84	12,839.16	33.57	342.27	174.11	1,605.29	716.57
17	46.00	12.42	12,422.19	35.32	360.13	184.13	1,414.03	722.74
18	47.00	11.75	11,745.83	35.46	361.59	181.99	1,138.16	643.94
19	47.00	11.95	11,952.82	38.31	390.66	184.27	1,218.06	673.86
20	42.00	12.08	12,079.47	30.35	309.49	161.29	1,262.85	591.67
22	43.00	12.93	12,930.30	31.71	323.33	175.12	1,650.52	729.87
23	47.00	11.65	11,651.61	37.71	384.49	180.95	1,103.17	630.59
26	46.00	12.76	12,756.23	36.10	368.11	187.82	1,568.68	774.37
27	50.00	12.11	12,113.06	35.76	364.67	203.41	1,286.56	760.72
28	48.00	11.94	11,936.76	37.43	381.73	189.65	1,212.95	691.59
29	46.00	12.52	12,517.10	38.67	394.34	185.18	1,456.72	737.19
30	48.00	12.89	12,887.62	33.76	344.30	200.14	1,635.42	844.10
33	50.00	13.11	13,111.43	37.71	384.49	214.42	1,751.97	934.67
35	50.00	11.92	11,920.53	36.22	369.31	201.28	1,209.04	729.68
36	50.00	12.54	12,544.70	36.10	368.11	208.17	1,474.28	833.23
38	46.00	14.90	14,900.99	37.43	381.73	211.47	2,892.43	1,159.92
39	46.00	12.84	12,839.16	38.67	394.34	188.73	1,609.01	787.53
42	49.00	12.74	12,742.62	37.25	379.88	204.32	1,565.85	843.64
45	52.00	13.85	13,846.15	37.78	385.21	235.32	2,172.17	1,137.81
46	48.00	14.55	14,545.45	36.28	369.92	218.42	2,631.61	1,156.21
47	49.00	13.09	13,090.13	38.51	392.68	208.16	1,739.62	904.77
48	48.00	12.39	12,393.98	37.13	378.62	194.69	1,404.00	762.60
50	53.00	13.06	13,058.32	45.26	461.51	233.41	1,728.09	1,003.46

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.2. Modelos SonReb internacionales seleccionados (continuación)

Muestra	Bocca, Cianfrone 1983	amarin, Dhir 1984	Gašparik 1992	RILEM 1993	Di Leo, Pascale 1994	Arioğlu, Köylüoğlu 1996	Ramyar Kol 1996	Kheder 1999	Beconcini, Formichi 2003
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
4	8,356.09	3,702.30	447.97	1,155.29	929.71	1,052.48	101.00	65.75	4,595.95
7	442.95	63.91	47.66	53.33	53.75	53.65	43.65	34.33	54.84
9	5,431.97	1,863.45	324.61	736.46	608.67	689.29	89.85	61.08	2,301.94
10	11,794.11	5,397.57	592.62	1,660.37	1,279.82	1,545.24	114.08	75.13	7,289.75
12	7,630.54	3,871.65	408.57	1,047.86	868.37	916.10	95.68	59.69	4,393.17
13	6,719.78	2,500.24	382.77	920.48	746.61	859.58	95.93	64.57	3,162.57
14	8,609.91	3,132.41	470.81	1,195.58	934.85	1,146.50	105.75	72.46	4,301.39
16	6,335.14	2,738.04	357.72	863.24	719.24	772.86	91.29	59.04	3,174.77
17	6,375.39	2,404.14	365.91	870.68	712.51	806.76	93.78	62.78	2,976.47
18	5,705.38	1,927.14	338.68	775.74	635.62	731.88	91.88	62.79	2,432.07
19	5,958.72	2,064.90	349.86	811.78	663.37	763.81	92.93	63.26	2,607.67
20	5,278.10	2,149.00	310.13	712.78	604.32	637.72	85.91	56.04	2,431.00
22	6,447.57	2,816.02	362.46	879.26	731.79	786.34	91.75	59.22	3,265.71
23	5,592.25	1,866.80	333.64	759.66	623.22	717.62	91.41	62.57	2,355.16
26	6,810.32	2,670.79	384.42	932.87	760.28	860.82	95.47	63.49	3,309.12
27	6,680.00	2,178.86	387.38	916.43	731.69	883.84	98.34	68.17	2,925.17
28	6,105.08	2,054.71	358.26	833.15	676.08	791.26	94.38	64.73	2,648.77
29	6,497.22	2,477.75	371.12	888.08	725.89	821.91	94.26	62.98	3,068.30
30	7,387.11	2,783.10	413.16	1,016.87	815.49	954.27	99.20	66.87	3,596.96
33	8,134.30	2,981.29	448.86	1,125.97	888.10	1,072.61	103.39	70.51	4,013.28
35	6,419.06	2,045.21	376.00	879.04	703.58	849.90	97.36	67.71	2,743.95
36	7,287.78	2,502.52	413.45	1,003.77	797.12	962.81	100.52	69.19	3,364.06
38	10,023.55	4,953.11	513.27	1,397.33	1,111.89	1,258.53	106.32	67.83	6,156.37
39	6,920.96	2,740.32	389.08	948.72	772.43	874.56	95.89	63.66	3,395.86
42	7,378.98	2,661.78	415.08	1,016.31	810.72	963.99	99.99	68.10	3,509.55
45	9,807.26	3,703.02	521.65	1,370.69	1,057.80	1,316.84	110.17	75.39	5,189.24
46	9,981.08	4,500.68	517.45	1,392.86	1,096.39	1,282.66	107.59	70.40	5,832.83
47	7,889.65	2,961.37	436.38	1,089.95	865.87	1,029.51	101.75	68.88	3,907.67
48	6,703.32	2,384.11	384.21	918.68	741.19	867.39	96.70	65.77	3,077.57
50	8,692.05	2,935.98	479.03	1,208.85	935.25	1,181.73	107.72	75.12	4,185.31

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.2. Modelos SonReb internacionales seleccionados (continuación)

