

Evaluación de estructuras de concreto mediante el ensayo por ultrasonido

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN
CONSTANCIA DE PRESENTACIÓN PÚBLICA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Evaluación de estructuras de concreto mediante el ensayo por ultrasonido

Llevado a cabo por el estudiante:

Cordero Camacho Jonnathan

Carné: 2018112006

Trabajo Final de Graduación presentado públicamente ante el Tribunal Evaluador el viernes 23 de enero de 2026 como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

En fe de lo anterior firman los siguientes integrantes del Tribunal evaluador:

 **Tecnológico de Costa Rica**
Digitally signed by JOSE ANDRES ARAYA OBANDO (FIRMA)
Date: 2026.01.28 16:56:37 -06'00'

Dr. José Andrés Araya Obando
Director de Escuela

GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA)
Firmado digitalmente por GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA)
Fecha: 2026.01.27 13:34:34 -06'00'

Ing. Giannina Ortiz Quesada, MSc.
Profesora Guía

 **Tecnológico de Costa Rica**
Firmado digitalmente por MILTON ANTONIO SANDOVAL QUIROS (FIRMA)
Fecha: 2026.01.27 13:26:34 -06'00'

Ing. Milton Sandoval Quirós, MAE
Profesor Lector

Rommel Cuevas Kauffmann
Firmado digitalmente por Rommel Cuevas Kauffmann
Fecha: 2026.01.28 13:06:29 -06'00'

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann
Profesor Observador

Resumen

El presente proyecto final de graduación realizado en los laboratorios del CIVCO del Tecnológico de Costa Rica, tuvo como finalidad la implementación del ensayo por ultrasonido por el método indirecto para el control de calidad del concreto fresco. Los prismas de concreto se ensayaron mediante transductores de 24 y 55 kHz, por el método directo e indirecto, de acuerdo con la norma ASTM C597-22. Los ensayos se enfocaron en los 3, 7, 14 y 28 días del curado del concreto analizando la variación de la velocidad del pulso ultrasónico en relación con el proceso de hidratación.

A los 28 días del curado se registraron velocidades de 3573,5 m/s para 24 kHz y 3514,9 m/s para 55 kHz, siendo propios de un concreto de una calidad cuestionable. El análisis de varianza (ANOVA) determinó diferencias significativas entre las frecuencias, siendo el transductor de 24 kHz más eficiente para el control de calidad del concreto mientras que la frecuencia de 55 kHz se recomienda para la detección de fisuras. Los factores de ajuste varían de 1,55 a 1,02 para el transductor de 24 kHz y para el de 55 kHz de 2,34 a 1,07, con el propósito de incrementar la confiabilidad del ensayo de ultrasonido aplicado mediante el método indirecto

Palabras Clave: Curado, endurecimiento, frecuencia, longitud de onda, oscilación, transductor, ultrasonido.

Abstract

The present final graduation project, conducted in the CIVCO laboratories of the Costa Rica Institute of Technology, aimed to implement ultrasonic testing using the indirect method for the quality control of fresh concrete. Concrete prisms were tested using 24 kHz and 55 kHz transducers through both the direct and indirect methods, in accordance with ASTM C597-22. The tests focused on concrete at 3, 7, 14, and 28 days of curing, analyzing the variation of ultrasonic pulse velocity in relation to the hydration process.

At 28 days of curing, ultrasonic pulse velocities of 3573.5 m/s and 3514.9 m/s were recorded for the 24 kHz and 55 kHz transducers, respectively, values that correspond to concrete of questionable quality. The analysis of variance (ANOVA) identified statistically significant differences between the frequencies, indicating that the 24 kHz transducer is more efficient for concrete quality control, whereas the 55 kHz frequency is recommended for crack detection. The adjustment factors range from 1.55 to 1.02 for the 24 kHz transducer and from 2.34 to 1.07 for the 55 kHz transducer, with the aim of increasing the reliability of the ultrasonic test when applied using the indirect method.

Keywords: Curing, Frequency, Oscillation, Stiffness, Transducer, Ultrasound, Wavelength.

Evaluación de estructuras de concreto mediante el ensayo por ultrasonido.

JONNATHAN CORDERO CAMACHO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Noviembre de 2025

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Tabla de contenido

Resumen ejecutivo	10
Introducción	13
Objetivos	16
Capítulo 1: Marco teórico	17
1.1 Propiedades del concreto	17
1.1.1 Cemento	17
1.1.2 Agregados	19
1.2 Caracterización de los agregados	20
1.3 Diseño de mezcla según ACI 211.1-91	21
1.3.1 Revenimiento	21
1.3.2 Contenido de agua	23
1.3.3 Relación agua – cemento	24
1.3.4 Ajuste por humedad de los agregados	26
1.4 Ensayo destructivo	26
1.5 Ensayo no destructivo	27
1.5.1 Ensayo por ultrasonido	27
1.5.1.1 Equipo de ultrasonido	27
1.5.1.2 Intensidad de onda	30
1.5.1.3 Impedancia acústica	31
1.5.1.4 Pulso ultrasónico	31
1.5.2 Tipos de ensayos ultrasónicos	31
1.5.2.1 Directo	32
1.5.2.2 Indirecto	32
1.5.2.3 Semidirecto	33
1.6 Aplicaciones del ensayo por ultrasonido	33

1.7 Control de calidad en sitio _____	35
1.8 Interpretación de resultados _____	38
1.9 Análisis de varianza (ANOVA) _____	39
Capítulo 2: Metodología _____	40
2.1 Tipo de investigación _____	40
2.2 Definición de categorías y variables _____	40
2.3 Sujetos de información _____	40
2.4 Fuentes de información _____	41
2.5 Técnicas e instrumentos de recolección _____	42
2.5.1 Descripción de técnicas e instrumentos _____	42
2.5.1.1 Técnicas _____	42
2.5.1.2 Moldes prismáticos _____	43
2.5.1.3 Equipo de compactación _____	43
2.5.1.4 Equipo para el ensayo del revenimiento _____	44
2.5.1.5 Equipo de ultrasonido _____	44
2.5.2 Actividades realizadas _____	45
2.6 Análisis y procesamiento de la información _____	47
2.6.1 Presentación de resultados _____	47
2.6.2 Descripción del proceso de análisis _____	47
Capítulo 3: Resultados y análisis _____	48
3.1.1 Caracterización de los agregados _____	48
3.1.2 Diseño de mezcla _____	53
3.1.3 Ensayo de ultrasonido: método directo _____	57
3.1.4 Ensayo de ultrasonido: método indirecto _____	61
3.1.4 Factor de ajuste _____	69
3.2 Conclusiones y recomendaciones _____	73
3.2.1 Conclusiones _____	73
3.2.2 Recomendaciones _____	75
4. Referencias bibliográficas _____	77
5. Apéndice _____	82

Índice de Tablas

Tabla 1 Composición del cemento holcim fuerte de uso general _____	18
Tabla 2 Clasificación de los agregados de acuerdo con su tamaño _____	19
Tabla 3 Caracterización de los agregados _____	20
Tabla 4 Límites del revenimiento para el concreto estructural _____	22
Tabla 5 Revenimiento para el concreto de acuerdo el tipo de construcción _____	23
Tabla 6 Contenido de agua (l/m^3) para el agregado grueso seleccionado _____	24
Tabla 7 Resistencia a la compresión requerida _____	24
Tabla 8 Relación agua – cemento para concreto con entrada de aire _____	25
Tabla 9 Volumen del agregado grueso de acuerdo con el módulo de finura del agregado fino _____	25
Tabla 10 Ensayos destructivos _____	36
Tabla 11 Ensayos no destructivos _____	37
Tabla 12 Clasificación del concreto de acuerdo con la velocidad por ultrasonido _____	38
Tabla 13 Diámetro de la barra y número de golpes para las pruebas de moldeo de especímenes _____	44
Tabla 14 Actividades realizadas _____	46
Tabla 15 Masas de ensayo de granulometría _____	48
Tabla 16 Granulometría de los agregados finos _____	49
Tabla 17 Masas obtenidas en el ensayo de granulometría para agregados gruesos _____	50
Tabla 18 Granulometría de los agregados gruesos _____	50
Tabla 19 Gravedad específica de agregados gruesos _____	51
Tabla 20 Masas para la gravedad específica de agregados gruesos _____	51
Tabla 21 Resultados del ensayo de gravedad específica para agregados gruesos _____	51
Tabla 22 Gravedad específica de agregados finos _____	52
Tabla 23 Masas para la gravedad específica de agregados finos _____	52
Tabla 24 Características del concreto implementado _____	53
Tabla 25 Determinación de la relación agua - cemento _____	53
Tabla 26 Estimación del volumen del agregado grueso para el diseño de mezcla _____	54
Tabla 27 Datos iniciales para la compactación de agregados _____	54
Tabla 28 Pesos unitarios de los agregados _____	55

Tabla 29 Estimación de los materiales para la batida	55
Tabla 30 Humedad de los agregados	56
Tabla 31 Ajuste de la cantidad de agua requerida para la colada	56
Tabla 32 Verificación de temperatura y revenimiento de la mezcla	57
Tabla 33 Velocidad de ultrasonido por el método directo	59
Tabla 34 Velocidad de ultrasonido por el método indirecto	62
Tabla 35 Error relativo	63
Tabla 36 Longitud de onda	67
Tabla 37 Número de onda	68
Tabla 38 Impedancia acústica	68
Tabla 39 Promedio y varianza del método directo	69
Tabla 40 Análisis de varianza de un factor, para el método directo	69
Tabla 41 Promedio y varianza del método indirecto	69
Tabla 42 Análisis de varianza de un factor, para el método indirecto	70
Tabla 43 Factor de ajuste para el método indirecto con una frecuencia de 24 khz	70
Tabla 44 Factor de ajuste para el método indirecto con una frecuencia de 55 khz	71
Tabla 45 Resistencia a la compresión	71

Índice de Figuras

Figura 1 Cemento fuerte de uso general de Holcim	18
Figura 2 Agente acoplante	28
Figura 3 Barra calibradora	28
Figura 4 Calibración del equipo	29
Figura 5 Equipo de ultrasonido	29
Figura 6 Transductores de 24 y 55 khz.	30
Figura 7 Onda sonora	30
Figura 8 Método directo del ensayo por ultrasonido	32
Figura 9 Método indirecto del ensayo por ultrasonido	32
Figura 10 Método semidirecto del ensayo por ultrasonido	33
Figura 11 Cono de abrams.	35
Figura 12 Equipo de ensayo de ultrasonido	45
Figura 13 Medición de temperatura	56
Figura 14 Distancias entre los transductores	58
Figura 15 Cámara húmeda	58
Figura 16 Velocidad de ultrasonido por el método directo	60
Figura 17 Ensayo por ultrasonido a los 3 días por el método indirecto	61
Figura 18 Velocidad de ultrasonido por el método indirecto	62
Figura 19 Relación entre la distancia entre transductores y la velocidad de ultrasonido para 24 kHz	64
Figura 20 Impacto de la distancia entre los transductores a la velocidad de ultrasonido con 55 kHz	65
Figura 21 Impacto de la distancia entre los transductores a la velocidad de ultrasonido con 24 kHz	66

Resumen ejecutivo

Los ensayos por ultrasonido facilitan el estudio de la condición interna de una estructura mediante el análisis de la velocidad de ultrasonido obtenida en las mediciones. Este trabajo tiene como finalidad aportar al área de estudio de ensayos no destructivos de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica, realizando los ensayos en el laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) para evaluar el estado interno del concreto fresco en diferentes edades del curado (3, 7, 14 y 28 días).

