



Universidad del Azuay

Facultad de Ciencias y Tecnología

Carrera de Ingeniería Civil

**Aplicación del método no destructivo de ultrasonido en
la evaluación de la resistencia del hormigón:
Comparativa con el método de rotura a compresión**

Trabajo previo a la obtención del título de ingeniero civil

Autor:

Servio Sebastian Marquina Tenesaca

Director:

Ing. Vladimir Eugenio Carrasco Castro

Cuenca – Ecuador

2024

DEDICATORIA

Este logro va dedicado a mi padre Servio en el cielo, a mi madre Gladys por su amor y apoyo incondicional, a mi hermana Paola por siempre estar presente ante cualquier circunstancia. A toda mi familia y Paula por el apoyo brindado para no decaer en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, a toda la comunidad universitaria por impartir todas las enseñanzas a lo largo de mi carrera, a todos los docentes de la escuela de ingeniería civil que día a día compartían sus conocimientos dentro de las aulas.

Agradezco al Ing. Vladimir Carrasco Castro, tutor de mi proyecto de graduación por su compromiso y ayuda a lo largo de este trabajo. Por último, pero no menos importante quiero agradecer a mi familia por su apoyo incondicional en todo momento, a mis compañeros y amigos a lo largo de mi vida universitaria por estar siempre ahí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE CONTENIDOS	III
ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ANEXOS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
ESTADO DEL ARTE	2
MARCO TEÓRICO.....	5
EL CONCRETO	5
CEMENTO.....	5
AGUA.....	7
AGREGADOS FINOS	7
AGREGADO GRUESO	8
ADITIVOS	8
TRABAJABILIDAD.....	9
DISEÑO DE MEZCLAS.....	9
GRANULOMETRÍA	10
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	11
MÉTODO DESTRUCTIVO DE ROTURA A COMPRESIÓN.....	12
MÉTODO NO DESTRUCTIVO DE ULTRASONIDO	13
<i>Trasmisión Directa.....</i>	<i>15</i>
<i>Trasmisión Semidirecta.....</i>	<i>15</i>
<i>Trasmisión Indirecta</i>	<i>15</i>

OBJETIVO GENERAL.....	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
MATERIALES Y MÉTODOS	17
MATERIALES	17
PROBETAS PARA HIERRO	17
PRENSA DE HORMIGÓN	18
EQUIPO DE ULTRASONIDO	18
MÉTODOS.....	19
ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN	20
DESCRIPCIÓN DEL ÁRIDO GRUESO	20
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	21
DESCRIPCIÓN DEL ÁRIDO FINO	21
DOSIFICACIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS DE HORMIGÓN	22
ENSAYO DE ULTRASONIDO	27
RESULTADOS.....	30
RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ULTRASONIDO	33
RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ROTURA A COMPRESIÓN	35
COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL MÉTODO DE ULTRASONIDO Y EL MÉTODO DE ROTURA A COMPRESIÓN	36
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	39
REFERENCIAS	42
ANEXOS	43

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ANEXOS

Índice de figuras

FIGURA 1. <i>CEMENTOS HIDRÁULICOS POR DESEMPEÑO.</i>	7
FIGURA 2. <i>TIPOS DE TRASMISIÓN CON ULTRASONIDO</i>	14
FIGURA 3. <i>PROBETA DE HIERRO PARA HORMIGÓN</i>	17
FIGURA 4. <i>PRENSA HIDRÁULICA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY</i>	18
FIGURA 5. <i>EQUIPO DE ULTRASONIDO MARCA TICO PROCEQ.</i>	19
FIGURA 6. <i>ARMADURA UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS</i>	23
FIGURA 7. <i>MOLDES PARA OBTENER CILINDROS DE HORMIGÓN</i>	24
FIGURA 8. <i>ELABORACIÓN DE LOS CILINDROS DE HORMIGÓN</i>	24
FIGURA 9. <i>NIVELACIÓN DE LOS CILINDROS</i>	25
FIGURA 10. <i>CILINDROS MOLDEADOS</i>	26
FIGURA 11. <i>PROCESO DE CURADO DEL HORMIGÓN</i>	26
FIGURA 12. <i>CALIBRACIÓN DEL EQUIPO</i>	27
FIGURA 13. <i>TRANSDUCTORES: EMISOR Y RECEPTOR DE ULTRASONIDO</i>	28
FIGURA 14. <i>TRASMISIÓN DIRECTA DE ENSAYOS DE ULTRASONIDO.</i>	28
FIGURA 15. <i>REGISTRO DE DIMENSIONES Y PESOS DE LAS MUESTRAS</i>	29
FIGURA 16. <i>ROTURA DE CILINDROS A COMPRESIÓN</i>	30
FIGURA 17. <i>ROTURA A COMPRESIÓN VS ULTRASONIDO A LOS 7 DÍAS</i>	37
FIGURA 18. <i>ROTURA A COMPRESIÓN VS ULTRASONIDO A LOS 14 DÍAS</i>	38

Índice de tablas

TABLA 1. <i>NORMATIVAS NACIONALES E INTERNACIONES PARA DIFERENTES TIPOS DE CEMENTOS</i>	6
TABLA 2. <i>LIMITES GRANULOMÉTRICOS DE AGREGADOS PARA ALGUNAS APLICACIONES</i>	11
TABLA 3. <i>RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A COMPRESIÓN SOBRE PROBETAS DEL MISMO TIPO</i> .	13
TABLA 4. <i>DETALLADO DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN</i>	20
TABLA 5. <i>CARACTERÍSTICAS DEL AGREGADO GRUESO</i>	20
TABLA 6. <i>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO RFV</i>	21
TABLA 7. <i>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADO FINO RFV</i>	21
TABLA 8. <i>DOSIFICACIONES AL VOLUMEN PARA LOS CILINDROS DE HORMIGÓN</i>	22
TABLA 9. <i>DOSIFICACIONES AL PESO PARA LOS CILINDROS DE HORMIGÓN</i>	22
TABLA 10. <i>DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS A EXAMINARSE</i>	31
TABLA 11. <i>ESPECIFICACIONES DE CADA PROBETA</i>	32
TABLA 12. <i>RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ULTRASONIDO</i>	33
TABLA 13. <i>RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE ROTURA A COMPRESIÓN</i>	35
TABLA 14. <i>COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS A LOS 7 DÍAS</i>	36
TABLA 15. <i>COMPARACIÓN DE RESULTADOS A LOS 14 DÍAS</i>	37
TABLA 16. <i>COMPARACIÓN DE RESULTADOS A/C=0.7 A DIFERENTES EDADES</i>	38
TABLA 17. <i>COMPARACIÓN DE PROBETAS CON ARMADURA A DIFERENTES EDADES</i>	39

Aplicación del Método No Destructivo de Ultrasonido en la Evaluación de la Resistencia del Hormigón: Comparativa con el Método Destructivo de Rotura a Compresión

Resumen

La evaluación de la resistencia del hormigón es un aspecto fundamental para garantizar la estabilidad estructural de las edificaciones. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas metodologías para evaluar esta resistencia, clasificándose principalmente en métodos destructivos y no destructivos. Entre los métodos destructivos, la prueba de rotura a compresión es ampliamente utilizada debido a su alta eficacia y confiabilidad. Por otro lado, los métodos no destructivos, como el ultrasonido, permiten evaluar el estado del hormigón sin comprometer su integridad, ofreciendo una práctica alternativa y menos invasiva. Sin embargo, diversos estudios han señalado que no es posible establecer una relación general entre ambos métodos, ya que las propiedades del concreto están influenciadas por factores como las características de los agregados, que varían según su procedencia geográfica.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en investigar la eficacia del método de ultrasonido para la evaluación de la resistencia del concreto. Para ello, se analizarán diferentes propiedades físicas y mecánicas del hormigón, utilizando agregados provenientes de una fábrica local. Las muestras serán sometidas tanto a pruebas de ultrasonido como a ensayos de rotura a compresión, permitiendo obtener datos complementarios. Posteriormente, los resultados serán sometidos a un análisis estadístico con el objetivo de correlacionar ambas metodologías y determinar no solo la efectividad del ultrasonido, sino también los factores que influyen en sus resultados.

Palabras Clave: Métodos no destructivos, resistencia del hormigón, efectividad del ultrasonido, Correlación, Rotura a compresión.

Application of the Non-Destructive Ultrasound Method in the Evaluation of Concrete Strength: Comparison with the Destructive Method of Compression Break

Abstract

The evaluation of the resistance of concrete is a fundamental aspect to guarantee the structural stability of buildings. Over time, various methodologies have been developed to evaluate this resistance, mainly classified into destructive and non-destructive methods. Among the destructive methods, the rupture by compression testing is widely used due to its high efficiency and reliability. On the other hand, non-destructive methods, such as ultrasound, make it possible to assess the condition of concrete without compromising its integrity, offering an alternative and less invasive practice. However, several studies have pointed out that it is not possible to establish a general relationship between the two methods. Since the properties of the concrete are influenced by factors such as, the characteristics of the aggregates, which vary according to their geographical origin.

In this context, the present work focuses on investigating the efficacy of the ultrasound method for the evaluation of concrete resistance. To do this, different physical and mechanical properties of concrete will be analyzed, using aggregates from a local factory. The samples will be subjected to both ultrasonic and compression rupture tests, allowing complementary data to be obtained. Subsequently, the results will be subjected to a statistical analysis with the aim of correlating both methodologies and, determining not only the effectiveness of ultrasound, but also the factors that influence its results.

Keywords: Non-destructive methods, concrete resistance, ultrasonic effectiveness, correlation, compression breakage.

Aplicación del Método No Destructivo de Ultrasonido en la Evaluación de la Resistencia del Hormigón: Comparativa con el Método Destructivo de Rotura a Compresión

Introducción

El hormigón, elemento fundamental en esta investigación, está compuesto principalmente por cemento, agregados finos, gruesos y agua. Al mezclarse y solidificarse, estos componentes forman una roca artificial conocida por su alta resistencia a la compresión, aunque su desempeño bajo tensión es considerablemente inferior. Las características de este material pueden ajustarse según las especificaciones técnicas del proyecto, permitiendo la adición de aditivos que modifican propiedades como el tiempo de fraguado, mejoran la resistencia o aumentan la durabilidad frente a diversas condiciones de servicio.