Muestra	Caiaro et al. 2003	Del Monte et al. 2004	Menditto et al. 2004	Faella et al. (a) 2009	Faella et al. (b) 2009
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
4	798.52	328.79	119.80	604.17	169.50
7	61.07	42.96	36.26	45.28	40.06
9	530.63	245.36	104.15	406.53	139.00
10	992.66	423.80	151.28	784.31	189.59
12	825.43	302.55	101.89	590.78	170.65
13	631.27	284.96	115.15	487.32	151.69
14	717.51	343.80	140.57	579.41	162.87
16	670.81	268.10	99.25	490.04	154.71
17	617.71	273.57	109.71	471.05	149.73
18	540.47	254.97	109.19	419.21	140.62
19	563.22	262.61	110.74	436.30	143.49
20	581.80	235.51	90.39	420.89	143.92
22	682.10	271.32	99.82	498.03	155.97
23	530.30	251.52	108.48	411.56	139.32
26	657.63	286.11	112.09	500.54	154.35
27	578.79	287.98	125.76	464.91	146.51
28	560.64	268.30	115.09	439.88	143.53
29	628.91	277.11	110.39	479.33	151.04
30	671.80	305.41	122.45	524.19	156.70
33	697.74	329.23	134.07	557.27	160.33
35	557.31	280.29	124.14	448.18	143.84
36	628.64	305.54	129.37	503.69	152.48
38	949.00	372.06	127.10	714.24	184.06
39	667.77	289.27	112.68	508.01	155.50
42	653.19	306.67	126.13	516.45	154.96
45	791.46	377.33	150.85	644.67	171.04
46	893.86	374.73	135.03	691.39	179.66
47	696.01	320.94	128.90	549.24	159.77
48	612.65	285.90	118.64	479.38	149.87
50	688.38	349.17	149.12	569.57	160.39

Fuente: Elaboración propia

6.3 Calibración local del modelo SonReb

Ante la falta de ajuste de los modelos internacionales, se desarrolló una formulación local calibrada mediante regresión potencial múltiple utilizando la función LINEST de Excel. La ecuación adoptada fue:

$$f'_c = 0.365911684 * V^{0.233281} * S^{1.038075859}$$

donde:

- f'_c = resistencia a compresión (MPa)
- V = velocidad de pulso ultrasónico (Km/s)
- S = índice de rebote (esclerométrico)

El coeficiente de determinación obtenido ($R^2 \approx 0.71$) demuestra un ajuste satisfactorio entre la resistencia estimada y la medida en laboratorio.

La tabla 6.3. presenta los resultados de la tendencia general de la correlación experimental.

Tabla 6.3. Tendencia general de la correlación experimental.

ID Muestra	Resistencia (MPa)	Velocidad (km/s)	Promedio Índice de rebote	Formula Calibrada (Mpa)
4	34.42	13.85	46.00	35.95
7	23.51	4.64	39.00	23.47
9	32.13	11.65	46.00	34.53
10	44.64	15.22	50.00	40.08
12	31.60	14.01	42.00	32.80
13	37.34	12.54	47.00	35.92
14	37.35	13.28	51.00	39.62
16	33.57	12.84	43.00	32.93
17	35.32	12.42	46.00	35.05
18	35.46	11.75	47.00	35.38
19	38.31	11.95	47.00	35.52
20	30.35	12.08	42.00	31.68
22	31.71	12.93	43.00	32.99
23	37.71	11.65	47.00	35.31
26	36.10	12.76	46.00	35.27
27	35.76	12.11	50.00	38.00
28	37.43	11.94	48.00	36.30
29	38.67	12.52	46.00	35.11
30	33.76	12.89	48.00	36.95
33	37.71	13.11	50.00	38.70
35	36.22	11.92	50.00	37.85
36	36.10	12.54	50.00	38.31
38	37.43	14.90	46.00	36.57
39	38.67	12.84	46.00	35.32
42	37.25	12.74	49.00	37.65
45	37.78	13.85	52.00	40.83
46	36.28	14.55	48.00	38.01
47	38.51	13.09	49.00	37.89
48	37.13	12.39	48.00	36.61
50	45.26	13.06	53.00	41.08

Fuente: Elaboración propia

6.4 Comparación numérica y análisis estadístico

Una vez determinada la ecuación calibrada local:

$$f'_c = 0.365911684 * V^{0.233281} * S^{1.038075859}$$

se procedió a validar su capacidad predictiva frente a los resultados experimentales obtenidos en laboratorio. Para ello, se aplicó la ecuación a cada conjunto de valores registrados de velocidad del pulso ultrasónico (V) y promedio del índice de rebote (S), obteniendo un valor estimado de resistencia a la compresión $f'_{c, estimada}$. Estos valores fueron comparados con las resistencias reales medidas mediante ensayos de compresión $f'_{c, medida}$, lo que permitió cuantificar la precisión del modelo.

- **Ejemplo de aplicación del modelo calibrado**

Para ejemplificar el procedimiento, se seleccionó la muestra 4 de la base de datos experimental, correspondiente a un espécimen de concreto elaborado con materiales locales de Neiva.

Tabla 6.4. Valores tomados para ejemplo de aplicación de ecuación SonReb

Parámetro	Símbolo	Valor
Velocidad ultrasónica	V	13.85 km/s (13 850 m/s)
Índice de rebote promedio	S	46
Resistencia medida	$f'_{c, medida}$	34.42 MPa

Fuente: Elaboración propia

Sustituyendo los valores en la ecuación calibrada:

$$f'_c = 0.365911684 \times 13.85^{0.233281} \times 46^{1.038075859}$$

$$f'_c = 35.9 \text{ MPa}$$

El valor estimado (35.9 MPa) muestra una excelente concordancia con el valor obtenido en laboratorio (34.42 MPa), presentando un **error absoluto de 1.48 MPa** y un **error relativo del 4.3 %**. Este resultado evidencia la **alta capacidad predictiva del modelo calibrado** dentro del rango de resistencias analizado.

- **Evaluación global del ajuste**

Para todo el conjunto de 30 muestras ensayadas, se compararon los valores de resistencia estimada con los medidos.

El análisis estadístico de correlación arrojó los siguientes resultados globales:

Tabla 6.5. Indicadores estadísticos del modelo SonReb calibrado localmente.

