

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**“MODELO DE CALIBRACIÓN DE FACTOR R DE ESCLEROMETRÍA PARA $f'_c=210$
kg/cm² FRENTE DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EN CHOTA, 2025”**

Tesis para optar al título profesional de:
Ingeniero Civil

Autores:

Bach. Ronald Elvis Condorachay Tarrillo
Bach. Deyner Vásquez Peralta

Asesor:

Dr. Ing. Miguel Ángel Silva Tarrillo

Coasesor:

Dr. Ing. Dante Hartman Cieza León

**Chota - Perú
2026**



Colpa Matara, 14 de agosto del 2026.

C.O. N° 19-2026-UI-EPIC

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD Y USO DE IA

El que suscribe, Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de Chota, hace constar que el Informe Final de Tesis titulado: **“MODELO DE CALIBRACIÓN DE FACTOR R DE ESCLEROMETRÍA PARA $F'C = 210 \text{ KG/CM}^2$ FRENTE A COMPRESIÓN UNIAXIAL EN CHOTA, 2025”**, elaborado por los bachilleres en ingeniería civil: **Condorachay Tarrillo Ronald Elvis y Vásquez Peralta Deyner**, para optar el Título Profesional de ingeniero civil, presenta un índice de similitud de 10% excluyendo texto citado, bibliografía y fuentes que tengan coincidencias de menos de 10 palabras, no teniendo un porcentaje de escritura con inteligencia artificial; por lo tanto, cumple con los criterios de evaluación de originalidad establecidos en el acápite g) del artículo 20 del Reglamento de Grados y Títulos UNACH, aprobado mediante la Resolución C.O. N° 120-2022-UNACH con fecha de 03 de marzo de 2022.

Se expide la presente, en conformidad a la directiva antes mencionada, para los fines que estime pertinentes.

Miguel Ángel SILVA TARRILLO
INGENIERO CIVIL

Ing. Miguel Ángel Silva Tarrillo
Director de la unidad de
investigación FCI-UNACH

Ronald E. Condorachay Tarrillo y Deyner Vásquez P...

MODELO DE CALIBRACIÓN DE FACTOR R DE ESCLEROMETRÍA PARA $F'C = 210 \text{ KG/CM}^2$ FRENTE A COMPRESIÓN UNIAXIAL E...

-  Informe Final de Tesis
-  UNIDAD DE INVESTIGACION FIC 2026
-  Universidad Nacional Autonoma de Chota

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3627360264

Fecha de entrega

14 ago 2026, 8:09 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 ago 2026, 8:19 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

INFORME_FINAL_DE_TESIS_-_CONDORACHAY_TARRILLO_-_VÁSQUEZ_PERALTA_tnt.pdf

Tamaño del archivo

2.3 MB

81 páginas

19.615 palabras

110.713 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

8%	Fuentes de Internet
1%	Publicaciones
7%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Trabajos del estudiante Universidad Cesar Vallejo	1%
2	Internet repositorio.unach.edu.pe	<1%
3	Trabajos del estudiante Ingeniería	<1%
4	Internet repositorio.unc.edu.pe	<1%
5	Internet hdl.handle.net	<1%
6	Trabajos del estudiante uncedu	<1%
7	Internet www.campustudionline.com	<1%
8	Internet grupokb.com.mx	<1%
9	Internet alicia.concytec.gob.pe	<1%
10	Internet bibdigital.epn.edu.ec	<1%
11	Internet repositorio.ucv.edu.pe	<1%

12	Trabajos del estudiante	Docentes	<1%
13	Trabajos del estudiante	Universidad Privada del Norte	<1%
14	Trabajos del estudiante	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez	<1%
15	Trabajos del estudiante	Blackboard	<1%
16	Trabajos del estudiante	Universitat Oberta de Catalunya	<1%
17	Internet	repositorio.unj.edu.pe	<1%
18	Internet	repositorio.uss.edu.pe	<1%
19	Internet	repositorio.unfv.edu.pe	<1%
20	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional de Cajamarca	<1%
21	Internet	repositorio.ujcm.edu.pe	<1%
22	Internet	eprints.uanl.mx	<1%
23	Internet	repositorio.upt.edu.pe	<1%
24	Internet	repositorio.unprg.edu.pe	<1%
25	Internet	www.coursehero.com	<1%

26	Internet	repositorio.upn.edu.pe	<1%
27	Trabajos del estudiante	Universidad Anahuac México Sur	<1%
28	Internet	repositorio.utea.edu.pe	<1%
29	Internet	core.ac.uk	<1%
30	Internet	repositorio.uch.edu.pe	<1%
31	Internet	www.slideshare.net	<1%
32	Internet	repository.ucatolica.edu.co	<1%
33	Trabajos del estudiante	Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion	<1%
34	Internet	repositorio.upla.edu.pe	<1%
35	Internet	1library.co	<1%
36	Trabajos del estudiante	ULACIT Universidad Latinoamericana de Ciencia y Tecnología	<1%
37	Trabajos del estudiante	Universidad Tecnológica del Peru	<1%
38	Internet	www.scribd.com	<1%
39	Trabajos del estudiante	Universidad Privada Antenor Orrego 2025	<1%

54	Internet	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
55	Internet	tesis.usat.edu.pe	<1%
56	Internet	www.idexlab.com	<1%
57	Internet	www.repositorio.unach.edu.pe	<1%


 Miguel Ángel SILVA TARRILLO
 INGENIERO CIVIL
 CIP. 157782

Dr. Ing. Miguel Ángel Silva Tarrillo
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA

Ley de Creación N° 29531

LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 160-2018-SUNEDU/CD
DECANATO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Siendo las 03:00 p.m. del día Jueves 20 de agosto, reunidos en la sala de Incuba del local administrativo-UNACH, los miembros del jurado de tesis que suscriben, para escuchar y evaluar la sustentación de tesis presentado por los bachilleres: : Ronald Elvis Condorachay Tarrillo y Deyner Vásquez Peralta denominada: "Modelo de calibración de factor R de esclerometría para $F'C=210 \text{ KG/CM}^2$ frente a compresión uniaxial, Chota 2025" escuchada la sustentación, y absueltas las preguntas a las observaciones formuladas, la declaramos:

13 (Trece)

CON EL CALIFICATIVO (*)

Aprobado.

En consecuencia, se le declara **EXPEDITOS** para conferirle el Título de Ingeniero civil, elevando la presente acta al decano de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería a fin de que se emita el acto resolutivo, en conformidad con la ley universitaria y el estatuto de la Universidad.

Chota, 20 de agosto del 2026.


Dra. Claudia Emilia Benavidez Núñez
PRESIDENTE


Mg. Jefferson Ruiz Cachi
SECRETARIO


M.Sc. Carlos Tapia Cabrera
VOCAL


Dr. Miguel Angel Silva Tarrillo
ASESOR


Dr. Dante Hartman Cieza León
CO ASESOR

(*) De acuerdo al reglamento específico del proyecto y tesis de investigación de la EPIC, aprobada con Resolución de coordinación N° 141-2020, Artículo 21, cuya calificación es: (20 Summa Cum Laude); (18-19: Aprobado con excelencia); (15-17: Aprobado con mención honrosa); (12-14: Aprobado); (0-11: Desaprobado).

**MODELO DE CALIBRACIÓN DE FACTOR R DE
ESCLEROMETRÍA PARA $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ FRENTE
DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EN CHOTA, 2025**

POR:

RONALD ELVIS CONDORACHAY TARRILLO

DEYNER VÁZQUES PERALTA

**Presenta a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universi-
dad Nacional Autónoma de Chota para optar el título de
INGENIERO CIVIL**

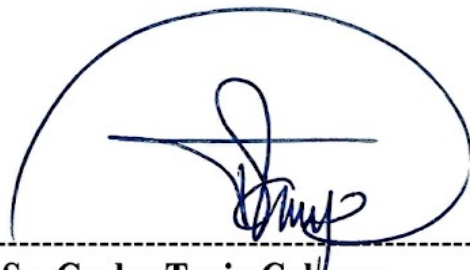
APROBADA POR EL JURADO INTEGRADO POR



Dra. Claudia Emilia Benavidez Núñez
PRESIDENTE



Mg. Jefferson Ruiz Cachi
SECRETARIO



M.Sc. Carlos Tapia Cabrera
VOCAL

Dedicatoria

A Dios, por guiarnos durante este proceso académico y darnos fortaleza para culminar esta etapa de nuestra formación profesional.

A nuestros padres y familiares, por su apoyo constante, comprensión y motivación en cada momento de nuestra vida universitaria. Su esfuerzo, confianza y acompañamiento fueron fundamentales para alcanzar este objetivo.

A todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron con palabras de aliento, orientación y apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Agradecimiento

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de Chota, a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por brindarnos la formación académica necesaria para el desarrollo de la presente investigación.

A nuestro asesor, Mg. Ing. Miguel Ángel Silva Tarrillo, por su orientación, acompañamiento y apoyo académico durante el proceso de elaboración de la tesis.

A nuestro coasesor, Dr. Ing. Dante Hartman Cieza León, por sus aportes técnicos y recomendaciones para fortalecer el desarrollo metodológico y experimental del estudio.

Asimismo, agradecemos al personal de laboratorio de suelos y concreto, a los docentes y a los profesionales que apoyaron en la ejecución de los ensayos, procesamiento de información y revisión técnica del trabajo.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias por su respaldo permanente, paciencia y motivación durante toda nuestra formación profesional.

Índice de contenidos

Constancias de originalidad	2
Acta de sustentación	10
Dedicatoria	12
Agradecimiento	13
Índice de contenidos	14
Índice de tablas	17
Índice de figuras	18
Índice de abreviaturas	19
Resumen	20
Abstract	21
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	22
1.1. Planteamiento del problema	22
1.2. Justificación	24
1.2.1. Justificación científica	24
1.2.2. Justificación social	24
1.2.3. Justificación económica	25
1.3. Formulación del problema	25
1.3.1. Pregunta general	25
1.3.2. Preguntas específicas	25
1.4. Objetivos de la investigación	26
1.4.1. Objetivo general	26
1.4.2. Objetivos específicos	26
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	27
2.1. Antecedentes	27
2.1.1. Antecedentes internacionales	27
2.1.2. Antecedentes nacionales	32
2.1.3. Antecedentes regionales	35
2.2. Bases teóricas	39
2.2.1. Concreto y resistencia a compresión	39
2.2.2. Diseño de mezcla ACI 211.1	40

2.2.3. Propiedades de los agregados y su influencia en la relación $R-f^c$	42
2.2.4. Esclerometría según ASTM C805/C805M y NTP 339.181	42
2.2.5. Compresión uniaxial según ASTM C39/C39M y NTP 339.034	43
2.2.6. Modelos de ajuste $R-f^c$	44
2.2.7. Criterios estadísticos de evaluación	45
2.2.8. Residuos y banda de predicción.....	48
2.3. Definiciones conceptuales	50
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	52
3.1. Tipo, diseño, nivel y enfoque de investigación.....	52
3.2. Ubicación, población, muestra, muestreo y unidad de análisis	52
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	55
3.4. Hipótesis	56
3.5. Operacionalización de variables	56
3.6. Procedimientos de recolección de datos	57
3.7. Procedimientos de análisis de datos.....	58
3.8. Materiales y equipos	59
3.9. Aspectos éticos.....	60
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	62
4.1. Descripción de resultados y/o resultados inferenciales	62
4.1.1. Caracterización de los materiales empleados	62
4.1.2. Diseño de mezcla del concreto $f^c = 210 \text{ kg/cm}^2$	65
4.1.3. Elaboración, codificación y curado de probetas	67
4.1.4. Resultados del ensayo esclerométrico	69
4.1.5. Resultados del ensayo de compresión uniaxial.....	70
4.1.6. Consolidación de pares experimentales $R-f^c$	72
4.1.7. Modelo lineal	74
4.1.8. Modelo logarítmico.....	76
4.1.9. Modelo potencial	78
4.1.10. Comparación de modelos de ajuste.....	80
4.1.11. Análisis de residuos	81
4.1.12. Banda de predicción al 95 %	84

4.2. Contratación de hipótesis	86
4.2.1. Relación global entre esclerometría y resistencia a compresión	86
4.2.2. Cumplimiento resistente del concreto diseñado	87
4.2.3. Comparación de la variabilidad de R y f'_c	88
4.2.4. Desempeño relativo de los modelos de ajuste	88
4.2.5. Cobertura de la banda de predicción e incertidumbre del modelo.....	89
4.3. Discusión.....	91
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1. Conclusiones	96
5.2. Recomendaciones	97
REFERENCIAS.....	100
ANEXOS	105
Anexo 1. Matriz de consistencia.....	105
Anexo 2. Operacionalización de variables.....	108
Anexo 3. Resultados de caracterización del agregado fino	111
Anexo 4. Resultados de caracterización del agregado grueso	111
Anexo 5. Diseño de mezcla ACI completo.....	112
Anexo 6. Base consolidada y verificación de banda de predicción del modelo logarítmico..	113

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</i>	55
Tabla 2. <i>Operacionalización de variables</i>	57
Tabla 3. <i>Materiales y equipos utilizados</i>	60
Tabla 4. <i>Propiedades físicas del agregado fino de Conchán</i>	62
Tabla 5. <i>Propiedades físicas del agregado grueso de Colpamatara</i>	63
Tabla 6. <i>Propiedades del cemento utilizado</i>	63
Tabla 7. <i>Parámetros generales del diseño de mezcla</i>	65
Tabla 8. <i>Dosificación final corregida por humedad</i>	66
Tabla 9. <i>Proporciones finales del diseño de mezcla</i>	66
Tabla 10. <i>Estadísticos descriptivos del índice de rebote R</i>	69
Tabla 11. <i>Estadísticos descriptivos de la resistencia a compresión $f'c$</i>	70
Tabla 12. <i>Estructura de la base consolidada $R-f'c$</i>	72
Tabla 13. <i>Indicadores estadísticos del modelo lineal</i>	74
Tabla 14. <i>Indicadores estadísticos del modelo logarítmico</i>	76
Tabla 15. <i>Indicadores estadísticos del modelo potencial</i>	78
Tabla 16. <i>Comparación de modelos de calibración $R-f'c$</i>	80
Tabla 17. <i>Cobertura de la banda de predicción al 95 %</i>	84
Tabla 18. <i>Síntesis de contrastación de hipótesis</i>	90

Índice de figuras

Figura 1. <i>Ubicación general del ámbito de estudio</i>	53
Figura 2. <i>Flujograma metodológico de la investigación</i>	58
Figura 3. <i>Materiales empleados para la elaboración del concreto</i>	64
Figura 4. <i>Proceso de mezclado del concreto</i>	67
Figura 5. <i>Moldeo y codificación de probetas cilíndricas</i>	68
Figura 6. <i>Curado de probetas cilíndricas</i>	68
Figura 7. <i>Ejecución del ensayo esclerométrico</i>	70
Figura 8. <i>Ejecución del ensayo de compresión uniaxial</i>	72
Figura 9. <i>Diagrama de dispersión entre R y $f'c$</i>	73
Figura 10. <i>Modelo lineal entre R y $f'c$</i>	74
Figura 11. <i>Modelo logarítmico entre R y $f'c$</i>	77
Figura 12. <i>Modelo potencial entre R y $f'c$</i>	79
Figura 13. <i>Comparación gráfica de los modelos de calibración</i>	81
Figura 14. <i>Residuos frente a valores ajustados del modelo logarítmico</i>	82
Figura 15. <i>Q-Q plot de residuos del modelo logarítmico</i>	83
Figura 16. <i>Banda de predicción al 95 % del modelo logarítmico</i>	85

Índice de abreviaturas

Abreviatura	Significado
ACI	American Concrete Institute.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CV	Coeficiente de variación.
END	Ensayo no destructivo.
ED	Ensayo destructivo.
f'_c	Resistencia a compresión del concreto.
f'_{cr}	Resistencia promedio requerida de dosificación.
F	Estadístico de Fisher del análisis de varianza.
IC	Intervalo de confianza.
IP	Intervalo de predicción.
MAE	Error absoluto medio.
MCO	Mínimos cuadrados ordinarios.
NTP	Norma Técnica Peruana.
p	Valor de significancia estadística.
Pmax	Carga máxima registrada durante el ensayo de compresión.
R	Índice de rebote obtenido mediante esclerometría.
r	Coeficiente de correlación de Pearson.
R^2	Coeficiente de determinación.
R^2_{aj}	Coeficiente de determinación ajustado.
RMSE	Raíz del error cuadrático medio.
TMN	Tamaño máximo nominal del agregado grueso.
UNACH	Universidad Nacional Autónoma de Chota.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo comparar la relación entre el índice de rebote R obtenido mediante esclerometría y la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial en concreto diseñado para $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaborado con agregados locales de Chota, 2025. Se elaboraron 70 probetas cilíndricas utilizando cemento Portland Tipo I Pacasmayo, agregado fino de Conchán y agregado grueso de Colpamatara. En cada probeta se determinó primero el índice de rebote R mediante martillo Schmidt y posteriormente la resistencia a compresión f'_c mediante ensayo de compresión uniaxial. Con los 70 pares experimentales R – f'_c se evaluaron los modelos lineal, logarítmico y potencial, considerando como indicadores estadísticos r , R^2 , R^2 ajustado, RMSE, MAE, estadístico F y valor p . Los resultados mostraron que todas las probetas superaron la resistencia especificada de 210 kg/cm^2 , alcanzándose una resistencia promedio de 377.35 kg/cm^2 . El índice de rebote presentó una media de 37.98 y una baja dispersión relativa, mientras que la resistencia a compresión mostró mayor variabilidad. De los modelos evaluados, el logarítmico presentó el mejor desempeño relativo, con $r = 0.2439$, $R^2 = 0.0595$, R^2 ajustado = 0.0457, RMSE = 43.17 kg/cm^2 , MAE = 35.51 kg/cm^2 y $p = 0.0418$. Aunque la relación resultó estadísticamente significativa al nivel de 0.05, su magnitud fue débil y el modelo explicó únicamente el 5.95 % de la variabilidad observada en la resistencia a compresión. La banda de predicción al 95 % contuvo 68 de los 70 pares experimentales, equivalente a una cobertura interna de 97.14 %; sin embargo, su amplitud evidenció una incertidumbre considerable para estimaciones individuales. Se concluye que, bajo las condiciones experimentales y los materiales evaluados, el índice de rebote puede emplearse como indicador complementario para comparaciones preliminares y control de uniformidad del concreto, pero no proporciona por sí solo una estimación suficientemente precisa de la resistencia a compresión ni sustituye al ensayo de compresión uniaxial cuando se requiere determinar f'_c con precisión.

Palabras clave: esclerometría, compresión uniaxial, índice de rebote, resistencia a compresión, concreto.

Abstract

The objective of this research was to compare the relationship between the rebound index R obtained by rebound hammer testing and the compressive strength f'_c determined by uniaxial compression testing in concrete designed for $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ and produced with local aggregates from Chota, Peru, in 2025. A total of 70 cylindrical concrete specimens were prepared using Pacasmayo Type I Portland cement, fine aggregate from Conchán, and coarse aggregate from Colpamatará. For each specimen, the rebound index R was first determined using a Schmidt hammer, followed by compressive strength testing through uniaxial compression. Using the 70 experimental R – f'_c pairs, linear, logarithmic, and power models were evaluated based on the statistical indicators r , R^2 , adjusted R^2 , RMSE, MAE, F-statistic, and p-value. The results showed that all specimens exceeded the specified strength of 210 kg/cm^2 , reaching an average compressive strength of 377.35 kg/cm^2 . The rebound index had a mean value of 37.98 and low relative dispersion, whereas compressive strength showed greater variability. Among the evaluated models, the logarithmic model showed the best relative performance, with $r = 0.2439$, $R^2 = 0.0595$, adjusted $R^2 = 0.0457$, RMSE = 43.17 kg/cm^2 , MAE = 35.51 kg/cm^2 , and $p = 0.0418$. Although the relationship was statistically significant at the 0.05 level, its magnitude was weak, and the model explained only 5.95% of the observed variability in compressive strength. The 95% prediction band contained 68 of the 70 experimental pairs, corresponding to an internal coverage of 97.14%; however, its width showed considerable uncertainty for individual estimates. It is concluded that, under the experimental conditions and materials evaluated, the rebound index can be used as a complementary indicator for preliminary comparisons and concrete uniformity assessment, but by itself it does not provide a sufficiently accurate estimate of compressive strength and does not replace uniaxial compression testing when a precise determination of f'_c is required.

Keywords: rebound hammer test, uniaxial compression, rebound index, compressive strength, concrete.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

En una obra de concreto, conocer f'_c no es un dato accesorio. Permite comprobar si la mezcla alcanzó la resistencia prevista y si el material responde al uso para el que fue diseñado. Esa comprobación debe hacerse con procedimientos normalizados y resultados que puedan revisarse.

Para realizar esta comprobación, la rotura de probetas cilíndricas continúa siendo el procedimiento de referencia. En la prensa, f'_c se obtiene al aplicar carga axial a la probeta hasta su falla, respetando los criterios normalizados de preparación, alineamiento, velocidad de carga y cálculo de resistencia (ASTM International, 2024; Instituto Nacional de Calidad, 2015). Sin embargo, se trata de un ensayo destructivo que requiere probetas previamente elaboradas, tiempo de curado, equipos de laboratorio y rotura del espécimen.

Cuando se necesita revisar el concreto sin destruir el elemento, se recurre a ensayos no destructivos. Entre ellos, la esclerometría con martillo Schmidt destaca por su rapidez, bajo costo y facilidad de aplicación. El martillo Schmidt registra el índice de rebote R asociado con la respuesta superficial del concreto, mientras que f'_c se determina mediante la rotura de la probeta en la máquina de compresión. Al aplicar ambos ensayos sobre el mismo espécimen, es posible analizar la relación entre sus resultados sin considerarlos mediciones equivalentes (ASTM International, 2025; Instituto Nacional de Calidad, 2018).

El rebote también cambia por condiciones que no son la resistencia: humedad, carbonatación, rugosidad, edad, agregado, compactación u orientación del impacto. Una lectura R aislada, entonces, no basta para aceptar o rechazar concreto. Su valor se entiende mejor cuando se contrasta con un ensayo de referencia realizado bajo condiciones conocidas.

Aquí, el agregado no es un detalle secundario dentro de la comparación. La procedencia, textura, absorción, dureza y mineralogía del agregado pueden modificar tanto la resistencia a compresión como la respuesta de rebote superficial. En consecuencia, curvas generales del fabricante o modelos desarrollados en otros contextos pueden no representar adecuadamente el comportamiento del concreto elaborado con materiales locales.