De acuerdo con la norma ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, el método directo dispone el transductor emisor y el receptor en caras opuestas del prisma, permitiendo una propagación rectilínea de la onda a través del material, mientras que en el método indirecto ambos transductores se ubican sobre la misma superficie, generando una propagación superficial. El estudio de estructuras cuya geometría o ubicación presenta complejidades plantea desafíos para la evaluación de su estado interno, por lo que la aplicación del método directo se imposibilita, como solución se implementa el método indirecto. Ante esta situación, la presente investigación abordó dicha problemática mediante el establecimiento de una correlación entre el método indirecto y el método directo del ensayo por ultrasonido para incrementar la confiabilidad de los resultados del método indirecto.

Es de suma importancia que el alcance de las investigaciones esté relacionado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, los cuales presentan diferentes iniciativas para mejorar la calidad de vida de las personas con un desarrollo social, tecnológico e industrial sin afectar el medio ambiente. Estos objetivos son presentados en el artículo The Sustainable Development Goals Report (2025). La investigación se relaciona con los ODS 9 (Industria Innovación e Infraestructura), 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y 12 (Producción y Consumo Responsables). Para el ODS 9, se incita a implementar tecnologías innovadoras como los métodos no destructivos en la evaluación de estructuras como el concreto, del mismo modo, para el ODS 11, esta tecnología impulsa metodologías que favorecen en el desarrollo de construcciones sostenibles y resilientes. Finalmente, para el ODS 12, este ensayo al no generar gran cantidad de desechos ayuda en el uso responsable de los recursos siendo una de las finalidades de este objetivo.

El desarrollo de la investigación va acorde a los objetivos específicos, el primer objetivo específico corresponde a determinar la velocidad de ultrasonido en prismas de concreto implementando diferentes frecuencias de transductores. Para la investigación se implementaron dos transductores de frecuencias de 24 y 55 kHz, estas frecuencias permiten el estudio del espécimen más detalladamente, evitando obtener longitudes de onda superiores al espesor del prisma, según la ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, la longitud de onda debe ser menor al espesor del espécimen de estudio.

Es importante recalcar que, antes de realizar el ensayo de ultrasonido, se limpió la superficie de los prismas ya que la presencia de residuos puede perjudicar el acoplamiento del transductor con el concreto, y como consecuencia, obtener valores erróneos en las mediciones. Cada prisma fue marcado en los puntos de medición correspondientes a 30, 40 y 50 cm para el método indirecto y para el método directo, corresponden a 15 y 60 cm. Posteriormente, se calibró el equipo con la barra calibradora y se aplicó un agente de acoplamiento (vaselina), entre el transductor y la superficie del prisma, los datos fueron analizados en tiempo real para detectar y corregir irregularidades.

El segundo objetivo específico, corresponde a analizar la variación de los resultados obtenidos en el ensayo de ultrasonido por el método directo e indirecto, a los 3, 7, 14 y 28 días del proceso curado del concreto, los resultados del ensayo de ultrasonido implementando la frecuencia del transductor de 24 kHz determinaron que a los 3 días del curado se alcanza un 66 % de la velocidad máxima del ultrasonido, lo que aumentó a los 7 días hasta un 87 %, implementando el método directo. De manera similar la frecuencia de 55 kHz evidenció un crecimiento de 65 % al 89 % de la velocidad de ultrasonido máxima.

Esta información indica que se puede realizar evaluaciones del concreto a edades tempranas del curado, detectando vacíos o discontinuidades que perjudican la resistencia a la compresión esperada a los 28 días, esto contribuye a su vez a reducir costos y tiempos de intervención. Entre los 14 y 28 días la variación de la velocidad máxima de ultrasonido es moderada, de un 5 a 6 %, siendo una etapa donde se comienza a estabilizar el proceso de hidratación del concreto y el endurecimiento

A los 28 días del curado del concreto, la velocidad de ultrasonido alcanzó 3573,50 m/s para el transductor de 24 kHz y de 3514,96 m/s para la frecuencia de 55 kHz. Estos valores se relacionan con el documento presentado por el IAEA (2002), donde se presentan valores de referencia para identificar la condición del concreto, en este caso el concreto se identifica como un concreto de calidad cuestionable.

En la investigación se analizó la variación de los resultados obtenidos mediante los métodos directo e indirecto durante el proceso de curado del concreto a los 3, 7, 14 y 28 días. La implementación del análisis de varianza (ANOVA), mostró diferencias significativas entre los métodos directo e indirecto y las frecuencias de 24 y 55 kHz, donde el transductor de 24 kHz el que presentó mayor variación, pero un mejor factor de ajuste entre ambos métodos. En cambio, el transductor de 55 kHz presentó una menor variación en los resultados, aunque mayor correlación con el método directo

La frecuencia de 55 kHz presentó una longitud de onda de 5,95 cm, siendo menor al espesor del prisma de 15 cm, esto permite un estudio más detallado de las fisuras internas y a la vez una menor dispersión de los datos obtenidos, como lo identificó el ANOVA, al contrario de la frecuencia de 24 kHz, cuya longitud de onda fue de 14,58 cm siendo más cercana al espesor del elemento, por lo tanto, se redujo la cantidad de ondas ultrasónicas en el prisma, presentando una mayor variación de los resultados, brinda una evaluación más general de la condición interna del concreto, aunque una menor precisión en la detección de discontinuidades. Esto confirma que el transductor de 24 kHz es el más adecuado para el control de calidad del concreto, mientras que la frecuencia de 55 kHz se recomienda para la detección de fisuras internas.

El tercer objetivo específico, establecer una correlación, mediante un factor de ajuste, del método directo e indirecto, para la validación de la metodología indirecta para su implementación en el control de calidad de estructuras de concreto, tuvo como finalidad el establecer un factor de correlación entre ambos métodos para validar el uso del método indirecto como herramienta de control de calidad en estructuras de concreto, lo que mejora la precisión de los resultados del método indirecto. Para 24 kHz, los factores de ajuste oscilaron entre 1,14 a 1,02 y para 55 kHz de 1,55 a 1,07. Esto confirma que, a medida que incrementa el periodo de curado, disminuye la variabilidad de los datos consecuente a la consolidación del concreto.

Finalmente, en relación al objetivo general de esta investigación, determinar la velocidad de ultrasonido en prismas de concreto (15 x 15 x 60 cm) diseñados para una resistencia a la compresión de 210 kg/cm², empleando dos transductores con frecuencias de 24 y 55 kHz, se destaca que la correcta ejecución del ensayo de ultrasonido requiere un conocimiento técnico previo, ya que errores en el acoplamiento o calibración del equipo pueden inducir a pérdidas de energía ultrasónica y, por ende, irregularidades en las medidas obtenidas. La aplicación del ensayo de ultrasonido a edades tempranas del curado permite ampliar el estudio de la condición interna del concreto, identificando la estabilización del proceso de hidratación. Los procesos de curado del concreto en campo son fundamentales para resguardar las propiedades del concreto evitando perjudicar la resistencia a la compresión esperada. Los ensayos de ultrasonido podrán identificar posibles fallas en la estructura dado que una falencia en el curado se reflejará en la evolución de la velocidad de ultrasonido.

Introducción

El ensayo por ultrasonido permite identificar la presencia de grietas o vacíos que puedan afectar la integridad estructural, este ensayo está normado por la ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete. El estudio del pulso ultrasónico se puede realizar por diferentes metodologías: directa, indirecta y semidirecta. En estos métodos, lo que varía es la posición de los transductores, es decir, el método directo de acuerdo con Martin et al. (s.f.), pone los transductores en lados opuestos del espécimen a una distancia de referencia común de tal alineación, lo que se busca obtener es información más precisa de la condición general del concreto, a diferencia del indirecto, que realiza mediciones a distancias sucesivas y en la misma cara del espécimen.

El ensayo de ultrasonido fue evaluado en edades tempranas del curado (3, 7, 14 y 28 días) permitiendo ampliar el estudio de la condición interna del prisma, identificando la etapa del curado donde ocurre la estabilización del proceso de hidratación, lo que se refleja en la estabilización de los valores máximos que se pueden obtener de la velocidad de ultrasonido. Se efectuó un factor de ajuste que permita establecer la semejanza entre las metodologías directa e indirecta para implementar esta última con alta fiabilidad de resultados para el control de calidad en sitio.

El diseño de la mezcla de concreto fue realizado de acuerdo a los procedimientos del ACI 211.1 (2022), Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete Guide, para alcanzar una resistencia a la compresión de 210 kg/cm², sin embargo, los ensayos realizados a los 28 días determinaron una resistencia a la compresión de 161,64 kg/cm². Esta diferencia significativa se atribuye posiblemente a variaciones en la relación agua/cemento, deficiencias en el proceso de curado o imprecisiones en las dosificaciones de los materiales. Por lo tanto, es importante considerar que las velocidades de ultrasonido obtenidas en este estudio corresponden a un concreto que no alcanzó su resistencia a la compresión de diseño.

El promover acciones en el desarrollo equilibrado de áreas económicas, sociales y tecnológicas forma parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Pese a las iniciativas para cumplir con su Agenda prevista hasta el 2030 se avanza con lentitud en consecuencia a la falta de participación de sectores privados y regulaciones de los países. Por lo tanto, el alcance de la investigación promueve a los ODS 9, 11 y 12, los cuales son presentados en el informe The Sustainable Development Goals Report (2025).

Promover el uso de tecnologías limpias y conectividad digital como parte del proceso de industrialización sostenible forma parte del ODS 9 llamado Industria, Innovación e Infraestructura. El estudio del ensayo de ultrasonido forma parte de la implementación de tecnologías innovadoras, empleando métodos no destructivos para el estudio de la condición interna del concreto. Del mismo modo, para el ODS 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles, se enfoca principalmente en garantizar la seguridad estructural en las viviendas, mejoras en el transporte urbano y en la gestión de residuos, objetivo relacionado con el alcance de la investigación, al verificar la calidad de la estructura, se evidencian las discontinuidades que puedan afectar la integridad estructural, además, impulsa metodologías que favorecen en el desarrollo de construcciones sostenibles y resilientes.

Por último, el ODS 12, Producción y Consumo Responsables, resalta el impacto ambiental ante la generación de desechos y el uso inadecuado de los recursos naturales siendo los sectores tecnológicos y constructivos los que afectan en mayor medida a esta problemática. Implementando ensayos no invasivos, se reduce la producción de desechos para el estudio en los laboratorios, promoviendo el uso responsable de los recursos en el control de calidad del concreto.

La aplicación del ensayo de ultrasonido en edades tempranas del curado permite determinar la condición interna del concreto, identificando la etapa de estabilización del proceso de hidratación. Los procesos de curado del concreto en campo son fundamentales para resguardar las propiedades del concreto evitando perjudicar la resistencia a la compresión esperada. En este sentido, Torres et al. (2018) respaldan en su estudio esta afirmación, al identificar la evolución y estabilidad de la consolidación interna del concreto a lo largo del tiempo. La investigación demostró que un curado constante presenta un desarrollo más uniforme en comparación del curado expuesto a las condiciones ambientales, confirmando que el curado influye en las mediciones del ensayo de ultrasonido.