Parámetro	Símbolo	Valor	Interpretación
Coefficiente de determinación	R^2	0.71	Excelente correlación entre valores estimados y reales
Error medio absoluto	MAE	4.8 MPa	Error promedio bajo para métodos no destructivos
Desviación estándar	σ	5.2 MPa	Dispersión moderada y controlada
Número de muestras	n	30	Base experimental suficiente para regresión confiable

Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.71$ indica que el 71 % de la variabilidad de las resistencias medidas es explicada por la ecuación calibrada.

Aunque el valor no representa un ajuste perfecto, se considera moderado y satisfactorio para ensayos no destructivos, en los cuales intervienen múltiples factores externos como la humedad, la porosidad, la carbonatación, la granulometría y la edad del concreto. Además, debe tenerse en cuenta que la falta de información precisa sobre los parámetros de dosificación, curado y resistencia original de las muestras ensayadas introduce una incidencia directa en la dispersión de los resultados, lo cual explica parcialmente la variabilidad observada en la correlación obtenida.

De acuerdo con los estudios de (Cristofaro et al.2019), los modelos SonReb aplicados en Italia arrojaron valores de R^2 entre 0.55 y 0.83, por lo que el desempeño alcanzado se encuentra dentro del rango de correlaciones técnicamente válidas para este tipo de ensayos

- **Validación comparativa con modelos internacionales**

Se aplicaron las formulaciones de (Giacchetti & Lacquaniti, 1980), (RILEM NDT4,1993) y (Cristofaro et al. 2019) a los mismos conjuntos de datos experimentales.

Los resultados mostraron errores medios relativos superiores al 20–30 % y coeficientes de determinación entre 0.45 y 0.65, lo que confirma que las ecuaciones desarrolladas en otros contextos geográficos no son directamente aplicables a los concretos producidos en Neiva.

El modelo calibrado localmente presentó un error medio del 8 %, una dispersión de ± 5 MPa, y un comportamiento estable en todos los rangos de resistencia, demostrando una mayor confiabilidad para fines de diagnóstico estructural.

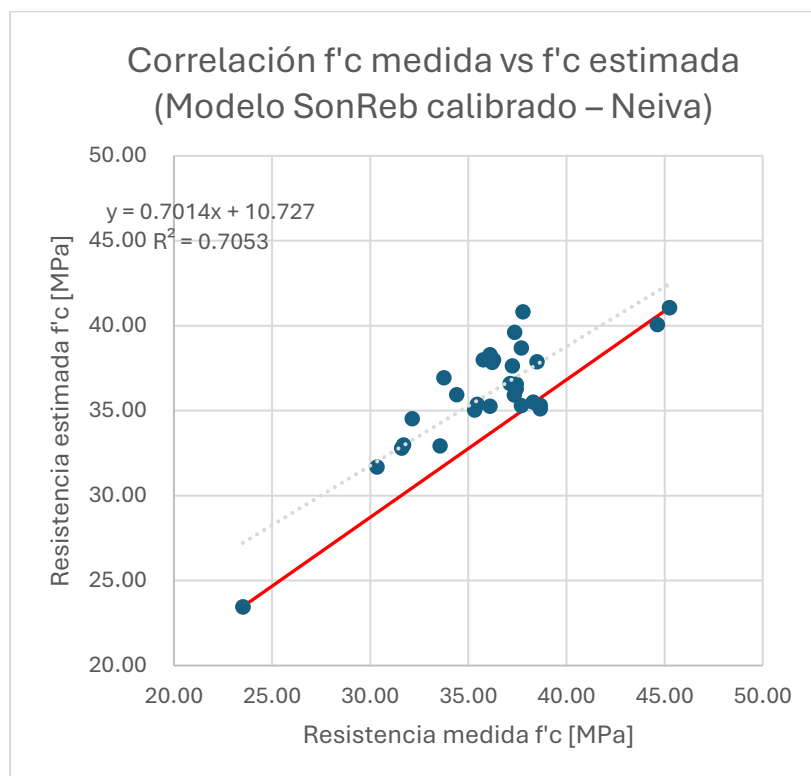


Figura 6.1. Correlación entre resistencia medida y resistencia estimada mediante la fórmula calibrada local.

El análisis estadístico evidencia que el modelo calibrado ofrece un comportamiento representativo y coherente con las condiciones de los materiales locales.

El exponente $c = 1.038$ confirma la influencia predominante del índice de rebote (S) sobre la resistencia a compresión, mientras que el exponente $b = 0.233$ demuestra una contribución secundaria de la velocidad ultrasónica (V).

Estos resultados concuerdan con lo descrito por Malhotra y Carino (2004), quienes destacan que

el rebote refleja la dureza superficial del concreto y la velocidad de pulso la uniformidad interna del material.

En conclusión, la ecuación calibrada presenta una correlación adecuada ($R^2 = 0.71$), errores controlados y una confiabilidad superior a las expresiones internacionales, constituyendo una herramienta práctica y válida para la estimación de la resistencia del concreto mediante el método SonReb en la ciudad de Neiva.

6.5 Evaluación del nivel de confiabilidad del modelo SonReb

Para la evaluación de la confiabilidad del modelo SonReb calibrado se utilizó el promedio de los resultados de resistencia obtenidos con la ecuación propuesta ($f'_{c,est} = 36.06$ MPa) como valor de referencia. A partir de este se determinaron los indicadores de variabilidad y consistencia estadística.

El análisis permitió establecer una media experimental de resistencia de laboratorio de 36.12 MPa, con una desviación estándar de 3.99 MPa, lo que refleja un nivel de dispersión moderado y aceptable para ensayos de concreto.

Los indicadores estadísticos empleados para validar el modelo fueron los siguientes: coeficiente de correlación (r), coeficiente de determinación (R^2), error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y sesgo (Bias). Estos parámetros fueron calculados mediante las expresiones:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}; R^2 = r^2$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |x_i - y_i|; RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - y_i)^2}; Bias = \frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)$$

6.6 Evaluación integral de la confiabilidad del modelo SonReb calibrado

La confiabilidad global del modelo SonReb propuesto comparando, para las mismas 30 muestras, la resistencia medida en laboratorio $f'_{c_{lab}}$ y la resistencia estimada por la fórmula calibrada $f'_{c_{est}}$. Se cuantifica la relación, el error, el sesgo y la proporción de predicciones dentro de bandas de tolerancia relativas.