Una de las propiedades más importantes es su resistencia a la compresión, que resulta clave para garantizar la seguridad y la durabilidad de las estructuras. Existen diferentes métodos para evaluar esta resistencia, clasificados en métodos destructivos y no destructivos. En este trabajo, nos enfocamos principalmente en el método no destructivo de ultrasonido para compararlo con el método estándar destructivo de rotura a compresión. En el caso del método de rotura a compresión, el cual consiste en someter una probeta de hormigón (generalmente un cilindro) a una fuerza axial creciente hasta que la muestra falle o se fracture. Este procedimiento es uno de los más utilizados en la industria de la construcción debido a su estandarización y su metodología clara y establecida.

La ingeniería civil desempeña un papel crucial en la industria de la construcción, ya que uno de los principales objetivos es la optimización de recursos y tiempo. Este desafío ha impulsado el desarrollo de nuevos métodos tecnológicos, como los ensayos no destructivos, los cuales, según Neville (2011), ofrecen información crucial sobre las características mecánicas del hormigón, permitiendo evaluar su resistencia y durabilidad sin afectar la integridad de las muestras. Entre los métodos más destacados se encuentra el método de ultrasonido, que permite evaluar la calidad del hormigón de manera eficiente y sin comprometer la integridad de la estructura. Su funcionamiento se basa en la

medición del tiempo que tarda una onda ultrasónica en atravesar un espécimen de hormigón, lo que permite inferir la calidad del material a partir de la velocidad de propagación de la onda. Es un método versátil y de fácil aplicación, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para el control de calidad en obra.

De acuerdo con Kumar P. & Morteiro P. (2006), la evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón a través de ensayos no destructivos no solo es útil para estimar su resistencia, sino también para predecir su comportamiento a largo plazo y su durabilidad en diversas condiciones ambientales, lo que lo convierte en un enfoque altamente efectivo en el monitoreo de estructuras en servicio (p. 295).

Estado del arte

El concreto, que será el enfoque principal de este trabajo, es el material de construcción más utilizado en el mundo debido a sus propiedades esenciales para la ingeniería civil. Las edificaciones cuentan con varios pilares fundamentales, y muchos de ellos dependen de las características que el hormigón puede ofrecer. Al ser una roca sólida, el concreto destaca por su alta resistencia a la compresión, lo que garantiza la estabilidad y durabilidad de las estructuras. Neville (2011) en su obra *Propiedades del Concreto*, uno de los aspectos clave en la construcción con este material es el control de la resistencia de diseño mediante ensayos que permiten verificar su calidad en función de las especificaciones del proyecto. Además, la resistencia del concreto está influenciada por factores como la relación agua/cemento, las condiciones de curado y la granulometría de los agregados, entre otros.

Por otro lado, Kumar P. & Morteiro P. (2006) en su obra enfatizan la importancia de la microestructura del hormigón para comprender su comportamiento en obra. Estos autores destacan que la resistencia a la compresión es uno de los principales indicadores de la calidad del material y puede ser evaluada a través de distintos métodos, tanto destructivos como no destructivos. Entre estos, el ensayo de rotura a compresión se ha consolidado como el método más utilizado para el control de calidad del concreto. Asimismo, señalan que, para evaluar el estado real de una estructura en servicio, es recomendable extraer núcleos y realizar las pruebas y ensayos pertinentes. Esto permite no solo controlar la calidad de las estructuras nuevas, sino también garantizar la integridad de las ya existentes.

Según Mindess et al. (2003), en su libro resaltan la importancia de los ensayos no destructivos, en especial el ultrasonido y la esclerometría, debido a que estos permiten evaluar la calidad del hormigón en estructuras existentes sin comprometerlas estructuralmente. Con estos métodos es posible determinar el estado de la estructura y evaluarlas con forme pasa el tiempo, permitiendo detectar fallas en áreas importantes como las juntas y las zonas con armaduras.

Espinosa et al. (2023) destacan el método de ultrasonido, señalando que los resultados obtenidos reflejan tendencias similares a las propiedades mecánicas del concreto. Esto sugiere una dependencia estadística entre esta técnica no destructiva y las propiedades mecánicas evaluadas. Además, mencionan que la adición de agregados reciclados finos puede disminuir la velocidad del pulso ultrasónico, lo que se atribuye a la menor densidad y mayor porosidad del concreto resultante. Estos hallazgos enfatizan la importancia de considerar la composición del concreto al utilizar métodos de evaluación no destructiva.

Ergueta & Quino (2024) emplean el método de ultrasonido como parte de los ensayos no destructivos para evaluar la integridad y uniformidad del hormigón en estructuras de construcción. Este método permite detectar anomalías, medir la profundidad de fisuras y analizar la calidad del hormigón afectada por factores externos o por deficiencias durante la etapa de construcción. Entre los resultados obtenidos, destacan la identificación de daños en estructuras afectadas por el fuego, la medición de la profundidad de costura y la evaluación de la uniformidad en diferentes componentes.

Además, se evaluó la efectividad de las reparaciones realizadas en daños del concreto, y el método de ultrasonido se demostró efectivo en la inspección de estructuras de concreto armado, facilitando decisiones inmediatas sobre reparaciones y rehabilitaciones necesarias para optimizar la seguridad.

Pellicer V (2014), en su tesis, comparó el método de ultrasonido con el método de georradar para el análisis de sondas de hormigón con distintas relaciones agua/cemento. Afirma que ambos métodos, el ultrasonido y el georradar, son efectivos para evaluar el contenido de humedad del concreto y examinar el comportamiento de distintas dosificaciones. Pellicer concluye que las sondas con una relación agua/cemento (a/c) de 0,45 presentan mayor calidad y homogeneidad, lo cual se traduce en resultados superiores en la velocidad de transmisión en las pruebas de ultrasonido. Esto sugiere que una

dosificación óptima mejora la precisión y eficacia en la evaluación de la integridad estructural del hormigón.

Suárez-Ántola (2004), concluye que, el uso del método de ultrasonido en ensayos de hormigón es altamente efectivo para identificar fisuras significativas que afectan la superficie del material y para evaluar la sección útil de un hormigón afectada por factores como el fuego. Además, el método facilita la determinación de la resistencia del hormigón, siempre que se haya establecido previamente una compensación entre la resistencia y la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas. Suárez-Ántola también destaca que el ultrasonido es una herramienta útil para monitorear el proceso de endurecimiento del concreto, especialmente en las etapas iniciales de construcción, lo que permite un control de calidad temprano y preciso. Por otro lado, este autor no recomienda usar el método de ultrasonido para determinar la resistencia absoluta del hormigón, debido a la gran cantidad de variables que afectan la relación entre la resistencia y la velocidad.

Marco teórico

Debido a que la resistencia del hormigón es un componente importante en cuanto a la durabilidad y seguridad al momento de construir, la evaluación del mismo ha sido un tema importante para la ingeniería civil. Es por ello por lo que existen numerosos métodos para la evaluación de la resistencia del hormigón y para abordar la investigación es necesario indagar un poco sobre las definiciones, generalidades, especificaciones, entre otros; para la aplicación de los diferentes métodos en la evaluación de la resistencia del hormigón.

El concreto

El concreto es una mezcla de cemento, agua, agregados gruesos, agregados finos y aditivos que, al solidificarse mediante procesos químicos, se convierte en una especie de roca artificial, constituyendo un pilar esencial en la ingeniería civil. Según Salguero & Josué (2019) su historia se remonta a más de 10,000 años, en el Neolítico, cuando se utilizaban aglomerantes naturales para la construcción de viviendas primitivas. Desde entonces, el hormigón ha evolucionado significativamente, consolidándose como un material indispensable en una gran variedad de estructuras.

En términos generales, el concreto se compone de un aglomerante conocido como cemento Portland, agregados finos y/o gruesos, agua y, en ocasiones, aditivos. Al endurecerse, este material es capaz de soportar grandes esfuerzos a compresión, lo que lo convierte en un elemento clave para garantizar la estabilidad y durabilidad de las edificaciones.

Cemento

En la industria de la construcción, el cemento Portland es uno de los materiales más utilizados debido a sus excelentes propiedades de resistencia a la compresión. A lo largo de los años, ha evolucionado incorporando diferentes materiales. Su principal componente es el clínker, que se obtiene a partir de la caliza y la arcilla mediante un proceso de calcinación a altas temperaturas. Además, se le añade una pequeña cantidad de yeso para regular el tiempo de fraguado. El cemento es el elemento clave en la fabricación del concreto, permitiendo la construcción de estructuras sólidas y duraderas.

“La evolución de la tecnología ha permitido elaborar distintos tipos de cemento que satisfagan las necesidades actuales de la construcción y sostenibilidad ambiental”(Holcim Ecuador S.A., 2016, p. 6)

Según Sanjuán & Chinchón (2004), el término "cemento" se refiere a cualquier tipo de producto o mezcla con propiedades adhesivas. El conglomerante, por su parte, es un compuesto formado por una o varias sustancias que pueden endurecerse al entrar en contacto con otros productos, como el agua en el caso de los cementos Portland, ya sea a corto o largo plazo.

Tabla 1.

Normativas nacionales e internaciones para diferentes tipos de cementos

Título Norma	Norma Nacional	Norma Internacional
Cementos Portland. Requisitos	NTE INEN 152	ASTM C150
Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos	NTE INEN 490	ASTM C595
Cementos Hidráulicos. Requisitos de diseño	NTE INEN 2380	ASTM C1157

Nota. Fuente: recopilada de Holcim, (2016)

En la actualidad, no existen restricciones específicas en cuanto a la composición química del concreto, siempre que se cumpla el requisito fundamental de alcanzar determinados niveles de desempeño. Lo importante es que el concreto cumpla con los estándares de calidad requeridos, sin importar cómo se logren estos resultados. En cuanto a la clasificación de los cementos, se distinguen diferentes tipos de nomenclaturas.

- Tipo GU – Uso general
- Tipo HE – Alta Resistencia inicial
- Tipo HS – Alta Resistencia a los sulfatos
- Tipo MS – Moderada resistencia a los sulfatos
- Tipo MH – Moderado calor de hidratación
- Tipo LH – Bajo calor de hidratación

Figura 1.