En las obras convencionales de Chota se utiliza con frecuencia concreto especificado para $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Su resistencia se comprueba mediante ensayos de compresión, mientras que el martillo Schmidt proporciona un índice de rebote asociado con la respuesta superficial. El problema surge cuando una lectura R se interpreta mediante curvas elaboradas para concretos con diferente dosificación, procedencia de agregados, edad o condición de ensayo. En Chota no se dispone de suficiente información experimental que permita conocer la relación entre R y f'_c para los materiales locales, lo que puede producir interpretaciones imprecisas cuando se pretende utilizar la esclerometría como sustituto de la compresión.

Por esta razón, se planteó comparar la resistencia del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ mediante esclerometría y compresión uniaxial, usando probetas elaboradas con agregado fino de Conchán y agregado grueso de Colpamatara. Con los resultados de ambos ensayos se analizaron tres formas de relación entre R y f'_c : lineal, logarítmica y potencial.

El interés del estudio no se limita a obtener una ecuación; también busca establecer hasta dónde puede utilizarse el índice R en el concreto local. Si la relación entre R y f'_c es limitada, el martillo Schmidt debe mantenerse como herramienta de apoyo y no como reemplazo del ensayo de compresión uniaxial.

1.2. Justificación

1.2.1. Justificación científica

La justificación científica nace de comparar dos respuestas que no son equivalentes. La compresión recoge el comportamiento del espécimen hasta la falla; el martillo Schmidt registra el rebote de la superficie. Aplicar ambos ensayos sobre las mismas probetas permite saber si esa respuesta superficial guarda una relación útil con $f'c$ en el concreto local (Aydin & Saribiyik, 2010; ASTM International, 2025).

Para realizar la comparación se realizaron 70 probetas con arena de Conchán y piedra de Colpamatará, cada par reunió el rebote de una probeta elaborada con materiales locales y la resistencia obtenida posteriormente en la prensa. Con esa base de información se probaron ajustes lineal, logarítmico y potencial, junto con medidas de correlación, error y predicción. El análisis se delimitó a los agregados de Conchán y Colpamatará, porque los cambios en su origen, forma y mineralogía pueden modificar la resistencia del concreto y la respuesta superficial registrada mediante esclerometría (Katuwal, 2019).

1.2.2. Justificación social

La utilidad social se aprecia en decisiones de obra que dependen de interpretar correctamente la resistencia del concreto. En Chota, donde se construyen viviendas, pavimentos y edificaciones públicas, una estimación mal interpretada puede llevar a aceptar un concreto que necesita verificación o, en el sentido contrario, a rechazarlo sin suficiente sustento (Kosmatka et al., 2002; Sánchez de Guzmán, 2001).

El martillo Schmidt puede ayudar a revisar una estructura en poco tiempo, pero su lectura necesita contexto. Los resultados ofrecen a profesionales y laboratorios de Chota una referencia para comparar la uniformidad superficial del concreto y seleccionar las zonas que requieren una

evaluación adicional. Cuando sea necesario determinar f'_c , las lecturas R deberán contrastarse mediante compresión uniaxial u otro ensayo de referencia técnicamente sustentado.

1.2.3. Justificación económica

La ventaja económica de la esclerometría es la posibilidad de evaluar varias veces un concreto sin necesidad de romperlo, en poco tiempo y de manera no invasiva. Esa ventaja, sin embargo, desaparece si una lectura se usa como único método de comprobación, conduciendo a diagnósticos errados.

En este estudio, la comparación con compresión permite valorar ese límite. Una relación útil favorecería el control preliminar; una relación débil, como la obtenida, advierte que el ahorro no debe lograrse sustituyendo el ensayo de referencia.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Pregunta general

¿Existe una relación estadísticamente significativa entre el índice de rebote R obtenido mediante esclerometría y la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial, en probetas de concreto diseñadas para $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaboradas con agregados locales de Chota durante el año 2025?

1.3.2. Preguntas específicas

- ¿La resistencia promedio a compresión del concreto elaborado con agregados locales de Chota alcanza la resistencia especificada de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días?
- ¿Qué diferencias se presentan entre la variabilidad relativa del índice de rebote R obtenido mediante esclerometría y la variabilidad relativa de la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial?

- ¿Qué modelo (lineal, logarítmico o potencial) proporciona el mejor ajuste entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f'_c ?
- ¿Cómo se comporta la banda de predicción al 95 % del modelo seleccionado al aplicarse a los pares experimentales R – f'_c ?

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Comparar la relación entre el índice de rebote R obtenido mediante esclerometría y la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial, en probetas de concreto diseñadas para $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaboradas con agregados locales de Chota durante el año 2025.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar si la resistencia promedio a compresión del concreto elaborado con agregados locales de Chota cumple o supera la resistencia especificada de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.
- Comparar la variabilidad relativa del índice de rebote R obtenido mediante esclerometría con la variabilidad relativa de la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial.
- Comparar los modelos lineal, logarítmico y potencial para identificar el modelo de mejor desempeño relativo en la relación entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f'_c , considerando R^2 ajustado, RMSE y MAE.
- Analizar el comportamiento de la banda de predicción al 95 % del modelo seleccionado al aplicarse a los pares experimentales R – f'_c .

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Tugrul Tunc (2025), en la investigación titulada Relationship Between Schmidt Hammer Rebound and Concrete Strength Tests for Limestone Aggregate Concrete, desarrollada en Turquía, tuvo como objetivo correlacionar el número de rebote del martillo Schmidt con la resistencia a compresión de concretos elaborados con agregado calizo. El estudio fue experimental y consideró mezclas de concreto con distintas dosificaciones y edades de ensayo. Las unidades de análisis fueron especímenes de concreto evaluados primero mediante esclerometría y posteriormente mediante ensayos destructivos de compresión. Las variables principales fueron el índice de rebote R y la resistencia a compresión f'_c . Los autores emplearon modelos de correlación para analizar la relación entre ambos resultados y determinaron que el tipo de agregado influye en la ecuación de ajuste obtenida. Los resultados mostraron una relación positiva entre R y f'_c , aunque dependiente de la composición del concreto, la edad y las características del agregado calizo. Se concluyó que los concretos elaborados con agregados específicos requieren ecuaciones de calibración propias. Este antecedente es relevante para la presente investigación porque confirma que la procedencia y naturaleza del agregado condicionan la relación entre esclerometría y resistencia a compresión, aspecto directamente relacionado con el uso de agregado fino de Conchán y agregado grueso de Colpamatara.

Aydin y Saribiyik (2010), en el estudio Correlation between Schmidt Hammer and Destructive Compressions Testing for Concretes in Existing Buildings, analizaron la relación entre el número de rebote del martillo Schmidt y la resistencia a compresión obtenida mediante ensayos destructivos en concretos de edificaciones existentes. La investigación tuvo un enfoque experimental y comparativo, debido a que se aplicaron mediciones no destructivas en elementos

de concreto y se contrastaron con resultados de compresión. Las variables principales fueron el número de rebote y la resistencia real del concreto. Los autores demostraron que el martillo Schmidt puede utilizarse como herramienta auxiliar para estimar la resistencia, siempre que exista una base de calibración experimental. Sin embargo, señalaron que el método no debe utilizarse de manera aislada para aceptar o rechazar concreto estructural. Este antecedente aporta a la tesis porque respalda la necesidad de contrastar el índice de rebote con el ensayo de compresión uniaxial, considerado el método de referencia.

Badarloo y Lehner (2023), en el estudio *Practical Aspects of Correlation Analysis of Compressive Strength from Destructive and Non-Destructive Methods in Different Directions*, evaluaron la influencia de la dirección del ensayo, la orientación del impacto y la posición de aplicación del martillo Schmidt en la correlación entre métodos destructivos y no destructivos. La metodología fue experimental, con probetas de concreto evaluadas en diferentes direcciones de impacto y posteriormente sometidas a compresión. Las variables analizadas fueron el número de rebote, la resistencia a compresión y la orientación del ensayo. Al comparar las mediciones, observaron que la dirección del impacto, la superficie ensayada y el control del procedimiento modificaban la relación entre R y f'_c . El estudio mostró que utilizar el mismo martillo no garantiza resultados comparables, la orientación del impacto, la superficie seleccionada y la forma de repetir las lecturas también modificaron la correlación obtenida. Este antecedente es importante porque justifica la necesidad de mantener condiciones controladas durante el ensayo esclerométrico realizado en las probetas de la presente investigación.

Kumavat et al. (2021), en *Factors Influencing the Performance of Rebound Hammer Tests*, reunieron evidencias sobre las condiciones que modifican el rebote: humedad, carbonatación, rugosidad, edad, agregado, orientación, compactación y curado. La revisión aclara que R describe

una respuesta superficial y que su asociación con f^c cambia cuando esas condiciones no se controlan. Los autores sostuvieron que el equipo es útil para una inspección inicial, pero que cualquier estimación resistente necesita contraste local con ensayos destructivos. Este planteamiento ayuda a interpretar el resultado de la tesis: el ajuste alcanzó significancia, aunque explicó una proporción pequeña de la variación de f^c .

Katuwal (2019), en la investigación *Correlation between Concrete Compressive Strength and Rebound Number for River and Crushed Aggregates in Pokhara Valley*, desarrollada en Nepal, tuvo como objetivo establecer correlaciones entre el número de rebote y la resistencia a compresión de concretos fabricados con agregados de río y agregados triturados. El estudio fue experimental y empleó especímenes de concreto elaborados con diferentes tipos de agregados, los cuales fueron evaluados mediante martillo Schmidt y ensayo de compresión. Las variables principales fueron el índice de rebote, la resistencia a compresión, el tipo de agregado y la edad de ensayo. La pendiente no se mantuvo igual al cambiar la procedencia y la forma del agregado. Se concluyó que la mineralogía, textura y origen del árido influyen directamente en la relación R - f^c . Este antecedente es pertinente porque la presente investigación trabaja con materiales locales específicos de Chota, por lo que no resulta recomendable aplicar curvas genéricas sin validación experimental.

Guerrero Estupiñán y Palas De La Torre (2023), en el estudio *Estudio comparativo de resistencia del hormigón en elementos similares de vivienda mediante ensayos no destructivos*, evaluaron la resistencia del concreto endurecido en viviendas mediante el uso de métodos no destructivos. La investigación se desarrolló en elementos estructurales, principalmente columnas, y tuvo como propósito analizar si la antigüedad de la construcción influye en la resistencia estimada por esclerometría. El estudio incluyó viviendas con distintos tiempos de construcción y aplicó lecturas múltiples con martillo Schmidt. Los resultados evidenciaron que la edad del

concreto y las condiciones de servicio pueden influir en la resistencia estimada. Se concluyó que los ensayos no destructivos permiten obtener información preliminar útil sobre el estado del concreto, pero su interpretación debe considerar la edad, el estado superficial y las condiciones del elemento evaluado. Este antecedente se relaciona con la tesis porque refuerza la necesidad de interpretar el índice de rebote como un indicador superficial y no como una medición directa de la resistencia interna.

Padilla-Peña y Triana-León (2022), en la investigación Comparación de los resultados de ensayos destructivos y no destructivos en especímenes cilíndricos de concreto, compararon la resistencia obtenida por compresión axial con resultados de esclerometría y velocidad de pulso ultrasónico. La investigación fue cuantitativa, experimental y comparativa, desarrollada en laboratorio con especímenes cilíndricos de concreto curado bajo condiciones controladas. Las variables evaluadas fueron la resistencia a compresión, el número de rebote y la velocidad de pulso ultrasónico. Los autores aplicaron análisis estadísticos para comparar los métodos destructivos y no destructivos. Los resultados mostraron que los ensayos no destructivos permiten identificar tendencias generales, pero presentan mayor incertidumbre que el ensayo de compresión directa. Se concluyó que estos métodos son útiles en evaluaciones preliminares, aunque no reemplazan al ensayo convencional cuando se requiere precisión. Este antecedente se vincula con la presente investigación porque diferencia claramente entre significancia estadística y utilidad predictiva del modelo.

Galindo Reascos (2022), en la tesis Análisis comparativo y correlación de los ensayos: esclerómetro, ultrasonido y extracción de núcleos, para determinar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad del hormigón endurecido, desarrollada en Ecuador, tuvo como objetivo evaluar la resistencia del concreto mediante métodos no destructivos y compararla con resultados

obtenidos por extracción de núcleos. La investigación fue experimental y comparativa. Se aplicaron ensayos de esclerometría, velocidad sónica y extracción de núcleos en elementos de concreto. Los resultados mostraron que la combinación de esclerometría y ultrasonido mejora la estimación de la resistencia frente al uso aislado del martillo Schmidt. El estudio reportó un mejor desempeño cuando se integraron ambos métodos no destructivos en modelos combinados. Se concluyó que la esclerometría es útil como herramienta de diagnóstico preliminar, pero su confiabilidad aumenta cuando se complementa con otros métodos y se valida con ensayos destructivos. Este antecedente es importante porque permite explicar por qué, en la presente investigación, el uso aislado del índice de rebote genera un modelo de baja capacidad explicativa.

Torres Palacios (2022), en la tesis Correlación entre el f'_c equivalente del concreto según ACI 214.4-21 y el f'_c obtenido por ACI 318-19, y su relación con ensayos no destructivos, desarrollada en la Universidad Autónoma de Nuevo León, tuvo como propósito establecer relaciones entre la resistencia equivalente del concreto, los criterios normativos de evaluación y los métodos no destructivos. La investigación empleó mezclas de diferentes resistencias, ensayos de compresión, núcleos y métodos no destructivos como martillo de rebote, velocidad de pulso ultrasónico y Lok-Test. Se aplicaron regresiones lineales y polinómicas para establecer correlaciones. Los resultados evidenciaron altos niveles de ajuste cuando se integraron varios métodos de evaluación. Se concluyó que la combinación de técnicas destructivas y no destructivas mejora la confiabilidad de la estimación de resistencia. Este antecedente respalda la recomendación de complementar la esclerometría con otros métodos cuando se requiera una evaluación estructural más precisa.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Borja Suárez (2019), en la tesis *Correlación entre la resistencia real del concreto y el ensayo no destructivo de esclerometría*, desarrollada en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, tuvo como objetivo determinar la correlación entre el número de rebote del martillo Schmidt y la resistencia real del concreto. La investigación fue experimental y comparativa, mediante probetas de concreto sometidas primero a esclerometría y luego a compresión. Se trabajó con concretos de diferentes resistencias de diseño, entre ellos valores cercanos a 175, 210 y 280 kg/cm². Las variables principales fueron el índice de rebote y la resistencia a compresión. En sus ensayos, las correlaciones fueron más consistentes cuando se controlaron las condiciones y se trabajó con ecuaciones propias. Se concluyó que el martillo Schmidt puede emplearse como herramienta de apoyo para estimar la resistencia, pero no debe reemplazar al ensayo destructivo cuando se requiere precisión. Este antecedente respalda la finalidad de establecer una calibración local entre R y f'_c en el contexto de Chota.

Eyzaguirre Acosta y Vélez Gallardo (2019), en *Determinación de la resistencia a la compresión del concreto mediante el método de esclerometría*, contrastaron lecturas del martillo Schmidt con resultados de compresión obtenidos sobre especímenes de concreto. Además de R y f'_c , consideraron la textura superficial, la homogeneidad y la orientación del impacto. La relación existió, pero su precisión cambió con esas condiciones; por ello, concluyeron que la calibración debe responder al contexto de producción del concreto. Este antecedente es cercano al problema estudiado en Chota, donde la mezcla se elaboró con agregados locales y no con materiales genéricos.

Flores Molocho (2020), en la investigación *Análisis comparativo de costos y resistencia a la compresión del concreto tradicional y el concreto predosificado seco*, Trujillo 2020, comparó el

desempeño resistente y económico de concretos diseñados para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. El estudio fue descriptivo y comparativo, con probetas evaluadas a diferentes edades de curado. Los resultados mostraron que el concreto predosificado seco alcanzó resistencias superiores a la requerida y presentó ventajas económicas frente al concreto tradicional. Aunque esta investigación no se centra directamente en esclerometría, resulta útil porque evidencia que concretos diseñados para 210 kg/cm^2 pueden alcanzar resistencias superiores cuando existe control de materiales, dosificación y curado. Este antecedente se relaciona con el presente estudio, donde la resistencia promedio obtenida también superó ampliamente la resistencia especificada.

Cipiran Velásquez y Sialer Mejía (2021), en la tesis Evaluación de estructuras por métodos no destructivos, Samanco - 2021, evaluaron la resistencia a compresión de elementos de concreto armado mediante métodos no destructivos. La investigación tuvo enfoque cuantitativo y diseño comparativo, con una muestra de viviendas ubicadas en Puerto Samanco, zona expuesta a condiciones ambientales agresivas por la brisa marina. Se aplicaron técnicas de observación, revisión documental y mediciones con equipos de evaluación no destructiva. Los resultados mostraron que varias estructuras presentaban resistencias inferiores a las mínimas requeridas. Se concluyó que los métodos no destructivos permiten realizar diagnósticos preliminares útiles, aunque sus resultados deben interpretarse con criterios técnicos. Este antecedente demuestra la importancia de aplicar la esclerometría como herramienta de evaluación inicial y no como sustituto absoluto de los ensayos destructivos.

Ramírez Quintana (2025), en la tesis Relación entre los ensayos de esclerometría y compresión para la estimación de la resistencia del concreto - Chiclayo, tuvo como objetivo determinar la relación entre los resultados del ensayo esclerométrico y los resultados de compresión para estimar la resistencia del concreto. El estudio fue experimental y cuantitativo,

trabajando con diseños de mezcla de 140, 175, 210 y 280 kg/cm². La investigación incluyó ensayos de laboratorio con esclerómetros mecánicos y prensa hidráulica, además de mediciones in situ en elementos estructurales de una edificación multifamiliar. Los resultados mostraron una correlación significativa entre el número de rebote y la resistencia a compresión. Se concluyó que la esclerometría puede ser una herramienta confiable para estimar f'_c cuando se complementa con ensayos destructivos y calibraciones propias. Este antecedente es relevante porque incluye concreto de 210 kg/cm², resistencia directamente relacionada con la presente investigación.

García Murrieta y Rodríguez Cachique (2022), en la tesis Comparación de los ensayos de diamantina y esclerometría del pavimento rígido del Jr. Dos de mayo, de las cuadras 4-11, Iquitos - 2021, compararon los resultados de resistencia obtenidos mediante extracción de diamantina y esclerometría en pavimento rígido. La investigación fue aplicada y comparativa, con una muestra de testigos extraídos y mediciones esclerométricas distribuidas por cuadras. Los resultados mostraron diferencias importantes entre ambos métodos: la resistencia obtenida por diamantina fue menor que la estimada por esclerometría. Los autores determinaron un factor de corrección para aproximar la resistencia estimada al valor real y reportaron una correlación alta entre ambos métodos. Se concluyó que la esclerometría es útil para evaluaciones rápidas, pero puede sobreestimar la resistencia si no se aplica una calibración. Este antecedente respalda la necesidad de proponer modelos locales y evitar el uso directo de curvas del fabricante.

Choquehuanca Huanca (2022), en la tesis Variación de la resistencia del concreto entre el método de esclerometría y núcleos diamantinos, Residencial Aeropuerto, Juliaca - Puno, tuvo como objetivo determinar la variación entre la resistencia estimada por esclerometría y la resistencia obtenida mediante núcleos diamantinos. La metodología fue descriptiva, con diseño no experimental. Se realizaron mediciones con esclerómetro en viviendas y se contrastaron con

resultados de núcleos extraídos. Los resultados permitieron establecer una ecuación lineal entre el número de rebotes y la resistencia de los núcleos. Sin embargo, también se evidenció que el uso del ábaco del fabricante podía generar estimaciones inadecuadas. Se concluyó que no debe utilizarse únicamente el ábaco del esclerómetro para determinar la resistencia a la compresión del concreto, sino que se debe realizar contraste con un ensayo destructivo. Este antecedente coincide con el enfoque de la presente tesis, donde se calibra el índice de rebote frente a compresión uniaxial.

Huaynatte Paucar y Maylle Quispe (2024), en la tesis Evaluación de la vulnerabilidad sísmica empleando métodos no destructivos del concreto estructural de las viviendas de Jancao, Amarilis - Huánuco, evaluaron la vulnerabilidad sísmica de viviendas mediante métodos no destructivos, especialmente el esclerómetro. La investigación se aplicó en viviendas de concreto armado y analizó la resistencia de elementos estructurales como columnas y vigas. Los resultados evidenciaron que una proporción importante de viviendas no alcanzaba la resistencia mínima de 210 kg/cm², lo que incrementaba su vulnerabilidad sísmica. Se concluyó que la esclerometría permite obtener información rápida para diagnósticos preliminares de seguridad estructural. Este antecedente se relaciona con la presente tesis porque emplea el martillo Schmidt en concretos asociados a resistencias de diseño similares.

2.1.3. Antecedentes regionales

Zambrano Rojas (2017), en la tesis Comparación de los ensayos de diamantina y esclerometría de la pavimentación de los jirones Japón, Portugal y Brasil - Cajamarca, tuvo como objetivo comparar los resultados de resistencia obtenidos mediante esclerometría y extracción de núcleos diamantinos en pavimentos rígidos urbanos. La investigación se desarrolló en la ciudad de Cajamarca y tuvo un enfoque aplicado, comparativo y experimental. La muestra estuvo

conformada por núcleos extraídos y zonas evaluadas con martillo Schmidt en distintos tramos de pavimento. Las variables analizadas fueron el índice de rebote, la resistencia de núcleos y la diferencia respecto a la resistencia de diseño. Los resultados mostraron diferencias entre los valores estimados y los valores medidos, asociadas al acabado superficial, condiciones del pavimento y características del concreto. Se concluyó que la esclerometría puede utilizarse como herramienta de diagnóstico rápido, pero requiere contraste con ensayos destructivos para estimar la resistencia real. Este antecedente es relevante porque se desarrolla en el ámbito regional de Cajamarca.

Carranza Segovia (2021), en la tesis Resistencia de concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con los agregados de las canteras de la provincia de Chota, Cajamarca - 2018, evaluó la resistencia del concreto elaborado con agregados locales de la provincia de Chota. La investigación fue experimental y consideró la caracterización física de agregados, diseño de mezcla, elaboración de probetas, curado y ensayo de compresión. Las variables principales fueron las propiedades de los agregados y la resistencia a compresión del concreto. Los resultados permitieron reconocer que la procedencia de los materiales influye en el desempeño resistente del concreto. Se concluyó que los agregados locales pueden utilizarse en concretos convencionales siempre que sean caracterizados previamente y se controle adecuadamente el diseño de mezcla. Este antecedente se relaciona directamente con la presente tesis porque también trabaja concreto de 210 kg/cm^2 y materiales propios de Chota.