La detección de discontinuidades internas implementando la metodología directa e indirecta ha sido estudiada previamente por Kaylan-Sri y Kishen-Chandra (2013), en su investigación al comparar los métodos directos, indirectos y semidirectos, induciendo fisuras en cubos de 150 mm, concluyó la eficacia de los métodos indirectos y semidirectos, al determinar con una mayor precisión la presencia de grietas en la estructura que en comparación con el método directo, el cual no presentó variaciones significativas en sus mediciones, lo que indica que este método no logró detectar las discontinuidades presentes. De esta forma, se incrementa la confiabilidad del ensayo no destructivo en el control de calidad del concreto.

El presente proyecto final de graduación estableció una correlación entre los ensayos por ultrasonido mediante los métodos directo e indirecto, empleando transductores de 24 y 55 kHz. En este sentido, se recomienda su aplicación en campo como herramienta para la estimación del pulso ultrasónico mediante el método indirecto, siempre que se utilice en estructuras de concreto con un espesor de 15 cm y bajo condiciones similares a las evaluadas en esta investigación.

Una limitación del presente estudio radica en que no se incluyó el análisis de la distribución normal de los datos recolectados. Al no haberse verificado explícitamente el ajuste de las muestras a una distribución de probabilidad, la precisión de las inferencias estadísticas y de las correlaciones entre la velocidad del ultrasonido podría presentar ciertos sesgos. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como tendencias observadas dentro de las condiciones experimentales específicas de este trabajo.

Objetivos

El presente proyecto tiene como finalidad establecer una correlación entre los ensayos directos e indirectos, para efectuar el control de calidad en estructuras de concreto implementando la metodología directa. De acuerdo con lo mencionado, se presentan los objetivos de la investigación.

General

Implementar del ensayo de ultrasonido por el método indirecto para el control de calidad de concreto fresco.

Específicos

OE 1: Determinar la velocidad de ultrasonido en prismas de concreto implementando diferentes frecuencias de transductores.

OE 2: Analizar la variación de los resultados obtenidos en el ensayo de ultrasonido por el método directo e indirecto, a los 3, 7, 14 y 28 días del proceso curado del concreto

OE 3: Establecer una correlación, mediante un factor de ajuste, del método directo e indirecto, para la validación de la metodología indirecta para su implementación en el control de calidad de estructuras de concreto.

Capítulo 1: Marco teórico

Para el desarrollo de la presente investigación, es importante conocer los aspectos que forman parte de la investigación, como las propiedades del concreto, diseño de mezcla para los prismas a estudiar y los fundamentos teóricos del ensayo por ultrasonido.

1.1 Propiedades del concreto

El concreto es uno de los materiales más importantes en el ámbito constructivo, de acuerdo con Cordero et al. (2018), la presencia de propiedades como la versatilidad, propiedades físico-mecánicas y su bajo costo, lo convierten en un material ideal para la realización de proyectos de vivienda, puentes, sistemas de alcantarillado, entre otras estructuras que son fundamentales para el ser humano. Este material está conformado por cemento, arena y grava, siendo los materiales más frecuentes en su composición, todo esto en presencia del agua, la cual permite que la reacción química del cemento ocurra, favoreciendo la trabajabilidad y la hidratación del concreto, lo que conlleva al cumplimiento de la resistencia a la compresión esperada de acuerdo con el diseño.

1.1.1 Cemento

Según Cordero et al. (2018), se le conoce como cemento hidráulico por las propiedades presentadas al momento de fraguar como consecuencia de la interacción con el agua. Este material presenta propiedades de cohesión y adhesión lo que permite un excelente desempeño estructural. El cemento está conformado por materiales arcillosos con un alto contenido de alúmina y sílice, donde con un proceso de molienda y calcinación se obtiene el clinker.

En la presente investigación se usa el cemento de uso general de Holcim tipo MM/C (C-P) 28, mostrado en la Figura 1, el cual es producido en la planta del Holcim, en Agua Caliente de Cartago, Costa Rica. De acuerdo con los datos obtenidos de la ficha técnica del cemento Holcim (s.f.), está certificado con las normas ISO 9001:2015 Gestión de Calidad e ISO 14001:2015 Gestión Ambiental.

Figura 1

Cemento fuerte de uso general de Holcim



Nota: Obtenido de *cemento fuerte EcoPlanet cemento hidráulico para construcción general*, s.f., (https://www.holcim.cr/sites/costarica/files/2022-08/ficha_cemento_fuerte.pdf)

En la Tabla 1 se puede apreciar la composición del cemento de acuerdo con la ficha técnica de Holcim (s.f.).

Tabla 1

Composición del cemento Holcim Fuerte de uso general

Ítem	Cemento Holcim Fuerte	RTCR 479-2015
Clinker	45 – 64	45 - 64
Adiciones minerales	36 – 55	36 - 55
Otros	0 – 55	0 - 5

Nota: Adaptado de la *ficha técnica del cemento Holcim fuerte de uso general*, s.f. (https://www.holcim.cr/sites/costarica/files/2022-08/ficha_cemento_fuerte.pdf).

1.1.2 Agregados

Los agregados cumplen una relación de resistencia/costo, de acuerdo con Cordero et al. (2018), estos materiales permiten reducir las cantidades necesarias del cemento, disminuyendo los costos de la obra y mejorando las propiedades mecánicas del concreto. En la Tabla 2 se presenta la clasificación de los agregados de acuerdo con su tamaño máximo nominal.

Tabla 2

Clasificación de los agregados de acuerdo con su tamaño

Tamaño de las partículas (mm)	Denominación	Clasificación
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina
0,002 – 0,074 (No. 200)	Limo	
0,075 – 4,76 (No. 200 – No. 4)	Arena	
4,76 – 19,1 (No. 4 – ¾ ")	Gravilla	Agregado fino
19,1 - 50,8 (¾" - 2")	Grava	
50,8 – 152,4 (2" - 6")	Piedra	
> 152,4 (6")	Rajón	
	Piedra bola	

Nota: Adaptado de, *Tecnología del Mortero, materiales, propiedades y diseño de mezclas*, tomo 1, tercera edición, ASOCRETO, 2010.

1.2 Caracterización de los agregados

Para el proceso de caracterización de los agregados, la American Society for Testing and Materials presenta diferentes normas que regulan estos ensayos. Esto se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3
Caracterización de los agregados

Norma	Definición
ASTM C127-15	De acuerdo con la ASTM C127-15, este método consiste en la determinación de la absorción y densidad del agregado grueso una vez sumergido en agua durante (24 ± 4) horas, esto con la finalidad de llenar los poros del agregado. Posterior a esto, la mezcla se seca y se pesa, para determinar el volumen mediante el método de desplazamiento del agua. Una vez finalizado este proceso, la mezcla se seca en el horno y se determina la masa, con los datos obtenidos se podrá determinar la densidad relativa y la absorción (2024).
ASTM C128-22	Con base en la norma ASTM C128-22, el procedimiento se basa en sumergir el agregado fino en agua durante (24 ± 4) horas, esto con la finalidad de llenar los poros del agregado. Una vez finalizado, la mezcla se seca y se procede a pesarla, para determinar el volumen mediante el método gravimétrico o volumétrico. Una vez finalizado este proceso, la mezcla se seca en el horno y se determina la masa, con los datos obtenidos se podrá determinar la densidad relativa y la absorción (2023).
ASTM C566-19	De acuerdo con la ASTM C566-19, se basa en la determinación del peso del agregado húmedo, con una aproximación del 0.1%, el cual es secado posteriormente en un horno con una temperatura controlada de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, para nuevamente determinar el peso del agregado seco. Estos datos serán fundamentales para la determinación del contenido de humedad del agregado (2019).
ASTM C136/C136M-14	La norma ASTM C136/C136M-14, presenta una serie de tamices estandarizados, los cuales serán requeridos para determinar el tamaño máximo nominal de la muestra, de esta forma se puede determinar si el agregado cumple con lo requerido en el diseño de la mezcla. (2014).

1.3 Diseño de mezcla según ACI 211.1

El ACI 211.1 brinda una serie de pasos que permiten diseñar una mezcla de concreto, considerando las propiedades de los agregados, el tipo de construcción, contenido de aire. Además, se complementa este diseño con las normativas y códigos vigentes implementados en Costa Rica, estos procedimientos son mostrados a continuación.

1.3.1 Revenimiento

El revenimiento del concreto es determinado mediante la norma ASTM C138/C138M-17a (2023), Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, donde se explica los procesos a seguir. En este ensayo se hará uso del cono de Abrams, el cual tiene un diámetro en la parte inferior de 200 mm y en la parte superior de 100 mm, con una altura de 300 mm. Además, se implementa la compactación por capas con una varilla de acero recta, con una sección circular de 16 mm, de acuerdo con la ASTM C138/C138M-17a. (2023).

El procedimiento consiste en humedecer el molde colocándolo en una superficie plana y rígida, de acuerdo con la ASTM C138/C138M-17^a (2023), se debe agregar 3 capas de igual tamaño de concreto en el molde, cada una compactada 25 veces. Una vez finalizado el llenado del molde, se procede a retirar el cono de Abrams colocándolo junto a la mezcla realizada midiendo la diferencia entre la parte superior del molde y la del concreto asentado.

Esta medida corresponde al asentamiento del concreto, la cual nos brindará información sobre la dosificación de la mezcla. De acuerdo con el documento del MOPT el CR-2020 (2022), Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, en la Tabla 552-02 brinda un rango de asentamiento para considerar aceptable la mezcla de acuerdo con el tipo de obra. Esto se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4

Límites del revenimiento para el concreto estructural

Tipo de obra	Asentamiento (mm)	Asentamiento máximo (mm)
Secciones de un espesor mayor que 300 mm.	25 - 75	125
Secciones de un espesor menor o igual a 300 mm.	25 - 100	125
Pilas coladas en sitio y pozos perforados no vibrados	125 - 200	225
Concreto colocado bajo el agua	125 - 200	225
Relleno para protección de taludes	75 - 175	200

Nota: Adaptado de, *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes*, CR- 2020. (<https://www.mopt.go.cr/sites/default/files/destacados/planificacion-sectorial/normativa/manuales/cr-2020/cr-2020.pdf>).

De acuerdo con el diseño de mezclas de concreto por el método ACI 211.1-91 (2015), Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, la selección del revenimiento esperado se basa en el tipo de construcción. Esto mostrado en la Tabla 5.

Tabla 5

Revenimiento para el concreto de acuerdo el tipo de construcción

Estructura	Asentamiento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	75	25
Zapatas, cajones y muros de subestructura sin refuerzo	75	25
Muros y vigas reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Concreto en masa	50	25

Nota: Adaptado del ACI 211.1-91, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, 2002. (https://kashanu.ac.ir/Files/aci%20211_1_91.pdf).

1.3.2 Contenido de agua

Para el presente proyecto se emplea un agregado grueso con un tamaño máximo nominal de 12,5 mm (quintilla), siendo uno de los agregados gruesos que son frecuentados en las construcciones en Costa Rica. De acuerdo con el ACI 211.1-91, en la Tabla 6.3.3, se presenta la estimación del contenido de agua y aire para la mezcla, para ello se implementa la Tabla 6.

Tabla 6

Contenido de agua (l/m^3) para el agregado grueso seleccionado

Asentamiento (mm)	9,5 (mm)	12,5 (mm)	19 (mm)	25 (mm)	37,5 (mm)	50 (mm)	75 (mm)	150 (mm)
25 – 50	208,1	199,2	187,3	178,4	163,5	154,6	130,8	113,0
75 – 100	228,9	217,0	202,2	193,2	178,4	169,5	145,7	124,9
150- 175	243,8	229,0	214,1	202,2	187,3	178,4	160,5	-
175 <	-	-	-	-	-	-	-	-
Aire en la mezcla (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2

Nota: Adaptado de Diseño de mezclas por el método ACI, Cordero et al., 2018.
(<https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/view/25/20/678>).