Cementos Hidráulicos por desempeño.



Nota: Ilustración recopilada de (Holcim Ecuador S.A., 2016)

Agua

Para obtener un hormigón de calidad, el agua juega un papel importante ya que influye directamente a la calidad de este. El control en la calidad de agua que se usa en el hormigón se ve relacionado a lo largo de la vida útil de la estructura por lo que se debe realizar un control exhaustivo con respecto a la calidad y cantidad de agua que se empleara en las etapas de producción y el fraguado por ende la dosificación del agua en una mezcla no debe ser excesiva ni escasa, debe ser la cantidad exacta lo que se determina en el prediseño de la mezcla.

El agua debe cumplir requisitos tanto orgánicos como químicos en todo el proceso de empleo, estos procesos se encuentran establecidos en la norma NTE INEN 1108 y NTE INEN 1855.

Agregados Finos

Dentro de los materiales que se usan para obtener un hormigón de calidad, es de vital importancia los agregados finos mejor conocidos como arena natural o triturada debido a que afectan directamente a factores como la trabajabilidad, la resistencia y demás propiedades claves del material. La limpieza y pureza del material agregan otras propiedades como el fraguado del cemento, un agregado fino en mal estado o que contengan impurezas como la arcilla o materia orgánica puede alterar la resistencia del

material, reduciendo la durabilidad de este, probablemente causando fisuración o agrietamientos.

La norma INEN (2011), especifica que el árido fino no debe tener más de 45% pasante en cualquier tamiz y puede ser de tipo natural, procesada o una combinación de ambas, y su módulo de finura no debe ser menos que 2,3 ni mayor que 3,1.

Agregado Grueso

Según la norma INEN 872, se le conoce como agregado grueso al material que proviene de la desintegración de la roca de origen volcánico y que por su tamaño queda retenido en el tamiz número 4 (4,75 mm)(INEN, 2011).

Los agregados gruesos se destacan por su importancia en la resistencia y el comportamiento mecánico del hormigón. Es fundamental conocer su forma y textura para asegurar una adecuada adherencia entre el cemento y el agregado, considerando las características específicas de cada tipo de agregado. Además, el tamaño del agregado afecta directamente la cantidad de cemento que se debe utilizar en la mezcla, lo que influye en la resistencia y trabajabilidad del concreto.

Los agregados gruesos deben estar constituidos de partículas duras y resistentes para garantizar la vida útil del hormigón, lo cual se verificarán previamente siguiendo las especificaciones establecidas en la norma NTE INEN 872. Consecuentemente, deben estar libres de impurezas como materia orgánica, contaminantes, arcilla, entre otros. Según Holcim Ecuador S. A. (2024), en mezclas de cemento, los agregados gruesos mejoran el uso del cemento debido a que su graduación permite dejar menos espacios vacíos que tengan que ser llenados por cemento.

Aditivos

Los aditivos para hormigón son compuestos químicos o minerales que se incorporan a la mezcla con el fin de modificar las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Estos aditivos permiten adaptar el material a las exigencias específicas de cada proyecto constructivo, optimizando su desempeño y durabilidad.

Al ser añadidos en pequeñas proporciones, generalmente entre un 0,1% y un 5% del peso del cemento, los aditivos interactúan con los componentes del hormigón (cemento, agua, agregados) modificando su proceso de hidratación y, en consecuencia, sus propiedades finales. Según (Sika Colombia S.A.S., 2014), La necesidad de modificar las propiedades

de un ligante con base en cal, han sido siempre una constante durante la historia de la construcción

La dosificación precisa de los aditivos es fundamental para garantizar la efectividad y la reproducibilidad de los resultados. Una dosificación inadecuada puede comprometer las propiedades del hormigón y afectar negativamente su desempeño a largo plazo.

Trabajabilidad

Otra propiedad fundamental del hormigón es su trabajabilidad, que se define como la capacidad del material para ser manipulado, transportado y colocado en la obra sin perder su homogeneidad. Esta característica determina la facilidad con la que el hormigón fresco puede adaptarse a los diferentes procesos constructivos, desde el mezclado hasta el endurecimiento.

La trabajabilidad del hormigón se ve influenciada por diversos factores, entre los que destacan la relación agua-cemento, el tipo de cemento utilizado, el tamaño y la forma de los agregados, y la presencia de aditivos. Para evaluar cuantitativamente la fluidez del hormigón, se realizan ensayos específicos como el ensayo de slump.

Una adecuada trabajabilidad es esencial para garantizar la calidad y durabilidad de las estructuras de hormigón. Un hormigón con una trabajabilidad óptima facilita la colocación, la compactación y el acabado, lo que se traduce en una mejor adherencia entre el hormigón y el refuerzo, una reducción de poros y fisuras, y, en consecuencia, una mayor resistencia y durabilidad de la estructura.

Diseño de mezclas

El diseño de mezclas de hormigón se basa en la correcta selección de los materiales y las proporciones adecuadas para cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad establecidos para una construcción específica. Según Santamaria J et al. (2018), la mayoría de los métodos convencionales se apoyan en la experiencia personal acumulada y en el uso de tablas empíricas. Esto implica que, aunque hay fundamentos teóricos, la práctica y la observación juegan un papel importante en el proceso de diseño.

El objetivo del diseño es optimizar los recursos de manera que los materiales seleccionados se ajusten a las necesidades específicas de la estructura. Cada diseño de mezcla debe adaptarse a las condiciones particulares del proyecto, lo que requiere considerar varias variables, como las solicitaciones del servicio. Estas variables incluyen

valores mínimos que deben cumplirse, basados en los requerimientos técnicos y normativos. Giraldo (2004) subraya que factores como el costo, la resistencia, la trabajabilidad y la durabilidad son esenciales para determinar el comportamiento del hormigón desde su mezcla inicial hasta su maduración.

En cuanto a la resistencia del hormigón, el diseño se realiza para asegurar que esta propiedad se cumpla a los 28 días, momento en el que el hormigón alcanza aproximadamente su resistencia máxima. Esta característica está directamente influenciada por la relación agua/cemento y el uso de aditivos, los cuales se ajustan según las necesidades específicas de cada proyecto (Neville, 2011). Esto se debe a que una relación agua/cemento más baja tiende a aumentar la resistencia, mientras que el uso de aditivos puede modificar propiedades como la velocidad de fraguado o la trabajabilidad, lo que permite optimizar el rendimiento del hormigón en diferentes condiciones de servicio.

Granulometría

El proceso implica organizar los tamaños permitidos de las partículas de un agregado, utilizando pruebas de cribado a través de mallas con aberturas de diversos diámetros. Para ello, las mallas se disponen en orden de mayor a menor abertura, ubicando al final una bandeja recolectora que retiene las partículas más finas. En la parte superior de este conjunto de mallas se coloca una muestra del agregado, que luego se cubre con una tapa. Posteriormente, el conjunto se agita mecánicamente durante el tiempo estipulado por la normativa correspondiente. Aunque también es posible realizar el cribado manualmente, este método es menos eficiente y más lento. Al concluir el ensayo, se pesan las partículas retenidas en cada malla para su análisis. En la Tabla 2 se reflejan los valores permitidos según la granulometría, utilizados para controlar la composición de distintos materiales de construcción que requieren el uso de agregados.

Tabla 2.*Limites granulométricos de agregados para algunas aplicaciones*

Tamiz Granulométrico		Hormigón Hidráulico		Hormigón Asfáltico	Base Hidráulica %
		Grava % Pasante	Arena % Pasante	% Pasante	Pasante
25,4 mm	(1")	100			
19	(3/4")	90-100		100	100
12,7	(1/2")			90-100	
9,5	(3/8")	20-55	100	70-95	560-85
4,75	(No.4)	0-10	95-100	45-70	35-65
2,36	(No.8)	0-5	80-100		
2	(No.10)				25-50
1,18	(No.16)		50-85	20-50	
600 um	(No.30)		25-60		
425	(No.40)				15-30
300	(No.50)		10-30	5-25	
150	(No.100)		2-10		
75	(No.200)			3-10	5-15

Nota. Fuente: Gómez (2014).**Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión del hormigón es uno de los factores clave en su desempeño estructural, ya que este material se utiliza principalmente para soportar grandes cargas axiales. La resistencia a compresión es crucial para garantizar la durabilidad de las estructuras, dado que cada edificación se diseña con un período de vida útil específico. De acuerdo con Toirac Corral (2009), las edificaciones convencionales suelen proyectarse para una vida útil mínima de 50 años, mientras que las construcciones de mayor envergadura o importancia económica deben resistir al menos 80 a 100 años. La resistencia del hormigón a lo largo del tiempo es esencial para asegurar que la estructura mantenga su funcionalidad y seguridad durante ese periodo.

Se podría decir que la resistencia a la compresión es la máxima carga que un espécimen de hormigón puede soportar antes de fallar, y este valor está directamente relacionado con las características de los materiales utilizados en la mezcla y las especificaciones de diseño del concreto. Esta propiedad se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado

(kg/cm²) y puede evaluarse mediante diversos métodos, tanto destructivos como no destructivos. Los métodos destructivos, como la prueba de compresión estándar, implican romper una muestra de hormigón para medir su resistencia, mientras que los métodos no destructivos, como el ultrasonido o el esclerómetro, permiten obtener una estimación de la resistencia sin dañar la estructura (Neville, 2011).

Además, la resistencia a la compresión del hormigón no solo depende de los materiales, sino también de la proporción de la mezcla, la relación agua/cemento y el proceso de curado. Es por ello por lo que un adecuado diseño de mezclas y control de calidad son esenciales para asegurar que el hormigón cumpla con las especificaciones requeridas para su uso en cualquier tipo de construcción (Kosmatka et al., 2002).

Método destructivo de Rotura a compresión

El método de rotura a compresión es uno de los métodos más utilizados para medir la resistencia del hormigón. Su relevancia radica en la alta precisión que ofrece para evaluar la capacidad de carga del hormigón en condiciones controladas. Este procedimiento consiste en someter una muestra, generalmente en forma de cilindro, a una carga axial creciente hasta que el cilindro falle o se fracture. La carga máxima soportada por el cilindro en este punto es proporcional a su resistencia a la compresión.