Flores Herrera (2023), en la investigación Evaluación de la resistencia a compresión del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, empleando los agregados del río Chotano en el distrito de Cochabamba, provincia de Chota, departamento de Cajamarca, analizó el comportamiento resistente de concretos elaborados con agregados locales de la provincia de Chota. La investigación fue

experimental y comprendió caracterización de materiales, diseño de mezcla, elaboración de probetas, curado y rotura a compresión. Los resultados mostraron que los materiales locales pueden alcanzar resistencias adecuadas cuando se controla la dosificación, el curado y el procedimiento de ensayo. Se concluyó que la caracterización de agregados es indispensable para garantizar el desempeño del concreto. Este antecedente es pertinente porque confirma la importancia de evaluar concretos de 210 kg/cm² con materiales de la zona.

Uriarte-Herrera y Cieza-Sánchez (2021), en la investigación Evaluación de concreto elaborado con agregados de canteras de río y de cerro de los Andes del norte de Perú, compararon el comportamiento del concreto elaborado con agregados de diferente procedencia. La investigación fue experimental y comparativa, considerando ensayos de caracterización de agregados y resistencia a compresión del concreto. Los resultados evidenciaron que la granulometría, textura, absorción, peso específico y procedencia del agregado influyen en el desempeño del concreto endurecido. Se concluyó que la selección del agregado debe considerar tanto su disponibilidad como sus propiedades físicas. Este antecedente sustenta la importancia de trabajar con agregado fino de Conchán y agregado grueso de Colpamatara, debido a que sus propiedades pueden afectar la relación entre índice de rebote y resistencia.

Irigoín Barboza (2021), en la investigación Evaluación del deterioro prematuro del pavimento rígido de la Av. Micaela Bastidas, Chota, 2019, evaluó las condiciones de deterioro de un pavimento rígido en la ciudad de Chota. La metodología incluyó inspección visual, evaluación del estado del pavimento y aplicación de ensayos de diagnóstico, entre ellos la esclerometría. Los resultados permitieron identificar el estado del pavimento y reconocer la utilidad del martillo de rebote como herramienta de evaluación superficial. Se concluyó que la evaluación de pavimentos debe integrar indicadores visuales, propiedades del material y ensayos complementarios. Este

antecedente es relevante porque evidencia el uso local de la esclerometría en investigaciones desarrolladas en Chota.

Campos Acuña y Reyes Farje (2023), en la investigación Análisis de la resistencia a la compresión del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con el reemplazo de 30 %, 45 % y 60 % de cerámico y concreto reciclado, como alternativa de agregado grueso, Cajamarca 2023, evaluaron el comportamiento mecánico de concretos de 210 kg/cm^2 incorporando materiales reciclados como reemplazo parcial del agregado grueso. La investigación fue experimental y consideró la elaboración de probetas, curado y ensayo de compresión. Los resultados permitieron analizar cómo la modificación del agregado grueso afecta la resistencia final del concreto. Este antecedente es útil porque demuestra que el tipo de agregado y su composición influyen directamente en la resistencia, criterio que también afecta la interpretación de la esclerometría.

Centurión Vargas (2022), en la investigación Determinación de la resistencia del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ elaborado con agregados reciclados de vías, en la ciudad de Cajamarca, 2021, estudió el comportamiento resistente de concretos elaborados con agregado reciclado. La investigación fue experimental y evaluó probetas de concreto diseñadas para una resistencia de 210 kg/cm^2 . Los resultados mostraron que la incorporación de agregados reciclados modifica el comportamiento mecánico del concreto, por lo que resulta necesario controlar la procedencia y calidad del agregado. Este antecedente refuerza el criterio de que la resistencia del concreto y la respuesta superficial medida por esclerometría dependen de las características del material granular.

Díaz Edquen (2023), en la investigación Evaluación del concreto elaborado con agregado reciclado en sustitución del agregado grueso para pavimentos de bajo tránsito en Chota, Cajamarca, evaluó la posibilidad de utilizar agregado reciclado como sustituto parcial del agregado

grueso en concretos para pavimentos. El estudio fue experimental y se desarrolló en el contexto local de Chota. Los resultados evidenciaron que la sustitución del agregado modifica las propiedades mecánicas del concreto, por lo que se requiere control técnico del diseño de mezcla. Este antecedente aporta al presente estudio porque confirma que el comportamiento del concreto en Chota está condicionado por las propiedades de los agregados empleados.

De los antecedentes revisados se desprende una coincidencia central para este estudio: el martillo Schmidt facilita una primera revisión, pero su lectura no permanece igual cuando cambian el agregado, la humedad, la edad, la carbonatación, la rugosidad, la orientación del impacto o el curado. A la vez, las investigaciones nacionales y regionales muestran que los materiales de procedencia local pueden alcanzar la resistencia prevista cuando se caracterizan previamente y se incorporan en una dosificación controlada. En ese punto se ubica esta tesis, pues contrasta R con $f'c$ en el concreto elaborado en Chota y, a partir de esa comparación, define el uso que puede darse al equipo sin trasladar de manera automática curvas preparadas para otros materiales.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Concreto y resistencia a compresión

El concreto reúne cemento, agua, agregado fino, agregado grueso y, cuando el diseño lo requiere, aditivos. Su respuesta no depende de un componente aislado, sino de la interacción entre la pasta, las partículas de agregado y la zona de transición que se forma entre ambos. Mientras está fresco, interesa su trabajabilidad para transportarlo, colocarlo y compactarlo; una vez endurecido, cobran importancia la resistencia, la durabilidad y la estabilidad volumétrica (Kosmatka et al., 2002; Sánchez de Guzmán, 2001).

La resistencia a compresión es una de las propiedades más utilizadas para evaluar la calidad del concreto. Se expresa como la carga máxima soportada por una probeta dividida entre el área

transversal efectiva, de acuerdo con el principio de cálculo establecido para especímenes cilíndricos; sin embargo, no es una propiedad aislada, porque depende de la edad de ensayo, relación agua/cemento, tipo de agregado, condiciones de curado, geometría del espécimen, velocidad de carga y procedimiento de fabricación (ASTM International, 2024; Instituto Nacional de Calidad, 2015; Kosmatka et al., 2002).

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

2.2.2. Diseño de mezcla ACI 211.1

El diseño de mezcla de concreto consiste en determinar las proporciones adecuadas de cemento, agua, agregado fino y agregado grueso, con la finalidad de obtener un concreto trabajable, durable y capaz de alcanzar la resistencia especificada del proyecto. En concretos convencionales, este proceso busca equilibrar la resistencia mecánica, la consistencia, la economía y la calidad final del material endurecido (American Concrete Institute, 2022; Kosmatka et al., 2002).

El método ACI 211.1 es uno de los procedimientos más utilizados para dosificar concretos de peso normal, debido a que permite estimar las cantidades de materiales a partir de propiedades físicas de los agregados, resistencia requerida, asentamiento, tamaño máximo nominal del agregado grueso y relación agua/cemento. Este método es de naturaleza semiempírica porque combina criterios experimentales con procedimientos prácticos de dosificación (American Concrete Institute, 2022).

El procedimiento general comprende la selección del asentamiento, selección del tamaño máximo nominal del agregado, estimación del agua de mezcla y contenido de aire, elección de la relación agua/cemento, cálculo del contenido de cemento, estimación del contenido de agregado

grueso, determinación del agregado fino por diferencia de volúmenes absolutos y corrección por humedad y absorción de los agregados (American Concrete Institute, 2022).

Uno de los principios fundamentales del diseño de mezcla es la relación agua/cemento. Esta relación influye directamente en la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del concreto: un exceso de agua puede mejorar la fluidez, pero incrementa la porosidad capilar y reduce la resistencia final; por el contrario, una relación agua/cemento baja puede mejorar la resistencia, pero exige mayor control de colocación y compactación (American Concrete Institute, 2022; Kosmatka et al., 2002).

La relación agua/cemento se expresa como la razón entre la cantidad de agua de mezcla y la cantidad de cemento. A partir de esta relación se calcula el contenido de cemento requerido. En la presente investigación, el diseño adoptó $a/c = 0.56$ para un concreto especificado de $f'c = 210$ kg/cm² y una resistencia promedio requerida de $f'cr = 294$ kg/cm², según el diseño de mezcla elaborado para el estudio (American Concrete Institute, 2022).

$$a/c = \frac{A}{C}$$

$$C = \frac{A}{a/c}$$

El diseño por volúmenes absolutos permite comprobar que la suma de los volúmenes de los componentes sea equivalente a un metro cúbico de concreto. Una vez calculadas las cantidades en condición seca o saturada superficialmente seca, se realizan correcciones por humedad y absorción de los agregados, ya que estos pueden aportar o absorber agua durante el mezclado y modificar la relación agua/cemento real (American Concrete Institute, 2022).

$$\sum_{i=1}^k V_i = 1.00m^3$$

2.2.3. Propiedades de los agregados y su influencia en la relación $R-f^c$

Los agregados ocupan la mayor proporción del volumen del concreto y ejercen influencia directa sobre su trabajabilidad, densidad, resistencia, módulo elástico y durabilidad. El agregado fino contribuye a llenar vacíos entre partículas mayores y mejorar la cohesión de la mezcla, mientras que el agregado grueso aporta estructura granular y restricción volumétrica a la pasta cementante (Kosmatka et al., 2002; Sánchez de Guzmán, 2001).

En estudios que relacionan esclerometría y resistencia a compresión, el tipo de agregado adquiere especial importancia porque el martillo Schmidt registra una respuesta de rebote en la zona superficial impactada. Cuando el impacto coincide con partículas de agregado, pasta cementante o zonas con diferente compactación, el valor de R puede variar. Por ello, concretos elaborados con agregados de distinta procedencia, textura, absorción, forma o mineralogía pueden presentar relaciones $R-f^c$ diferentes. Esta condición justifica la necesidad de realizar calibraciones locales, especialmente cuando se trabaja con agregado fino de Conchán y agregado grueso de Colpamatara (Katuwal, 2019; Kumavat et al., 2021).

2.2.4. Esclerometría según ASTM C805/C805M y NTP 339.181

La esclerometría es un ensayo no destructivo empleado para evaluar el concreto endurecido mediante el martillo de rebote o martillo Schmidt. Su principio consiste en impactar una masa elástica contra la superficie del concreto y registrar el índice de rebote R . Este valor está asociado a la respuesta superficial del material; sin embargo, cuando se calibra con ensayos destructivos de referencia, puede utilizarse como una variable indirecta para analizar la resistencia a compresión del concreto (ASTM International, 2025; Instituto Nacional de Calidad, 2018).

El ensayo esclerométrico se encuentra normalizado por la ASTM C805/C805M y por la NTP 339.181. Estas normas establecen criterios para la preparación de la superficie, ubicación de

puntos de impacto, separación mínima entre lecturas, descarte de valores anómalos y cálculo del promedio representativo del número de rebote. En este estudio, las lecturas obtenidas sobre cada probeta se vincularon con el valor de f'_c del mismo espécimen, medido posteriormente mediante compresión uniaxial. De esta manera se examinó si R aportaba información útil sobre la capacidad resistente, sin tratarlo como una medición directa de la resistencia.

En la práctica, el martillo Schmidt permite revisar varias zonas sin dañarlas. Sirve, por ejemplo, para reconocer si responden de manera parecida y escoger dónde conviene ampliar la evaluación. Esa rapidez no convierte a R en una medida directa de f'_c . La humedad, la carbonatación, la rugosidad, la edad, el agregado, la orientación del impacto, la compactación y el curado pueden modificar la lectura; por eso, su uso resistente requiere calibración local y contraste con compresión (Aydin & Saribiyik, 2010; Kumavat et al., 2021).

2.2.5. Compresión uniaxial según ASTM C39/C39M y NTP 339.034

El ensayo de compresión uniaxial es el método destructivo de referencia para determinar la resistencia a compresión del concreto endurecido. Consiste en someter una probeta cilíndrica a una carga axial creciente hasta producir su falla, registrando la carga máxima soportada por el espécimen y calculando la resistencia como la relación entre carga máxima y área transversal (ASTM International, 2024; Instituto Nacional de Calidad, 2015).

El ensayo se encuentra normalizado por la ASTM C39/C39M y por la NTP 339.034. Estas normas establecen requisitos para preparación de probetas, medición de dimensiones, alineamiento, velocidad de carga, registro de carga máxima y cálculo de la resistencia. En la presente investigación, el ensayo de compresión uniaxial permitió determinar la resistencia a la compresión de las 70 probetas cilíndricas elaboradas con concreto diseñado para $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (ASTM International, 2024; Instituto Nacional de Calidad, 2015).

La compresión uniaxial se adoptó como método de referencia porque evalúa el comportamiento resistente global del espécimen, integrando la calidad de la pasta cementante, la distribución de agregados, la compactación, la presencia de vacíos y la condición interna del concreto. Esta característica la diferencia de la esclerometría, que registra una respuesta superficial de rebote. Por ello, la comparación entre ambos métodos permite determinar si el índice R puede utilizarse como indicador indirecto de la resistencia a compresión o si su aplicación debe limitarse a evaluaciones preliminares y de control de uniformidad.

2.2.6. Modelos de ajuste R-f'c

Los modelos de ajuste permiten establecer una relación matemática entre una variable medida de forma indirecta y una variable obtenida mediante un método de referencia. En esta investigación, el índice de rebote R fue utilizado como variable independiente, mientras que la resistencia a compresión f'c fue considerada como variable dependiente. El propósito de estos modelos no fue sustituir el ensayo de compresión, sino analizar hasta qué punto el valor de rebote describe la variación de la resistencia en el concreto evaluado (Draper & Smith, 1998; Montgomery et al., 2021).

El modelo lineal supone que la resistencia aumenta en proporción constante por cada unidad adicional del índice de rebote. Es útil como primera aproximación porque su pendiente expresa el cambio promedio de f'c asociado con una unidad de R, siempre que los supuestos de regresión sean razonablemente aceptables (Draper & Smith, 1998; Montgomery et al., 2021).

$$f'_c = a + bR + \varepsilon$$

El modelo logarítmico permite representar relaciones crecientes con pendiente decreciente, es decir, situaciones en las que incrementos del índice de rebote se asocian con aumentos de

resistencia, pero no necesariamente en forma proporcional constante. En esta investigación fue el modelo con mejor desempeño relativo (Montgomery et al., 2021).

$$f'_c = a + b \ln(R) + \varepsilon$$

El modelo potencial es frecuente en correlaciones empíricas de materiales porque permite representar comportamientos no lineales mediante un coeficiente de escala y un exponente de crecimiento. Su interpretación requiere cuidado, especialmente cuando el rango de R es estrecho y la variabilidad de la variable dependiente es mayor que la de la variable independiente (Draper & Smith, 1998; Kutner et al., 2005).

$$f'_c = AR^B$$

2.2.7. Criterios estadísticos de evaluación

Para evaluar los modelos de ajuste entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f'_c , se consideraron indicadores estadísticos que permiten analizar la dirección de la relación, su capacidad explicativa, el error de estimación y la significancia estadística. Entre estos indicadores se emplearon el coeficiente de correlación r, el coeficiente de determinación R^2 , el R^2 ajustado, el error cuadrático medio RMSE, el error absoluto medio MAE y el valor p, debido a que su uso conjunto permite interpretar el desempeño del modelo de manera más completa que un solo indicador aislado (Kutner et al., 2005; Montgomery et al., 2021).

Para la interpretación de la magnitud absoluta del coeficiente de correlación se adoptó el criterio orientativo de Schober et al. (2018): de 0.00 a 0.10, correlación despreciable; de 0.10 a 0.39, débil; de 0.40 a 0.69, moderada; de 0.70 a 0.89, fuerte; y de 0.90 a 1.00, muy fuerte. Estos intervalos deben analizarse junto con el contexto técnico, la dispersión de los datos y los indicadores de error.

El coeficiente de determinación R^2 expresa la proporción de variabilidad de la variable dependiente que puede ser explicada por el modelo. En el presente estudio, R^2 indica qué porcentaje de la variación de la resistencia a compresión f'_c es explicado por el índice de rebote R . Por ello, un R^2 bajo no impide que exista significancia estadística, pero sí indica una baja capacidad explicativa del modelo. El R^2 ajustado se utilizó como complemento, debido a que permite valorar el ajuste considerando el número de predictores y el tamaño de la muestra (Hair et al., 2021; Montgomery et al., 2021).

El RMSE y el MAE fueron empleados para comparar el error de estimación entre los modelos lineal, logarítmico y potencial. A diferencia de r o R^2 , estos indicadores no poseen rangos universales de interpretación, ya que dependen de la unidad de medida de la variable analizada. En esta investigación, al estar expresados en kg/cm^2 , permitieron identificar qué modelo presentó menores diferencias entre las resistencias medidas mediante compresión uniaxial y las resistencias estimadas a partir del índice de rebote R . Por ello, fueron utilizados principalmente como criterios comparativos entre modelos (Kutner et al., 2005; Montgomery et al., 2021).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (f'_{c,i} - \bar{f}'_c)^2}$$

Donde R^2 es el coeficiente de determinación; e_i es el residuo correspondiente a la observación i ; $f'_{c,i}$ es la resistencia a compresión observada en la probeta i ; $\bar{f}'_c$ es la resistencia promedio observada; y n es el número total de pares experimentales analizados.

El coeficiente de determinación, representado por R^2 , permite medir la proporción de variabilidad de la resistencia a compresión observada que es explicada por el modelo de ajuste. En esta expresión, el numerador corresponde a la suma de cuadrados de los residuos, es decir, la variación que el modelo no logra explicar; mientras que el denominador representa la variabilidad

total de los valores observados respecto a su media. Por tanto, mientras menor sea la suma de errores residuales en relación con la variabilidad total, mayor será el valor de R^2 y mejor será el ajuste del modelo. En términos interpretativos, un R^2 cercano a 1 indica alta capacidad explicativa, mientras que un valor cercano a 0 evidencia que el modelo explica poca variación de la resistencia a compresión. En la presente investigación, este indicador permitió evaluar qué porcentaje de la variación de f'_c fue explicado por el índice de rebote R , considerando los modelos lineal, logarítmico y potencial.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$$

Donde RMSE es el error cuadrático medio; e_i representa el residuo de cada observación; y n corresponde al número total de pares experimentales $R - f'_c$ considerados en el ajuste del modelo.

En este trabajo, el RMSE se interpretó en la misma unidad de la resistencia, kg/cm^2 , y sirvió para comparar cuánto se alejaban, en conjunto, los valores estimados de los medidos. Como el cálculo eleva los residuos al cuadrado, las diferencias grandes tienen mayor peso; por esa razón, entre dos modelos se consideró más favorable el que presentó el valor menor.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}$$

Donde MAE es el error absoluto medio; $|e_i|$ representa el valor absoluto del residuo de la observación i ; y n es el número total de observaciones consideradas en el análisis.

El MAE expresa el error medio sin conservar el signo de cada diferencia. También se interpreta en kg/cm^2 , pero, a diferencia del RMSE, no aumenta de forma desproporcionada por

unos pocos errores grandes. Su lectura conjunta permitió distinguir si la aparente mejora de un modelo se mantenía en una medida más directa del error.

La prueba F y el valor p permiten analizar si el modelo presenta significancia estadística global. Cuando $p < 0.05$ se considera que existe evidencia estadística de relación entre las variables bajo el nivel de significancia adoptado. Sin embargo, la significancia estadística no debe confundirse con una relación fuerte ni con una alta utilidad predictiva, debido a que el p-valor no mide el tamaño del efecto ni la importancia práctica del resultado (Field, 2018; Kutner et al., 2005; Wasserstein & Lazar, 2016).

2.2.8. Residuos y banda de predicción

Los residuos corresponden a la diferencia entre el valor observado de resistencia a compresión y el valor estimado por el modelo. Su análisis permite identificar patrones de error, valores atípicos, falta de ajuste, heterocedasticidad o desviaciones respecto a la normalidad; en un modelo adecuado deberían distribuirse de manera aleatoria alrededor de cero, sin patrones sistemáticos evidentes (Draper & Smith, 1998; Montgomery et al., 2021).

$$e_i = f'_{c,i} - \hat{f}'_{c,i}$$

Donde e_i es el residuo de la observación i ; $f_{c,i}$ es la resistencia a compresión observada experimentalmente; y $\hat{f}_{c,i}$ es la resistencia a compresión estimada por el modelo para la misma observación.

El residuo del modelo se define como la diferencia entre la resistencia a compresión observada y la resistencia a compresión estimada para una misma probeta. Si el residuo es positivo, significa que el modelo subestimó la resistencia real, debido a que el valor observado fue mayor que el valor estimado. Si el residuo es negativo, significa que el modelo sobreestimó la resistencia, debido a que el valor estimado fue mayor que el valor observado. Cuando los residuos se

mantienen cercanos a cero, el modelo presenta menor error de estimación. En la presente investigación, los residuos permitieron evaluar la dispersión de los modelos lineal, logarítmico y potencial, así como la consistencia del modelo logarítmico seleccionado.

La banda de predicción al 95 % representa el intervalo dentro del cual se espera que se ubique una nueva observación individual de $f'c$ para un valor determinado de R , considerando la variabilidad del modelo y la incertidumbre de una observación futura. A diferencia del intervalo de confianza de la media estimada, la banda de predicción es más amplia porque incorpora la dispersión individual de los datos (Kutner et al., 2005; Montgomery et al., 2021).

Ecuación 12. Forma general de una banda de predicción para una observación individual.

$$\hat{f}'_{c,0} \pm t_{\alpha/2, n-2} * s * \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Donde $\hat{f}'_{c,0}$ es la resistencia a compresión estimada para un valor específico x_0 ; $t_{\alpha/2, n-2}$ es el valor crítico de la distribución t de Student para un nivel de confianza del 95 % y $n - 2$ grados de libertad; s es el error estándar de estimación del modelo; n es el número total de observaciones; x_0 es el valor específico de la variable independiente para el cual se calcula la predicción; $\bar{x}$ es el promedio de la variable independiente; y x_i corresponde a cada valor observado de la variable independiente. En el modelo lineal, x representa directamente el índice de rebote R ; mientras que, en el modelo logarítmico, x corresponde a $\ln(R)$, debido a la transformación aplicada para ajustar la relación entre R y $f'c$.