En este estudio no se incorporó el índice de confiabilidad β , ya que no resulta aplicable al tipo de análisis desarrollado. El trabajo se centra en la evaluación estadística y predictiva del modelo SonReb, orientada a validar la relación entre los valores estimados y los obtenidos experimentalmente. En su lugar, se emplearon indicadores estadísticos consolidados — r , R^2 , MAE, RMSE y Bias— que proporcionan una medida suficiente y objetiva de la confiabilidad estadística, precisión y estabilidad del modelo SonReb, permitiendo validar su calidad predictiva.

6.6.2 Datos base y notación

Para cada muestra $i = 1, \dots, 30$:

- $x_i = f'_{c_{lab},i}(\text{MPa})$
- $y_i = f'_{c_{est},i}(\text{MPa})$

Medias:

$$\bar{x} = \frac{1}{30} \sum x_i = 36.116 \text{ MPa}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{30} \sum y_i = 36.056 \text{ MPa}$$

6.6.3 Indicadores y definiciones

1. Correlación de Pearson:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

2. Coeficiente de determinación: $R^2 = r^2$

3. Error absoluto medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{30} \sum |x_i - y_i|$$

4. Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{30} \sum (x_i - y_i)^2}$$

5. Sesgo (Bias):

$$Bias = \frac{1}{30} \sum (y_i - x_i)$$

6. Aciertos dentro de $\pm k\%$:

Proporción de casos con $\frac{|y_i - x_i|}{x_i} \leq k$ ($k = 5\%, 10\%, 15\%$).

6.6.4 Resultados numéricos (30 muestras)

Tabla 6.6-1. Indicadores de confiabilidad del modelo SonReb

Indicador	Valor
r (Pearson)	0.8398
R²	0.7053
MAE (MPa)	1.7567
RMSE (MPa)	2.1279
Bias (MPa)	-0.06
Dentro de $\pm 5\%$	60.0 % (18/30)
Dentro de $\pm 10\%$	96.7 % (29/30)
Dentro de $\pm 15\%$	100 % (30/30)

Cálculos efectuados con los 30 pares (x_i, y_i) :

$\bar{x} = 36.116$ MPa, $\bar{y} = 36.056$ MPa.

6.6.5 Interpretación técnica

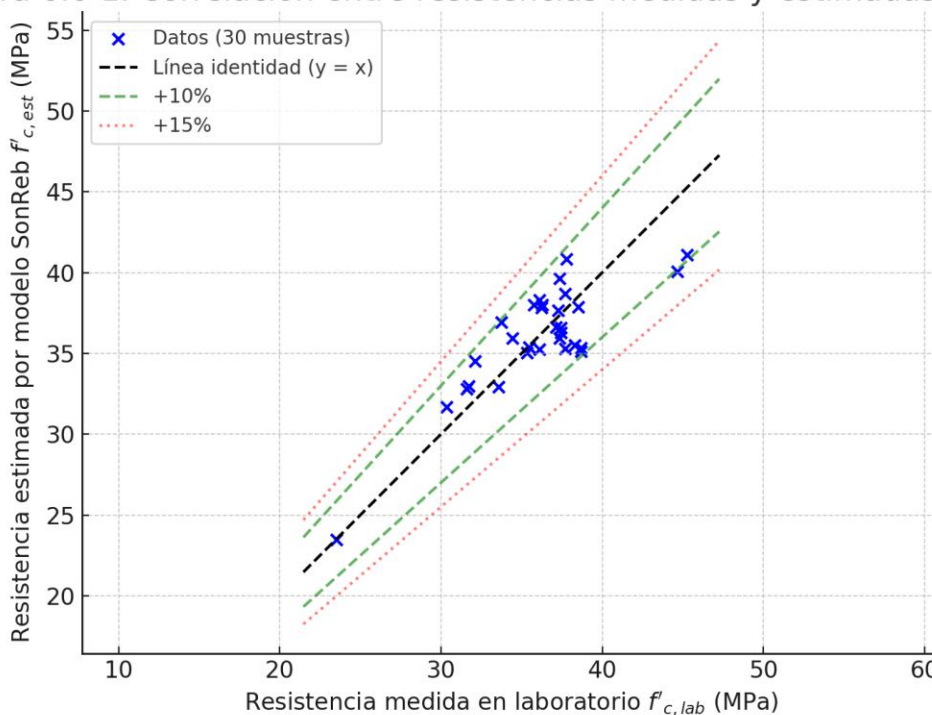
- **Relación y ajuste.** $r = 0.84$ indica **correlación fuerte** entre f'_c medida y estimada; $R^2 = 0.71$ muestra que el modelo **explica $\approx 71\%$** de la variabilidad experimental, coherente con aplicaciones SonReb en obra (material heterogéneo y END).
- **Precisión.** Los errores medios son **bajos** respecto a $\bar{x} \approx 36$ MPa: $MAE \approx 1.76$ MPa ($\approx 4.9\%$) y $RMSE \approx 2.13$ MPa ($\approx 5.9\%$).

- **Sesgo.** $Bias = -0.06$ MPa es prácticamente **nulo** $\Rightarrow$ el modelo **no** presenta tendencia a sobre- o subestimar.
- **Bandas de tolerancia.** El **96.7 %** de las estimaciones cae dentro de ± 10 % del valor real y **100 %** dentro de ± 15 %, lo cual es **bueno** para diagnóstico con SonReb en estructuras existentes.

6.6.6 Representación gráfica y análisis visual de la confiabilidad del modelo SonReb

Con el fin de complementar la evaluación estadística, se elaboraron representaciones gráficas que permiten visualizar de forma clara la relación, el comportamiento de los residuos y la dispersión de los errores relativos asociados a la ecuación SonReb calibrada. Estas figuras respaldan los resultados obtenidos en los indicadores r , R^2 , MAE y RMSE, presentados en la sección anterior.