Este método, al ser el estándar en la comprobación de la resistencia del hormigón a compresión, cuenta con factores regulados que garantizan la confiabilidad de los resultados, siempre y cuando se sigan rigurosamente las normas establecidas, como la Norma Técnica de Hormigón (ASTM C39). Sin embargo, una desventaja importante es que este método solo puede aplicarse una vez que la estructura ha sido construida, lo que implica que, si tras someterla a pruebas de compresión los resultados son desfavorables, será necesario reforzarla o incluso demolerla, generando costos adicionales significativos.

Además, para obtener una medida confiable de la resistencia óptima del hormigón y verificar si cumple con los parámetros establecidos en el prediseño, se debe realizar una prueba estándar a los 28 días, que es el periodo en el que el hormigón alcanza la mayoría de su resistencia (generalmente entre el 95% y el 99%). Este tiempo de espera puede representar un desafío en proyectos de construcción, ya que cualquier retraso en la verificación de la resistencia del material puede afectar significativamente el cronograma del proyecto.

Tabla 3.

Resistencia del hormigón a compresión sobre probetas del mismo tipo

Edad del Hormigón (días)	3	7	28	90	360
Hormigones de endurecimiento normal	0,4	0,65	1	1,2	1,35
Hormigones de endurecimiento rápido	0,55	0,55	1	1,15	1,2

Nota. Fuente: tabla recopilada de (Martinez I et al., 2022)

En la tabla 1 se proporcionan los valores de estimación de la resistencia del hormigón a diferente edad, destacando que a los 28 días presenta un aproximado del 100% de su resistencia total. Este método es regulado por diversas normas nacionales e internacionales, como la ASTM C39 y la NTE INEN 1573 en Ecuador. Estas regulaciones establecen que el ensayo debe realizarse aproximadamente 28 días después de la fabricación del hormigón, ya que es durante este tiempo que el material alcanza cerca de su máxima resistencia a compresión.

Sin embargo, a pesar de su eficacia, el método de rotura a compresión tiene la desventaja de destruir las muestras durante la evaluación, lo que limita su aplicación a fases de control de calidad y verificación en obra. A continuación, se presenta la tabla de coeficientes de correlación de la resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo a diferentes edades.

Método no destructivo de Ultrasonido

El ultrasonido es un método valioso para la evaluación de la calidad del hormigón y la verificación de su homogeneidad. Este método se basa en la propagación de un pulso ultrasónico que atraviesa el hormigón, permitiendo el análisis de sus características internas. El pulso es transmitido desde un emisor hacia un receptor, con frecuencias que varían entre 20 y 500 kHz (Suárez-Ántola, 2004).

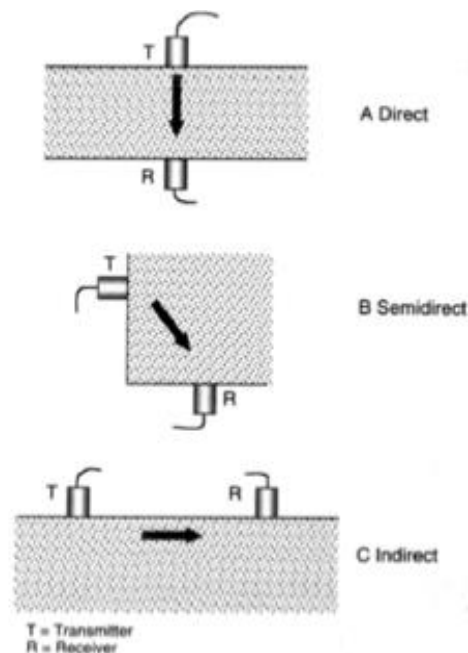
Una de las principales ventajas del método de ultrasonido es que es no destructivo, lo que significa que no compromete la integridad de la estructura evaluada. Esto lo convierte en una opción fácil y rápida de aplicar en diferentes entornos de trabajo, como laboratorios y en campo. Según Solís Carcaño (2023), esta técnica no altera las propiedades o los rendimientos mecánicos del hormigón, lo que la hace especialmente valiosa para la evaluación de elementos estructurales ya existentes.

Aunque el método de ultrasonido presenta varias ventajas, también tiene desventajas que deben ser consideradas. Uno de los factores más relevantes es el impacto de las condiciones ambientales en los resultados de la evaluación. Según Neville (2011), tanto la temperatura como la humedad pueden alterar la velocidad de propagación del ultrasonido a través del material, lo que podría llevar a mediciones inexactas. Además, las características del equipo son fundamentales para el éxito del método. Suárez-Ántola (2004) enfatiza que, la calibración adecuada y el tipo de transductores utilizados son cruciales para garantizar la precisión de las mediciones. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estos aspectos para maximizar la efectividad del ensayo de ultrasonido en la evaluación del hormigón.

Las mediciones en el método de ultrasonido se clasifican en tres tipos: transmisión directa, semidirecta e indirecta (Suárez-Ántola, 2004). Cada uno de estos métodos tiene aplicaciones específicas y se elige según las condiciones del sitio y las necesidades del análisis.

Figura 2.

Tipos de transmisión con ultrasonido



Nota. Fuente: Figura recopilada de Suárez-Ántola (2004)

Trasmisión Directa

En el método de transmisión directa, los transductores se colocan en caras opuestas y se alinean perpendicularmente al hormigón, permitiendo que la onda viaje en línea recta entre ambos transductores con una energía optimizada. Este alineamiento garantiza una medición precisa de la longitud de recorrido de la onda y produce resultados altamente confiables.

Trasmisión Semidirecta

En este método, los transductores se sitúan en dos caras adyacentes que, generalmente, forman un ángulo recto. Este enfoque puede ser satisfactorio siempre que la longitud de recorrido no sea excesiva. Sin embargo, debido al tamaño finito de los transductores, la longitud de recorrido no se define con precisión, por lo que suele medirse desde el centro del emisor hasta el centro del receptor.

Trasmisión Indirecta

En la transmisión indirecta o superficial, los transductores se colocan en la misma cara del elemento que se está evaluando. Este método requiere hacer suposiciones sobre la trayectoria de las ondas, es decir, sobre la longitud de recorrido. Además, solo se transmite el 3% de la amplitud de la señal, ya que las ondas sufren dispersión y atenuación debido a las discontinuidades en el concreto, lo que disminuye la calidad del impulso recibido. Los resultados obtenidos dependen en gran medida del estado superficial de la sonda o del elemento estructural de concreto, incluyendo factores como grietas, heterogeneidades o coqueras. Por esta razón, este método se considera menos confiable.

Objetivo General

Determinar la eficacia del método no destructivo del ultrasonido para evaluar la resistencia del hormigón, comparándolo con el método destructivo estándar de rotura a compresión utilizado en Ecuador, y analizar los aspectos importantes en la aplicación del método no destructivo.

Objetivos Específicos

- Evaluar la resistencia del hormigón aplicando el método destructivo de rotura a compresión y el método no destructivo de ultrasonido mediante probetas cilíndricas de hormigón a diferentes edades, composiciones y resistencias.
- Analizar las diferencias entre el método tradicional de rotura a compresión y el método de ultrasonido en la evaluación de la resistencia del hormigón.
- Evaluar la eficacia del ultrasonido como método para medir la resistencia del hormigón.

Materiales y Métodos

Dentro de la aplicación del método del ultrasonido y el método de rotura a compresión, los materiales y métodos son de mucha importancia debido a que se debe tener una buena metodología y usar los materiales exactos y precisos para llegar a obtener resultados fiables y poder llegar a concluir de buena manera. Por otra parte, también es importante detallar exactamente los materiales y métodos que se utilizó en el proyecto para que al momento en que se quiera replicar el experimento se pueda realizar de buena manera y se llegue a obtener y relacionar los resultados.

Materiales

Probetas para Hierro

Las probetas que utilizaremos tienen dimensiones de 10cm x 20cm y 15cm x 30cm, las cuales son propiedad de la Universidad del Azuay.

En la siguiente imagen podemos observar el modelo antes mencionado.

Figura 3.

Probeta de hierro para hormigón



Nota. Fuente: del autor

Prensa de Hormigón

La prensa hidráulica que se empleará es de la marca Hensgrand Hydraulic Testing Machine, modelo WAW-2000E con serial N°: CO20230344 la cual es propiedad de la Universidad del Azuay, como se puede ver en la siguiente imagen:

Figura 4.

Prensa hidráulica propiedad de la Universidad del Azuay



Nota. Fuente: del autor

Equipo de ultrasonido

El equipo que se empleará es de la Marca TICO, serie PROCEQ Testing Instruments el cual se alquilara en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, como se puede ver en la siguiente imagen:

Contenido:

- Equipo de medición
- Transductores de ultrasonido (emisor y receptor)
- 2 cables BNC
- Testigo de calibración
- Maletín de Transporte

Figura 5.

Equipo de ultrasonido marca Tico Proceq.



Nota. Fuente: del autor

Métodos

Para conocer la relación entre los métodos de ultrasonido y de rotura a compresión, es fundamental establecer que ambos corresponden a ensayos de laboratorio diseñados para obtener resultados precisos. En este contexto, se deben considerar las características de las muestras, las cuales estarán determinadas por su relación agua/cemento y su composición, ya que algunas incluirán armadura metálica y otras no.

Se procederá a detallar el proceso de diseño del hormigón, el cual permite determinar las proporciones de los materiales necesarios, incluyendo cemento, agua, agregados finos y gruesos, para una cantidad específica de muestras. Estas muestras se diferenciarán en función de la relación agua/cemento y de la inclusión de armaduras. Las relaciones agua/cemento empleadas serán de 0,4 y 0,7 siguiendo la metodología de diseño recomendada por el ACI.

En la siguiente tabla se detalla la composición de las unidades de las probetas de hormigón.

Tabla 4.*Detallado de las probetas de hormigón*

f'c	Tipo	Unidades
150 kg/cm2	Sin Armadura	6
	Con Armadura	3
450 kg/cm2	Sin Armadura	13
	Con Armadura	3
Total cilindros		25

Nota. Fuente: elaboración propia**Elaboración de las probetas de hormigón****Descripción del árido grueso**

Se emplea un árido grueso triturado, originario de Paute, con un peso específico seco de 1600 kg/m³ y un peso específico saturado de 1680 kg/m³. Este árido presenta un 2% de humedad y un 0,5% de absorción (RFV, 2023).