La forma general de la banda de predicción considera el valor estimado de la resistencia para un punto específico, el valor crítico de la distribución t de Student, el error estándar del modelo y el efecto de la posición del nuevo valor de la variable independiente respecto al promedio de los datos utilizados para ajustar la regresión. El término dentro de la raíz cuadrada incorpora

tres componentes: la incertidumbre propia de una nueva observación individual, la incertidumbre asociada a la estimación de la media y la distancia del nuevo valor x_0 respecto al promedio de la variable independiente. Por ello, la banda de predicción tiende a ser más estrecha cerca del centro de los datos y más amplia en los extremos del rango analizado.

2.3. Definiciones conceptuales

Concreto: Material compuesto formado por cemento, agua, agregado fino y agregado grueso que, al endurecer, desarrolla resistencia principalmente a compresión (Kosmatka et al., 2002; Sánchez de Guzmán, 2001).

Cemento Portland: Material aglomerante hidráulico que, al reaccionar con el agua, forma la pasta cementante del concreto (Kosmatka et al., 2002).

Agregado fino: Material granular que contribuye a llenar vacíos y mejorar la trabajabilidad. En esta investigación procedió de Conchán (American Concrete Institute, 2022).

Agregado grueso: Material granular que aporta volumen, estabilidad y estructura interna al concreto. En esta investigación procedió de Colpamatara (American Concrete Institute, 2022).

Diseño de mezcla: Procedimiento mediante el cual se determinan las cantidades de materiales para obtener un concreto con resistencia, trabajabilidad y durabilidad requeridas (American Concrete Institute, 2022).

Curado del concreto: Proceso mediante el cual se mantienen condiciones adecuadas de humedad y temperatura para favorecer la hidratación del cemento y el desarrollo de resistencia (Kosmatka et al., 2002).

Resistencia a compresión: Capacidad del concreto para soportar cargas axiales hasta la falla, calculada como carga máxima dividida entre el área transversal del espécimen (ASTM International, 2024; Instituto Nacional de Calidad, 2015).

Esclerometría: Ensayo no destructivo que registra un índice de rebote asociado a la respuesta superficial del concreto; puede emplearse como variable indirecta para analizar la resistencia cuando se calibra con ensayos de referencia (ASTM International, 2025; Instituto Nacional de Calidad, 2018).

Índice de rebote R: Valor adimensional registrado por el martillo Schmidt después del impacto sobre la superficie del concreto endurecido (ASTM International, 2025).

Modelo de ajuste $R-f^c$: Relación matemática ajustada a partir de datos experimentales para describir la asociación entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f^c obtenida mediante un método de referencia (Draper & Smith, 1998; Montgomery et al., 2021).

Banda de predicción: Intervalo dentro del cual se espera que se ubique una nueva observación individual de f^c para un valor dado de R, considerando incertidumbre del modelo y variabilidad individual (Kutner et al., 2005; Montgomery et al., 2021).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo, diseño, nivel y enfoque de investigación

El estudio fue aplicado y cuantitativo. Se ejecutaron ensayos normalizados para comparar el índice de rebote R con la resistencia f^c de probetas elaboradas con materiales de Chota; después, los resultados se procesaron mediante estadística descriptiva, correlación y regresión (Creswell & Creswell, 2018; Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

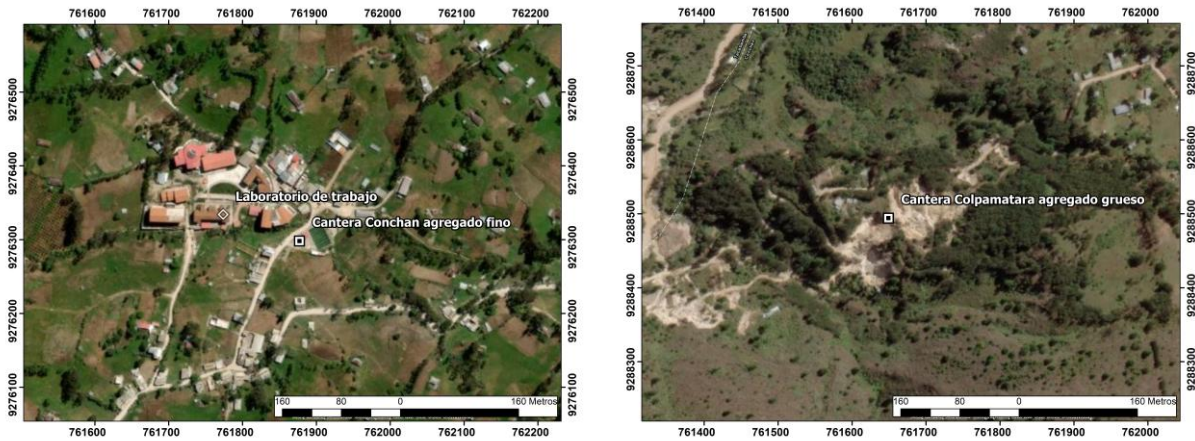
Por su alcance, la investigación fue descriptiva y correlacional: describió materiales, dosificación y resultados, y luego examinó la relación R - f^c con modelos lineal, logarítmico y potencial. El diseño se consideró no experimental y transversal porque las variables no fueron manipuladas para alterar su relación y los datos se reunieron dentro del periodo previsto para el trabajo experimental (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

3.2. Ubicación, población, muestra, muestreo y unidad de análisis

La investigación se desarrolló en la ciudad de Chota, provincia de Chota, departamento de Cajamarca. El agregado fino fue obtenido de la cantera Conchán ubicada en coordenadas UTM WGS84 zona 17S: Este 760443 m, Norte 9287928 m, con una altitud de 2305 m s. n. m., mientras que el agregado grueso procedió de la cantera Colpamatara, ubicada en las coordenadas UTM WGS84 zona 17S: Este 761878.5 m, Norte 9276299.21 m, con una altitud de 2545 m s. n. m. Los ensayos de caracterización, esclerometría y compresión se ejecutaron en condiciones de laboratorio.

Figura 1.

Ubicación general del ámbito de estudio



La población estuvo conformada por las probetas cilíndricas de concreto elaboradas con diseño de mezcla para una resistencia especificada de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, utilizando agregados locales de Chota. La muestra estuvo conformada por 70 probetas cilíndricas identificadas desde P-01 hasta P-70 (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

El tamaño muestral se definió a partir de la precisión requerida para estimar el coeficiente de correlación de Pearson, utilizando la transformación z de Fisher de acuerdo con el procedimiento descrito por Bonett y Wright (2000). Para la planificación se consideró una correlación poblacional esperada de $(\rho_0 = 0.80)$, correspondiente a una relación de magnitud alta entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f'_c . Este valor se utilizó únicamente como supuesto previo para determinar el número de pares experimentales y no corresponde a la correlación finalmente obtenida. Se estableció un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0.05$) y una anchura máxima prevista de 0.20 para el intervalo de confianza del coeficiente de correlación.

Para el cálculo se consideró un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, equivalente a un valor crítico $z_{1-\alpha/2}=1.96$, y una semi amplitud esperada del intervalo de confianza de $h_p = 0.10$. El tamaño de muestra se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$n = 3 + \left[\frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}}(1 - \rho_0^2)}{h_p} \right]^2$$

Al reemplazar los valores establecidos:

$$n = 3 + \left[\frac{1.96(1 - 0.8^2)}{0.1} \right]^2$$

$$n = 52.79$$

Mediante la transformación z de Fisher y su posterior transformación inversa, considerando un margen adicional del 20 % por posibles pérdidas, daños o invalidaciones durante la elaboración, curado y ejecución de los ensayos, el tamaño muestral ajustado fue:

$$n_{ajustado} = \frac{53}{1 - 0.2} = 66.25$$

La investigación trabajó con 70 probetas cilíndricas, cantidad superior al mínimo calculado, y cada una generó un par experimental compuesto por un índice de rebote R y un resultado de resistencia a compresión f'_c .

El muestreo fue no probabilístico intencional, porque las probetas fueron elaboradas expresamente para el objetivo experimental de comparar los resultados de esclerometría y compresión uniaxial. No se buscó representar aleatoriamente una población infinita de concretos, sino construir una base controlada de pares R- f'_c bajo condiciones definidas de materiales, dosificación, edad y procedimiento de ensayo (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

La unidad de análisis fue cada probeta cilíndrica de concreto. Cada unidad generó un par experimental compuesto por el índice de rebote promedio válido R y la resistencia a compresión f'_c obtenida por compresión uniaxial. La correspondencia de datos se mantuvo mediante la codificación P-01 a P-70 (ASTM International, 2024; ASTM International, 2025).

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica principal de recolección de datos fue la observación directa estructurada, debido a que los valores de las variables fueron registrados durante ensayos de laboratorio previamente definidos. Esta técnica permitió observar, medir y registrar de manera ordenada los resultados obtenidos en cada probeta (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018).

Los instrumentos empleados fueron fichas de registro de datos, esclerómetro tipo Schmidt, máquina de compresión uniaxial y formatos de laboratorio. Las fichas permitieron registrar lecturas individuales de rebote, promedio final válido, carga máxima y resistencia calculada de cada probeta, conforme al enfoque experimental y a las normas de ensayo aplicadas (ASTM International, 2024; ASTM International, 2025).

Tabla 1.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnica	Instrumento	Dato obtenido
Observación directa estructurada	Fichas de laboratorio	Registro ordenado de ensayos
Ensayo esclerométrico	Martillo Schmidt y formato de 12 lecturas	Índice de rebote R
Ensayo de compresión	Máquina de compresión uniaxial	Resistencia f'_c
Procesamiento estadístico	Hojas de cálculo y software estadístico	Modelos, residuos y banda de predicción

La Tabla 1 ordena qué dato produjo cada etapa. El martillo Schmidt generó R y la prensa permitió obtener f'_c ; ambos registros se conservaron con el mismo código de probeta. Las hojas de cálculo y el software se utilizaron después, cuando ya estaba formada la base de 70 pares.

3.4. Hipótesis

Hipótesis general: El índice de rebote R obtenido mediante esclerometría presenta una relación estadísticamente significativa con la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial, en el concreto diseñado para $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaborado con agregados locales de Chota.

Hipótesis nula general: El índice de rebote R obtenido mediante esclerometría no presenta una relación estadísticamente significativa con la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial en el concreto diseñado para $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Hipótesis específica 1: La resistencia promedio a compresión del concreto elaborado con agregados locales de Chota es mayor a la resistencia especificada de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.

Hipótesis específica 2: La resistencia a compresión f'_c presenta una variabilidad relativa mayor que el índice de rebote R en las probetas evaluadas.

Hipótesis específica 3: El modelo logarítmico presenta el mejor desempeño relativo entre los modelos lineal, logarítmico y potencial para describir la relación entre R y f'_c , al obtener el mayor R^2 ajustado y los menores valores de RMSE y MAE.

Hipótesis específica 4: La banda de predicción al 95 % del modelo de mejor desempeño relativo contiene al menos el 90 % de los pares experimentales R- f'_c .

3.5. Operacionalización de variables

La investigación consideró dos variables principales: el índice de rebote R, obtenido mediante el ensayo esclerométrico, y la resistencia a compresión f'_c , determinada mediante el ensayo de compresión uniaxial. La primera fue considerada variable independiente y la segunda

variable dependiente, de acuerdo con la lógica de calibración experimental entre método indirecto y método de referencia (ASTM International, 2024; ASTM International, 2025; Montgomery et al., 2021).

Tabla 2.

Operacionalización de variables

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Escala
Índice de rebote R	Promedio válido de las lecturas esclerométricas obtenidas en cada probeta mediante martillo Schmidt.	Respuesta esclerométrica superficial	R promedio, media, desviación estándar, coeficiente de variación	Cuantitativa de razón, adimensional
Resistencia a compresión $f'c$	Relación entre la carga máxima aplicada y el área de la sección transversal de la probeta cilíndrica.	Resistencia mecánica del concreto	$f'c$, media, desviación estándar, coeficiente de variación	Cuantitativa de razón, kg/cm^2

Nota. Los modelos no constituyeron una tercera variable; se aplicaron después para analizar la relación entre R y $f'c$ mediante r , R^2 , R^2 ajustado, RMSE, MAE, F y valor p.

En la Tabla 2 aparecen las dos mediciones hechas en laboratorio. R se trató como variable independiente y $f'c$ como dependiente. Los modelos y sus indicadores se aplicaron después para estudiar la relación entre ambas; no constituyeron una tercera variable.

3.6. Procedimientos de recolección de datos

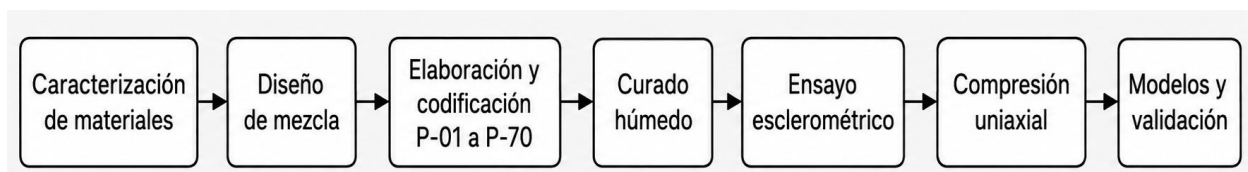
La recolección de datos se desarrolló de manera secuencial, siguiendo las etapas propias de la tecnología del concreto y los procedimientos normalizados para ensayos de laboratorio. El proceso comprendió caracterización de materiales, diseño de mezcla, elaboración de probetas, curado, ensayo esclerométrico, ensayo de compresión uniaxial y consolidación de resultados (American Concrete Institute, 2022; ASTM International, 2024; ASTM International, 2025).

En la primera etapa se realizó la caracterización física del agregado fino de Conchán y del agregado grueso de Colpamatará. Los ensayos permitieron determinar humedad, absorción, peso específico, peso unitario, granulometría, módulo de finura y abrasión del agregado grueso; con base en estos datos se elaboró el diseño de mezcla para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ siguiendo criterios del método ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2022).

Posteriormente se realizaron las correcciones por humedad y absorción para obtener las cantidades reales de pesaje. Las probetas cilíndricas fueron elaboradas, compactadas, codificadas desde P-01 hasta P-70 y sometidas a curado húmedo; finalizado el curado, se aplicó primero el ensayo esclerométrico y luego el ensayo de compresión uniaxial, manteniendo la trazabilidad de cada probeta (ASTM International, 2024; ASTM International, 2025).

Figura 2.

Flujograma metodológico de la investigación



3.7. Procedimientos de análisis de datos

El análisis de datos se realizó a partir de la base consolidada de 70 pares experimentales $R-f'c$. Primero se desarrolló un análisis descriptivo de ambas variables mediante media, desviación estándar, mínimo, máximo, rango y coeficiente de variación; luego se calculó el coeficiente de correlación de Pearson y se ajustaron los modelos lineal y logarítmico mediante MCO y el potencial mediante mínimos cuadrados no lineales en la escala original (Field, 2018; Montgomery et al., 2021).

Para evaluar la bondad de ajuste se calcularon R^2 , R^2 ajustado, RMSE, MAE, estadístico F y valor p. Para el modelo seleccionado se calculó la banda de predicción al 95 %. Todos los cálculos fueron desarrollados en hojas de cálculo y verificados mediante gráficos de dispersión, curvas de ajuste, análisis de residuos, Q-Q plot y banda de predicción (Draper & Smith, 1998; Kutner et al., 2005; Montgomery et al., 2021).

La decisión de selección del modelo se realizó con criterio técnico y estadístico. Se priorizó el modelo con mejor desempeño relativo entre los evaluados, pero sin confundir significancia estadística con alta capacidad predictiva; por ello, el modelo logarítmico fue seleccionado como el mejor relativo, aunque se interpretó como un modelo de baja capacidad explicativa (Field, 2018; Montgomery et al., 2021).

3.8. Materiales y equipos

Los materiales utilizados fueron cemento Portland Tipo I Pacasmayo, agua, agregado fino de Conchán, agregado grueso de Colpamatará y moldes cilíndricos para la elaboración de las probetas. Asimismo, se emplearon equipos de laboratorio como balanza, tamices, horno, recipientes de ensayo, esclerómetro tipo Schmidt y máquina de compresión uniaxial. Estos materiales y equipos permitieron desarrollar la caracterización de agregados, la preparación del concreto, la medición del índice de rebote y la determinación de la resistencia a compresión, conforme a los procedimientos técnicos establecidos para este tipo de ensayos (ASTM International, 2024; ASTM International, 2025; Instituto Nacional de Calidad, 2015; Instituto Nacional de Calidad, 2018).

Tabla 3.*Materiales y equipos utilizados*

Categoría	Material o equipo	Uso
Material	Cemento Portland Tipo I Pacasmayo	Componente cementante
Material	Agregado fino de Conchán	Componente granular fino
Material	Agregado grueso de Colpamatara	Componente granular grueso
Equipo	Tamices, balanza, horno y recipientes	Caracterización de agregados
Equipo	Moldes cilíndricos	Elaboración de probetas
Equipo	Esclerómetro tipo Schmidt	Medición del índice de rebote R
Equipo	Máquina de compresión uniaxial	Determinación de f'_c
Equipo informático	Hojas de cálculo y software estadístico	Procesamiento de datos

La Tabla 3 muestra los principales materiales, equipos de laboratorio y herramientas de procesamiento empleados durante la investigación. La presencia de cemento Portland Tipo I Pacasmayo, agregado fino de Conchán y agregado grueso de Colpamatara permite delimitar el alcance local del estudio, ya que los resultados obtenidos dependen de estos materiales específicos. Asimismo, los equipos de caracterización, el esclerómetro tipo Schmidt y la máquina de compresión uniaxial fueron necesarios para construir la base experimental R- f'_c . En conjunto, esta tabla evidencia que el procedimiento fue desarrollado con materiales, instrumentos y equipos acordes con los objetivos del estudio.

3.9. Aspectos éticos

La investigación se desarrolló respetando los principios de integridad científica, responsabilidad, transparencia y veracidad en el registro y análisis de datos. Debido a que el estudio trabajó únicamente con materiales de construcción y probetas de concreto, no involucró la participación de seres humanos, animales ni información personal sensible (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018; Universidad Nacional Autónoma de Chota, 2025).

Los datos experimentales fueron registrados de manera objetiva durante los ensayos de laboratorio, evitando alteración, manipulación o selección arbitraria de resultados. Asimismo, se respetó la propiedad intelectual de las fuentes consultadas mediante citas y referencias bibliográficas conforme a las normas APA 7 y al esquema institucional de informe final de tesis cuantitativa (American Psychological Association, 2020; Universidad Nacional Autónoma de Chota, 2025).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Descripción de resultados y/o resultados inferenciales

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental de la investigación. La descripción comprende la caracterización de materiales, diseño de mezcla, elaboración y curado de probetas, resultados de esclerometría, resultados de compresión, consolidación de pares $R-f_c$, ajuste de modelos y evaluación de la banda de predicción del modelo seleccionado.

4.1.1. Caracterización de los materiales empleados

La caracterización de los materiales permitió obtener los parámetros necesarios para el diseño de mezcla. Se evaluaron las propiedades físicas del agregado fino procedente de Conchán, del agregado grueso procedente de Colpamatara y del cemento utilizado. Estos datos fueron empleados para calcular la dosificación mediante el método ACI 211.1 y aplicar correcciones por humedad y absorción.

Tabla 4.

Propiedades físicas del agregado fino de Conchán

Propiedad	Valor
Peso específico de masa	2.56 g/cm ³
Peso específico SSS	2.618 g/cm ³
Peso específico aparente	2.717 g/cm ³
Peso unitario compactado	1508 kg/m ³
Peso unitario suelto	1382 kg/m ³
Absorción	2.20 %
Humedad natural	2.54 %
Módulo de finura	2.27 - 2.28
Tamaño máximo de partículas	3/8"

Los resultados de la Tabla 4 permiten caracterizar el agregado fino utilizado en la mezcla de concreto. El peso específico de 2.56 g/cm³, el módulo de finura de 2.27, la absorción de 2.20 % y la humedad natural de 2.54 % evidencian que se trata de un material que requiere correcciones

por humedad antes de la dosificación final. El módulo de finura indica una arena relativamente fina, condición que puede influir en la trabajabilidad de la mezcla, en la demanda de agua y en la distribución de vacíos. Por ello, la caracterización del agregado fino fue una etapa necesaria para aplicar el método ACI 211.1 y obtener una dosificación coherente con la resistencia especificada.

Tabla 5.

Propiedades físicas del agregado grueso de Colpamatara

Propiedad	Valor
Peso específico de masa	2.59 g/cm ³
Peso específico SSS	2.613 - 2.624 g/cm ³
Peso específico aparente	2.647 - 2.665 g/cm ³
Peso unitario compactado	1541 kg/m ³
Peso unitario suelto	1390 kg/m ³
Absorción	0.92 %
Humedad natural	2.27 %
Abrasión Los Ángeles	24.00 %
Tamaño máximo nominal	3/4"

La tabla resume las propiedades físicas del agregado grueso empleado en la mezcla. El peso específico de 2.59 g/cm³, la absorción de 0.92 %, la humedad natural de 2.27 %, el peso unitario compactado de 1541 kg/m³ y la abrasión Los Ángeles de 24.00 % permiten reconocer que el agregado presenta características adecuadas para su uso en concreto convencional. El tamaño máximo nominal de 3/4" también resulta compatible con la elaboración de probetas cilíndricas y con los criterios usuales de dosificación. Estos parámetros fueron determinantes para calcular el volumen de agregado grueso, corregir la humedad de cantera y establecer la dosificación final del concreto.

Tabla 6.

Propiedades del cemento utilizado

Propiedad	Valor
Tipo de cemento	Portland Tipo I Pacasmayo
Peso específico	3.10 g/cm ³
Peso por bolsa	42.5 kg

La tabla 6 identifica el cemento Portland Tipo I Pacasmayo como material cementante utilizado en la investigación, con un peso específico de 3.10 g/cm^3 . Este dato fue necesario para el cálculo de los volúmenes absolutos dentro del diseño de mezcla. La identificación del tipo de cemento también permite delimitar el alcance de los resultados, ya que el desarrollo de resistencia del concreto depende del cemento utilizado, de su interacción con los agregados y de las condiciones de curado. Por tanto, los modelos de ajuste obtenidos deben interpretarse para concretos elaborados bajo estas condiciones específicas de materiales.

Figura 3.