1.3.3 Relación agua – cemento

En la Tabla A1.5.3.4 (a) del ACI 211.1-91, se presenta una relación del agua/cemento, de acuerdo con la resistencia a la compresión esperada a los 28 días. Cabe destacar que se debe realizar un ajuste a la resistencia a la compresión esperada para obtener una sobrerresistencia de acuerdo con Cordero et al. (2018), esto se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7

Resistencia a la compresión requerida

Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión requerida (MPa)
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7,0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8,3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1,1 \cdot f'_c + 5,0$

Nota: Adaptado de Diseño de mezclas por el método ACI, Cordero et al., 2018.
(<https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/view/25/20/678>).

Con la resistencia a la compresión requerida para el diseño de mezcla, se realiza una interpolación con los valores presentados en la Tabla 8.

Tabla 8

Relación agua – cemento para concreto con entrada de aire

Resistencia a la compresión requerida (MPa)	Concreto sin entrada de aire	Concreto con entrada de aire
40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

Nota: Adaptado del ACI 211.1-91, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, 2002. (https://kashanu.ac.ir/Files/aci%20211_1_91.pdf)

Para la estimación del agregado grueso requerido para el diseño de mezcla, se implementan los valores presentados en la Tabla 9.

Tabla 9

Volumen del agregado grueso de acuerdo con el módulo de finura del agregado fino

Tamaño máximo nominal del agregado grueso (mm).	Módulo de finura (%)			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,59
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Nota: Adaptado de la Tabla A1.5.3.6 del ACI 211.1-91, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, 2002. (https://kashanu.ac.ir/Files/aci%20211_1_91.pdf)

1.3.4 Ajuste por humedad de los agregados

Según Cordero et al. (2018), la mezcla debe ajustarse de acuerdo con la humedad que presentan los agregados. Los datos correspondientes a la humedad de los agregados son obtenidos del ensayo de la norma ASTM C29/C29-M23, para obtener la cantidad de agua corregida requerida, para ello se implementa la Ecuación 1.

$$W_M = W_D - Gx(A_G - H_G) - Fx(A_F - H_F)$$

Ecuación 1

Donde:

- A_F : Absorción del agregado fino (%).
- A_G : Absorción del agregado grueso (%).
- F : Cantidad del agregado fino (kg).
- G : Cantidad del agregado grueso (kg).
- H_F : Humedad del agregado fino (%).
- H_G : Humedad del agregado grueso (%).
- W_D : Cantidad de agua de acuerdo con el asentamiento (kg).
- W_M : Cantidad de agua estimada para el diseño de mezcla (kg).

1.4 Ensayo destructivo

De acuerdo con Jiménez et al. (2020), los ensayos destructivos son aquellos que generan una alteración en la composición química, mecánica o geométrica, irreversible, en la estructura, con la finalidad de determinar las propiedades mecánicas. Además, se implementa como método de control de calidad para establecer si es requerido una intervención en el elemento analizado. Los ensayos destructivos contribuyen en la generación de residuos, por ejemplo, en la elaboración de probetas, lo que representa un impacto sobre el medio ambiente.

1.5 Ensayo no destructivo

Este tipo de ensayos son realizados sin afectar la integridad de la estructura, de acuerdo con Jiménez et al. (2020) estos ensayos permiten la detección de fisuras internas, vacíos, discontinuidades, implementando ondas electromagnéticas, acústicas o elásticas, lo que permite estudiar todo el elemento sin requerir intervenir en su estructura. Por lo tanto, su implementación en el control de calidad reduce la complejidad del estudio y la generación de residuos. El ensayo por ultrasonido forma parte de este tipo de ensayos, su implementación en el control de calidad del concreto favorece al estudio de estructuras que presenten cierta complejidad en su ubicación o geometría que perjudique los tiempos de entrega del informe.

1.5.1 Ensayo por ultrasonido

El ensayo por ultrasonido se encuentra normado por la ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, se basa en la determinación de la calidad del concreto, estableciendo la homogeneidad y daños internos de la estructura. De acuerdo con Saif (2019), el ensayo genera ondas ultrasónicas que son transmitidas por un transductor electroacústico que funcionaría como el emisor de la onda y son captadas por el segundo transductor que da la función de receptor. La norma ASTM C597-22 (2022), menciona que se transmiten 3 pulsos por segundo.

1.5.1.1 Equipo de ultrasonido

Los elementos que conforman el equipo de ultrasonido son descritos en la norma ASTM C597-22 (2022), los cuales fueron implementados en la presente investigación, estos son presentados a continuación.

- Agente acoplante

Este elemento permite minimizar los espacios vacíos entre los transductores y la superficie de concreto, de forma que las ondas ultrasónicas no sufran ninguna perturbación durante el ensayo. Es de suma importancia conocer los fundamentos teóricos de un ensayo previo a su realización, de esta forma el análisis de datos será más preciso, estos fundamentos son presentados a continuación.

Figura 2

Agente acoplante



- Barra calibradora

El proceso de calibración del equipo se basa en realizar un ensayo de prueba a un elemento del cual se conozca el tiempo de tránsito de las ondas longitudinales, de modo que se puedan realizar los ajustes necesarios al equipo para obtener resultados más precisos. Esto se ejemplifica en la Figura 3.

Figura 3

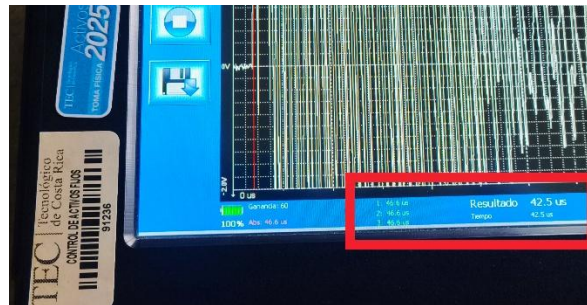
Barra calibradora



En la Figura 4 se puede observar el resultado obtenido, de 42.5 μ s lo que corresponde al valor de tiempo propio de la barra calibradora. Con este resultado se puede concluir que el equipo está bien calibrado.

Figura 4

Calibración del equipo



- Medidor de tiempo.

El medidor de tiempo debe tener una precisión de al menos 1 μs con un funcionamiento en temperaturas entre los 0 a 40 $^{\circ}\text{C}$. Esto se observa en la Figura 5.

Figura 5

Equipo de ultrasonido



- Transductores

Estos componentes deben ser construidos por elementos piezoeléctricos o materiales sensibles al voltaje. El equipo consta de dos transductores. (Véase Figura 6).

Figura 6

Transductores de 24 y 55 kHz.

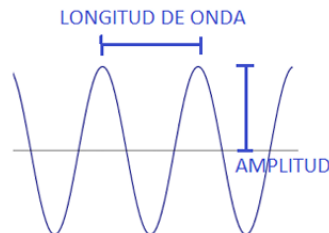


1.5.1.2 Intensidad de onda

Según lo presentado en la tesis de Lipa-L. y Alamo-J. (2015), la intensidad de onda corresponde a la cantidad de energía acústica que es transportada por el sonido (dB), la cual disminuye por la fricción generada entre las partículas de sonido y el medio, en este caso las ondas ultrasónicas y el concreto, este fenómeno es conocido por absorción. Es requerido que el espesor del espécimen sea mayor que la longitud de la onda, para que atraviese el medio en caso contrario, la onda se verá reflejada, generando datos erróneos. En la Figura 7, se ejemplifica la longitud de onda y amplitud.

Figura 7

Onda sonora



Nota: Adaptado de *Metodología para la detección de vacíos y medición de espesores en el concreto, por medio del pulso ultrasónico*, Lipa- L. y Alamo-J., 2015.

La longitud de onda se estima con la siguiente ecuación, de acuerdo con Lipa-L. y Alamo-J., (2015).

$$\lambda = \frac{V}{F}$$

Ecuación 2

Dónde:

- V: Velocidad de la onda (m/s).
- F: Frecuencia de la onda (Hertz).

En relación con el número de onda, Lipa-L. y Alamo-J., (2015), presentan la siguiente ecuación.

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

Ecuación 3

1.5.1.3 Impedancia acústica

De acuerdo con Lipa-L., y Alamo-J., (2015), esta propiedad corresponde a la resistencia que opone el medio a las ondas que lo atraviesan, la cual se determina mediante la Ecuación 4. En el caso del concreto es aproximadamente $7 \times 10^6 \text{ kg/(m/s}^2\text{)}$.

$$Z = \frac{P}{v}$$

Ecuación 4

Donde:

- Z: Impedancia acústica ($\text{kg/(m/s}^2\text{)}$).
- P: Presión acústica (Pa).
- v: Velocidad de las partículas (m/s).

1.5.1.4 Pulso ultrasónico

El pulso ultrasónico es producido por los transductores, los cuales convierten la energía en ultrasonido, al momento de entrar en contacto el transductor con el concreto se generan diversos pulsos, los cuales provocan una serie de ondas mecánicas que se propagan por el espécimen de concreto, de acuerdo con Lipa-L., y Alamo-J., (2015).

1.5.2 Tipos de ensayos ultrasónicos

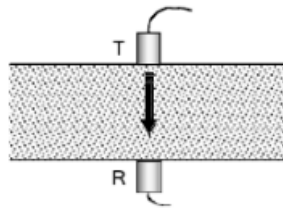
Los ensayos por ultrasonidos se pueden realizar de diversas formas de acuerdo con la posición de los transductores, los cuales son el método directo, indirecto y semidirecto.

1.5.2.1 Directo

De acuerdo con Ergueta-G. y Quino-M., (2024), el ensayo por el método directo es el más efectivo, brindando resultados más precisos donde con la longitud de la trayectoria permite determinar la velocidad de pulso ultrasónico. Este se puede observar en la Figura 8.

Figura 8

Método directo del ensayo por ultrasonido



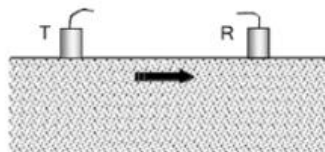
Nota: Adaptado de *Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción*, Ergueta-G. y Quino-M., 2024. (<https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>)

1.5.2.2 Indirecto

Este método de acuerdo con Ergueta-G. y Quino-M. (2024), es el menos satisfactorio, dado que la amplitud de la señal es menor que en el método directo, lo que requiere de un procedimiento especial para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico (Véase Figura 9).

Figura 9

Método indirecto del ensayo por ultrasonido



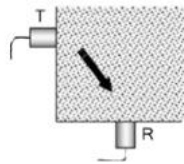
Nota: Adaptado de *Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción*, Ergueta-G. y Quino-M., 2024. (<https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>)

1.5.2.3 Semidirecto

Por último, el ensayo por el método semidirecto brinda resultados más efectivos, con el cuidado de que la distancia entre los transductores no incremente demasiado, dado que esto puede llegar a afectar la detección de la señal de pulso según Ergueta – G. y Quino – M., (2024), presentado en la Figura 10.