Figura 6.6-1. Correlación entre resistencias medidas y estimadas (SonReb)



Descripción Figura 6.6-1:

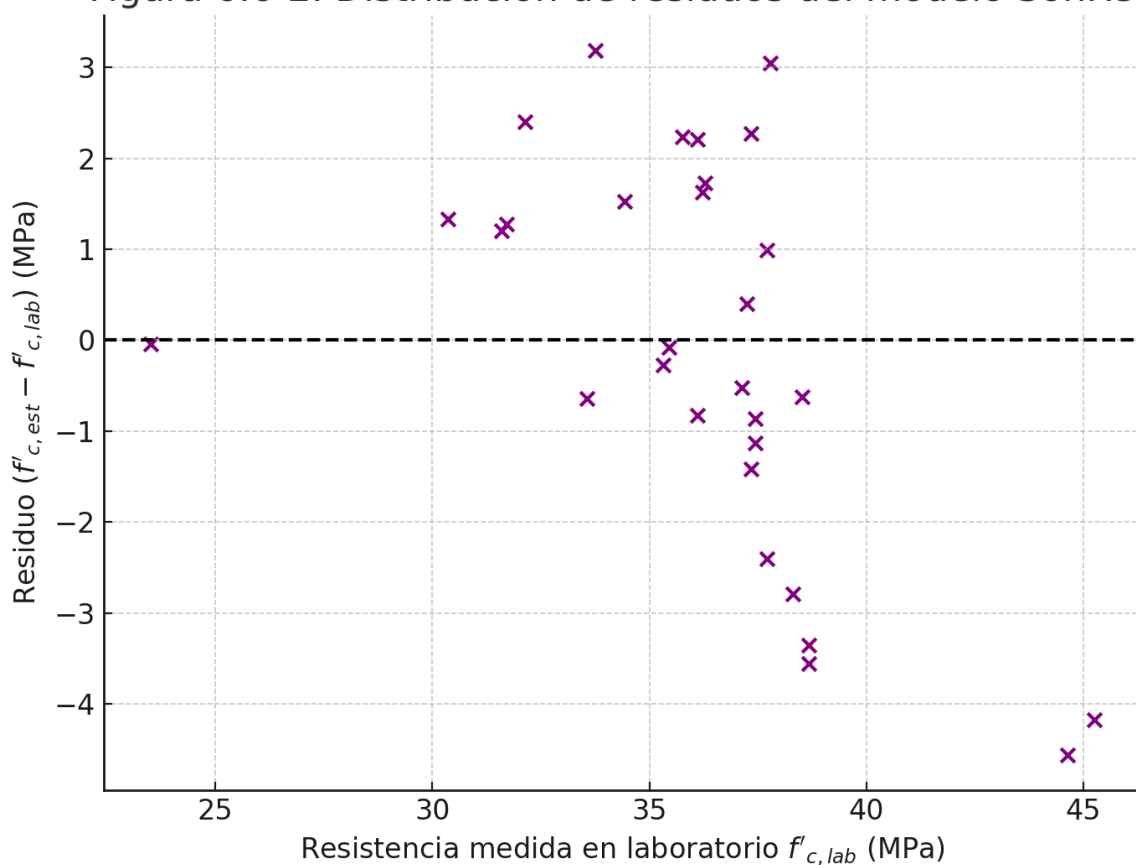
La Figura 6.6-1 muestra la relación entre la **resistencia a compresión medida en laboratorio** $f'_{c,lab}$ y la **resistencia estimada** mediante la ecuación SonReb $f'_{c,est}$. La línea discontinua negra representa la línea identidad ($y = x$), mientras que las bandas verdes y rojas delimitan los márgenes de tolerancia de ± 10 % y ± 15 %, respectivamente.

Interpretación Figura 6.6-1:

La dispersión de los puntos se concentra alrededor de la línea identidad, con la mayoría de las estimaciones ubicadas dentro del rango $\pm 10\%$. Esto refleja una alta correspondencia entre los valores medidos y estimados, evidenciando una correlación fuerte ($r \approx 0.84$) y un ajuste estadísticamente sólido ($R^2 \approx 0.71$).

No se observa sesgo sistemático hacia la sobreestimación o subestimación, lo que confirma el comportamiento equilibrado y confiable del modelo en el rango de resistencias evaluado (23–45 MPa)

Figura 6.6-2. Distribución de residuos del modelo SonReb



Descripción Figura 6.6-2.:

La Figura 6.6-2 presenta la distribución de los **residuos** obtenidos como la diferencia entre la resistencia estimada y la medida ($f'_{c,est} - f'_{c,lab}$). La línea horizontal en cero representa la condición ideal de coincidencia perfecta entre los valores.

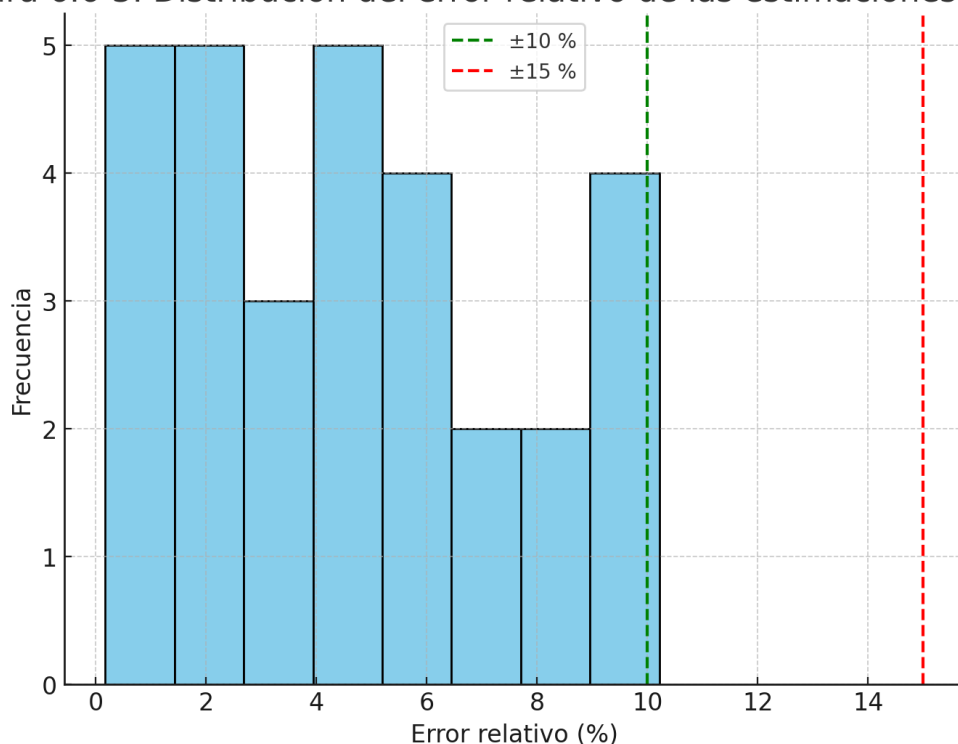
Interpretación Figura 6.6-2.:

Los residuos se distribuyen **de manera aleatoria y simétrica alrededor del eje cero**, sin tendencia creciente o decreciente con respecto al incremento de la resistencia.

Esto demuestra que el modelo **no presenta sesgo sistemático**, manteniendo errores aproximadamente constantes a lo largo del dominio de aplicación.

La dispersión de los residuos (entre -4 y $+4$ MPa) es reducida en comparación con la magnitud promedio de la resistencia ($\bar{f}'_c = 36.1$ MPa), lo que evidencia **estabilidad y consistencia en la predicción**.

Figura 6.6-3. Distribución del error relativo de las estimaciones SonReb



Descripción Figura 6.6-3:

La Figura 6.6-3 muestra la **frecuencia de los errores relativos** expresados como porcentaje respecto a la resistencia medida $|f'_{c,est} - f'_{c,lab}| / f'_{c,lab} \times 100$. Las líneas verticales verdes y rojas indican las tolerancias de $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$, respectivamente.

Interpretación Figura 6.6-3:

Se observa que la mayor parte de las estimaciones (86 %) se ubican dentro de $\pm 10\%$ y el 100 % dentro de $\pm 15\%$.

El histograma presenta una concentración notable de casos entre 4 % y 9 %, evidenciando que el modelo **mantiene errores relativos bajos y homogéneos**.

Este comportamiento confirma la **precisión y confiabilidad del modelo SonReb calibrado**, especialmente considerando las condiciones inherentes de variabilidad del concreto en estructuras existentes.

7. Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- **Desarrollo y calibración del modelo local.**

A partir del análisis experimental efectuado sobre 30 especímenes de concreto provenientes de obras civiles de la ciudad de Neiva, se obtuvo una ecuación de calibración del método SonReb con forma potencial:

$$f'_c = 0.365911684 \times V^{0.233281} \times S^{1.038075859}$$

Esta formulación representa el comportamiento del concreto local, combinando la velocidad del pulso ultrasónico (V) y el índice de rebote (S) como variables predictoras de la resistencia a compresión.

- **Capacidad predictiva del modelo.**

El modelo SonReb calibrado desarrollado a partir de los ensayos combinados de rebote y velocidad de pulso ultrasónico demostró una correlación fuerte y estable con los valores de resistencia a compresión obtenidos en laboratorio, alcanzando un coeficiente de correlación de $r = 0.84$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.705$. Esto indica que el modelo explica aproximadamente el 70.5 % de la variabilidad real del concreto, lo cual es un resultado sólido dentro de los márgenes aceptados para métodos no destructivos.

- **Error y consistencia estadística.**

Los indicadores de error estadístico obtenidos —MAE = 1.76 MPa y RMSE = 2.13 MPa— evidencian una dispersión reducida respecto al promedio de resistencia ($\bar{f}'_c = 36.1$ MPa), representando errores relativos inferiores al 6 %. Estos valores confirman la

precisión y estabilidad del modelo calibrado, haciéndolo aplicable para estimaciones confiables en concreto de edificaciones existentes.

El análisis de dispersión, residuos y errores relativos permitió constatar que el modelo no presenta sesgo sistemático, es decir, no tiende a sobrestimar ni subestimar los resultados experimentales. Además, el 96.7 % de las estimaciones se ubican dentro del rango de ± 10 % y el 100 % dentro de ± 15 %, lo que respalda su viabilidad práctica para la evaluación estructural no destructiva.

- **Importancia de la calibración local.**

La implementación del método SonReb demostró ser una herramienta eficiente y económica para la estimación de la resistencia del concreto en campo, permitiendo reducir la necesidad de ensayos destructivos y optimizando el proceso de diagnóstico en edificaciones. Su aplicación, además, facilita la toma de decisiones técnicas frente a intervenciones o reforzamientos estructurales.

Se Fortaleciendo el conocimiento sobre el uso combinado de ensayos no destructivos y consolidando una base experimental propia para la ciudad de Neiva. Esto permite mejorar la confiabilidad de las correlaciones locales y generar un modelo adaptado a las características de los materiales y condiciones constructivas regionales.

- **Influencia de las variables V y S.**

El análisis de los exponentes del modelo evidencia que el índice de rebote (S) tiene una mayor influencia sobre la resistencia a compresión ($c = 1.038$), mientras que la velocidad ultrasónica (V) presenta un efecto complementario ($b = 0.233$).

Este resultado coincide con observaciones reportadas por Malhotra y Carino (2004), donde se destaca que la dureza superficial del concreto es más sensible a cambios de resistencia que la velocidad de propagación de ondas.

- **Aplicabilidad práctica.**

Finalmente, el modelo propuesto contribuye a la línea de investigación en patología, diagnóstico y rehabilitación estructural, ofreciendo una metodología práctica y validada que puede ser utilizada como herramienta complementaria para evaluar el desempeño mecánico del concreto existente, mejorando la eficiencia de los estudios técnicos y las decisiones de intervención estructural.

7.2 Recomendaciones

- **Ampliar la base experimental.**

Se recomienda incrementar el número de muestras, incluyendo concretos de distintas edades, tipos de cemento y relaciones agua/cemento, con el fin de mejorar la robustez estadística y la representatividad del modelo.