Materiales empleados para la elaboración del concreto



La Figura 3 presenta los materiales principales empleados para la elaboración de la mezcla de concreto utilizada en la investigación. Se identifican el cemento Portland Tipo I, el agua, el agregado fino o arena natural procedente de la cantera Conchán y el agregado grueso o piedra chancada procedente de la cantera Colpamatara. La disposición de los materiales en el área de trabajo permite evidenciar la etapa previa a la elaboración del concreto, en la cual los componentes son reunidos y preparados antes del mezclado.

4.1.2. Diseño de mezcla del concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$

El diseño de mezcla se realizó para un concreto de resistencia especificada $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, empleando el método ACI 211.1 para concreto de peso normal. Para asegurar el cumplimiento de la resistencia especificada, se adoptó una resistencia promedio requerida de $f'_{cr} = 294 \text{ kg/cm}^2$, incorporando un margen de seguridad de 84 kg/cm^2 . El concreto fue considerado sin aire incorporado, con asentamiento previsto de 3" a 4" y tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4".

Tabla 7.

Parámetros generales del diseño de mezcla

Parámetro	Valor
Resistencia especificada, f'_c	210 kg/cm ²
Resistencia promedio requerida, f'_{cr}	294 kg/cm ²
Tipo de concreto	Sin aire incorporado
Cemento	Portland Tipo I Pacasmayo
TMN del agregado grueso	3/4"
Asentamiento previsto	3" - 4"
Relación agua/cemento	0.56
Contenido de aire atrapado	2.00 %
Agua de diseño	205.00 L/m ³

La Tabla 7 presenta los criterios principales adoptados para el diseño del concreto. Se observa que la resistencia especificada fue $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, mientras que la resistencia promedio requerida fue $f'_{cr} = 294 \text{ kg/cm}^2$, lo que incorpora un margen de seguridad frente a la variabilidad

propia de los materiales y del proceso de elaboración. Asimismo, la relación agua/cemento de 0.56, el asentamiento previsto de 3" a 4" y el contenido de aire atrapado de 2.00 % corresponden a un concreto convencional sin aire incorporado. Estos parámetros explican por qué las resistencias finales superaron ampliamente la resistencia de diseño.

Tabla 8.

Dosificación final corregida por humedad

Material	Cantidad final
Cemento	367.12 kg/m ³
Agua efectiva	190.26 L/m ³
Agregado fino húmedo	782.42 kg/m ³
Agregado grueso húmedo	948.54 kg/m ³

La Tabla 8 muestra las cantidades finales de materiales corregidas por humedad para un metro cúbico de concreto. La dosificación quedó conformada por 367.12 kg/m³ de cemento, 190.26 L/m³ de agua efectiva, 782.42 kg/m³ de agregado fino húmedo y 948.54 kg/m³ de agregado grueso húmedo. Estos valores evidencian que el diseño no se aplicó únicamente en condición teórica seca, sino que incorporó la humedad real de los agregados. Esta corrección fue importante porque la humedad de cantera modifica el agua disponible en la mezcla y, por tanto, influye directamente en la relación agua/cemento efectiva y en la resistencia final del concreto.

Tabla 9.

Proporciones finales del diseño de mezcla

Tipo de proporción	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua
En peso	1.00	2.13	2.58	22.03 L/bolsa
En volumen	1.00	2.31	2.52	23.73 L/bolsa
Por tanda	1 bolsa	98.34 kg/bolsa	106.93 kg/bolsa	22.03 kg/bolsa

La Tabla 9 permite expresar la dosificación en términos prácticos, tanto en peso como en volumen. En peso, la relación cemento: agregado fino: agregado grueso fue 1.00:2.13:2.58, con un contenido de agua de 22.03 L por bolsa de cemento. Esta forma de presentación facilita la

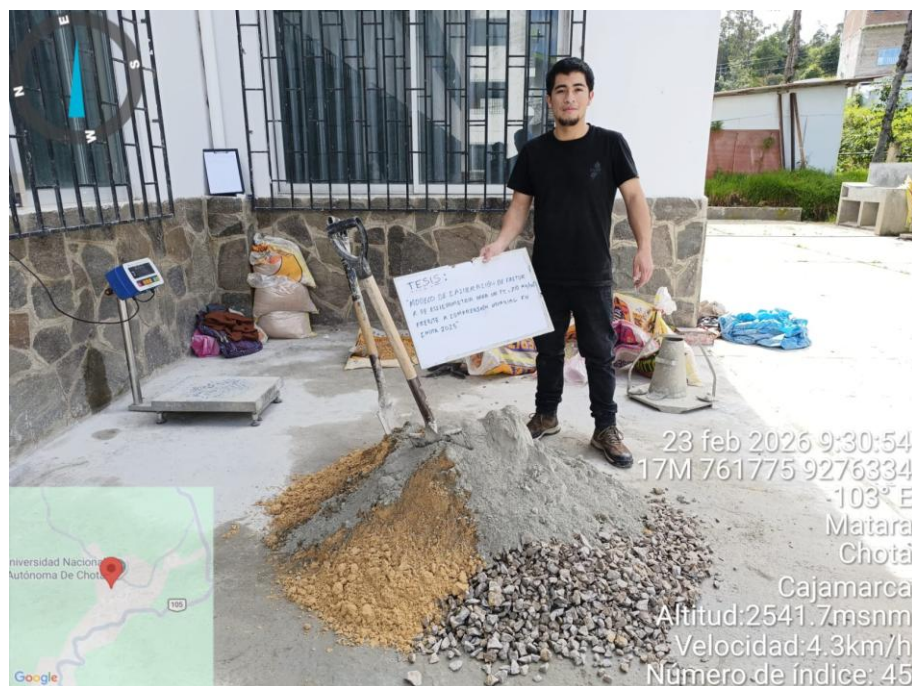
reproducción de la mezcla en condiciones de laboratorio u obra controlada. Además, la comparación entre proporción en peso y proporción en volumen permite verificar que la dosificación fue adaptada para su aplicación práctica, sin perder la correspondencia con los cálculos del método ACI 211.1.

4.1.3. Elaboración, codificación y curado de probetas

Las probetas se elaboraron con la dosificación final del diseño de mezcla. Para no perder la correspondencia entre ensayos, cada una recibió un código, desde P-01 hasta P-70.

Figura 4.

Proceso de mezclado del concreto



Los materiales se mezclaron después de efectuar la corrección por humedad de los agregados. Durante esta etapa se buscó distribuir de manera uniforme la pasta y las partículas, pues una diferencia entre tandas podía reflejarse luego en los resultados de las probetas.

Figura 5.

Moldeo y codificación de probetas cilíndricas



La identificación se realizó durante el moldeo. Los códigos P-01 a P-70 se conservaron en todo el proceso y permitieron relacionar, sin cambiar de espécimen, el valor R con el resultado de compresión.

Figura 6.

Curado de probetas cilíndricas



Después del desmolde, las probetas se mantuvieron en curado húmedo hasta los 28 días. Se aplicó el mismo procedimiento a los 70 especímenes para reducir diferencias asociadas a la pérdida de humedad.

4.1.4. Resultados del ensayo esclerométrico

En cada una de las 70 probetas se tomaron 12 lecturas de rebote. Luego se revisaron las lecturas válidas y se calculó el promedio representativo de cada espécimen.

Tabla 10.

Estadísticos descriptivos del índice de rebote R

Estadístico	Valor
Número de probetas	70
Media	37.98
Desviación estándar	1.31
Valor mínimo	35.75
Valor máximo	42.08
Rango	6.33
Coefficiente de variación	3.45 %

El índice R se concentró en un intervalo estrecho: media de 37.98, desviación estándar de 1.31 y coeficiente de variación de 3.45 %. En términos prácticos, las superficies respondieron de manera parecida al impacto. Esa uniformidad, sin embargo, no basta para afirmar que la resistencia interna también varió poco.

La diferencia se hizo visible al comparar estos valores con los resultados de compresión, cuya dispersión fue mayor.

Figura 7.

Ejecución del ensayo esclerométrico



Las lecturas se tomaron antes de someter las probetas a compresión, de modo que cada espécimen pudo utilizarse en ambos ensayos. El valor obtenido fue R ; corresponde a la respuesta de la superficie y no, de manera directa, a $f'c$.

4.1.5. Resultados del ensayo de compresión uniaxial

Después de la esclerometría, las mismas 70 probetas se ensayaron a compresión. Así se obtuvo el valor de $f'c$ asociado a cada código.

Tabla 11.

Estadísticos descriptivos de la resistencia a compresión $f'c$

Estadístico	Valor
Número de probetas	70
Media	377.35 kg/cm ²
Desviación estándar	44.84 kg/cm ²
Valor mínimo	273.89 kg/cm ²

Estadístico	Valor
Valor máximo	432.50 kg/cm ²
Rango	158.61 kg/cm ²
Coefficiente de variación	11.88 %

Los resultados del ensayo de compresión presentaron una dispersión mayor que las lecturas del índice de rebote; la resistencia media alcanzó 377.35 kg/cm², con una desviación estándar de 44.84 kg/cm² y un coeficiente de variación de 11.88 %. Los valores oscilaron entre 273.89 y 432.50 kg/cm², por lo tanto, las 70 probetas presentaron resistencias superiores a la resistencia especificada de diseño, $f'_c = 210$ kg/cm².

El valor promedio obtenido fue superior tanto a la resistencia especificada $f'_c = 210$ kg/cm² como a la resistencia promedio requerida $f'_{cr} = 294$ kg/cm² adoptada durante el diseño de mezcla. Respecto a esta última, la resistencia media experimental fue aproximadamente 28.4 % mayor, esta diferencia evidencia una sobrerresistencia bajo las condiciones de elaboración y curado utilizadas; sin embargo, el estudio no fue diseñado para aislar el efecto individual de los factores que pudieron originarla, por lo que no corresponde atribuirle a una única causa.

A pesar de que todas las probetas superaron la resistencia especificada, los valores de f'_c presentaron una amplitud considerable frente al intervalo relativamente estrecho observado en el índice de rebote R. Esta diferencia anticipó una relación de baja magnitud entre ambas variables, situación posteriormente confirmada mediante los análisis de correlación y regresión.

Figura 8.

Ejecución del ensayo de compresión uniaxial



En la prensa, cada probeta se cargó hasta la falla. Este resultado se tomó como referencia porque recoge la respuesta del espécimen completo, incluida la distribución de agregados, los vacíos y posibles diferencias de compactación.

4.1.6. Consolidación de pares experimentales $R-f^c$

Con ambos ensayos terminados, los datos se emparejaron por código. Así se formaron 70 pares $R-f^c$, uno por probeta; R quedó como variable independiente y f^c como dependiente.

Tabla 12.

Estructura de la base consolidada $R-f^c$

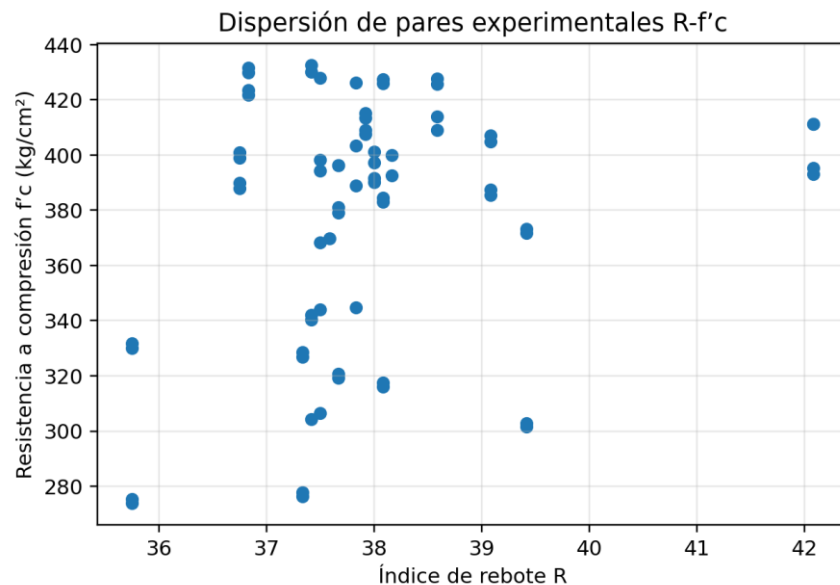
Código de probeta	Índice de rebote R	Resistencia f^c
P-01	37.50	306.46 kg/cm ²
P-02	37.83	344.84 kg/cm ²
P-03	38.00	390.08 kg/cm ²
...	...	...
P-70	37.50	368.34 kg/cm ²

Nota. La base completa de datos $R-f_c$ se presenta en el Anexo 6.

La revisión por código evitó mezclar lecturas de especímenes distintos. Con esta base se ajustaron los modelos lineal, logarítmico y potencial; el detalle completo se mantiene en el Anexo 6.

Figura 9.

Diagrama de dispersión entre R y f_c



La Figura 9 muestra una dispersión amplia de los pares experimentales $R-f_c$, sin que se observe visualmente un patrón creciente claramente definido. Para valores similares del índice de rebote R se obtuvieron valores de resistencia a compresión considerablemente diferentes, particularmente en el intervalo de 37 a 39 de índice de rebote. Esta distribución sugiere que el índice de rebote, considerado de manera aislada, presenta una capacidad explicativa reducida con respecto a la variación de la resistencia a compresión. La magnitud y significancia de esta relación se evaluaron posteriormente mediante los análisis de correlación y regresión.

4.1.7. Modelo lineal

El primer modelo evaluado fue el modelo lineal simple, considerando como variable independiente el índice de rebote promedio válido R y como variable dependiente la resistencia a compresión f'_c . La ecuación ajustada se presenta en formato de ecuación para mantener consistencia académica y facilitar su lectura técnica (Montgomery et al., 2021).

Ecuación 13. Modelo lineal ajustado con los 70 pares R - f'_c .

$$f'_c = 67.5924 + 8.1551R$$

Tabla 13.

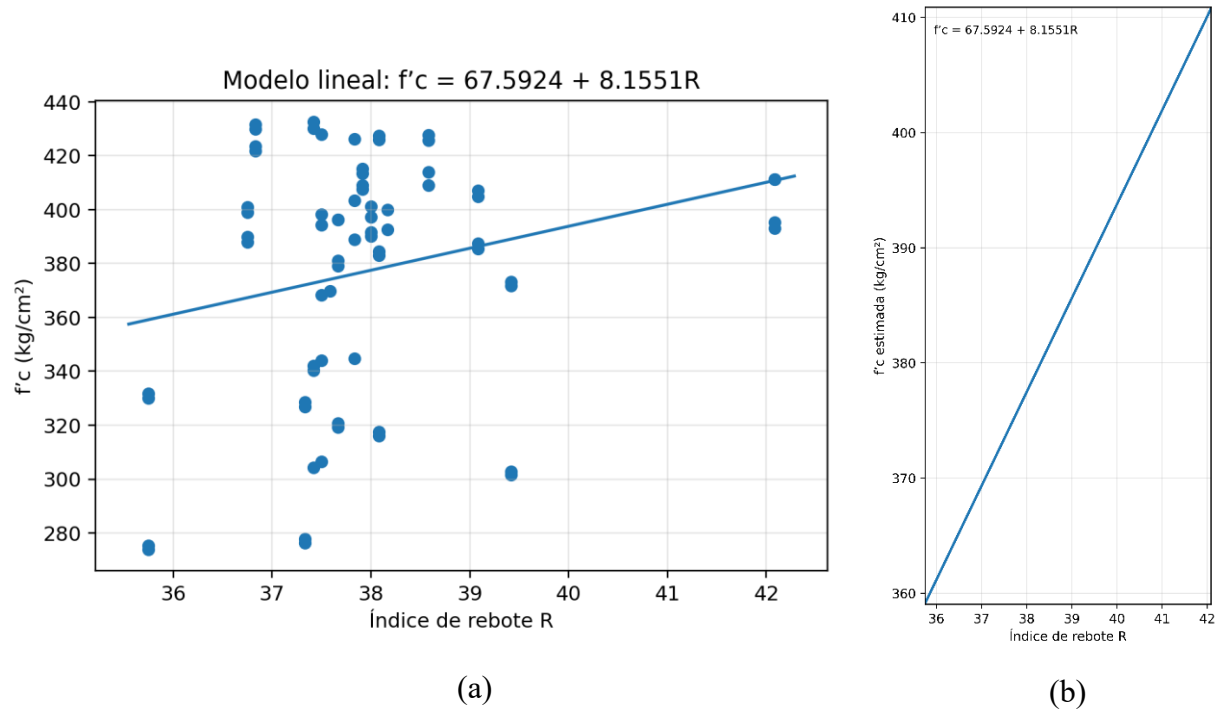
Indicadores estadísticos del modelo lineal

Indicador	Valor
Número de pares	70
Intercepto a	67.5924
Pendiente b	8.1551
r	0.2386
R^2	0.0569
R^2 ajustado	0.0431
RMSE	43.23 kg/cm ²
MAE	35.58 kg/cm ²
F	4.1055
p	0.0467

La Tabla 13 muestra que el modelo lineal presentó una relación positiva entre el índice de rebote y la resistencia a compresión, expresada mediante la ecuación $f'_c = 67.5924 + 8.1551R$. Sin embargo, el valor de $r = 0.2386$ y $R^2 = 0.0569$ evidencian que la relación fue débil y que el modelo explicó solo una pequeña proporción de la variabilidad de f'_c . Aunque el valor $p = 0.0467$ indica significancia estadística al nivel de 0.05, los errores $RMSE = 43.23$ kg/cm² y $MAE = 35.58$ kg/cm² muestran una capacidad predictiva limitada. Por tanto, el modelo lineal se consideró una alternativa de referencia para la comparación de formas funcionales, pero mostró una baja capacidad explicativa y predictiva para estimar individualmente la resistencia a compresión.

Figura 10.

Modelo lineal entre R y f'_c



Nota. En el panel (b) se empleó una escala vertical ampliada y una relación de aspecto ajustada con fines exclusivamente visuales. Esta representación no modifica la ecuación ni los valores estimados y permite comparar la forma del modelo lineal con las demás funciones evaluadas.

La Figura 10 muestra que la recta del modelo lineal presenta pendiente positiva; sin embargo, los pares experimentales se encuentran ampliamente dispersos respecto a la línea ajustada y no evidencian visualmente un patrón lineal claramente definido. Esta dispersión es coherente con el bajo coeficiente de determinación obtenido ($R^2 = 0.0569$), según el cual el modelo explica únicamente el 5.69 % de la variabilidad observada en la resistencia a compresión. La representación auxiliar permite apreciar la forma estrictamente lineal de la función dentro del intervalo experimental evaluado.

4.1.8. Modelo logarítmico

El segundo modelo evaluado fue el modelo logarítmico. Con los 70 pares experimentales consolidados, este modelo presentó el mejor desempeño relativo entre las formas funcionales evaluadas, aunque su capacidad explicativa fue baja (Field, 2018; Montgomery et al., 2021).

$$f'_c = -801.3908 + 324.1345 \ln(R)$$

Tabla 14.

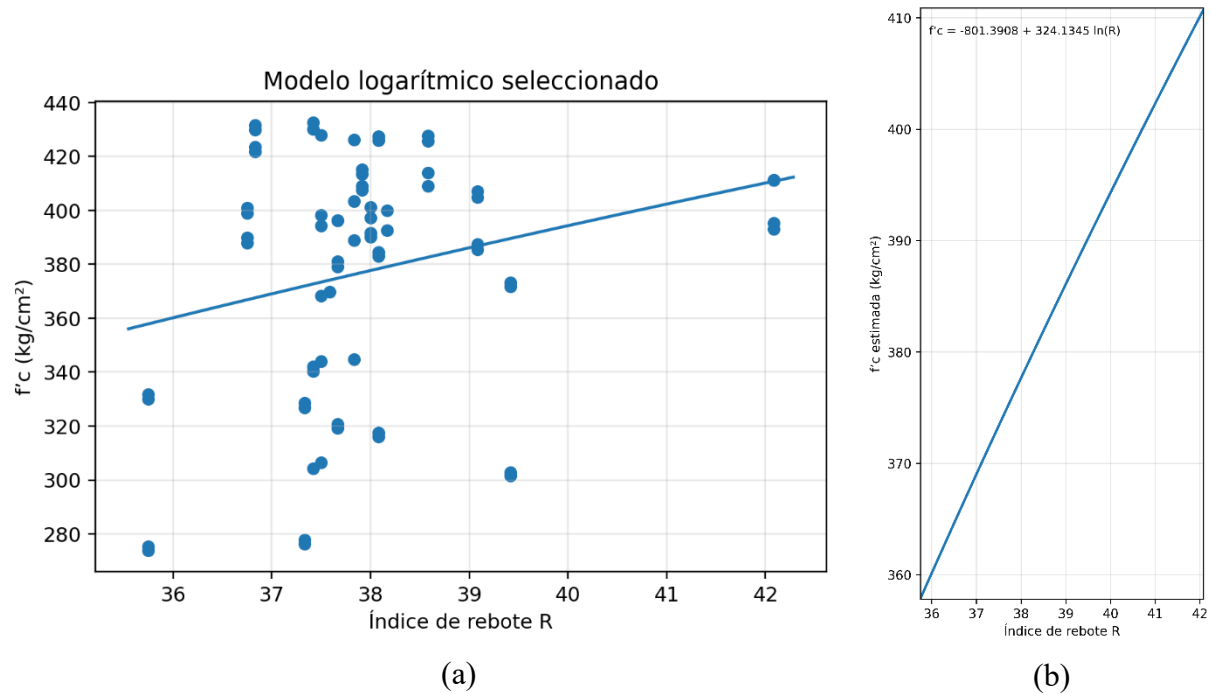
Indicadores estadísticos del modelo logarítmico

Indicador	Valor
Número de pares	70
Intercepto a	-801.3908
Coefficiente b	324.1345
r	0.2439
R ²	0.0595
R ² ajustado	0.0457
RMSE	43.17 kg/cm ²
MAE	35.51 kg/cm ²
F	4.3024
p	0.0418

La Tabla 14 evidencia que el modelo logarítmico obtuvo el mejor desempeño relativo entre los modelos evaluados. Su ecuación fue $f'_c = -801.3908 + 324.1345 \ln(R)$, con $r = 0.2439$, $R^2 = 0.0595$, R^2 ajustado = 0.0457, RMSE = 43.17 kg/cm², MAE = 35.51 kg/cm² y $p = 0.0418$. Aunque estos indicadores muestran una ligera mejora respecto al modelo lineal y potencial, la capacidad explicativa continúa siendo baja. En consecuencia, el modelo logarítmico puede considerarse el mejor entre las alternativas analizadas, pero no un modelo predictivo suficientemente fuerte para reemplazar al ensayo de compresión uniaxial.

Figura 11.