Figura 10

Método semidirecto del ensayo por ultrasonido



Nota: Adaptado de *Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción*, Ergueta – G. y Quino – M., 2024. (<https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>)

1.6 Aplicaciones del ensayo por ultrasonido

De acuerdo con el International Atomic Energy Agency (2002), el ensayo por ultrasonido determina la uniformidad del concreto, permite implementarlo como método de control de calidad para estructuras de concreto mediante una correlación entre la resistencia y la velocidad de ultrasonido, además de obtener valores como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson dinámico del concreto.

La detección de imperfecciones puede mencionarse como la principal aplicación del ensayo por ultrasonido, permitiendo la toma de decisiones sobre las intervenciones en estructuras salvaguardando la integridad de terceros y de la edificación, sin necesidad de extraer núcleos que pueden tener un faltante de información de la estructura al ser un estudio muy puntual, esto de acuerdo con el IAEA (2002).

La correlación entre la velocidad de ultrasonido y la resistencia a la compresión del concreto puede presentar variaciones en función de la edad del concreto, el tipo de agregados utilizados, la dosificación del diseño de mezcla, el empleo de aditivos y el tipo de cemento. De acuerdo con el documento de la IAEA (2002), *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*, los estudios que establecen este tipo de correlaciones deben especificar claramente todos estos factores, con el fin de facilitar una interpretación adecuada de los resultados garantizando una correcta aplicación en evaluaciones en campo.

En la investigación realizada por Kaylan-Sri y Kishen-Chandra (2013), se analizó el comportamiento del pulso ultrasónico en cubos de concreto, con la finalidad de detectar fisuras internas y superficiales, así como determinar la ubicación de las discontinuidades en relación con el tiempo de tránsito y velocidad de propagación obtenida. Los cubos de concreto de 150 mm, con una resistencia a la compresión de 25 MPa, fueron ensayados, algunos presentaban micro fisuras inducidas previamente y otros sin ningún daño. Para este ensayo de ultrasonido se aplicaron las tres metodologías, directo, indirecto y semidirecto.

Los resultados de la investigación por Kaylan-Sri y Kishen-Chandra (2013), demostraron que la velocidad de ultrasonido disminuye significativamente implementando el método indirecto y semidirecto a diferencia del método directo. Lo que se concluye en la efectividad de la implementación de mediciones indirectas en el ensayo de ultrasonido para la detección de fisuras internas y superficiales. Los parámetros del ensayo son similares a la presente investigación, por consiguiente, se espera un comportamiento semejante en el estudio del pulso ultrasónico en prismas de 15 x 15 x 60 cm.

El control de calidad del concreto mediante la aplicación del ensayo de ultrasonido permite evaluar las propiedades internas de las estructuras de forma no destructiva. En el estudio realizado en la Universidad Central de Venezuela por Torres et al. (2018), analizaron el comportamiento de 96 probetas cilíndricas con diferentes dosificaciones, métodos de curado y diseños de resistencia a la compresión de 180, 300 y 320 kg/cm². Un grupo de probetas fue sumergido en un tanque de agua para cumplir con el proceso de curado, mientras que el otro grupo se dejó en estado seco a la intemperie simulando las condiciones de la obra.

Los resultados evidenciaron que el ensayo de ultrasonido identifica con claridad la estabilidad de la consolidación interna del concreto a través del tiempo, identificando un aumento paulatino en las velocidades de pulso, siendo estos valores mayores en el concreto con una resistencia a la compresión de diseño de 320 kg/cm², evidenciando la confiabilidad del ensayo para diferenciar el comportamiento de diferentes concretos con distintas dosificaciones. Asimismo, se comprobó que las condiciones de curado tienen un impacto directo en las mediciones del ensayo ultrasónico, las probetas con un curado constante evidenciaron un desarrollo más uniforme del material, con una menor presencia de vacíos. Al contrario de las probetas con un curado al aire libre, los cuales presentaron una evolución más lenta y resultados con poca estabilidad. Esto resalta la importancia del curado en el desarrollo del concreto, y la capacidad del ensayo ultrasónico de detectar estas falencias.

1.7 Control de calidad en sitio

El control de calidad del concreto en sitio se puede realizar desde el proceso de colado hasta diversas edades de este, mediante la aplicación de procesos normados por la ASTM y por reglamentos vigentes aplicados en Costa Rica. El control de calidad asegura el cumplimiento de los procesos de elaboración de la mezcla de acuerdo con el diseño, verificando, además, que el concreto cumplirá con el objetivo estructural. Este

El revenimiento del concreto se realiza con los procedimientos explicados en la ASTM C143/C143M-12 (2015). Para este ensayo se implementa el cono de Abrams, el cual permite determinar el asentamiento de la mezcla, comparando los valores obtenidos con los esperados en el diseño de mezcla, identificando posibles falencias con la dosificación del diseño. Al mismo tiempo, se puede realizar la prueba de la temperatura de la mezcla (ASTM C1064/C1064M-17), determinando si el concreto cumple con los parámetros de temperatura del diseño de mezcla. El cono de Abrams es mostrado en la Figura 11.

Figura 11

Cono de Abrams.



En Costa Rica el CR-2020 (2022), Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, se establece un rango de asentamiento para la aprobación del concreto en sitio, determinando si el concreto es muy fluido lo que indica un exceso de agua o si el concreto es muy seco concluyendo que el concreto no cumple con la cantidad de agua requerida. Los problemas con la dosificación de la mezcla pueden conllevar a la presencia de vacíos o discontinuidades en la estructura, perjudicando la resistencia a la compresión esperada.

De acuerdo con el CR-2020 (2022), Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes, del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, es responsabilidad del contratista verificar la calidad tanto de los materiales como de los productos utilizados en la elaboración del concreto, mediante constancias generadas por los laboratorios debidamente inscritos en el Ente Costarricense de Acreditación.

Adicionalmente, uno de los métodos aplicados en campo para verificar el cumplimiento de la resistencia a la compresión esperada del concreto es la extracción de núcleos de acuerdo con la ASTM C42/C42M-20 (2020), Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, la cual permite determinar si concreto cumple con la resistencia a la compresión esperada o se presentaron incongruencias en la elaboración de la mezcla que pueda afectar la integridad estructural.

En la Tabla 10 y Tabla 11, se pueden observar ensayos destructivos y no destructivos que son implementados en el control de calidad del concreto.

Tabla 10
Ensayos destructivos

Ensayo	Norma	Descripción
Resistencia a la compresión	ASTM C39/C39M-2	Este ensayo determina la resistencia a la compresión en pruebas realizadas a cilindros de concreto, aplicando una carga compresiva axial de acuerdo con la ASTM C39/39M-2 (2024).
Resistencia al corte	ASTM C273/C273M-16	La finalidad de este ensayo es aplicar una fuerza de corte sobre prismas, determinando su capacidad de resistencia ante estos esfuerzos cortantes de acuerdo con ASTM C273/C273M-16 (2018).
Resistencia a la flexión	ASTM C78/C78M-22	Mediante una viga simple con carga en 3 puntos, se determina la resistencia a la flexión del concreto, permitiendo determinar el módulo de ruptura del espécimen.

Tabla 11

Ensayos no destructivos

Ensayo	Norma	Definición
Esclerómetro de rebote	ASTM C805/C805M-18.	Esta prueba determina la uniformidad del concreto, detectando variaciones en la estructura y permitiendo determinar la resistencia del concreto al implementar una correlación entre el número de rebote y la resistencia a la compresión del diseño del concreto, esto de acuerdo con la ASTM C805/C805M-18 (2025).
Resistencia a la penetración	ASTM C803/C803M-18	Este ensayo consiste en determinar la resistencia del concreto ante la penetración de una sonda o aguja de acero determinando las zonas de baja calidad, de acuerdo con la ASTM C803/C803M-18 (2023).
Potencial de corrosión	ASTM C876-22b	La norma ASTM C879-22b (2022), indica que el ensayo del potencial de corrosión establece la medición de la probabilidad que exista corrosión en la estructura y en caso de estar presente indica su severidad.
Método de eco impacto	ASTM C1383-15(2022)	Este ensayo analiza el tiempo en que se recibe la onda emitida por diversos impactos superficiales controlados, determinando el espesor del elemento y las posibles discontinuidades en este, de acuerdo con la ASTM C1383-15(2022).
Radiografía industrial	ASTM E1742/E1742M-18	De acuerdo con la ASTM E1742/E1742M-18, este método permite mediante imágenes obtenidas por radiación X, determinar los vacíos internos y la posición del acero en el concreto.

1.8 Interpretación de resultados

Una vez realizado el ensayo por ultrasonido el principal resultado será la velocidad de este, por ende, es importante conocer que indican estos datos. Por ello se hace referencia a la Tabla 11.3 del IAEA, en su estudio de Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, donde se menciona la clasificación del concreto de acuerdo con la velocidad de pulso ultrasónica obtenida por la metodología directa. Esto se puede observar en la Tabla 12.

Tabla 12

Clasificación del concreto de acuerdo con la velocidad por ultrasonido

Velocidad de ultrasonido (m/s)	Calidad del concreto
> 4500	Excelente
3500 – 4500	Buena
3000 – 3500	Cuestionable
2000 – 3000	Pobre
< 2000	Muy pobre

Nota: Adaptado de Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, IAEA, 2002. (https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-17_web.pdf).

1.9 Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) permite identificar estadísticamente diferencias significativas entre las medias de dos o más grupos experimentales, a partir de la variabilidad de sus datos (Dagnino, 2014). En el presente estudio, esta metodología se aplicó con el propósito de analizar los resultados obtenidos en los ensayos por ultrasonido, comparando la velocidad de propagación de la onda entre dos grupos definidos por la frecuencia de los transductores utilizados: 24 kHz y 55 kHz.

La presente investigación corresponde al ANOVA de un factor, dado que el diseño experimental cuenta con un solo factor independiente, la frecuencia del transductor, y una variable dependiente cuantitativa, la velocidad de ultrasonido. De acuerdo con Dagnino (2014), la hipótesis nula (H_0), permite identificar la igualdad entre las medias de los grupos estudiados, ante una hipótesis alternativa (H_1) que identifica las diferencias significativas entre los grupos. El ANOVA, compara la variabilidad interna de los grupos, cuando las varianzas son similares, esto se identifica con un valor F. Cuando la media de un grupo difiere significativamente, el valor F se aparta de 1, lo que reduce la probabilidad de que la hipótesis nula sea verdadera.

Para la determinación de diferencias significativas entre las medias, se debe comparar el valor p con el nivel de significancia, la cual para la presente investigación corresponde a 0,05. Dagnino (2014), menciona que la igualdad de las medias de los grupos estudiados se presenta con la hipótesis nula. De acuerdo con Bakieva et al. (s.f.), si el valor p es menor que 0,05 las diferencias entre las medias son significativas, en consecuencia, se rechaza H_0 . En caso contrario, donde p sea mayor a 0,05, las medias no son estadísticamente significativas y la hipótesis H_0 es válida. El valor F calculado (F_c), el cual es fundamental para el rechazo o la aprobación de la hipótesis H_0 , donde se rechaza si $F_c > F$.

Capítulo 2: Metodología

El desarrollo de la presente investigación tuvo como finalidad obtener una correlación entre los ensayos directos con los indirectos, permitiendo implementar la metodología indirecta en el control de calidad de estructuras de concreto. Para ello se presenta a continuación el tipo de investigación a realizar.

2.1 Tipo de investigación

Este proyecto consistió en una investigación mixta, de primera mano se obtendrán datos cuantitativos por medio de ensayos de laboratorio, y posteriormente por medio de recopilación bibliográfica y el estudio de correlación, se obtendrán los factores de ajuste que permitan determinar cualitativamente el estado del concreto.