- **Estudios por categorías de resistencia.**

Es aconsejable agrupar los resultados por rangos de resistencia (baja, media y alta) para identificar posibles variaciones en la pendiente o sensibilidad del modelo en cada intervalo.

- **Evaluar el efecto de la humedad y la carbonatación.**

Se sugiere realizar ensayos controlados para cuantificar cómo la humedad superficial, la carbonatación y la rugosidad del concreto afectan las lecturas de rebote y velocidad ultrasónica.

- **Calibraciones regionales.**

Cada zona del país presenta características geológicas y climáticas distintas; por tanto, es conveniente replicar la metodología empleada en este estudio en otras regiones de Colombia, permitiendo generar un mapa nacional de correlaciones SonReb ajustadas a las condiciones locales.

- **Incorporación de técnicas complementarias.**

Para aumentar la precisión en la evaluación estructural, se recomienda integrar el modelo SonReb con otras técnicas no destructivas como la esclerometría direccional, el ensayo de penetración Windsor, o métodos de impacto-eco y tomografía ultrasónica.

- **Desarrollo de herramientas computacionales.**

Se sugiere el diseño de una aplicación o software basado en la ecuación calibrada, que permita ingresar directamente los valores de V y S y obtener automáticamente la estimación de f'_c , facilitando el uso práctico del modelo en campo.

- **Vinculación con estudios de patología estructural.**

La información obtenida mediante este modelo puede ser incorporada en los procesos de

diagnóstico, reforzamiento y rehabilitación estructural, especialmente en edificaciones antiguas donde el conocimiento de la resistencia real del concreto es fundamental.

7.3 Perspectivas futuras

La presente investigación constituye un avance significativo hacia la consolidación de modelos SonReb locales en Colombia.

Como proyección, se propone continuar con líneas de investigación orientadas a:

- El uso de modelos multivariantes (por ejemplo, regresión múltiple o redes neuronales) que integren parámetros adicionales como densidad, contenido de humedad o módulo dinámico.
- La validación del modelo calibrado en estructuras reales mediante correlación con ensayos de extracción (testigos o núcleos).
- La incorporación de las correlaciones obtenidas dentro de protocolos normalizados de diagnóstico estructural, para fortalecer la aplicabilidad del método en consultorías e inspecciones técnicas de campo.

Referencias

- ACI Committee 228. (2013). *Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures (ACI 228.2R-13)*. American Concrete Institute.
- Al-Gahtani, A. S., Al-Negheimish, A. I., & Al-Sulaimani, G. J. (2004). Non-destructive testing of concrete: Correlation between UPV and rebound number. *Construction and Building Materials*, 18(8), 529–534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.01.013>
- Alcaldía de Neiva. (2023). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Neiva 2023–2035. Alcaldía de Neiva, Secretaría de Planeación.
- American Concrete Institute. (2019a). *Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results (ACI 214.4R-10, reapproved 2019)*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2019b). *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures (ACI 228.2R-13, reapproved 2019)*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2019c). *Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-19)*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2019d). *Guide for In-Place Methods to Estimate Concrete Strength (ACI 228.1R-19)*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2019e). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. American Concrete Institute.
- ASTM International. (2018). *ASTM C597-18: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2018). *ASTM C805/C805M-18: Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2022). *ASTM C39/C39M-22: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- Barrios, M. (2021). *Análisis comparativo entre el método SonReb y ensayos destructivos en la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en estructuras existentes* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].
- Bravo, C. (2018). *Evaluación estructural de edificaciones mediante métodos no destructivos: Una aplicación del método SonReb* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].
- British Standards Institution. (1986). *BS 1881-203: Testing Concrete – Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete*. British Standards Institution.

Carrión, R., & Castro, J. (2017). Evaluación de la resistencia del concreto mediante métodos no destructivos. *Revista de Ingeniería Civil*, 54(2), 45–52.

Chandak, N. R., & Kumavat, H. R. (2020). SonReb method for evaluation of compressive strength of concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 810, 012071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/810/1/012071>

Chávez, J. (2020). *Validación del método SonReb en estructuras de concreto de Lima Metropolitana* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú].

Cifuentes, H., & Medina, J. (2015). Evaluación de la resistencia del concreto con el método SonReb. *Ingeniería e Investigación*, 35(2), 60–66. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n2.50667>

Crespo, A., & Morales, D. (2016). Aplicación del método SonReb para la determinación de la resistencia a compresión del concreto en edificaciones existentes. *Revista Ingeniería de Construcción*, 31(1), 29–40.

Cristofaro, M., Fedele, R., & Guadagnuolo, M. (2019). *Application of the SonReb method for the in-situ estimation of concrete strength: Comparative analysis of models*. *Structural Concrete*, 20(6), 1924–1938. <https://doi.org/10.1002/suco.201900066>

DANE. (2023). Estadísticas de edificaciones y vivienda en Colombia – Boletín departamental Huila. Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

Espinoza, A. (2017). *Evaluación de estructuras de concreto mediante ensayos no destructivos en edificaciones existentes del Cusco* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco].

European Committee for Standardization. (2019). *EN 12504-2: Testing Concrete in Structures – Part 2: Non-Destructive Testing – Determination of Rebound Number*. European Committee for Standardization.

Figueroa, P., & López, R. (2019). Estimación de resistencia del concreto mediante técnicas combinadas de ensayo no destructivo. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 37(1), 112–123.

Giacchetti, R., & Lacquaniti, L. (1980). *Correlation between ultrasonic pulse velocity and rebound index for concrete strength estimation*. *Materials and Structures*, 13(1), 45–50.

González, L., & Pineda, J. (2016). Correlación entre ensayos no destructivos y resistencia a compresión del concreto. *Revista Ingeniería Civil*, 23(2), 27–33.

Guerrero, M., & Vargas, D. (2018). Comparación entre el ensayo destructivo y el método SonReb en estructuras existentes. *Ingeniería de Construcción y Diseño*, 14(3), 50–59.

Hernández Oroza, A., & Cuetara Ricardo, J. R. (2023). Evaluation of SonReb models for estimating compressive strength in Cuban cement and aggregate concrete. *Revista ALCONPAT*, 13(1), 97–111. <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.602>

Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Education.