Modelo logarítmico entre R y f'_c



Nota. En el panel (b) se utilizó una escala vertical ampliada y una relación de aspecto ajustada para facilitar la apreciación de la curvatura de la función. La modificación corresponde únicamente a la presentación gráfica; se mantienen sin cambios el rango experimental, la ecuación y los valores estimados.

La Figura 11 representa el ajuste obtenido mediante la función logarítmica ($f'_c = -801.3908 + 324.1345 \ln(R)$). En la representación conjunta con los datos experimentales, la curvatura resulta poco perceptible debido al reducido intervalo de valores de R evaluado. Por esta razón, el panel auxiliar emplea una escala vertical ampliada que permite identificar con mayor claridad la forma logarítmica de la función, sin alterar sus valores calculados. No obstante, la elevada dispersión de las observaciones respecto al modelo es coherente con su bajo coeficiente de determinación ($R^2 = 0.0595$), por lo que su capacidad explicativa continúa siendo reducida.

4.1.9. Modelo potencial

El tercer modelo evaluado fue el potencial, expresado como $f'_c = AR^B$. Sus coeficientes A y B se estimaron mediante mínimos cuadrados no lineales en la escala original, minimizando la suma de cuadrados de los errores entre las resistencias observadas y estimadas (Draper & Smith, 1998; Montgomery et al., 2021).

$$f'_c = 19.5929R^{0.8133}$$

Tabla 15.

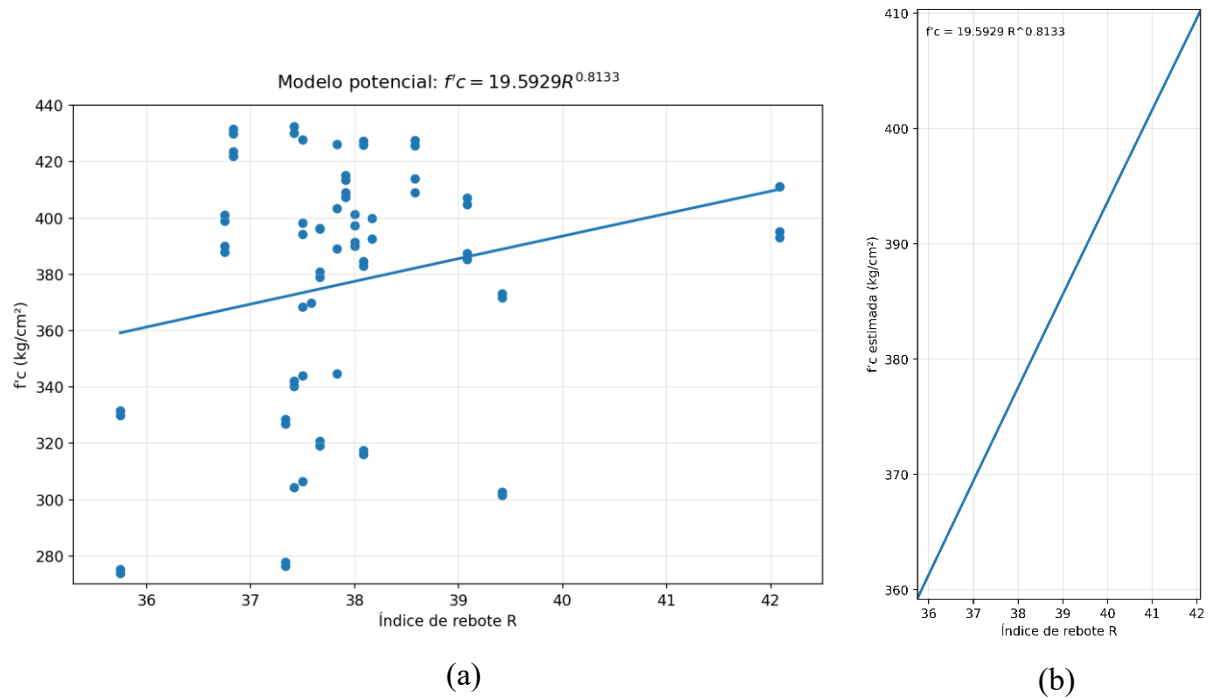
Indicadores estadísticos del modelo potencial

Indicador	Valor
Número de pares	70
Coefficiente A	19.5929
Exponente B	0.8133
r	0.2396
R ²	0.0574
R ² ajustado	0.0435
RMSE	43.22 kg/cm ²
MAE	35.57 kg/cm ²
F	4.1404
p	0.0458

La Tabla 15 presenta el ajuste del modelo potencial, cuya ecuación fue $f'_c = 19.5929R^{0.8133}$. Este modelo mostró una relación positiva entre R y f'_c , con $r = 0.2396$ y $R^2 = 0.0574$. Aunque el valor $p = 0.0458$ indica significancia estadística, el RMSE = 43.22 kg/cm² y el MAE = 35.57 kg/cm² fueron ligeramente superiores a los del modelo logarítmico. Por ello, el modelo potencial no fue seleccionado como el mejor modelo relativo. Su comportamiento confirma que la relación entre esclerometría y compresión existe, pero es débil bajo las condiciones experimentales evaluadas.

Figura 12.

Modelo potencial entre R y $f'c$



Nota. En el panel (b) se empleó una escala vertical ampliada y una relación de aspecto ajustada para hacer más perceptible la forma de la función potencial dentro del intervalo evaluado. Este recurso gráfico no modifica la ecuación, el dominio experimental ni los valores estimados.

La Figura 12 corresponde al modelo potencial ($f'c=19.5929R^{0.8133}$). Aunque matemáticamente se trata de una función no lineal, su curvatura es reducida dentro del intervalo experimental debido al estrecho rango del índice de rebote y al valor del exponente estimado. En consecuencia, en la representación con los datos experimentales su trayectoria puede apreciarse visualmente próxima a una recta. El panel auxiliar, mediante una escala vertical ampliada, permite distinguir con mayor claridad la forma potencial de la función sin modificar los resultados del ajuste. La dispersión observada continúa siendo consistente con el bajo R^2 obtenido (0.0574).

4.1.10. Comparación de modelos de ajuste

Después de ajustar los modelos lineal, logarítmico y potencial, se realizó una comparación conjunta de sus principales indicadores estadísticos. El modelo logarítmico presentó el mejor desempeño relativo; sin embargo, su capacidad explicativa siguió siendo baja.

Tabla 16.

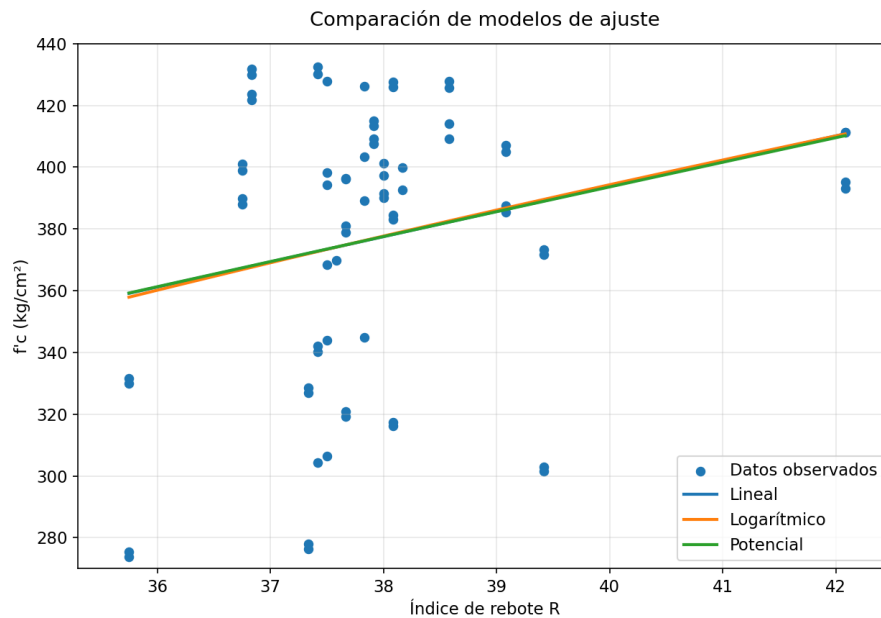
Comparación de modelos de calibración R^2 - f^2c

Modelo	Ecuación	r	R ²	R ² aj	RMSE	MAE	F	p
Lineal	$f^2c = 67.5924 + 8.1551R$	0.2386	0.0569	0.0431	43.23	35.58	4.1055	0.0467
Logarítmico	$f^2c = -801.3908 + 324.1345 \ln(R)$	0.2439	0.0595	0.0457	43.17	35.51	4.3024	0.0418
Potencial	$f^2c = 19.5929R^{0.8133}$	0.2396	0.0574	0.0435	43.22	35.57	4.1404	0.0458

La Tabla 16 permite comparar de manera conjunta los modelos lineal, logarítmico y potencial. Se observa que los tres modelos presentan valores de r cercanos a 0.24, R² inferiores a 0.06 y errores de estimación similares. El modelo logarítmico alcanzó el mayor R² ajustado y el menor RMSE y MAE, razón por la cual fue seleccionado como el modelo de mejor desempeño relativo. Sin embargo, las diferencias entre modelos fueron mínimas y todos presentaron baja capacidad explicativa. Por ello, la selección del modelo logarítmico debe entenderse como una elección relativa entre alternativas, no como evidencia de alta precisión predictiva.

Figura 13.

Comparación gráfica de los modelos de calibración



La Figura 13 permite comparar simultáneamente los modelos lineal, logarítmico y potencial. Se observa que las curvas o líneas de ajuste presentan comportamientos muy cercanos dentro del rango de valores de R evaluado. Esta proximidad gráfica coincide con los indicadores estadísticos similares obtenidos para los tres modelos. El modelo logarítmico fue seleccionado por su mejor desempeño relativo, pero la comparación visual confirma que la mejora respecto a los otros modelos fue reducida.

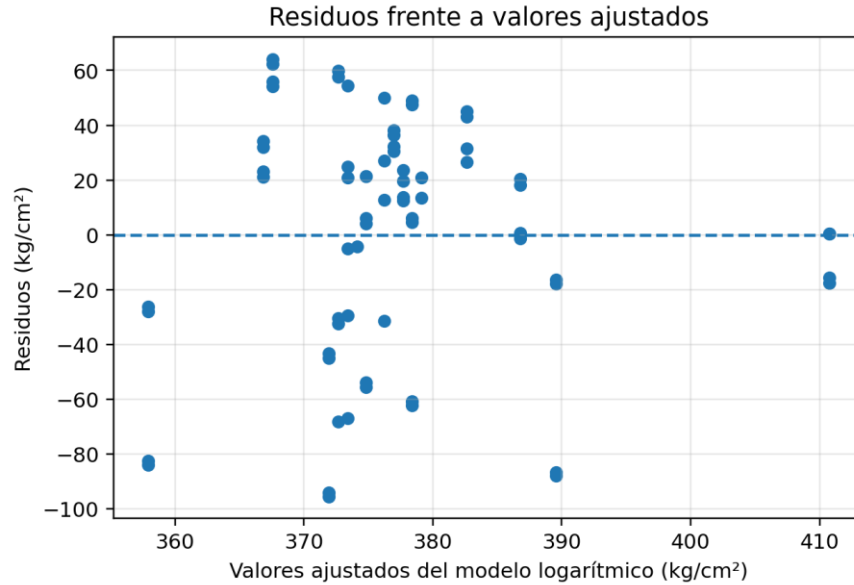
4.1.11. Análisis de residuos

El análisis de residuos del modelo logarítmico permitió evaluar la diferencia entre los valores observados de $f'c$ y los valores estimados por la ecuación seleccionada. Los residuos mostraron dispersión considerable alrededor de cero, coherente con el bajo R^2 del modelo y con la incertidumbre observada para estimaciones individuales (Draper & Smith, 1998; Montgomery et al., 2021).

$$e_i = f'_{c,i} - \hat{f}'_{c,i}$$

Figura 14.

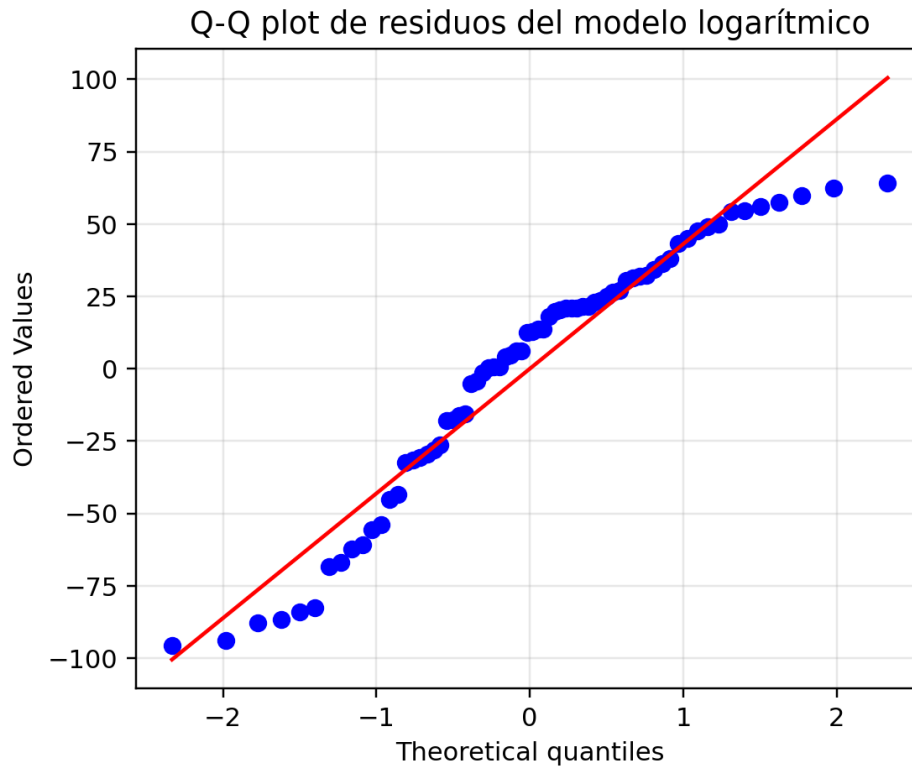
Residuos frente a valores ajustados del modelo logarítmico



La Figura 14 de residuos permite evaluar la diferencia entre los valores observados y los valores estimados por el modelo. La dispersión de los residuos alrededor de cero permite analizar si existe algún patrón sistemático de error. En este caso, la presencia de residuos con magnitudes apreciables confirma que el modelo no logra estimar con precisión todos los valores de resistencia a compresión. Por ello, el análisis residual refuerza la necesidad de interpretar el modelo con cautela y de no reemplazar el ensayo de compresión uniaxial con la esclerometría.

Figura 15.

Q-Q plot de residuos del modelo logarítmico



La Figura 15 muestra que los residuos del modelo logarítmico se aproximan a la línea de referencia en la zona central de la distribución; sin embargo, se observan desviaciones en sus extremos. En la cola inferior, varios residuos negativos se alejan de la trayectoria esperada, mientras que en la cola superior los puntos permanecen por debajo de la recta. Este comportamiento indica que los residuos no presentan un ajuste completamente normal y que los valores extremos influyen en la distribución del error. En consecuencia, la significancia estadística del modelo debe interpretarse con cautela y de manera conjunta con el bajo coeficiente de determinación, los valores de RMSE y MAE y la amplitud de la banda de predicción. El gráfico no invalida por sí solo el ajuste logarítmico, pero confirma que su capacidad para estimar con precisión la resistencia individual de una probeta es limitada.

4.1.12. Banda de predicción al 95 %

Luego de seleccionar el modelo logarítmico como el de mejor desempeño relativo, se construyó la banda de predicción al 95 %. Para los 70 pares evaluados, la banda comprendió 68 pares observados, equivalente a una cobertura de 97.14 %. Los pares fuera de banda correspondieron a las probetas P-08 y P-26.

Tabla 17.

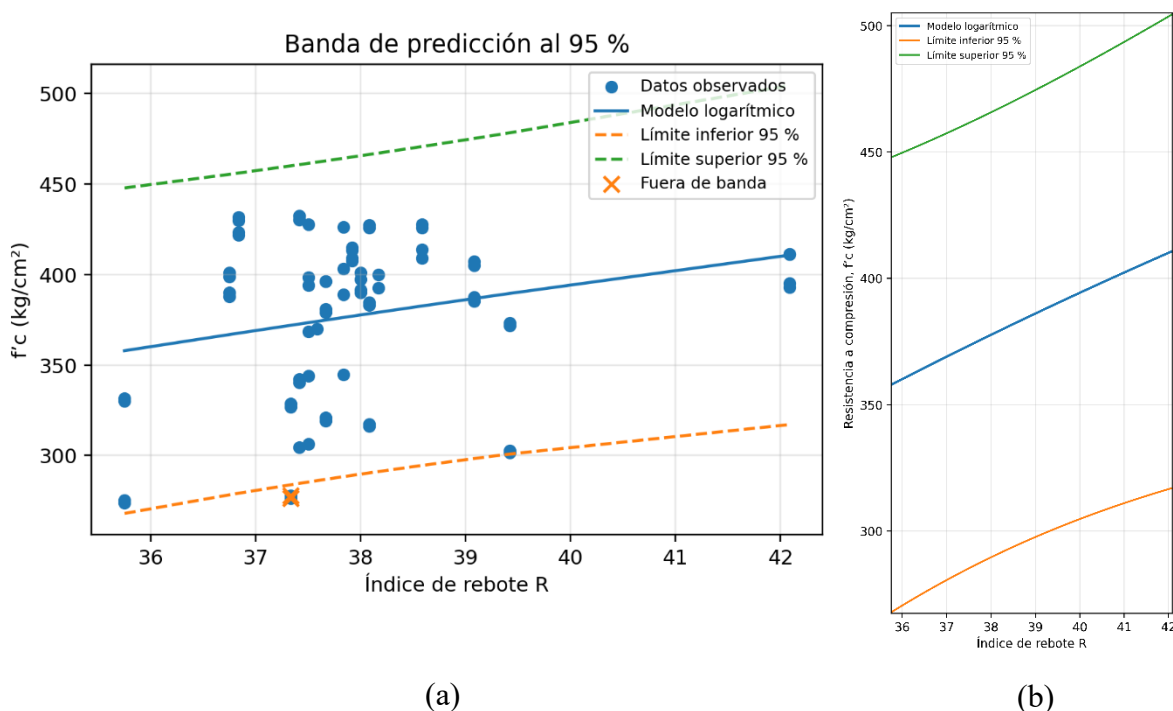
Cobertura de la banda de predicción al 95 %

Indicador	Valor
Modelo seleccionado	Logarítmico
Número total de pares	70
Pares contenidos dentro de la banda	68
Pares fuera de la banda	2
Probetas fuera de banda	P-08 y P-26
Cobertura observada	97.14 %
Criterio mínimo establecido	90.00 %

La Tabla 17 muestra que la banda de predicción del modelo logarítmico contuvo 68 de los 70 pares experimentales, equivalente a una cobertura observada de 97.14 %. Este valor supera el criterio mínimo establecido de 90 %, por lo que la banda cumple con el requisito de cobertura planteado. Sin embargo, esta lectura debe ser prudente, ya que una alta cobertura puede estar asociada a una banda amplia y no necesariamente a un modelo preciso. En consecuencia, la banda de predicción permite delimitar un rango probable de resistencia, pero no garantiza estimaciones individuales exactas.

Figura 16.

Banda de predicción al 95 % del modelo logarítmico



Nota. El panel (b) fue construido con los mismos valores y el mismo procedimiento estadístico utilizado en el cálculo original de la banda de predicción. Se empleó una escala vertical ampliada y una relación de aspecto ajustada únicamente para facilitar la apreciación de la curvatura y de los cambios de amplitud de los límites. No se modificaron la ecuación del modelo ni los límites de predicción calculados.

La Figura 16 presenta la banda de predicción individual al 95 % correspondiente al modelo logarítmico. Los límites fueron calculados para cada valor de R considerando ($x = \ln(R)$), el error estándar residual y la distancia de cada valor respecto al centro de los datos. En la representación principal, la variación de amplitud resulta poco evidente debido a que la incertidumbre residual del modelo es considerable frente a los cambios producidos dentro del reducido intervalo de R. La representación auxiliar permite observar con mayor claridad que los límites no son estrictamente paralelos y que la amplitud de la banda varía a lo largo del rango experimental. Esta mejora

corresponde únicamente a la escala de presentación y no implica modificación de los valores calculados. De los 70 pares experimentales empleados en el ajuste, 68 se encontraron dentro de los límites, equivalente a una cobertura interna de 97.14 %.

Aunque la banda cumplió con el criterio de cobertura, su amplitud refleja incertidumbre considerable para estimar valores individuales de resistencia a compresión. Por ello, el modelo debe utilizarse con fines descriptivos, comparativos y de control preliminar, no como sustituto directo del ensayo de compresión uniaxial.

4.2. Contrastación de hipótesis

La contrastación de hipótesis se realizó a partir de los resultados obtenidos en los modelos de ajuste entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f'_c . De los modelos evaluados, el logarítmico presentó el mejor desempeño relativo, por lo que fue considerado como referencia principal para interpretar la relación entre la esclerometría y la compresión uniaxial.

4.2.1. Relación global entre esclerometría y resistencia a compresión

La hipótesis general planteó que el índice de rebote R obtenido mediante esclerometría presenta una relación estadísticamente significativa con la resistencia a compresión f'_c determinada mediante compresión uniaxial. El modelo logarítmico obtuvo un valor $p = 0.0418$, menor al nivel de significancia de 0.05; por ello, se evidencia una relación estadísticamente significativa entre ambas variables.

Sin embargo, la magnitud de esta relación fue baja, debido a que el coeficiente de correlación fue $r = 0.2439$ y el coeficiente de determinación fue $R^2 = 0.0595$. Esto indica que el índice de rebote explica solo el 5.95 % de la variabilidad de la resistencia a compresión. En ese sentido, debido a que $p = 0.0418$ fue menor que $\alpha = 0.05$, se rechazó la hipótesis nula general y se

respaldó la hipótesis general. Sin embargo, no se confirmó una relación fuerte ni una capacidad predictiva suficiente para reemplazar el ensayo de compresión uniaxial.

Este resultado confirma que el esclerómetro Schmidt registra una respuesta superficial relacionada con la dureza del concreto, pero dicha respuesta no explicó adecuadamente la variabilidad interna de la resistencia a compresión. Por tanto, el índice de rebote puede emplearse como indicador preliminar de uniformidad superficial, pero no como sustituto del ensayo de compresión uniaxial.