Tabla 5.*Características del agregado grueso.*

Composición del agregado grueso (%)							
Tamaño máximo del agregado (pulg.)	Módulo de finura						
	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
3/8	0,5	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44
1/2	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53
3/4	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,6
1	0,71	0,7	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65
1 1/2	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,7	0,69
2	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72
3	0,82	0,81	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76
4	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81

Nota. Fuente: adaptado de RFV (2023)

Análisis granulométrico

Tabla 6.

Análisis granulométrico del agregado grueso RFV

Tamiz	Masa Retenida			Porcentaje		
		Parcial	Acumulado	Retenido	Retenido Acumulado	Pasante
Pulgadas	mm	gr	gr	%	%	%
3/4"	19	0	0	0	0	100
1/2"	12,5	1363	1363	68,15	68,15	31,81
3/8"	9,5	515	1878	25,75	93,9	6,1
No. 4	4,75	119	1997	5,95	99,85	0,15
Base		3	2000	1,15	100	0
Total (gr)		2000				

Nota. Fuente: Elaboración propia

Descripción del árido fino

Tabla 7.

Análisis granulométrico de agregado fino RFV

Tamiz	Masa Retenida			Porcentaje		
		Parcial	Acumulado	Retenido	Retenido Acumulado	Pasante
Pulgadas	mm	gr	gr	%	%	%
3/8"	9,5	0	0	0	0	100
No. 4	4,75	5	5	0,25	0,25	99,75
No. 8	2,36	149	154	7,45	7,7	92,3
No. 16	1,18	727	881	36,35	44,05	55,95
No. 30	0,6	550	1431	27,5	71,55	28,45
No. 50	0,3	378	1809	18,9	90,45	9,55
No. 100	0,15	145	1954	7,25	97,7	2,3
No. 200	0,075	31	1985	1,55	99,25	0,75
0		15	2000	0,75	100	0
Total (gr)		2000				

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Dosificación para la elaboración de los cilindros de hormigón

Las cantidades que se utilizaron para las dosificaciones se especifican en el siguiente cuadro.

Tabla 8.

Dosificaciones al volumen para los cilindros de hormigón

Resistencia	Dosificación al volumen			
	a/c	Cemento (u)	Arena (u)	Ripio (u)
f'c= 450 Kg/cm²	0,4	1,0	2,5	3,0
f'c= 150 Kg/cm²	0,75	1,0	3,0	3,0

Nota: Fuente. Elaboración propia

Tabla 9.

Dosificaciones al peso para los cilindros de hormigón

Resistencia	Dosificación por peso para un m ³			
	a/c	Cemento (kg)	Arena (kg)	Ripio (kg)
f'c= 450 Kg/cm²	0,4	400	800	1200
f'c= 150 Kg/cm²	0,75	260	1300	1430

Nota: Fuente: Elaboración propia. La Tabla 9 presenta las dosificaciones de los materiales que componen la mezcla para los cilindros de hormigón.

En las probetas pequeñas de 10cm x 20cm se realizarán un total de 6 cilindros con presencia de armadura en su interior, las cuales tendrán las siguientes especificaciones:

- Armadura de acero compuesta por 4 varillas de 15 cm de longitud y 10 mm de espesor.
- 4 estribos de acero con un espesor de 5,5 mm y una separación de 4 cm entre ellos.
- La armadura se ubicó a 2,5 cm de la base del cilindro.

Figura 6.

Armadura utilizada para la elaboración de los cilindros



Nota. Fuente del autor.

Una vez definido el diseño, se fabricarán cilindros de hormigón pequeños con dimensiones de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro y cilindros de hormigón grandes con dimensiones de 300 mm de altura y 150 mm de diámetro. La elaboración de estos especímenes se llevará a cabo conforme a las recomendaciones y procedimientos establecidos, asegurando así la obtención de muestras de calidad que cumplan con la resistencia de diseño requerida.

Para realizar el moldeo de los cilindros se debe seguir los procesos los cuales se especifica en la norma INEN 1576 y recomienda lo siguiente:

- Los moldes que se vayan a utilizar deben estar previamente calibrados y recubiertos con una fina capa de aceite mineral o un material desmontable que no sea reactivo.

Figura 7.

Moldes para obtener cilindros de hormigón



Nota. Fuente: del autor

- El concreto se vierte en los cilindros en tres capas, compactando cada una con 25 golpes, distribuidos uniformemente a lo largo de la sección transversal. Para este proceso, se utiliza una varilla de compactación.

Figura 8.

Elaboración de los cilindros de Hormigón



Nota. Fuente: del autor

- Después de compactar cada capa, se golpea el molde entre 10 y 15 veces con un mazo de cabeza de caucho para cerrar los agujeros dejados por la varilla y eliminar el aire atrapado.
- Se nivelan los cilindros, asegurándose de que su superficie no tenga depresiones ni proyecciones.

Figura 9.

Nivelación de los cilindros



Nota. Fuente: del autor

- Es importante realizar el moldeo de los cilindros cerca del lugar donde se los va a ubicar para su fraguado, al día siguiente se los desencofra, identifica e instala en la cámara de curado de acuerdo con las normas NTE INEN 2628.

Figura 10.

Cilindros Moldeados



Nota. Fuente: del autor.

Tras un periodo de curado de 7,14 y 28 días, se realizarán las evaluaciones utilizando el método de ultrasonido. Para ello, se analizarán seis cilindros, uno correspondiente a cada relación agua/cemento y considerando la presencia o ausencia de armadura. Los ensayos se llevarán a cabo de acuerdo con las normas y procedimientos establecidos en la NTC 4325.

Figura 11.

Proceso de curado del hormigón.



Nota. Fuente: del autor

Ensayo de ultrasonido

Para realizar los ensayos con el método no destructivo de ultrasonido, primero se debe verificar el estado del equipo que se utilizará en el ensayo, asegurándose de que esté calibrado previamente y que sus componentes se encuentren en buen estado. Para la calibración del equipo, es necesario contar con un testigo que permita verificar que la calibración del equipo sea correcta dentro de un tiempo preestablecido.

Figura 12.

Calibración del equipo



Nota. Fuente elaboración propia.

Los pasos para llevar a cabo el ensayo son los siguientes:

1. Se conectaron los transductores y el generador de pulso mediante cables BNC.
2. Se aplicó vaselina en las caras de los transductores para asegurar una correcta adherencia a los testigos.

Figura 13.

Transductores: Emisor y Receptor de ultrasonido



Nota. Fuente: Elaboración propia

3. Se verificó que las caras de las probetas de hormigón estuvieran limpias.
4. Los transductores se colocaron en los extremos de la probeta para iniciar el ensayo.

Figura 14.

Trasmisión directa de ensayos de ultrasonido.



Nota. Fuente: del autor

5. Se registraron al menos tres lecturas en cada probeta para verificar que no hubiera grandes variaciones en las mediciones; en caso de variaciones significativas, se recomienda repetir el ensayo.
6. Se anotaron todos los tiempos medidos y la distancia entre los transductores, con lo cual se determinará posteriormente la velocidad.

Ensayo de Rotura a compresión

Para realizar los ensayos destructivos, se esperó que las probetas de hormigón cumplieran edades de 7, 14 y 28 días desde su elaboración. Los cilindros previamente a los ensayos deben estar secos debido a que antes del ensayo destructivo se hizo el ensayo no destructivo de ultrasonido.

Antes de realizar el ensayo, se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Tomar el peso de cada cilindro y medir el diámetro y la altura de cada cilindro.
- Previamente se deben tener registrados los datos de ultrasonido.
- Al colocar el cilindro para que la prensa efectúe la carga, se debe verificar que el cilindro se encuentre nivelados, alineados y que las superficies que van a estar en contacto con la prensa se encuentren limpias.

Figura 15.

Registro de dimensiones y pesos de las muestras



Nota. Fuente: del autor

Antes de proceder con el ensayo, se debe verificar que la prensa se encuentre calibrada y que este encerrada, el bloque de hormigón debe estar colocado correctamente y que al momento de que la fuerza se aplique sea de manera continua y sin impacto.

Figura 16.

Rotura de cilindros a compresión



Nota. Fuente: del autor

Resultados

En esta sección, se llevará a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos mediante los dos métodos aplicados. En primer lugar, se verificará si los datos obtenidos con el método de ultrasonido presentan alteraciones o resultados que difieran significativamente entre sí. Posteriormente, se compararán estos resultados con los obtenidos a través del método destructivo de rotura a compresión, con el objetivo de determinar si existe una correlación entre ambos enfoques. Además, se explorará la influencia de la relación agua/cemento (a/c) y la implementación de armaduras dentro de los cilindros en las mediciones obtenidas, buscando establecer su impacto en los resultados obtenidos.

Como primera parte se detallará cada cilindro mediante una numeración indicando su peso, dimensión, volumen, área y peso volumétrico entre otros parámetros para sus conocer a profundidad sus especificaciones, y así obtener resultados más precisos.