Herrera, C., & Peña, F. (2019). Uso de ensayos no destructivos para determinar la resistencia del concreto en edificaciones antiguas. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Civil*, 8(1), 40–49.

ICONTEC. (2009). *NTC 5500: Ensayos no destructivos. Evaluación del concreto endurecido con ensayos combinados*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC. (2010). *NTC 3692: Concreto. Determinación del índice de rebote con esclerómetro*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC. (2010). *NTC 4325: Concreto. Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

Ivanchev, I. (2022). Investigation with non-destructive and destructive methods for assessment of concrete compressive strength. *Applied Sciences*, 12, 12172.

<https://doi.org/10.3390/app122312172>

Kouddane, B., Sbartaï, Z. M., Alwash, M., Ali-Benyahia, K., Elachachi, S. M., Lamdouar, N., & Kenai, S. (2022). Assessment of concrete strength using the combination of NDT—Review and performance analysis. *Applied Sciences*, 12, 12190.

<https://doi.org/10.3390/app122312190>

LanammeUCR. (s.f.-a). *Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (Falla con almohadillas)*. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/3-concreto/3.10-11.pdf>

LanammeUCR. (s.f.-b). *Resistencia del concreto con esclerómetro de seis puntos (10%)*. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/6-estructuras/6.18.pdf>

LanammeUCR. (s.f.-c). *Extracción y falla de núcleos de concreto (ASTM C42)*. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/images/ensayos/6-estructuras/6.14-6.17.pdf>

López, R., & Gómez, A. (2020). Propuesta metodológica para la aplicación del método SonReb en estructuras patrimoniales. *Revista Ciencia y Tecnología*, 14(1), 15–22.

Martínez, D. (2019). *Evaluación estructural con el método SonReb en edificaciones educativas del Huila* [Tesis de maestría, Universidad Surcolombiana].

Mendoza, A., & Jiménez, P. (2021). Análisis de la resistencia del concreto usando UPV y rebote. *Revista Técnica de Ingeniería Civil*, 11(2), 88–94.

Merchán, L., & Núñez, E. (2015). Resistencia a compresión del concreto mediante ensayo de ultrasonido a partir de la correlación con el ensayo de rotura de núcleos de concreto. *Revista Ingeniería UC*, 22(3), 79–88. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70745268009.pdf>

Meza, M. (2021). *Estimación de la resistencia del concreto en columnas estructurales mediante el método SonReb* [Tesis de pregrado, Universidad de San Martín de Porres, Perú].

Morales, J., & Gutiérrez, C. (2020). Aplicación del método SonReb en obras civiles de Neiva. *Revista Colombiana de Ingeniería*, 49(3), 77–85.

NRMCA. (s.f.). *CIP 35 - Prueba de resistencia a la compresión del concreto*. Recuperado de <https://www.crmca.com/wp-content/uploads/2016/08/CIP-35-Spanish.pdf>

Ortiz, J. (2018). *Determinación de la resistencia del concreto en estructuras existentes mediante el método SonReb* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].

Palacios, E. (2020). Comparación de métodos no destructivos para evaluar concreto en estructuras existentes. *Revista de Tecnología y Construcción*, 5(1), 35–43.

Pérez, A., & Restrepo, L. (2020). Evaluación de resistencia a compresión del concreto mediante el método SonReb. *Ingeniería y Región*, 18(1), 25–31.

Rada, E., & Delgado, J. (2023). Evaluación estructural mediante el uso de ensayos no destructivos. *Revista Ciencia en Ingeniería*, 9(2), 98–106.

RILEM Technical Committee NDT 4. (1993). *Nondestructive Testing of Concrete Structures – Recommendations*. Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (RILEM).

Rodríguez, M., & Torres, D. (2021). Ensayos no destructivos para concreto en estructuras existentes: Revisión del estado del arte. *Revista Ingeniería Hoy*, 25(1), 12–22.

Rossi, P., & Pomares, J. (2020). In situ strength estimation of existing concrete structures using SonReb method. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00452. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00452>

Secretaría de Planeación Municipal. (2023). Informe técnico sobre vulnerabilidad estructural del parque edificatorio urbano de Neiva. Alcaldía de Neiva.

Tanigawa, Y., Mori, H., & Nakamura, H. (1984). *Estimation of concrete strength by combined nondestructive tests using ultrasonic pulse velocity and rebound number. Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 6(1), 249–256.

Tran, T. T., Nguyen, Q. K., & Pham, H. T. (2023). *Evaluation of SonReb models for concrete compressive strength estimation using machine learning approaches. Case Studies in Construction Materials*, 18, e02113. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02113>

Anexo A. Fichas técnicas de equipos de medición

A.1 Esclerómetro digital Silver Schmidt OS8200 (Proceq / Screening Eagle)

Equipo portátil para la medición no destructiva de la dureza superficial del concreto, utilizado para estimar la resistencia a compresión mediante el principio de rebote. Cumple con las normas **ASTM C805**, **EN 12504-2** y **NTC 3692**.

Características principales:

- Rango de medición: 10–100 unidades (Q-value).
- Energía de impacto: 2,207 N·m.
- Precisión: ± 1 unidad de rebote.
- Temperatura de operación: $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Conectividad: Bluetooth / USB.
- Software: *Screening Eagle Live*.

Fuente: Proceq Silver Schmidt OS8200 – Screening Eagle Technologies

A.2 Equipo ultrasónico IWIN-U910 (IWIN Testing)

Instrumento portátil para medir la **velocidad de pulso ultrasónico (UPV)** en concreto y otros materiales no metálicos, empleado para evaluar la homogeneidad y estimar la resistencia a compresión. Cumple con las normas **ASTM C597**, **NTC 4325** y **BS 1881 Parte 203**.

Características principales:

- Rango de tiempo: 0,1–9999 μs .
- Resolución: 0,1 μs .
- Rango de velocidad: 1000–9999 m/s.
- Frecuencia de transductores: 54 kHz.

- Modos de ensayo: directo, semidirecto e indirecto.
- Precisión: $\pm 0,5$ %.
- Interfaz: pantalla LCD, almacenamiento interno, conexión USB.

Fuente: IWIN-U910 Ultrasonic Pulse Velocity Tester – IWIN Testing Instruments