2.2 Definición de categorías y variables

Cómo eje fundamental de esta investigación y en pro de obtener un mejor resultado se analizó una sola variable principal, la cual es la velocidad del ultrasonido a través de los elementos de concreto. Esto deriva en dos variables dependientes que serán medidas indirectamente, la resistencia y densidad (detección de posibles vacíos internos) del concreto mediante los valores de velocidad de las ondas de ultrasonido.

2.3 Sujetos de información

La información se obtuvo por medio de pruebas de ultrasonido realizadas a prismas de concreto rectangulares moldeados y probados en el CIVCO, donde se estudió una población de 10 especímenes, de acuerdo con la ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, el ensayo ultrasónico no depende de una cantidad de pruebas sino de una correcta ejecución por lo que es esencial un

criterio técnico al momento de realizar el ensayo, siendo este el caso los ensayos ultrasónicos realizados en el CIVCO cuenta con la participación de un técnico del laboratorio capacitado para el uso de este equipo, siendo este ensayo parte de los servicios que ofrece dicho laboratorio garantizando la confiabilidad del mismo. A cada prisma se le realizó el ensayo de ultrasonido a diferentes distancias entre los transductores, siendo a 30, 40 y 50 cm para la metodología indirecta. Mientras que, para la metodología directa, se analizó la velocidad ultrasónica a los 15 y 30 cm.

El ensayo analizó 5 prismas con una frecuencia de 24 kHz y 5 a 55 kHz, de esta forma se tendrá un análisis más global de la condición interna del concreto, cabe mencionar que, en cada ensayo, se realizarán 10 lecturas, para analizar el comportamiento de los datos, identificando cualquier variación posiblemente derivada de un error en la manipulación del equipo. Esta cantidad fue determinada considerando una población que permita obtener diferentes resultados los cuales se pueden comparar para compensar la variabilidad que pueda producirse entre cada prisma, y reduciendo el margen de error para el resultado final.

2.4 Fuentes de información

Fuentes primarias: datos directos medidos en laboratorio.

Fuentes secundarias: normativa para ensayos y bibliografía referente a métodos de estudio y correlaciones matemáticas directas e indirectas.

La investigación se realizó de acuerdo con los procedimientos indicados en la ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, de igual forma se hace referencia al International Atomic Energy Agency (2002), Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, en su documento se presentan los valores de referencia para determinar la calidad del concreto de acuerdo con la velocidad de pulso ultrasónico obtenida.

De igual forma, investigaciones como la de Torres, R. et al. (2018), Análisis y evaluación de concretos dosificados a diferentes resistencias, edades y condiciones de curado mediante ensayos de ultrasonido y Kaylan, S. y Kishen, C. (2013), Experimental Evaluation of Cracks in Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity, presentan resultados en las investigaciones realizadas que se asemejan al objetivo de esta investigación siendo favorable para el análisis de resultados.

2.5 Técnicas e instrumentos de recolección

Para cumplir con el objetivo planteado en la presente investigación se realizarán una serie de ensayos en el laboratorio del CIVCO, del Tecnológico de Costa Rica. Para ello se describe a continuación las técnicas e instrumentos requeridos para el desarrollo del proceso investigativo.

2.5.1 Descripción de técnicas e instrumentos

Las técnicas requeridas para la obtención de datos en la campaña experimental son presentadas en el siguiente apartado, donde se muestran los procedimientos del ensayo de ultrasonido.

2.5.1.1 Técnicas

El procedimiento de obtención de datos se realizará mediante la norma ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, específicas para la realización y medición de ensayos de laboratorio. Dicho procedimiento se presenta a continuación.

- Preparación de la superficie.

Previo a la ejecución del ensayo se debe realizar una limpieza de la superficie donde se colocarán los transductores para prevenir la presencia de residuos que puedan afectar el acoplamiento, generando interferencias en los pulsos ultrasónicos. Además, se deben marcar los prismas con las dimensiones seleccionadas para la colocación de los transductores, en la presente investigación las medidas corresponden a 30, 40 y 50 cm para el método indirecto y 15 y 60 cm para el método directo.

- Colocación y acoplamiento.

Una vez seleccionados los transductores (24 y 55 kHz), se realiza la calibración del equipo, esto con la barra calibradora. Una vez obtenido el valor esperado en la calibración, se aplica un agente de acoplamiento (vaselina) entre el transductor y la superficie del concreto para reducir los vacíos entre ambos. Es importante generar una presión constante y uniforme para no generar variaciones en las mediciones.

- Registro e interpretación.

Es importante analizar los datos obtenidos durante el ensayo, dado que un mal acoplamiento puede afectar la propagación de la onda ultrasónica, generando variaciones entre las mediciones. En la investigación actual estos datos serán analizados en tiempo real, por lo que un resultado inusual puede ser corregido en el momento.

A continuación, se presenta el equipo requerido para la elaboración del proceso experimental.

2.5.1.2 Moldes prismáticos

Los moldes deben mantener sus dimensiones bajo todas las condiciones de manipulación en el laboratorio, de acuerdo con la ASTM C31/C31M-23 (2023), Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, su material tiene que ser de acero, hierro fundido o cualquier otro material que no permita la absorción del agua y tener propiedades herméticas. Los moldes implementados en este proyecto cumplen con las dimensiones de 15x15x60 cm, propiedad de los laboratorios del CIVCO, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

2.5.1.3 Equipo de compactación

En cada uno de los primas moldeados, se debe realizar un proceso de compactación para asegurar la uniformidad de estos especímenes, de igual forma se reduce la cantidad de vacíos permitiendo que la resistencia del concreto no se vea afectada en el proceso de curado. Para el proceso experimental se realizará la compactación mediante un proceso de golpes en cada capa de llenado del molde mediante una varilla acorde a las dimensiones establecidas por la ASTM C192/C192M-25 (2025), Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, esta información se puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13

Diámetro de la barra y número de golpes para las pruebas de moldeo de especímenes

Cilindros		
Diámetro del cilindro, mm [in]	Diámetro de la barra mm [in]	Número de golpes / Capa
75 [3] a < 150 [6]	10 ± 2 [3/8 ± 1/16]	25
150 [6]	16 ± 2 [5/8 ± 1/16]	25
200 [8]	16 ± 2 [5/8 ± 1/16]	50
250 [10]	16 ± 2 [5/8 ± 1/16]	75
Vigas y Prismas		
160 [25] o menos	10 ± 2 [3/8 ± 1/16]	25
165 a 310 [26 a 49]	10 ± 2 [3/8 ± 1/16]	1 por cada 7 cm ² [1 in ²] de superficie
320 [50] o más	16 ± 2 [5/8 ± 1/16]	1 por cada 14 cm ² [2 in ²] de superficie

Nota: Adaptado de *ASTM C192/C192M-25, 2025*.

2.5.1.4 Equipo para el ensayo del revenimiento

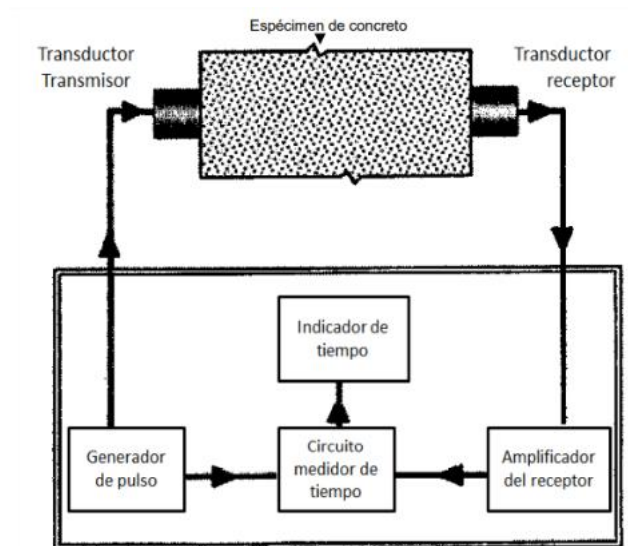
Este equipo debe cumplir con lo especificado en la ASTM C143/C143M-12 (2015), el molde implementado en este ensayo debe ser metálico para que no reaccione con los componentes del concreto, de acuerdo con la norma debe tener un espesor de 1.5 mm como mínimo, debe tener forma de cono truncado, con una base de 200 mm de diámetro y una altura de 300 mm. El molde será rellenado por 3 capas de concreto del mismo espesor, en cada una de estas capas se debe compactar 25 veces con una barra de 16 mm de diámetro de acuerdo con las especificaciones de la norma.

2.5.1.5 Equipo de ultrasonido

El equipo requerido para el ensayo se rige de acuerdo con la norma ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, donde se menciona el equipo requerido (véase la Figura 12). El equipo está conformado por un generador de pulso, dos transductores, un amplificador del transductor, el equipo implementado por el CIVCO corresponde a la marca Matest.

Figura 12

Equipo de ensayo de ultrasonido



Nota: Adaptado de COGUANOR NTG 41017 h17, 2012.

De acuerdo con los datos brindados por Matest (2025), se describen las principales características de cada equipo.

Equipo de ultrasonido Matest C369N.

- Tiene un rango de medición de 0 – 3000 μ s con una resolución de ± 10 μ s.
- Cuenta con un pulso ultrasónico ajustable de 250 a 1000 V.
- Capacidad de procesamiento de hasta 30 000 muestras.

Equipo de ultrasonido Matest C372M.

- Pantalla táctil de 7".
- Resolución 0,1 μ s.
- Permite la determinación de la distancia, tiempo de vuelo y velocidad entre sondas.

2.5.2 Actividades realizadas

A continuación, se presenta el cronograma establecido para la realización de la caracterización de los agregados, la colada del concreto, el desmolde de los especímenes y ensayos de ultrasonido. Estos ensayos serán realizados en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería en Construcción del CIVCO, con la supervisión de los técnicos de laboratorio.

Tabla 14
Actividades realizadas

Actividad	Descripción	Fechas
Análisis granulométrico	De acuerdo con la Norma ASTM C136 (2019), este ensayo es fundamental para determinar la uniformidad de los materiales a implementar en la mezcla de concreto, con la finalidad de reducir la cantidad de vacíos asegurando una correcta trabajabilidad.	16-20 septiembre
Material más fino que el tamiz 200.	Este ensayo permite determinar la composición de los materiales a implementar en la mezcla, de acuerdo con la norma ASTM C117-17 (2023). La determinación de materiales que alteren la uniformidad de la mezcla puede conllevar a una afectación sobre la resistencia final del concreto.	
Peso específico y absorción.	Estos ensayos permiten determinar la dosificación adecuada de la mezcla, en el caso de la arena se hará referencia a la ASTM C128-22 (2023) y para la piedra quintilla (9.5 mm) se implementará la ASTM C127-15 (2024).	
Limpieza de las probetas de 15x15x60 cm.	La limpieza previa de los moldes permitirá reducir los residuos en estos que puedan afectar la mezcla de concreto.	22 de septiembre
Realización de la mezcla de concreto y su colocación en los moldes.	Es importante recalcar que los moldes previos a la colada fueron engrasados para facilitar el desmolde, evitando daños en los prismas. El diseño de mezcla fue realizado para alcanzar una resistencia a la compresión de 210 kg/cm ² de acuerdo con las especificaciones del ACI 211.1 Selecting Proportions for Normal-Density and High Density-Concrete – Guide.	
Desmoldado de los especímenes.	Una vez realizado el desmolde, se trasladan los prismas al cuarto húmedo.	24 de septiembre
1er Ensayo ultrasonido de 24 kHz y 55 kHz		26/09/25
2do Ensayo ultrasonido de 24 kHz y 55 kHz		30/09/25
3er Ensayo ultrasonido de 24 kHz y 55 kHz		6/10/25
4to Ensayo ultrasonido de 24 kHz y 55 kHz		20/10/25

2.6 Análisis y procesamiento de la información

A continuación, se menciona como se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, de igual forma, la descripción del proceso de análisis.