Tabla 10.*Descripción de las muestras a examinarse.*

# Cilindro	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Área (cm²)	Volumen (cm³)	Peso Vol (Kg/m³)
1	14,7	29,7	12,59	169,72	5040,60	2496,73
2	14,9	29,6	12,48	174,37	5161,25	2418,41
3	14,9	29,6	12,39	174,37	5161,25	2400,58
4	14,7	29,7	12,39	169,72	5040,60	2458,44
5	14,8	30,1	12,92	172,03	5178,22	2494,10
6	14,9	30	12,92	174,37	5231,00	2470,08
7	14,8	29,7	12,72	172,03	5109,41	2490,11
8	14,9	29,7	12,55	174,37	5178,69	2423,59
9	14,9	30	13,04	174,37	5231,00	2493,21
10	14,9	30	13,02	174,37	5231,00	2488,82
11	9,7	19,3	3,72	73,90	1426,24	2606,16
12	9,8	18,9	3,65	75,43	1425,62	2560,98
13	9,8	19,6	3,78	75,43	1478,42	2556,78
14	9,8	19,5	3,77	75,43	1470,88	2565,13
15	9,7	19,2	3,63	73,90	1418,85	2558,42
16	10	19,1	3,78	78,54	1500,11	2519,81
17	9,9	19,1	3,62	76,98	1470,26	2462,15
18	10,7	19,5	3,69	89,92	1753,45	2103,85
19	10	19,5	3,86	78,54	1531,53	2518,40
20	9,9	20,1	4,06	76,98	1547,24	2624,03
21	9,5	19,5	4,13	70,88	1382,21	2987,98
22	9,9	19,4	3,93	76,98	1493,35	2632,33
23	9,6	19,5	4,15	72,38	1411,46	2936,68
24	9,9	19,3	3,82	76,98	1485,66	2570,58
25	9,8	19,6	4,14	75,43	1478,42	2802,98

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 11.*Especificaciones de cada probeta*

# Cilindro	Observaciones	
1	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
2	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
3	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
4	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
5	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
6	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
7	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
8	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
9	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
10	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
11	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
12	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
13	Relación $a/c=0,4$	Sin Armadura
14	Relación $a/c=0,7$	Sin Armadura
15	Relación $a/c=0,7$	Sin Armadura
16	Relación $a/c=0,7$	Sin Armadura
17	Relación $a/c=0,7$	Sin Armadura
18	Relación $a/c=0,7$	Sin Armadura
19	Relación $a/c=0,7$	Sin Armadura
20	Relación $a/c=0,7$	Con Armadura
21	Relación $a/c=0,4$	Con Armadura
22	Relación $a/c=0,7$	Con Armadura
23	Relación $a/c=0,4$	Con Armadura
24	Relación $a/c=0,7$	Con Armadura
25	Relación $a/c=0,4$	Con Armadura

Nota: Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos con el método de ultrasonido

Tabla 12.

Resultados obtenidos con el método de ultrasonido

# Cilindro	Días	Velocidad 1	velocidad 2	Velocidad 3	Promedio	Observaciones
1	7	4310	4250	4340	4300	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
2	7	4250	4180	4280	4237	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
3	7	4330	4250	4430	4337	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
4	7	4420	4430	4470	4440	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
5	7	4350	4420	4390	4387	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
6	7	4350	4450	4470	4423	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
7	14	4300	4460	4260	4340	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
8	14	4150	4230	4320	4233	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
9	14	4280	4360	4180	4273	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
10	14	4400	4430	4430	4420	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
11	14	4350	4390	4390	4377	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
12	28	4350	4380	4380	4370	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
13	28	4360	4250	4320	4310	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
14	7	3070	3260	3270	3200	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
15	7	2980	3180	3280	3147	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
16	14	3700	3640	3660	3667	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
17	14	3570	3590	3620	3593	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
18	28	3220	3240	3450	3303	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
19	28	3140	3410	3350	3300	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
20	7	3160	3640	3270	3357	Relación a/c=0,7 Con Armadura
21	7	3260	3450	3470	3393	Relación a/c=0,4 Con Armadura
22	14	3880	3910	3880	3890	Relación a/c=0,7 Con Armadura
23	14	3720	3990	3930	3880	Relación a/c=0,4 Con Armadura
24	28	3750	3810	3820	3793	Relación a/c=0,7 Con Armadura
25	28	3860	3950	3910	3907	Relación a/c=0,4 Con Armadura

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12 muestra, datos obtenidos al realizar la evaluación no destructiva a edad de 7, 14 y 28 días de las probetas de hormigón. Se observa que la velocidad del pulso ultrasónico se ve afectada por la relación agua/cemento. A medida que esta relación aumenta, también lo hace la porosidad del hormigón, lo que reduce su densidad. Esta disminución en la densidad afecta la propagación de las ondas ultrasónicas, ya que los materiales más densos permiten una mayor velocidad de propagación de las ondas.

Esto se puede observar en los datos obtenidos desde el cilindro 1 hasta el cilindro 12, los cuales tienen una relación agua/cemento (a/c) de 0.4. Esto indica que, al tener una relación

a/c baja, el material es un mejor conductor de ondas, lo que se refleja en las velocidades registradas. Por otro lado, en el caso de los cilindros con una relación a/c de 0.7, se evidencia una disminución en la velocidad de las ondas en comparación con los cilindros con relaciones más bajas, lo que confirma que una mayor relación a/c reduce la capacidad del hormigón para transmitir ondas ultrasónicas.

Por otra parte, las velocidades de propagación de la onda ultrasónica también se ven afectadas en las probetas que tienen armadura en su interior debido a las diferencias de propiedades físicas entre el acero y el hormigón. Al ser el acero un mejor conductor de ondas podría causar lecturas inexactas o interpretaciones erróneas.

Como se puede observar en los resultados de la Tabla 12, desde el cilindro 22 hasta el cilindro 27, los cuales contienen armadura metálica en su interior, presentan variaciones en sus velocidades debido a los factores previamente descritos. Esto evidencia que la combinación de diferentes materiales de construcción en la evaluación tiene un impacto significativo en la aplicación del método ultrasónico, afectando la precisión y la interpretación de los resultados.

Resultados obtenidos con el método de rotura a compresión

Tabla 13.

Resultados obtenidos con el método de rotura a compresión

# Cilindro	Días	Carga Rotura (Kgf)	Resistencia (Kg/cm ²)	Observaciones	
1	7	50465	297,35	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
2	7	47685	273,48	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
3	7	45760	262,44	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
4	7	48755	287,27	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
5	7	49065	285,21	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
6	7	49970	286,58	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
7	14	87245	507,14	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
8	14	82315	472,08	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
9	14	79140	453,87	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
10	14	81690	468,50	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
11	14	40481	547,80	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
12	28	30215	400,57	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
13	28	31365	415,82	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
14	7	4551	62	Relación a/c=0,7	Sin Armadura
15	7	5286	72	Relación a/c=0,7	Sin Armadura
16	14	4885	62	Relación a/c=0,7	Sin Armadura
17	14	3218	42	Relación a/c=0,7	Sin Armadura
18	28	5460	61	Relación a/c=0,7	Sin Armadura
19	28	6860	87	Relación a/c=0,7	Sin Armadura
20	7	4224	60	Relación a/c=0,7	Con Armadura
21	7	7080	92	Relación a/c=0,4	Con Armadura
22	14	8345	115	Relación a/c=0,7	Con Armadura
23	14	27555	358	Relación a/c=0,4	Con Armadura
24	28	0	0	Relación a/c=0,7	Con Armadura
25	28	0	0	Relación a/c=0,4	Con Armadura

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la resistencia a compresión mediante el método de rotura. Al analizar los datos, podemos notar que los cilindros con una relación agua/cemento (a/c) de 0.4 ofrecen resultados coherentes y dentro de lo esperado, lo que indica que se alcanzaron los parámetros adecuados de resistencia. Sin embargo, en las muestras con una relación a/c de 0.7, los resultados obtenidos son erróneos, lo que podría ser indicativo de una posible mala práctica en la

elaboración de las probetas de hormigón, ya sea por una mezcla incorrecta o por algún error en el proceso de curado.

Por otro lado, los cilindros que contienen armadura metálica en su interior (de los cuales se examinaron 4 de 6) muestran una variabilidad en los resultados. La presencia de armadura provoca una alteración en las propiedades físicas del hormigón, ya que el acero, al ser un material más rígido y resistente, influye en el comportamiento del material compuesto. Este refuerzo metálico, al no permitir una deformación tan libre en el hormigón, genera un aumento en la resistencia a la compresión, lo que podría explicar las diferencias observadas en los resultados en comparación con las probetas sin armadura. Este efecto resalta la importancia de considerar los refuerzos metálicos como un factor relevante al evaluar la resistencia del hormigón.

Comparación de resultados entre el método de ultrasonido y el método de rotura a compresión

Tabla 14.

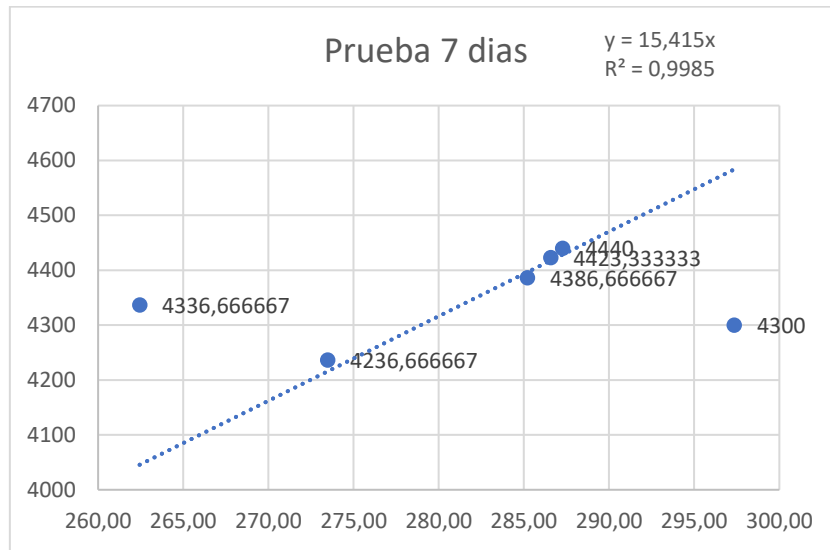
Comparación de resultados obtenidos a los 7 días

# Cilindro	resistencia	Velocidad Promedio	Edad	Observaciones	
cilindro 1	297,35	4300	7	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
cilindro 2	273,48	4236,67	7	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
cilindro 3	262,44	4336,67	7	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
cilindro 4	287,27	4440	7	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
cilindro 5	285,21	4386,67	7	Relación a/c=0,4	Sin Armadura
cilindro 6	286,58	4423,34	7	Relación a/c=0,4	Sin Armadura

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 17.

Rotura a compresión vs Ultrasonido a los 7 días



Nota. Fuente: elaboración propia

En la tabla 14 podemos observar la comparación entre los dos métodos, los cuales arrojan la gráfica 17 que representa una línea creciente dando a conocer que conforme la resistencia aumenta, también aumenta la velocidad de propagación del ultrasonido, esta grafica nos arroja la siguiente ecuación lineal $y=15.415x$ con un $R^2=0.9985$.

Tabla 15.