4.2.2. Cumplimiento resistente del concreto diseñado

La primera hipótesis específica indicó que el diseño de mezcla elaborado con agregados locales de Chota permite obtener un concreto que cumple con la resistencia de diseño $f'_c = 210$ kg/cm² a los 28 días. Los resultados de compresión uniaxial mostraron una resistencia promedio de 377.35 kg/cm², con un valor mínimo de 273.89 kg/cm² y un valor máximo de 432.50 kg/cm². Debido a que el menor valor registrado fue superior a 210 kg/cm², se verificó que el 100 % de las probetas cumplió con la resistencia especificada.

En consecuencia, se acepta la hipótesis específica; este resultado demuestra que la dosificación empleada, basada en el método ACI 211.1 y corregida por humedad de los agregados, permitió alcanzar resistencias superiores a la resistencia nominal. Además, confirma que los agregados locales de Conchán y Colpamatara pueden emplearse en concretos convencionales siempre que se realice una caracterización previa y un diseño de mezcla técnicamente controlado.

No obstante, la resistencia promedio obtenida fue considerablemente mayor que $f'_c = 210$ kg/cm², lo cual debe considerarse al interpretar la calibración esclerométrica. El modelo ajustado no representa un rango amplio de resistencias bajas y altas, sino un conjunto de probetas que, en

su totalidad, superó la resistencia de diseño. Esta condición puede influir en la baja variabilidad del índice de rebote y en la débil relación con f^c .

4.2.3. Comparación de la variabilidad de R y f^c

La segunda hipótesis específica planteó que la resistencia a compresión f^c presentaría mayor variabilidad relativa que el índice de rebote R. Debido a que ambas variables poseen unidades y escalas diferentes, la comparación se realizó mediante sus coeficientes de variación.

El índice de rebote presentó una media de 37.98, una desviación estándar de 1.31 y un coeficiente de variación de 3.45 %. Por su parte, la resistencia a compresión alcanzó una media de 377.35 kg/cm², una desviación estándar de 44.84 kg/cm² y un coeficiente de variación de 11.88 %.

La diferencia observada entre ambos coeficientes fue:

$$11.88\% - 3.45\% = 8.43 \text{ puntos porcentuales}$$

Además, la variabilidad relativa de f^c fue aproximadamente 3.44 veces la variabilidad de R. En consecuencia, se respalda la hipótesis específica dentro de la muestra analizada. Este resultado indica que las probetas presentaron respuestas superficiales relativamente homogéneas, aunque sus resistencias a compresión mostraron una dispersión mayor.

4.2.4. Desempeño relativo de los modelos de ajuste

La tercera hipótesis específica planteó que el modelo logarítmico presentaría el mejor desempeño relativo entre los modelos lineal, logarítmico y potencial. La comparación se realizó mediante el R^2 ajustado, el RMSE y el MAE, calculados en la misma escala de resistencia.

El modelo logarítmico obtuvo un R^2 ajustado de 0.0457, un RMSE de 43.17 kg/cm² y un MAE de 35.51 kg/cm². El modelo lineal presentó un R^2 ajustado de 0.0431, un RMSE de 43.23

kg/cm² y un MAE de 35.58 kg/cm²; mientras que el potencial alcanzó valores de 0.0435, 43.22 kg/cm² y 35.57 kg/cm², respectivamente.

De acuerdo con los criterios establecidos, el modelo logarítmico presentó los indicadores numéricos más favorables. Sin embargo, la reducción del error fue de solo 0.06 kg/cm² respecto al modelo lineal y de 0.05 kg/cm² respecto al potencial. Por esta razón, la hipótesis específica se respalda parcialmente: el ajuste logarítmico fue el mejor dentro de las alternativas comparadas, pero la diferencia no demuestra una superioridad predictiva importante.

4.2.5. Cobertura de la banda de predicción e incertidumbre del modelo

La cuarta hipótesis específica planteó que la banda de predicción al 95 % del modelo seleccionado debía contener al menos el 90 % de los pares experimentales R-f^c. En el modelo logarítmico, la banda de predicción contuvo 68 de los 70 pares observados, equivalente a una cobertura de 97.14 %. Este porcentaje supera el criterio mínimo establecido, por lo que se acepta la hipótesis específica.

A pesar de ello, la interpretación de este resultado debe ser cautelosa; una banda de predicción puede contener un alto porcentaje de observaciones debido a que incorpora la incertidumbre del modelo y la variabilidad individual de los datos. Por tanto, una cobertura elevada no significa necesariamente que el modelo sea preciso; también puede reflejar una banda amplia. En este caso, la amplitud de la banda evidencia que existe incertidumbre considerable para estimar una nueva resistencia individual a partir de un valor de R.

La banda de predicción permite reconocer el rango probable en el que podría ubicarse una nueva observación, aunque no garantiza una estimación exacta. En este caso, el modelo logarítmico puede apoyar evaluaciones preliminares de uniformidad y control referencial, pero

debe complementarse con ensayos destructivos cuando se requiera determinar la resistencia a la compresión del concreto.

Tabla 18.

Síntesis de contrastación de hipótesis

Hipótesis	Criterio evaluado	Resultado	Decisión
General	($p < 0.05$), junto con r y R^2	$r = 0.2439$; $R^2 = 0.0595$; $p = 0.0418$	Se rechaza la hipótesis nula; existe relación estadística, aunque débil
HE1	Cumplimiento de 210 kg/cm ²	Las 70 probetas superaron el valor especificado	Se respalda en la muestra
HE2	Comparación de los coeficientes de variación	CV de $R = 3.45\%$; CV de $f'_c = 11.88\%$	Se respalda descriptivamente
HE3	Mayor R^2 ajustado y menores RMSE y MAE	El modelo logarítmico presentó los valores más favorables	Se respalda parcialmente por la mínima diferencia
HE4	Cobertura igual o mayor que 90 %	68 de 70 pares; 97.14 %	Se respalda en la muestra evaluada

La Tabla 18 sintetiza los criterios empleados para examinar las hipótesis de la investigación. El valor $p = 0.0418$ permitió rechazar la hipótesis nula general y respaldar la existencia de una relación estadísticamente significativa entre R y f'_c , aunque su magnitud fue débil. La primera hipótesis específica se respaldó porque las 70 probetas superaron la resistencia de 210 kg/cm². La segunda se respaldó descriptivamente, dado que el coeficiente de variación de f'_c fue mayor que el de R . La tercera se respaldó parcialmente, debido a que el modelo logarítmico presentó los indicadores más favorables, pero con diferencias mínimas respecto a los otros modelos. Finalmente, la cuarta hipótesis se respaldó dentro de la muestra evaluada, al obtenerse una cobertura de 97.14 %. En conjunto, los resultados muestran que el martillo Schmidt aporta información preliminar, pero no sustituye al ensayo de compresión uniaxial.

4.3. Discusión

La comparación se realizó a partir de dos mediciones diferentes: el índice de rebote registrado en la superficie y la resistencia obtenida mediante la rotura de cada probeta elaborada con materiales locales de Chota. Debido a que ambos ensayos representan respuestas distintas del concreto, los resultados fueron interpretados de manera complementaria. Asimismo, el modelo obtenido se limita al intervalo experimental y a las condiciones de materiales, dosificación, curado y ensayo consideradas en la investigación.

Las 70 probetas quedaron por encima de 210 kg/cm^2 ; incluso el menor resultado alcanzó 273.89 kg/cm^2 . La resistencia promedio fue de 377.35 kg/cm^2 , resultado que se obtuvo gracias a la dosificación, los materiales empleados y el proceso de curado, que permitieron obtener un concreto con resistencia mayor en 167.35 kg/cm^2 al valor esperado. Este comportamiento coincide con los antecedentes regionales de Carranza Segovia (2021) y Flores Herrera (2023), quienes también señalaron que los agregados locales de Chota pueden alcanzar resistencias adecuadas cuando se caracterizan y dosifican correctamente.

Haber logrado y superado el valor de resistencia no significa que la predicción sea precisa, ya que el factor de rebote R presentó una variabilidad reducida, con media de 37.98 y coeficiente de variación de 3.45 %, mientras que la resistencia a compresión mostró una dispersión mayor, con media de 377.35 kg/cm^2 y coeficiente de variación de 11.88 %. Por lo que la diferencia entre los coeficientes de variación muestra que superficies con respuestas similares produjeron resistencias internas muy distintas en comparación a variaciones más amplias, como puede ser el comportamiento interno observado durante la compresión, incluso cuando todas las probetas superan el valor de diseño.

La discrepancia se entiende mejor al revisar qué parte del concreto representa cada ensayo: uno responde a la zona superficial y el otro al comportamiento global de la probeta hasta la falla. Esta lectura coincide con Kumavat et al. (2021), quienes indicaron que el martillo Schmidt puede verse afectado por condiciones superficiales, tipo de agregado, humedad, compactación, edad y curado; y con Aydin y Saribiyik (2010), quienes advirtieron que el método no debe emplearse de manera aislada para aceptar o rechazar concreto estructural.

Los tres modelos tuvieron poca diferencia entre sus resultados, pero el logarítmico tuvo indicadores que muestran un mejor desempeño. Su ecuación fue $f'c = -801.3908 + 324.1345 \ln(R)$, con $r = 0.2439$, $R^2 = 0.0595$, R^2 ajustado = 0.0457, RMSE = 43.17 kg/cm², MAE = 35.51 kg/cm² y $p = 0.0418$. Aunque el valor p indica que existe una relación estadísticamente significativa entre R y $f'c$, el coeficiente de correlación y el R^2 muestran que dicha relación es débil y explica solo una pequeña parte de la variabilidad de la resistencia. Por esto el resultado debe analizarse con suma cautela: el modelo logarítmico fue el mejor dentro de los modelos usados, aunque no tuvo buena capacidad de predicción para estimar con precisión la resistencia de cada probeta.

Los resultados ofrecen dos lecturas que deben mantenerse juntas: aunque $p < 0.05$ confirmó significancia estadística, los valores $r = 0.2439$ y $R^2 = 0.0595$ muestran que la mayor parte de la variación de $f'c$ no fue explicada por el índice de rebote; por ello, el martillo Schmidt puede apoyar una revisión preliminar del concreto y la comparación de uniformidad, pero no reemplazar el ensayo de compresión uniaxial.

La ecuación obtenida solo puede usarse en probetas hechas con la arena de Conchán y la piedra de Colpamatara, si se utilizaran en la mezcla otros agregados, se modificaría la dureza superficial, la absorción y la interacción entre la pasta y el agregado, alterando con ello la relación R - $f'c$ y a su vez el uso de la ecuación. Katuwal (2019) y Tugrul Tunc (2025) destacaron que el

tipo y la procedencia del agregado influyen en la relación entre el índice de rebote y la resistencia a compresión. En la presente investigación se empleó agregado fino de Conchán y agregado grueso de Colpamatara, por lo que la relación $R-f^c$ obtenida representa únicamente las condiciones experimentales evaluadas; no conviene aplicar directamente esta ecuación a concretos elaborados con otros agregados o bajo condiciones diferentes, como otras dosificaciones, edades de ensayo o formas de curado.

El martillo Schmidt permitió una lectura inicial, pero no permitió estimar el valor de f^c ; el análisis de sus resultados necesita interpretarse con información de ensayos locales y del mismo elemento evaluado. Esta idea coincide con Padilla-Peña y Triana-León (2022), quienes encontraron que los ensayos no destructivos permiten reconocer tendencias generales, aunque presentan mayor incertidumbre frente al ensayo de compresión. De manera similar, Galindo Reascos (2022) y Torres Palacios (2022) señalaron que la confiabilidad aumenta cuando la esclerometría se complementa con otros métodos o se valida con ensayos destructivos. En esa misma línea, los resultados del estudio indican que el martillo Schmidt puede aportar información preliminar, pero la compresión uniaxial continúa siendo necesaria cuando se requiere confirmar la resistencia del concreto.

La cobertura de la banda es del 97.14 % de todos los ensayos de probeta, pero esto no es evidencia de precisión porque, aunque 68 de los 70 pares quedaron dentro de la banda, el intervalo de la banda fue muy amplio y una banda de esa amplitud puede contener muchos puntos aún con una incertidumbre muy grande en la predicción de f^c a partir de índice de rebote R . Por esta razón, la cobertura se interpretó junto con el RMSE, el MAE y el R^2 , de modo que la banda representa una tendencia general sin garantizar estimaciones exactas para probetas individuales.

El equipo resulta útil en evaluaciones preliminares, permite comparar zonas de una estructura, reconocer áreas de menor uniformidad y orientar la selección de puntos que requieran ensayos complementarios. Sin embargo, no debe utilizarse como único criterio para aceptar la resistencia del concreto, sobre todo cuando la decisión técnica involucra seguridad estructural, recepción de obra o diagnóstico de elementos existentes.

Las curvas incluidas por el fabricante requieren cautela cuando los materiales y las condiciones de ensayo son distintos. Los modelos desarrollados ya presentan parámetros de evaluación poco confiables, tomar una ecuación no calibrada en Chota ni con los materiales usados en la mezcla podría generar estimaciones aún peores para el concreto de la zona. Por ello, esta investigación refuerza la necesidad de que los laboratorios, profesionales y responsables de obra interpreten las lecturas de rebote con criterio técnico, considerando el tipo de agregado, la edad del concreto, el estado superficial, el curado y la existencia de una correlación experimental.

Como el estudio se restringió a probetas de una misma dosificación, resistencia especificada y procedencia de agregados, sus resultados no deben generalizarse automáticamente a concretos de otras resistencias, estructuras en servicio, elementos carbonatados, superficies deterioradas o mezclas elaboradas con materiales de distinto origen; además, al compararse la esclerometría únicamente con la compresión uniaxial, queda pendiente verificar su comportamiento cuando se incorporen métodos como la velocidad de pulso ultrasónico o la extracción de núcleos y cuando las mediciones se realicen directamente sobre elementos contruidos.

Con estos resultados, la compresión uniaxial conserva su condición de referencia y el índice R queda como información complementaria de alcance limitado. La evidencia experimental mostró que el concreto evaluado cumplió con la resistencia de diseño, pero el índice de rebote R

no explicó de manera suficiente la variabilidad de f'_c . Por ello, el martillo Schmidt debe mantenerse como herramienta indirecta y complementaria para la evaluación preliminar de la capacidad resistente del concreto, mientras que la compresión uniaxial debe conservarse como método de referencia cuando se requiera una determinación precisa de la resistencia.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. El análisis de los 70 pares experimentales evidenció una relación estadísticamente significativa entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión $f'c$, debido a que el modelo logarítmico presentó $p = 0.0418$, inferior a $\alpha = 0.05$. Sin embargo, el coeficiente de correlación $r = 0.2439$ indicó una relación de baja magnitud y el coeficiente de determinación $R^2 = 0.0595$ mostró que el índice de rebote explicó únicamente el 5.95 % de la variabilidad observada en la resistencia a compresión. Por tanto, bajo las condiciones evaluadas, el índice R aporta información complementaria, pero por sí solo presenta baja capacidad para estimar individualmente $f'c$.

2. Las 70 probetas ensayadas presentaron resistencias superiores a la resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Los valores variaron entre 273.89 y 432.50 kg/cm^2 , con una media de 377.35 kg/cm^2 y una desviación estándar de 44.84 kg/cm^2 . Asimismo, la resistencia media obtenida fue aproximadamente 28.4 % superior a la resistencia promedio requerida $f'cr = 294 \text{ kg/cm}^2$ considerada en el diseño de mezcla. Estos resultados describen el comportamiento del concreto elaborado bajo las condiciones de dosificación, materiales, corrección de humedad y curado adoptadas en la investigación, sin atribuir la sobre resistencia observada a un factor individual.

3. La resistencia a compresión presentó una variabilidad relativa mayor que el índice de rebote. El índice R obtuvo un coeficiente de variación de 3.45 %, mientras que $f'c$ alcanzó 11.88 %, correspondiente a una diferencia de 8.43 puntos porcentuales. En términos relativos, la variabilidad de $f'c$ fue aproximadamente 3.44 veces la observada en R . Por tanto, lecturas de rebote relativamente similares estuvieron asociadas a un rango considerablemente mayor de resistencias a compresión.

4. El modelo logarítmico presentó el mejor desempeño relativo entre las tres formas funcionales evaluadas, al alcanzar el mayor R^2 ajustado (0.0457) y los menores valores de RMSE (43.17 kg/cm²) y MAE (35.51 kg/cm²). Sin embargo, su ventaja fue mínima: el RMSE disminuyó únicamente 0.06 kg/cm² respecto al modelo lineal y 0.05 kg/cm² respecto al potencial. En consecuencia, la tercera hipótesis específica se respalda solo parcialmente, debido a que el modelo logarítmico obtuvo los indicadores numéricamente más favorables, pero no mostró una superioridad práctica relevante frente a las otras alternativas.

5. La banda de predicción al 95 % del modelo logarítmico incluyó 68 de los 70 pares experimentales utilizados en el ajuste, equivalente a una cobertura interna de 97.14 %, superando el criterio de 90 % planteado en la cuarta hipótesis específica. No obstante, la amplitud de sus límites evidencia una incertidumbre considerable para las estimaciones individuales de $f'c$. Debido a que la cobertura se determinó sobre la misma muestra empleada para construir el modelo, este resultado no constituye una validación predictiva independiente ni garantiza un comportamiento equivalente en nuevas probetas.

5.2. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, las limitaciones identificadas y el alcance de la investigación, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. En la aplicación práctica, el martillo Schmidt debe usarse para comparar zonas de un mismo elemento, reconocer cambios en la respuesta superficial y escoger puntos que necesiten evaluaciones adicionales. No sería adecuado utilizar una lectura del martillo para decidir si aceptar o no el concreto, se necesitarían más ensayos y contrastación. Cuando la evaluación esté relacionada con la seguridad, la recepción de una obra o el diagnóstico de una estructura, será necesario recurrir a un ensayo de referencia.

2. Para mejorar la trazabilidad y repetibilidad de la investigación en futuras evaluaciones, cada ensayo debería quedar asociado a un registro único que acompañe a la probeta o al punto evaluado, en ella conviene registrar el código, la cantidad de impactos válidos, el promedio R, la resistencia obtenida, la edad, la dosificación, la tanda de mezclado, la cantera, la humedad, la orientación del equipo, el estado de la superficie y el tipo de curado; así se evitaría comparar lecturas obtenidas con propiedades diferentes.

3. Una siguiente etapa experimental debería incorporar concretos de 175, 210 y 280 kg/cm², además de niveles resistentes mayores. Durante esta ampliación será necesario mantener constantes la edad, el procedimiento de fabricación, el curado y la procedencia de los agregados. Un mayor rango de valores de R y f'_c ayudaría a comprobar si las limitaciones encontradas en la correlación obtenida estuvieron relacionadas con haber trabajado únicamente con concreto diseñado para 210 kg/cm².

4. También conviene repetir los ensayos utilizando materiales de otras canteras de Chota y Cajamarca. La comparación debería considerar granulometría, absorción, forma, textura, peso específico, desgaste y composición mineralógica. De esta manera se podría establecer cuánto cambia la relación R- f'_c cuando se modifica el agregado fino o grueso utilizado en el concreto.

5. El rebote puede complementarse con velocidad de pulso ultrasónico, extracción de núcleos u otras técnicas disponibles. El de métodos extra o más mediciones permitiría conocer si un modelo con mayor información puede reducir los errores encontrados en esta investigación.

6. Antes de aplicar la ecuación fuera del laboratorio, será necesario comprobarla con una muestra distinta de aquella utilizada para obtenerla. Posteriormente podrá evaluarse su funcionamiento en columnas, vigas, losas y pavimentos, considerando la edad, humedad,

carbonatación, deterioro, posición del elemento y condiciones de exposición. La cobertura de la banda deberá calcularse nuevamente con esos datos independientes.