2.6.1 Presentación de resultados

Los resultados del ensayo de ultrasonido serán presentados por medio de gráficos, tablas para datos y cuadros, de forma que se pueda observar el comportamiento de la variable medida. Posteriormente de la misma forma presentar las categorías medidas indirectamente.

2.6.2 Descripción del proceso de análisis

En primera instancia, se estudiará el comportamiento de la velocidad del sonido, con transductores de 24 y 55 kHz, obtenida en las pruebas de laboratorio a probetas de concreto de 15 x 15 x 60 cm. Posterior a esto, con los datos obtenidos, se hará análisis respecto al método de varianza para compensar las desviaciones y posibles errores durante el proceso, luego se procederá a un análisis de la razón de la varianza con regresión lineal múltiple y revisión iterativa de los resultados, esto con el propósito de generar una ecuación de correlación lo más exacta posible y que provea datos confiables para implementarla en escenarios reales, bajo las condiciones especificadas.

Capítulo 3: Resultados y análisis

De acuerdo con la campaña experimental realizada en el laboratorio del CIVCO, se presentan los resultados obtenidos del ensayo de ultrasonido. Se presenta en primera instancia la caracterización de los agregados continuando con el diseño de mezcla y por ultimo los ensayos de ultrasonido.

A continuación, se presenta un avance del proceso de laboratorio, en primera instancia se realizó la caracterización de materiales a emplear.

3.1.1 Caracterización de los agregados

En la Tabla 15 y Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos de la granulometría de los agregados.

Tabla 15
Masas de ensayo de granulometría

Descripción	Masa ($\pm 0,01$) g
Masa seca total + bandeja	577,4
Masa de la bandeja	109,3
Masa seca total	468,1
Masa que pasa el tamiz de 75 μm	22,30
Mediante el lavado	
Masa seca lavada	445,8

El análisis granulométrico de los agregados se realiza con base a la ASTM C136/C136M-14 (2020), Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, en la Tabla 16 se puede observar el comportamiento del agregado a implementar, de acuerdo con Fernández, A. y Salas, A. (2002), el módulo de finura debe encontrarse entre 2.3 y 3.1 para su aceptación, esto se cumple de acuerdo con lo mostrado a continuación.

Tabla 16
Granulometría de los agregados finos

Abertura de tamiz		Peso retenido ($\pm 0,01$) g	Peso retenido corregido ($\pm 0,01$) g	% Retenido		% Pasando acumulado
				% Total	% Acumulado	
9,5 (mm)	(3/8 in)	0,00	0,00	0,0%	0,0%	100,0%
4,75 (mm)	(N.º4)	47,20	47,2	10,1%	10,1%	89,9%
2,36 (mm)	(N.º8)	70,70	70,7	15,1%	25,2%	74,8%
1,18 (mm)	(N.º16)	71,60	71,6	15,3%	40,5%	59,5%
600 (μ m)	(N.º30)	73,10	73,1	15,6%	56,1%	43,9%
300 (μ m)	(N.º50)	72,70	72,7	15,5%	71,6%	28,4%
150 (μ m)	(N.º100)	67,60	67,6	14,4%	86,1%	13,9%
75 (μ m)	(N.º200)	37,20	37,2	7,9%	94,0%	6,0%
Charola		4,40	26,70	5,7%	99,7%	0,3%
Total		444,50	466,8	99,7%		

Nota: De acuerdo con los datos obtenidos, se presenta un error de 0,28 %, con un módulo de finura del 2,90 %.

Para el agregado grueso el procedimiento se realiza de forma similar, en la Tabla 17 se puede observar los pesos seleccionados para el muestreo del material de acuerdo con la ASTM C33/C33M-18 (2023), Standard Specification for Concrete Aggregates, donde se obtienen los rangos aceptables para cada tamiz.

Tabla 17

Masas obtenidas en el ensayo de granulometría para agregados gruesos

Descripción	Masa ($\pm 0,01$) g
Masa total seca + bandeja 1	2187,50
Masa de la bandeja 1	839,30
Masa total seca	1348,20

En la Tabla 18 se observan los resultados obtenidos, mostrando un porcentaje de error de 0.86 %, siendo un rango aceptable por la norma, además se verifica el porcentaje pasando acumulado con los rangos de la ASTM C33/C33M-18, cumpliendo con lo mencionado en la normativa.

Tabla 18

Granulometría de los agregados gruesos

Abertura de tamiz		Peso retenido ($\pm 0,01$) g	% Retenido		% Pasando acumulado
			% Total	% Acumulado	
19 (mm)	(3/4 in)	12,60	0,9%	0,9%	99,1%
9,5 (mm)	(3/8 in)	157,30	11,7%	12,6%	87,4%
4,75 (mm)	(N.º4)	992,30	73,6%	86,2%	13,8%
2,36 (mm)	(N.º8)	128,80	9,6%	95,8%	4,2%
1,18 (mm)	(N.º16)	20,40	1,5%	97,3%	2,7%
600 (μm)	(N.º30)	6,50	0,5%	97,8%	2,2%
300 (μm)	(N.º50)	6,90	0,5%	98,3%	1,7%
150 (μm)	(N.º100)	7,80	0,6%	98,8%	1,2%
75 (μm)	(N.º200)	5,80	0,4%	99,3%	0,7%
Charola		11,10	0,8%	100,1%	-0,1%
Total		1336,9	99,2%		

Nota: Los procedimientos fueron realizados de acuerdo con las normas ASTM C33/C33M-18 y C136/C136M-19, con un porcentaje de error del 0,86 %.

De acuerdo con la norma ASTM C127-15 (2024), Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, se puede determinar la absorción y densidad del agregado grueso, el cual es sumergido en agua durante (24 ± 4) horas, permitiendo el llenado de los poros del agregado. En la Tabla 19 se presenta el peso del material seco en el horno posterior al proceso descrito en la norma. Del mismo modo, para el agregado fino implementando la norma ASTM C128-22 (2025), Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, los resultados del peso del agregado fino seco en horno son presentados en la Tabla 20.

Tabla 19
Gravedad específica de agregados gruesos

Descripción	Masa ($\pm 0,01$) g
Peso de material sumergido	988,00
Bandeja	824,20
Bandeja + material seco	2362,20
Material seco en el horno	1538,00

Tabla 20
Masas para la gravedad específica de agregados gruesos

Descripción	Masa ($\pm 0,01$) g
Masa de la muestra seca al horno (A)	1538,00
Masa de la muestra saturada con superficie seca (B)	1571,80
Masa aparente de la muestra saturada (C)	988,00

En la Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23, se presentan los resultados de absorción de los agregados fino y grueso, esto permite realizar el ajuste de la cantidad de agua requerida para la mezcla de concreto.

Tabla 21

Resultados del ensayo de gravedad específica para agregados gruesos

Descripción	Magnitud
Densidad relativa de la muestra secada al horno (OD)	2,63
Densidad relativa de la muestra saturada con superficie seca (SSD)	2,69
Densidad relativa aparente	2,80
Absorción (%)	2,20

Tabla 22

Gravedad específica de agregados finos

Descripción	Masa ($\pm 0,01$) g
Picnómetro	175,4
Picnómetro + material	676,2
Picnómetro + material + agua	968,89
Masa de material saturado seco	500,8
Bandeja	422,3
Material seco en el horno	893,3

Tabla 23

Masas para la gravedad específica de agregados finos

Descripción	Masa ($\pm 0,01$) g
Masa del espécimen secado al horno (A)	471
Masa del picnómetro llenado con agua hasta la marca de calibración (B)	676,76
Masa del picnómetro llenado con agua y el espécimen hasta la marca de calibración (C)	968,89
Masa del espécimen saturado con superficie seca (S)	500,8

3.1.2 Diseño de mezcla

Con los datos obtenidos en la caracterización de los agregados, se procede a realizar el diseño de mezcla según los criterios del ACI 211.1, en la Tabla 24 se presentan las características a considerar del concreto.

Tabla 24
Características del concreto implementado

Características del concreto		
Resistencia del concreto	210	kg/cm ²
Resistencia del concreto	20,6	MPa
TMN	12,5	mm
Revenimiento	15 - 17,5	cm
Agua	217	l
Contenido de aire atrapado	2,5	%
Gs Cemento	2,8	
Resistencia a la compresión requerida	27,6	MPa

La selección del revenimiento se realizó de acuerdo con el ACI 211.1-22, la cantidad de agua a implementar y el contenido de aire atrapado determinado para el diseño de mezcla se estimó de acuerdo con la Tabla 2.2 de la norma, mostrada en la Tabla 6. La determinación de la relación de agua – cemento se obtiene mediante una interpolación de los valores presentados por el ACI 211.1-22 y la resistencia a la compresión esperada.

Tabla 25
Determinación de la relación agua - cemento

MPa	kg/cm ²	A/C
30	306	0,54
27,6	281	0,59
25	255	0,61

Con los datos presentados en la Tabla 25, con una relación agua – cemento de 0.59, se determina que el contenido de cemento requerido es de 367,80 kg. En la Tabla 26 se realiza la estimación del volumen del agregado grueso requerido para el diseño de mezcla, de acuerdo con el valor del módulo de finura del agregado fino.

Tabla 26

Estimación del volumen del agregado grueso para el diseño de mezcla

MF	Volumen del agregado grueso
2,8	0,55
2,9	0,54
3	0,53

El agregado fino por implementar en los ensayos de laboratorio presenta un módulo de finura de 2,90%, los datos requeridos para la interpolación provienen de la ACI 211.1-22 en la Tabla 9. De acuerdo con esto se obtiene un volumen del agregado grueso de 0.54. Es importante conocer los pesos unitarios de los agregados para determinar el volumen real requerido de cada material en el diseño de mezcla, la ejecución de este ensayo se realiza con base a la norma ASTM C29/29M-23 (2023), Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate, esto se observa en la Tabla 27 y Tabla 28.

Tabla 27

Datos iniciales para la compactación de agregados

Ítem	Valor	
Agregado grueso compactado	6771	g
Agregado fino compactado	6986,9	g
Molde	2615	cm ³
Molde	0,002615	m ³

Nota: Este ensayo se ejecuta de acuerdo con la norma *ASTM C29/C29M-23*.

Tabla 28

Pesos unitarios de los agregados

Peso Unitario Agregado Grueso		
W_m	2,63	kg
W_{Total}	6,77	kg
Peso Unitario Compactado	2589	kg/m ³
Peso Unitario Agregado Fino		
W_m	2,63	kg
W_{Total}	6,99	kg
Peso Unitario Compactado	2672	kg/m ³

Una vez obtenidos los datos requeridos sobre la caracterización de los agregados, relación agua-cemento y revenimiento esperado, se procede a estimar la cantidad de materiales para la batida. Esto se puede verificar en la Tabla 29.