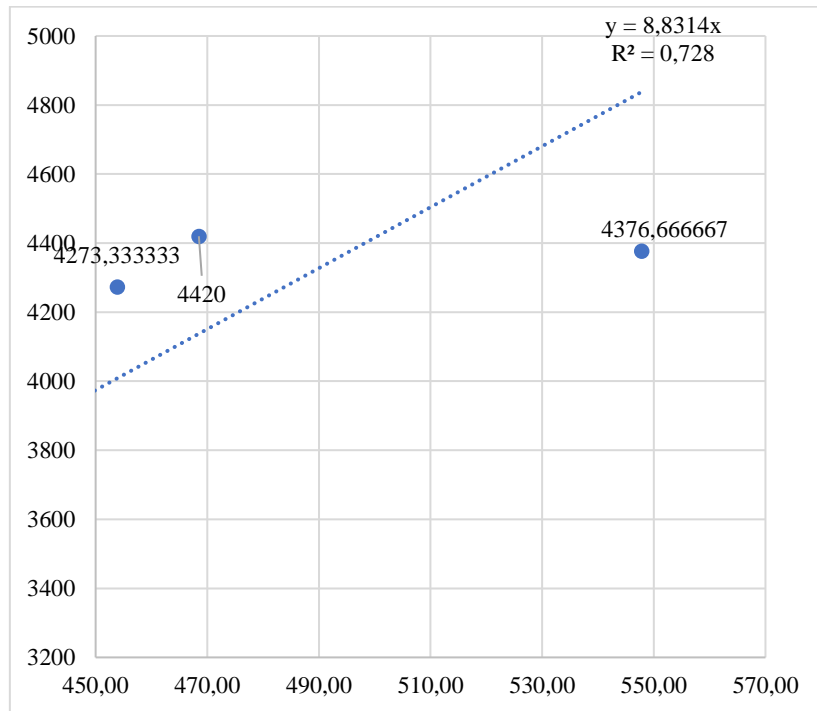
Comparación de resultados a los 14 días

# Cilindro	resistencia	velocidades	Edad	Observaciones
cilindro 7	507,14	4340	14	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
cilindro 8	472,08	4233,33	14	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
cilindro 9	453,87	4273,33	14	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
cilindro 10	468,50	4420	14	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
cilindro 11	547,80	4376,67	14	Relación a/c=0,4 Sin Armadura

Fuente: Elaboración propia

Figura 18.

Rotura a compresión vs Ultrasonido a los 14 días



Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15 se presenta una comparación entre los dos métodos, cuyos resultados se muestran en la Gráfica 18. Esta gráfica revela una tendencia creciente, indicando que a medida que aumenta la resistencia, también lo hace la velocidad de propagación del ultrasonido. La relación obtenida se expresa mediante la ecuación lineal $y = 8.8314x$, con un coeficiente de determinación $R^2=0.728$.

Tabla 16.

Comparación de resultados $a/c=0.7$ a diferentes edades

# Cilindro	resistencia	velocidades	Edad	Observaciones
cilindro 14	61,58	3200	7	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
cilindro 15	71,53	3147	7	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
cilindro 16	62,20	3667	14	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
cilindro 17	41,81	3593	14	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
cilindro 18	60,72	3303	28	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
cilindro 19	87,34	3300	28	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 16 se muestran los resultados obtenidos tras realizar el ensayo de rotura a compresión, los cuales arrojaron valores erróneos. Este hecho también tuvo un impacto negativo en la medición de la velocidad utilizando el método de ultrasonido. A partir de

estos resultados, se puede concluir que una velocidad baja de propagación de las ondas ultrasónicas es directamente proporcional a un hormigón de baja calidad. Esto sugiere que la muestra en estudio podría presentar fallas estructurales, como una mayor porosidad, una mala hidratación del cemento, o deficiencias en la mezcla de los materiales. Estas irregularidades afectan la integridad del hormigón, lo que a su vez se refleja en los valores de resistencia a compresión y en la velocidad de propagación del ultrasonido.

Tabla 17.

Comparación de probetas con armadura a diferentes edades

# Cilindro	resistencia	velocidades	Edad	Observaciones
20	59,60	3957	7	Relación a/c=0,7 Con Armadura
21	91,97	3927	7	Relación a/c=0,4 Con Armadura
22	115,29	3890	14	Relación a/c=0,7 Con Armadura
23	357,97	3880	14	Relación a/c=0,4 Con Armadura
24	0,00	3793	28	Relación a/c=0,7 Con Armadura
25	0,00	3907	28	Relación a/c=0,4 Con Armadura

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 17 se observa que a medida que aumenta la edad del concreto y la resistencia cambia en función de la relación agua/cemento (a/c), la velocidad del pulso ultrasónico se mantiene constante en un rango moderado. Esto se debe a las propiedades físicas de las armaduras de hierro presentes en el interior de los cilindros. Estas armaduras afectan la transmisión de las ondas ultrasónicas, manteniendo una velocidad estable a pesar de las variaciones en la resistencia del hormigón a diferentes edades.

Conclusión y Recomendaciones

El análisis de los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados mediante los métodos de ultrasonido y rotura a compresión revela aspectos claves sobre el comportamiento del hormigón bajo diferentes condiciones de ensayo. En primer lugar, se confirma que la relación agua/cemento (a/c) es un factor determinante en las propiedades físicas y mecánicas del material. Los cilindros con una relación a/c de 0,4 demostraron mayores velocidades de propagación de las ondas ultrasónicas, lo que denota una menor porosidad y una mayor densidad en comparación con los cilindros con una relación a/c de 0,7. Este fenómeno también se reflejó en los resultados de resistencia a compresión, donde las muestras con a/c de 0,4 alcanzaron valores significativamente superiores, confirmando su mejor desempeño estructural.

Por otro lado, la inclusión de armaduras metálicas dentro de las sondas introdujo una variable adicional que afectó tanto la medición de la velocidad ultrasónica como los resultados de resistencia a compresión. El acero, al ser un material más rígido y mejor conductor de ondas que el hormigón, alteró los resultados al modificar la propagación de las ondas y la respuesta estructural del compuesto durante el ensayo de rotura. Este efecto subraya la importancia de considerar las diferencias entre materiales en la interpretación de los resultados, ya que la interacción entre acero y hormigón puede generar lecturas no representativas de la calidad real del material.

En cuanto a la medición entre ambos métodos, se identificó una relación positiva entre la resistencia a compresión y la velocidad de propagación del ultrasonido, especialmente en probetas con una relación a/c de 0,4 y sin armadura. Esto sugiere que el método de ultrasonido puede ser una herramienta confiable para estimar la resistencia del concreto en condiciones normales, aunque su precisión disminuye en presencia de refuerzos metálicos o en mezclas con defectos significativos.

Debido a las conclusiones propuestas previamente, se debe destacar algunos puntos a recomendar. Dentro de los factores importantes, el diseño de mezclas de concreto debe priorizar relaciones bajas de agua/cemento, como 0,4, debido a los beneficios que aportan tanto en resistencia como en durabilidad. Este tipo de proporción no solo mejora la propagación de ondas ultrasónicas, lo que indica una mayor densidad y menor porosidad del material, sino que también incrementa significativamente la resistencia a compresión. Esta recomendación es aplicable en estructuras que exigen un alto desempeño, donde la calidad del concreto es fundamental para garantizar la seguridad y longevidad de esta.

Por otro lado, la evaluación mediante ultrasonido requiere una atención particular en presencia de refuerzos metálicos (armaduras) dentro de las probetas. El acero, al ser un material con propiedades mecánicas y de transmisión de ondas distintas al concreto, puede alterar las mediciones y reducir la precisión de los resultados. Por ello, no se recomienda el uso del método del ultrasonido para la evaluación de estas, sin embargo, se podría calibrar la máquina específicamente para estos casos en los cuales se pueda interpretar correctamente estas variaciones y aseguren que el método es confiable.

Finalmente, es indispensable mejorar los procedimientos de elaboración y control de las muestras, especialmente en mezclas con relaciones agua/cemento más altas, como 0,7. La correcta mezcla, compactación y curado son etapas críticas que influyen directamente

en la calidad del concreto, y cualquier deficiencia en estas fases puede comprometer los resultados de los ensayos. Además, se recomienda combinar métodos complementarios, como la resistencia a compresión, para proporcionar diagnósticos más completos y precisos, particularmente en proyectos estructurales de alta exigencia.

Referencias

- Ergueta, G. A., & Quino, M. V. (2024). Pathological study using ultrasound tests applied to structures under construction. *Revista Alconpat*, 14(1), 82–95. <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>
- Espinosa, A., Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Faleschini, F., & Ortega-López, V. (2023). Utility of Ultrasonic Pulse Velocity for Estimating the Overall Mechanical Behavior of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/app13020874>
- Giraldo, O. (2004). *Diseño de mezclas de hormigón*. Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, J. (2014). *MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Monterrey.
- Holcim Ecuador S. A. (2024). *Agregados gruesos Características*. www.holcim.com.ec
- Holcim Ecuador S.A. (2016). *Evolución de las normas para la fabricación de cemento*. www.holcim.com.ec
- INEN. (2011). *Áridos para hormigón. Requisitos* (NTE INEN 872:2011; 1st ed.).
- Kosmatka, S. H. ., Kerkhoff, Beatrix., & Panarese, W. C. . (2002). *Design and control of concrete mixtures* (14th ed.). Portland Cement Association.
- Kumar P., & Morteiro P. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. (Third Edition). McGraw-Hill Companies, Inc.
- Martinez I, Martínez R, & Martínez F. (2022). *PROCEDIMIENTOS PARA PRONOSTICAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A 28 DÍAS DESDE LAS EDADES TEMPRANAS*. 1, 20–31. <https://www.researchgate.net/publication/358645784>
- Mindess, S., Young, J., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Neville, A. (2011). *Properties of concrete* (Fifth edition). Pearson.
- Pellicer V. (2014). *Ensayos no destructivos en homrigon. Georadar y ultrasonidos*. Universitat Politècnica de València.
- Salguero, V., & Josué, R. (2019). *Previo a la obtención del título de: INGENIERO(A) CIVIL AUTORES: PRUDENTE MERCHÁN MARÍA ALEJANDRA*. Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- Sanjuán, M., & Chinchón, Servando. (2004). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. Universidad d'Alacant.
- Santamaria J, Pilaluisa J, & Morales L. (2018). *Modelo para dosificación de mezclas de hormigón utilizando logica difusa*. 1, 8.
- Sika Colombia S.A.S. (2014). *ADITIVOS PARA CONCRETO*. 1–28.