REFERENCIAS

- American Concrete Institute. (2022). *ACI PRC-211.1-22: Selecting proportions for normal-density and high-density concrete—Guide*. American Concrete Institute.
- American Psychological Association. (2020). *Publication manual of the American Psychological Association* (7th ed.). American Psychological Association.
- ASTM International. (2024). *ASTM C39/C39M-24: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- ASTM International. (2025). *ASTM C805/C805M-25: Standard test method for rebound number of hardened concrete*. ASTM International.
- Aydin, F., & Saribiyik, M. (2010). Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings. *Scientific Research and Essays*, 5(13), 1644–1648. <https://doi.org/10.5897/SRE.9000310>
- Badarloo, B., & Lehner, P. (2023). Practical aspects of correlation analysis of compressive strength from destructive and non-destructive methods in different directions. *Infrastructures*, 8(11), 155. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8110155>
- Bonett, D. G., & Wright, T. A. (2000). Sample size requirements for estimating Pearson, Kendall and Spearman correlations. *Psychometrika*, 65, 23–28. <https://doi.org/10.1007/BF02294183>
- Borja Suárez, M. A. (2019). *Correlación entre la resistencia real del concreto y el ensayo no destructivo de esclerometría para muestras de concreto en el departamento de Lambayeque* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/5761>
- Campos Acuña, J. L., & Reyes Farje, F. (2023). *Análisis de la resistencia a la compresión del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con el reemplazo de 30 %, 45 % y 60 % de cerámico y concreto reciclado, como alternativa de agregado grueso, Cajamarca 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN. <https://hdl.handle.net/11537/36036>

- Carranza Segovia, J. E. (2021). *Resistencia de concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con los agregados de las canteras de la provincia de Chota, Cajamarca - 2018* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/64484>
- Centurión Vargas, M. A. (2022). *Determinación de la resistencia del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ elaborado con agregados reciclados de vías, en la ciudad de Cajamarca, 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC.
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/5368>
- Choquehuanca Huanca, A. (2022). *Variación de la resistencia del concreto entre el método de esclerometría y núcleos diamantinos, Residencial Aeropuerto, Juliaca - Puno* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/92258>
- Cipiran Velásquez, C. J., & Sialer Mejía, S. D. (2021). *Evaluación de estructuras por métodos no destructivos, Samanco - 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/72160>
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Díaz Edquen, C. R. (2023). *Evaluación del concreto elaborado con agregado reciclado en sustitución del agregado grueso para pavimentos de bajo tránsito en Chota, Cajamarca* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio Institucional USAT. <https://hdl.handle.net/20.500.12423/6796>
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). *Applied regression analysis* (3rd ed.). Wiley.
- Eyzaguirre Acosta, C. A., & Vélez Gallardo, G. A. (2019). *Determinación de la resistencia a la compresión del concreto mediante el método de esclerometría* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC.
<http://hdl.handle.net/10757/626340>
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications.
- Flores Herrera, Y. P. (2023). *Evaluación de la resistencia a compresión del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, empleando los agregados del río Chotano en el distrito de Cochabamba,*

- provincia de Chota, departamento de Cajamarca* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC.
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/6190>
- Flores Moloch, N. J. (2020). *Análisis comparativo de costos y resistencia a la compresión del concreto tradicional y el concreto predosificado seco, Trujillo 2020* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
<https://hdl.handle.net/11537/24150>
- Galindo Reascos, K. A. (2022). *Análisis comparativo y correlación de los ensayos: esclerómetro, ultrasonido y extracción de núcleos, para determinar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad del hormigón endurecido* [Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22547>
- García Murrieta, S. A., & Rodríguez Cachique, C. M. (2022). *Comparación de los ensayos de diamantina y esclerometría del pavimento rígido del Jr. Dos de Mayo, de las cuadras 4–11, Iquitos - 2021* [Tesis de licenciatura, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional UCP. <http://hdl.handle.net/20.500.14503/1760>
- Guerrero Estupiñán, N. A., & Palas De La Torre, J. C. (2023). *Estudio comparativo de resistencia del hormigón similares en estructuras de diferentes edades en la ciudad de Guayaquil* [Tesis de licenciatura, Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil]. Repositorio Institucional ULVR. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/6153>
- Hair, J. F., Jr., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., & Ray, S. (2021). *Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) using R: A workbook*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Huaynatte Paucar, B. A., & Maylle Quispe, J. C. (2024). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica empleando métodos no destructivos del concreto estructural de las viviendas de Jancao, Amarilis - Huánuco* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Hermilio

- Valdizán]. Repositorio Institucional UNHEVAL.
<https://hdl.handle.net/20.500.13080/11131>
- Instituto Nacional de Calidad. (2015). *Concreto. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas (NTP 339.034:2015)*. INACAL.
- Instituto Nacional de Calidad. (2018). *Concreto. Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido (esclerometría) (NTP 339.181:2013, revisada el 2018)*. INACAL.
- Irigoin Barboza, I. (2021). *Evaluación del deterioro prematuro del pavimento rígido de la Av. Micaela Bastidas, Chota, 2019* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. Repositorio Institucional UNACH. <https://hdl.handle.net/20.500.14142/157>
- Katuwal, T. B. (2019). Correlation between concrete compressive strength and rebound number of river bed and crusher run coarse aggregate in Pokhara Valley. *Technical Journal*, 1(1), 29–33. <https://doi.org/10.3126/tj.v1i1.27584>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2002). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association.
- Kumavat, H. R., Chandak, N. R., & Patil, I. T. (2021). Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00491.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00491>
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models* (5th ed.). McGraw-Hill/Irwin.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2021). *Introduction to linear regression analysis* (6th ed.). Wiley.
- Padilla-Peña, S., & Triana-León, C. V. (2022). *Comparación de los resultados de ensayos destructivos y no destructivos en especímenes cilíndricos de concreto en condiciones ideales de laboratorio* [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia.
<https://hdl.handle.net/10983/30597>

- Ramírez Quintana, P. A. (2025). *Relación entre los ensayos de esclerometría y compresión para la estimación de la resistencia del concreto - Chiclayo* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Martín de Porres]. Repositorio Académico USMP.
<https://hdl.handle.net/20.500.12727/18761>
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bhandar Editores.
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763–1768.
<https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Torres Palacios, J. A. (2022). *Correlación entre el $f'c$ equivalente del concreto (ACI 214.4-21) con los criterios para evaluar la resistencia a la compresión por medio de núcleos de concreto (ACI 318-19) y con pruebas no destructivas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Académico Digital UANL.
<https://eprints.uanl.mx/24198/>
- Tugrul Tunc, E. (2025). Relationship between Schmidt Hammer rebound hardness test and concrete strength tests for limestone aggregate concrete based on experimental and statistical study. *Materials*, 18(6), 1388. <https://doi.org/10.3390/ma18061388>
- Universidad Nacional Autónoma de Chota. (2025). *Reglamento de grados y títulos* [Resolución de Comisión Organizadora N.º 770-2025-UNACH]. UNACH.
- Uriarte-Herrera, L., & Cieza-Sánchez, E. (2021). Evaluación de concreto elaborado con agregados de canteras de río y de cerro de los Andes del norte de Perú. *Revista Ciencia Nor@ndina*, 4(2), 4–13. <https://doi.org/10.37518/2663-6360X2021v4n2p4>
- Wasserstein, R. L., & Lazar, N. A. (2016). The ASA statement on p-values: Context, process, and purpose. *The American Statistician*, 70(2), 129–133.
<https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
- Zambrano Rojas, K. L. (2017). *Comparación de los ensayos de diamantina y esclerometría de la pavimentación de los jirones Japón, Portugal y Brasil - Cajamarca* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC.
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/1003>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES / PROCEDIMIENTOS	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
GENERAL ¿Existe una relación estadísticamente significativa entre el índice de rebote R obtenido mediante esclerometría y la resistencia a compresión $f'c$ determinada mediante compresión uniaxial, en probetas de concreto diseñadas para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaboradas con agregados locales de Chota durante el año 2025?	GENERAL Comparar la relación entre el índice de rebote R obtenido mediante esclerometría y la resistencia a compresión $f'c$ determinada mediante compresión uniaxial, en probetas de concreto diseñadas para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaboradas con agregados locales de Chota durante el año 2025.	HIPÓTESIS GENERAL El índice de rebote R obtenido mediante esclerometría presenta una relación estadísticamente significativa con la resistencia a compresión $f'c$ determinada mediante compresión uniaxial, en el concreto diseñado para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y elaborado con agregados locales de Chota. Hipótesis nula: El índice de rebote R obtenido mediante esclerometría no presenta una relación estadísticamente significativa con la resistencia a compresión $f'c$ determinada	Variable independiente: índice de rebote R obtenido mediante esclerometría. Variable dependiente: resistencia a compresión $f'c$ determinada mediante compresión uniaxial.	R: resistencia esclerométrica superficial. $f'c$: resistencia mecánica del concreto frente a compresión.	R promedio válido; media, desviación estándar y CV de R. Resistencia $f'c$; media, desviación estándar y CV de $f'c$. Coeficiente de correlación r ; R^2 ; R^2 ajustado; F; valor p.	Tipo: aplicada. Enfoque: cuantitativo. Nivel/alcance: descriptivo y correlacional. Diseño: no experimental y transversal. Población: probetas cilíndricas de concreto elaboradas con agregados locales de Chota y diseñadas para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. Muestra: 70 probetas P-01 a P-70. Muestreo: no probabilístico intencional. Unidad de análisis: cada probeta cilíndrica. Técnicas: observación directa estructurada, ensayo esclerométrico y ensayo de compresión uniaxial. Instrumentos: fichas de laboratorio, martillo Schmidt, máquina de compresión y hojas de cálculo/software estadístico. Análisis:

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES / PROCEDIMIENTOS	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
		mediante compresión uniaxial en el concreto diseñado para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.				estadística descriptiva, correlación de Pearson, regresión, análisis de residuos y banda de predicción al 95 %.
ESPECÍFICO 1 ¿La resistencia promedio a compresión del concreto elaborado con agregados locales de Chota alcanza la resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días?	ESPECÍFICO 1 Determinar si la resistencia promedio a compresión del concreto elaborado con agregados locales de Chota cumple o supera la resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.	HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1 La resistencia promedio a compresión del concreto elaborado con agregados locales de Chota es mayor a la resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días.	Variable dependiente: resistencia a compresión $f'c$.	Resistencia mecánica del concreto frente a compresión.	$f'c$ individual; resistencia promedio; desviación estándar; valor mínimo; valor máximo; CV; número y porcentaje de probetas con resistencias superiores a 210 kg/cm^2 .	Se ensayaron mediante compresión uniaxial las 70 probetas a los 28 días y sus resultados se compararon con la resistencia especificada de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.
ESPECÍFICO 2 ¿Qué diferencias se presentan entre la variabilidad relativa del índice de rebote R obtenido mediante esclerometría y la variabilidad relativa de la resistencia a compresión $f'c$ determinada mediante	ESPECÍFICO 2 Comparar la variabilidad relativa del índice de rebote R obtenido mediante esclerometría con la variabilidad relativa de la resistencia a compresión $f'c$ determinada	HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2 La resistencia a compresión $f'c$ presenta una variabilidad relativa mayor que el índice de rebote R en las probetas evaluadas.	Variables principales: índice de rebote R y resistencia a compresión $f'c$.	Variabilidad de la respuesta esclerométrica y variabilidad de la resistencia a compresión.	Media; desviación estándar; valor mínimo; valor máximo; rango; CV de R; CV de $f'c$; diferencia entre CV; relación entre ambos	Se calcularon los estadísticos descriptivos de R y $f'c$ para las 70 probetas. La comparación de la variabilidad relativa se realizó principalmente mediante los coeficientes de variación, al tratarse de variables con escalas y unidades diferentes.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES / PROCEDIMIENTOS	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
compresión uniaxial?	mediante compresión uniaxial.				coeficientes de variación.	
ESPECÍFICO 3 ¿Qué modelo (lineal, logarítmico o potencial) proporciona el mejor ajuste entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f^*c ?	ESPECÍFICO 3 Comparar los modelos lineal, logarítmico y potencial para identificar el modelo de mejor desempeño relativo en la relación entre el índice de rebote R y la resistencia a compresión f^*c , considerando R^2 ajustado, RMSE y MAE.	HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3 El modelo logarítmico presenta el mejor desempeño relativo entre los modelos lineal, logarítmico y potencial para describir la relación entre R y f^*c , al obtener el mayor R^2 ajustado y los menores valores de RMSE y MAE.	Procedimiento estadístico complementario: modelos de ajuste $R-f^*c$. No constituye una tercera variable de investigación.	Ajuste estadístico; capacidad explicativa; error de estimación; significancia estadística.	Modelos lineal, logarítmico y potencial; coeficientes de los modelos; r ; R^2 ; R^2 ajustado; RMSE; MAE; F; valor p.	Los modelos lineal y logarítmico se estimaron mediante mínimos cuadrados ordinarios y el modelo potencial mediante mínimos cuadrados no lineales en la escala original. La selección se realizó por desempeño relativo, priorizando mayor R^2 ajustado y menores RMSE y MAE, sin equiparar significancia estadística con alta capacidad predictiva.
ESPECÍFICO 4 ¿Cómo se comporta la banda de predicción al 95 % del modelo seleccionado al aplicarse a los pares experimentales $R-f^*c$?	ESPECÍFICO 4 Analizar el comportamiento de la banda de predicción al 95 % del modelo seleccionado al aplicarse a los pares experimentales $R-f^*c$.	HIPÓTESIS ESPECÍFICA 4 La banda de predicción al 95 % del modelo de mejor desempeño relativo contiene al menos el 90 % de los pares experimentales $R-f^*c$.	Procedimiento estadístico complementario: banda de predicción al 95 % del modelo seleccionado.	Incertidumbre de predicción de una observación individual de f^*c a partir de R.	Límite inferior de predicción; límite superior de predicción; número de pares dentro de la banda; número de pares fuera de la banda; porcentaje de	Se construyó la banda de predicción individual al 95 % del modelo logarítmico utilizando los 70 pares experimentales. Se verificó el número de observaciones contenidas y se comparó la cobertura interna obtenida con el criterio mínimo del 90 %.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES / PROCEDIMIENTOS	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
					cobertura interna.	

Anexo 2. Operacionalización de variables

Variable / procedimiento de análisis	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Técnica e instrumento
Variable independiente: Esclerometría mediante índice de rebote R	La esclerometría es un ensayo no destructivo que permite registrar el índice de rebote producido por el impacto del martillo Schmidt sobre la superficie del concreto endurecido. Este índice puede emplearse como variable indirecta para analizar su relación	Se obtuvo mediante la aplicación del martillo Schmidt sobre cada probeta cilíndrica de concreto. Para cada unidad experimental se registraron lecturas esclerométricas y se calculó un promedio válido del índice de rebote R, manteniendo la	Respuesta esclerométrica superficial.	Índice de rebote R. Promedio válido de lecturas. Media de R. Desviación estándar de R. Coeficiente de variación de R. Valor mínimo y máximo de R.	Cuantitativa de razón. Adimensional.	Técnica: ensayo esclerométrico. Instrumento: martillo Schmidt y ficha de registro de lecturas esclerométricas.

Variable / procedimiento de análisis	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Técnica e instrumento
Variable dependiente: Resistencia a compresión $f'c$	con la resistencia cuando se contrasta con ensayos destructivos de referencia.	codificación de probetas desde P-01 hasta P-70.				
	La resistencia a compresión es la capacidad del concreto endurecido para soportar cargas axiales de compresión hasta la falla. Constituye uno de los principales parámetros de control de calidad y se obtiene dividiendo la carga máxima soportada entre el área transversal de la probeta.	Se determinó mediante el ensayo de compresión uniaxial aplicado a las 70 probetas cilíndricas previamente evaluadas con esclerometría. En cada probeta se registró la carga máxima de rotura y se calculó la resistencia a compresión $f'c$ en kg/cm^2 .	Capacidad resistente del concreto frente a compresión.	Carga máxima de rotura. Área de la sección transversal. Resistencia $f'c$. Media de $f'c$. Desviación estándar de $f'c$. Coeficiente de variación de $f'c$. Valor mínimo y máximo de $f'c$. Porcentaje de probetas que superan 210 kg/cm^2 .	Cuantitativa de razón. kg/cm^2 .	Técnica: ensayo de compresión uniaxial. Instrumento: máquina de compresión, ficha de registro de carga máxima y formato de resultados de laboratorio.
Procedimiento estadístico complementario : Modelos de ajuste $R-f'c$	Los modelos de ajuste son relaciones matemáticas construidas con datos experimentales para describir la asociación entre R y $f'c$ y comparar el desempeño de	Se construyó a partir de los 70 pares experimentales $R-f'c$. Los modelos lineal y logarítmico se estimaron mediante mínimos cuadrados ordinarios; el modelo potencial se estimó mediante mínimos	Ajuste estadístico entre esclerometría y compresión uniaxial. Capacidad explicativa del modelo. Error de estimación.	Coefficientes del modelo. Coeficiente de correlación r . Coeficiente de determinación R^2 . R^2 ajustado. RMSE. MAE. Estadístico F. Valor p. Residuos.	No corresponde a una escala de medición propia; se expresa mediante indicadores estadísticos.	Técnica: análisis estadístico de datos. Instrumento: hoja de cálculo, base consolidada $R-f'c$ y gráficos de ajuste, residuos y banda de predicción.

Variable / procedimiento de análisis	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de medición	Técnica e instrumento
	distintas formas funcionales.	cuadrados no lineales en la escala original. Luego se compararon sus indicadores estadísticos para seleccionar el modelo con mejor desempeño relativo.	Significancia estadística.	Banda de predicción al 95 %. Porcentaje de pares dentro de la banda.		

Anexo 3. Resultados de caracterización del agregado fino

Propiedad	Resultado
Tamaño máximo de partículas	3/8"
Módulo de finura	2.28
Humedad natural	2.54%
Absorción	2.20%
Peso específico de masa	2.560 g/cm ³
Peso específico SSS	2.618 g/cm ³
Peso específico aparente	2.717 g/cm ³
Peso unitario suelto	1382 kg/m ³
Peso unitario compactado	1508 kg/m ³

Anexo 4. Resultados de caracterización del agregado grueso

Propiedad	Resultado
Tamaño máximo de partículas	1"
Tamaño máximo nominal	3/4"
Humedad natural	2.27%
Absorción	0.92%
Peso específico de masa	2.590 g/cm ³

Peso específico SSS	2.613 – 2.624 g/cm ³
Peso específico aparente	2.647 – 2.665 g/cm ³
Peso unitario suelto	1390 kg/m ³
Peso unitario compactado	1541 kg/m ³
Abrasión Los Ángeles	24.00%

Anexo 5. Diseño de mezcla ACI completo

Componente / parámetro	Resultado
Método de diseño	ACI 211
Tipo de concreto	Sin aire incorporado
Resistencia de diseño, f'_c	210 kg/cm ²
Resistencia promedio requerida, f'_{cr}	294 kg/cm ²
Asentamiento previsto	3" – 4"
Relación agua/cemento	0.56
Contenido de aire atrapado	2.00 %
Cemento	Portland Tipo I Pacasmayo
Peso específico del cemento	3.10 g/cm ³
Agregado fino	Cantera Conchán
Agregado grueso	Cantera Colpamatara
Tamaño máximo nominal del agregado grueso	3/4"
Cemento	367.12 kg/m ³
Agua efectiva	190.26 L/m ³
Agregado fino húmedo	782.42 kg/m ³
Agregado grueso húmedo	948.54 kg/m ³
Proporción en peso	1 : 2.13 : 2.58
Agua por bolsa de cemento	22.03 L/bolsa

Anexo 6. Base consolidada y verificación de banda de predicción del modelo logarítmico

Probeta	R	f_c	f_c estimada	Residuo	LI 95 %	LS 95 %	Dentro
P-01	37.50	306.46	373.38	-66.92	285.27	461.49	Sí
P-02	37.83	344.84	376.25	-31.41	288.22	464.28	Sí
P-03	38.00	390.08	377.68	12.40	289.65	465.70	Sí
P-04	42.08	393.06	410.76	-17.70	317.05	504.47	Sí
P-05	38.58	414.01	382.61	31.40	294.44	470.79	Sí
P-06	38.08	427.49	378.39	49.10	290.35	466.42	Sí
P-07	38.08	384.56	378.39	6.17	290.35	466.42	Sí
P-08	37.33	277.92	371.94	-94.02	283.76	460.12	No
P-09	35.75	331.70	357.89	-26.19	267.90	447.89	Sí
P-10	37.67	320.85	374.82	-53.97	286.76	462.88	Sí
P-11	36.83	431.70	367.57	64.13	279.04	456.10	Sí
P-12	37.92	415.07	376.96	38.11	288.94	464.99	Sí
P-13	36.75	401.03	366.83	34.20	278.23	455.44	Sí
P-14	39.08	407.11	386.79	20.32	298.29	475.28	Sí
P-15	37.42	432.50	372.66	59.84	284.52	460.80	Sí
P-16	39.42	373.24	389.54	-16.30	300.74	478.34	Sí
P-17	38.17	399.92	379.09	20.83	291.05	467.14	Sí
P-18	37.67	396.31	374.82	21.49	286.76	462.88	Sí
P-19	37.42	304.43	372.66	-68.23	284.52	460.80	Sí
P-20	37.50	343.93	373.38	-29.45	285.27	461.49	Sí
P-21	37.83	389.03	376.25	12.78	288.22	464.28	Sí
P-22	38.00	391.49	377.68	13.81	289.65	465.70	Sí
P-23	42.08	411.27	410.76	0.51	317.05	504.47	Sí
P-24	38.58	425.79	382.61	43.17	294.44	470.79	Sí
P-25	38.08	383.03	378.39	4.64	290.35	466.42	Sí
P-26	37.33	276.45	371.94	-95.49	283.76	460.12	No
P-27	35.75	329.95	357.89	-27.94	267.90	447.89	Sí
P-28	37.67	319.16	374.82	-55.66	286.76	462.88	Sí
P-29	36.83	429.98	367.57	62.41	279.04	456.10	Sí
P-30	37.92	413.42	376.96	36.46	288.94	464.99	Sí
P-31	36.75	398.90	366.83	32.07	278.23	455.44	Sí
P-32	39.08	404.94	386.79	18.15	298.29	475.28	Sí
P-33	37.42	430.20	372.66	57.54	284.52	460.80	Sí
P-34	39.42	371.76	389.54	-17.78	300.74	478.34	Sí
P-35	37.50	398.33	373.38	24.95	285.27	461.49	Sí
P-36	37.50	394.21	373.38	20.83	285.27	461.49	Sí
P-37	39.42	302.82	389.54	-86.72	300.74	478.34	Sí
P-38	37.42	342.11	372.66	-30.55	284.52	460.80	Sí
P-39	39.08	387.49	386.79	0.70	298.29	475.28	Sí
P-40	36.75	389.94	366.83	23.11	278.23	455.44	Sí

Probeta	R	f_c	f_c estimada	Residuo	LI 95 %	LS 95 %	Dentro
P-41	37.92	409.09	376.96	32.13	288.94	464.99	Sí
P-42	36.83	423.54	367.57	55.97	279.04	456.10	Sí
P-43	37.67	381.00	374.82	6.18	286.76	462.88	Sí
P-44	35.75	275.34	357.89	-82.55	267.90	447.89	Sí
P-45	37.33	328.63	371.94	-43.31	283.76	460.12	Sí
P-46	38.08	317.47	378.39	-60.92	290.35	466.42	Sí
P-47	38.58	427.71	382.61	45.10	294.44	470.79	Sí
P-48	42.08	411.24	410.76	0.48	317.05	504.47	Sí
P-49	38.00	397.32	377.68	19.64	289.65	465.70	Sí
P-50	37.83	403.34	376.25	27.09	288.22	464.28	Sí
P-51	37.50	427.93	373.38	54.55	285.27	461.49	Sí
P-52	37.58	369.80	374.10	-4.30	286.02	462.18	Sí
P-53	37.67	396.23	374.82	21.41	286.76	462.88	Sí
P-54	38.17	392.65	379.09	13.56	291.05	467.14	Sí
P-55	39.42	301.62	389.54	-87.92	300.74	478.34	Sí
P-56	37.42	340.30	372.66	-32.36	284.52	460.80	Sí
P-57	39.08	385.45	386.79	-1.34	298.29	475.28	Sí
P-58	36.75	387.88	366.83	21.05	278.23	455.44	Sí
P-59	37.92	407.48	376.96	30.52	288.94	464.99	Sí
P-60	36.83	421.87	367.57	54.30	279.04	456.10	Sí
P-61	37.67	378.99	374.82	4.17	286.76	462.88	Sí
P-62	35.75	273.89	357.89	-84.00	267.90	447.89	Sí
P-63	37.33	326.90	371.94	-45.04	283.76	460.12	Sí
P-64	38.08	316.20	378.39	-62.19	290.35	466.42	Sí
P-65	38.08	426.00	378.39	47.61	290.35	466.42	Sí
P-66	38.58	409.07	382.61	26.46	294.44	470.79	Sí
P-67	42.08	395.23	410.76	-15.53	317.05	504.47	Sí
P-68	38.00	401.22	377.68	23.54	289.65	465.70	Sí
P-69	37.83	426.25	376.25	50.00	288.22	464.28	Sí
P-70	37.50	368.34	373.38	-5.04	285.27	461.49	Sí