- Solís Carcaño, R. G. (2023). Evaluación de columnas de concreto con la técnica de ultrasonido. *Ingeniería y Desarrollo*, 39(01). <https://doi.org/10.14482/inde.39.1.624.189>
- Suárez-Ántola, R. (2004a). *Ensayo no destructivo de hormigones por ultrasonidos*. <https://www.researchgate.net/publication/216744783>
- Suárez-Ántola, R. (2004b). *Ensayo no destructivo de hormigones por ultrasonidos*. <https://www.researchgate.net/publication/216744783>
- Toirac Corral, J. (2009). La resistencia a compresión del hormigón, condición necesaria pero no suficiente para el logro de la durabilidad de las obras. *Ciencia y Sociedad*, 34(4). <https://doi.org/10.22206/cys.2009.v34i4.pp463-504>

Anexos

Ensayo no destructivo de ultrasonido

Método no destructivo de ultrasonido a/c=0.4														
# Cilindro	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Peso (gr)	Área	Volumen	Peso Vol (Kg/m3)	F. Contrucc	F. prueba	Días	Velocidad 1	velocidad 2	Velocidad 3	Promedio	Observaciones
1	14,7	29,7	12,585	169,72	5040,60	2496,73	13/11/2024	20/11/2024	7	4310	4250	4340	4300	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
2	14,9	29,6	12,482	174,37	5161,25	2418,41	13/11/2024	20/11/2024	7	4250	4180	4280	4237	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
3	14,9	29,6	12,39	174,37	5161,25	2400,58	13/11/2024	20/11/2024	7	4330	4250	4430	4337	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
4	14,7	29,7	12,392	169,72	5040,60	2458,44	13/11/2024	20/11/2024	7	4420	4430	4470	4440	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
5	14,8	30,1	12,915	172,03	5178,22	2494,10	13/11/2024	20/11/2024	7	4350	4420	4390	4387	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
6	14,9	30	12,921	174,37	5231,00	2470,08	13/11/2024	20/11/2024	7	4350	4450	4470	4423	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
7	14,8	29,7	12,723	172,03	5109,41	2490,11	29/10/2024	12/11/2024	14	4300	4460	4260	4340	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
8	14,9	29,7	12,551	174,37	5178,69	2423,59	29/10/2024	12/11/2024	14	4150	4230	4320	4233	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
9	14,9	30	13,042	174,37	5231,00	2493,21	6/11/2024	20/11/2024	14	4280	4360	4180	4273	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
10	14,9	30	13,019	174,37	5231,00	2488,82	6/11/2024	20/11/2024	14	4400	4430	4430	4420	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
11	9,7	19,3	3,717	73,90	1426,24	2606,16	21/10/2024	6/10/2024	14	4350	4390	4390	4377	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
12	9,8	18,9	3,651	75,43	1425,62	2560,98	21/10/2024	18/11/2024	28	4350	4380	4380	4370	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
13	9,8	19,6	3,78	75,43	1478,42	2556,78	21/10/2024	18/11/2024	28	4360	4250	4320	4310	Relación a/c=0,4 Sin Armadura

Método no destructivo de ultrasonido a/c=0.7														
# Cilindro	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso Vol (Kg/m ³)	F. Contrucc	F. Rotura	Días	Velocidad 1	velocidad 2	Velocidad 3	Promedio	Observaciones
1	9,8	19,5	3,773	75,43	1470,88	2565,13	21/10/2024	20/11/2024	7	3070	3260	3270	3200	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
2	9,7	19,2	3,63	73,90	1418,85	2558,42	21/10/2024	20/11/2024	7	2980	3180	3280	3147	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
3	10	19,1	3,78	78,54	1500,11	2519,81	21/10/2024	20/11/2024	14	3700	3640	3660	3667	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
4	9,9	19,1	3,62	76,98	1470,26	2462,15	21/10/2024	20/11/2024	14	3570	3590	3620	3593	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
5	10,7	19,5	3,689	89,92	1753,45	2103,85	21/10/2024	20/11/2024	28	3220	3240	3450	3303	Relación a/c=0,7 Sin Armadura
6	10	19,5	3,857	78,54	1531,53	2518,40	21/10/2024	20/11/2024	28	3140	3410	3350	3300	Relación a/c=0,7 Sin Armadura

Método no destructivo de ultrasonido Cilindros con Armadura														
# Cilindro	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso Vol (Kg/m ³)	F. Contrucc	F. Rotura	Días	Velocidad 1	velocidad 2	Velocidad 3	Promedio	Observaciones
1	9,9	20,1	4,06	76,98	1547,24	2624,03	21/10/2024	20/11/2024	7	3960	3940	3970	3957	Relación a/c=0,7 Con Armadura
2	9,5	19,5	4,13	70,88	1382,21	2987,98	21/10/2024	20/11/2024	7	3960	3950	3870	3927	Relación a/c=0,4 Con Armadura
3	9,9	19,4	3,931	76,98	1493,35	2632,33	21/10/2024	20/11/2024	14	3880	3910	3880	3890	Relación a/c=0,7 Con Armadura
4	9,6	19,5	4,145	72,38	1411,46	2936,68	21/10/2024	20/11/2024	14	3720	3990	3930	3880	Relación a/c=0,4 Con Armadura
5	9,9	19,3	3,819	76,98	1485,66	2570,58	21/10/2024	20/11/2024	28	3750	3810	3820	3793	Relación a/c=0,7 Con Armadura
6	9,8	19,6	4,144	75,43	1478,42	2802,98	21/10/2024	20/11/2024	28	3860	3950	3910	3907	Relación a/c=0,4 Con Armadura

Ensayo destructivo de rotura a compresión

Método destructivo de rotura a compresión a/c=0.4												
# Cilindro	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso Vol (Kg/m ³)	F. Contrucc	F. Rotura	Días	Carga Rotura (Kgf)	Resistencia (Kg/cm ²)	Observaciones
1	14,7	29,7	12,585	169,72	5040,60	2496,73	13/11/2024	20/11/2024	7	50465	297,35	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
2	14,9	29,6	12,482	174,37	5161,25	2418,41	13/11/2024	20/11/2024	7	47685	273,48	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
3	14,9	29,6	12,39	174,37	5161,25	2400,58	13/11/2024	20/11/2024	7	45760	262,44	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
4	14,7	29,7	12,392	169,72	5040,60	2458,44	13/11/2024	20/11/2024	7	48755	287,27	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
5	14,8	30,1	12,915	172,03	5178,22	2494,10	13/11/2024	20/11/2024	7	49065	285,21	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
6	14,9	30,0	12,921	174,37	5231,00	2470,08	13/11/2024	20/11/2024	7	49970	286,58	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
7	14,8	29,7	12,723	172,03	5109,41	2490,11	29/10/2024	12/11/2024	14	87245	507,14	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
8	14,9	29,7	12,551	174,37	5178,69	2423,59	29/10/2024	12/11/2024	14	82315	472,08	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
9	14,9	30	13,042	174,37	5231,00	2493,21	6/11/2024	20/11/2024	14	79140	453,87	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
10	14,9	30	13,019	174,37	5231,00	2488,82	6/11/2024	20/11/2024	14	81690	468,50	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
11	9,7	19,3	3,717	73,90	1426,24	2606,16	21/10/2024	6/10/2024	14	40481	547,80	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
14	9,8	18,9	3,651	75,4298 16	1425,62	2560,98	21/10/2024	18/11/2024	28	30215	400,57	Relación a/c=0,4 Sin Armadura
15	9,8	19,6	3,78	75,4298 16	1478,42	2556,78	21/10/2024	18/11/2024	28	31365	415,82	Relación a/c=0,4 Sin Armadura

Método destructivo de rotura a compresión $a/c=0.7$												
# Cilindro	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso Vol (Kg/m ³)	F. Contrucc	F. Rotura	Días	Carga Rotura (Kgf)	Resistencia (Kg/cm ²)	Observaciones
1	9,8	19,5	3,773	75,43	1470,88	2565,13	21/10/2024	20/11/2024	7	4551	61,58	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
2	9,7	19,2	3,63	73,90	1418,85	2558,42	21/10/2024	20/11/2024	7	5286	71,53	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
3	10	19,1	3,78	78,54	1500,11	2519,81	21/10/2024	20/11/2024	14	4885	62,20	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
4	9,9	19,1	3,62	76,98	1470,26	2462,15	21/10/2024	20/11/2024	14	3218	41,81	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
5	10,7	19,5	3,689	89,92	1753,45	2103,85	21/10/2024	20/11/2024	28	5460	60,72	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura
6	10	19,5	3,857	78,54	1531,53	2518,40	21/10/2024	20/11/2024	28	6860	87,34	Relación $a/c=0,7$ Sin Armadura

Método destructivo de rotura a compresión												
# Cilindro	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Área (cm ²)	Volumen (cm ³)	Peso Vol (Kg/m ³)	F. Contrucc	F. Rotura	Días	Carga Rotura (Kgf)	Resistencia (Kg/cm ²)	Observaciones
1	9,9	20,1	4,06	76,98	1547,24	2624,03	21/10/2024	20/11/2024	7	4224	59,60	Relación a/c=0,7 Con Armadura
2	9,5	19,5	4,13	70,88	1382,21	2987,98	21/10/2024	20/11/2024	7	7080	91,97	Relación a/c=0,4 Con Armadura
3	9,9	19,4	3,931	76,98	1493,35	2632,33	21/10/2024	20/11/2024	14	8345	115,29	Relación a/c=0,7 Con Armadura
4	9,6	19,5	4,145	72,38	1411,46	2936,68	21/10/2024	20/11/2024	14	27555	357,97	Relación a/c=0,4 Con Armadura
5	9,9	19,3	3,819	76,98	1485,66	2570,58	21/10/2024	20/11/2024	28	0	0,00	Relación a/c=0,7 Con Armadura
6	9,8	19,6	4,144	75,43	1478,42	2802,98	21/10/2024	20/11/2024	28	0	0,00	Relación a/c=0,4 Con Armadura