Tabla 29

Estimación de los materiales para la batida

Material	Litros (l)	Porcentaje (%)	Masa (kg)	Materiales para la batida (kg)
Cemento	132,14		367,80	70
Agua	217,00		217,00	41
Aire	25,00			
Σ	374,14			
Agregado				
Grueso	337,96	54%	875,08	166
Agregado				
Fino	287,89	46%	769,21	146
Σ	1000,00			

Con los materiales requeridos, el último paso corresponde a la corrección de la humedad de los agregados, esto se realiza el día previo a la colada. (Véase Tabla 30).

Tabla 30

Humedad de los agregados

Materiales	Bandeja (g)	W₁ (g)	W₂ (g)	Humedad (%)
Agregado fino	421,70	1219,70	1047,46	16,44
Agregado grueso		1126,60	1107,63	1,71

De acuerdo con los datos obtenidos, se procede a realizar el ajuste de la cantidad de agua de la mezcla, es importante recalcar que el agregado fino presenta un alto porcentaje de humedad debido a las condiciones del sitio donde se almacenó.

Tabla 31

Ajuste de la cantidad de agua requerida para la colada

Material	Absorción (%)	Humedad (%)	Ajuste de la cantidad de agua (kg)
Agregado fino	9,25	24,03	27,25
Agregado grueso	3,65	2,85	

La medición de la temperatura se observa en la Figura 13.

Figura 13

Medición de temperatura



Los parámetros del revenimiento y temperatura se observan registrados en la Tabla 32, de acuerdo con el diseño de mezcla; estos cumplen con lo solicitado, por lo cual se puede proceder con el colado de los especímenes de concreto. De acuerdo con el ACI 305R-20, Guide to Hot Weather Concreting, y el ACI 306R-16, Guide to Cold Weather Concreting (2016), los rangos de temperatura del concreto de acuerdo con el clima de la región pueden tener un rango entre 10 – 32 °C, en la Tabla 32 se puede observar el cumplimiento de la temperatura. Cabe mencionar que el revenimiento se encuentra entre los parámetros esperados según la ASTM C143/C143M-12 (2015), Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.

Tabla 32

Verificación de temperatura y revenimiento de la mezcla

Concreto (kg/cm ²)	Fecha de realización	Revenimiento (cm)	Temperatura (°C)
210	23/09/2025	8.00	23.9

Con estos parámetros registrados se colaron los especímenes de concreto para realizar las pruebas, los cuales fueron colocados en cámara húmeda de curado hasta la fecha en que se realicen las pruebas.

3.1.3 Ensayo de ultrasonido: Método directo

Previo a la ejecución del ensayo de ultrasonido, se realiza la calibración del equipo, con el fin de obtener resultados más precisos. Este proceso, como se indica en el apartado 1.5.1.1, involucra una barra patrón cuyos datos ya son conocidos. Para los ensayos por ultrasonido se requiere un agente acoplante, en este caso se utilizó vaselina, la cual se aplica sobre el transductor y la superficie del prisma con el propósito de reducir imperfecciones en el contacto entre transductor y superficie que puedan afectar la transmisión de la onda.

Una vez calibrado el equipo, se ejecuta el ensayo por ultrasonido, mediante los métodos directo e indirecto, a 30, 40 y 50 cm desde una de las caras del prisma. Los ensayos directos corresponden a las distancias de 15 y 60 cm, equivalentes al espesor y largo del prisma, respectivamente, esto se observa en la Figura 14. Al finalizar los ensayos por ultrasonido, se almacenan los prismas en la cámara húmeda para continuar su proceso de curado. Lo anterior es ejemplificado en la Figura 15.

Figura 14

Distancias entre los transductores

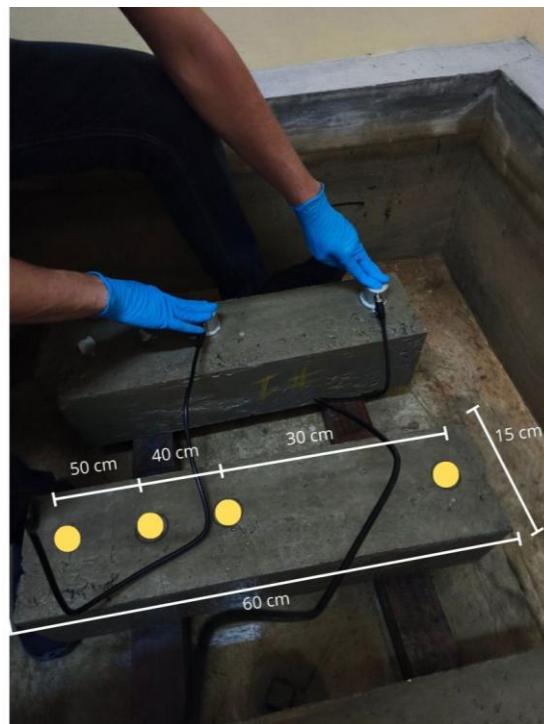


Figura 15

Cámara húmeda



En la Tabla 33 se presentan los resultados de la velocidad de ultrasonido por el método directo para los transductores de 24 y 55 kHz, en cada etapa del curado del concreto. Además, se observa un incremento de la velocidad de ultrasonido al progresar el periodo de curado del concreto, esto se identifica como velocidad máxima alcanzada en la Tabla 33.

Tabla 33

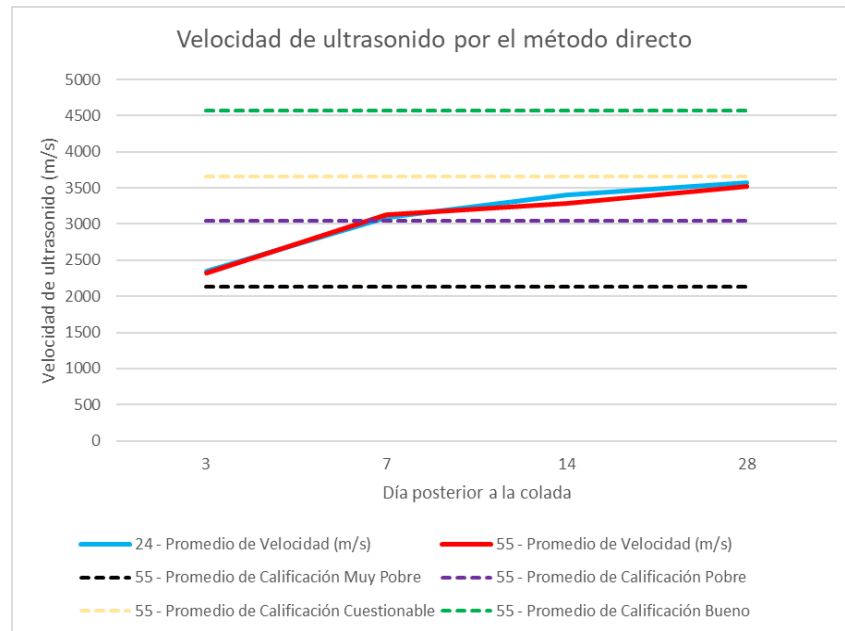
Velocidad de ultrasonido por el método directo

Día posterior al colado	Promedio de Velocidad de Ultrasonido (m/s)			
	Transductor (kHz)	Velocidad máxima alcanzada	Transductor (kHz)	Velocidad máxima alcanzada
	24	(%)	55	(%)
3	2344,25	66	2326,01	65
7	3094,13	87	3132,56	89
14	3402,39	95	3291,50	94
28	3573,50	100	3514,96	100

Los resultados obtenidos para los ensayos por ultrasonido implementando transductores de 24 y 55 kHz, muestran un comportamiento similar, esto observado en la Tabla 33 y en la Figura 16. La escasa variación presentada es consecuente a la posición de los transductores, donde se permite obtener el tiempo real de la transmisión del pulso ultrasónico dado que la onda tiene una trayectoria recta sin dispersión que pueda alterar la recepción de la onda, esto comprueba que la metodología directa es presenta mayor confiabilidad que el método indirecto.

Figura 16

Velocidad de ultrasonido por el método directo



Con base en la Tabla 33, a los 3 días del curado se alcanza un 65 – 66 % de la velocidad máxima de propagación del pulso ultrasónico en el concreto, lo que aumenta a los 7 días, este valor incrementa hasta un 87 - 89 % para ambos transductores. Esta información es relevante, ya que permite la evaluación temprana del concreto campo, detectando vacíos o discontinuidades que perjudican la resistencia a la compresión esperada a los 28 días, lo cual contribuye a reducir los costos y los tiempos de intervención, con estos datos se puede identificar un concreto que avanza de muy pobre a pobre conforme incrementa el tiempo de curado y su endurecimiento.

Entre los 14 y 28 días la variación de la velocidad máxima es moderada, de un 5 a 6 %, siendo una etapa donde se comienza a estabilizar el proceso de hidratación del concreto y el endurecimiento. Esto se observa donde su clasificación de acuerdo con la calidad del concreto avanza de pobre a cuestionable.

A los 28 días del curado del concreto, la velocidad de ultrasonido fue de 3573,50 m/s para el transductor de 24 kHz y de 3514,96 m/s para la frecuencia de 55 kHz. Estos valores de acuerdo con IAEA (2002), valores superiores a 3500 m/s son propios de un concreto de buena calidad, siendo así, los resultados presentados brindan los parámetros requeridos para la aceptación del concreto en su uso estructural. En la Figura 16 se presenta el comportamiento de la velocidad de ultrasonido, para ambas frecuencias, en cada etapa del curado del concreto para el método directo.

3.1.4 Ensayo de ultrasonido: Método indirecto

En el ensayo por ultrasonido por el método indirecto, las mediciones son realizadas en la misma cara del prisma, esto se observa en la Figura 18. La velocidad de ultrasonido es presentada en la Tabla 34 donde se observan los resultados para los diferentes transductores en relación con el día de curado del concreto.

Figura 17

Ensayo por ultrasonido a los 3 días por el método indirecto



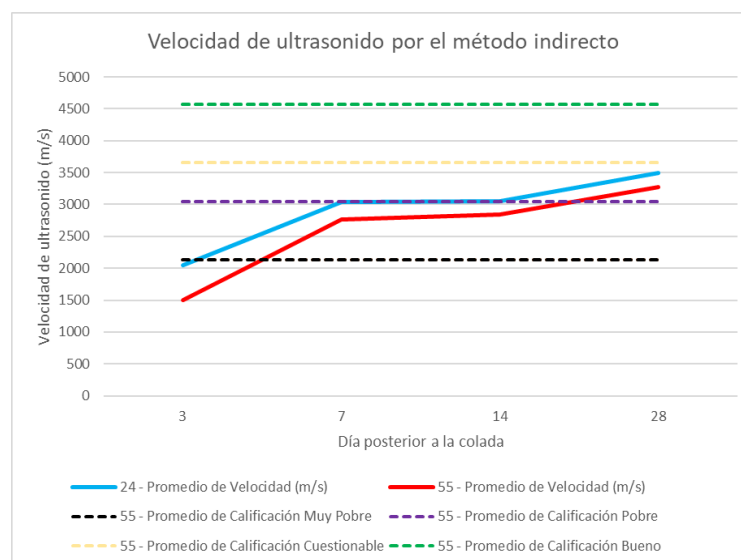
En la Tabla 34 se evidencia una relación del incremento de la velocidad de ultrasonido con la evolución del curado del concreto. A los 3 días se alcanza un 59% de la velocidad de ultrasonido máxima, mientras que a los 7 días del curado se presenta el 87% de la velocidad de ultrasonido para el transductor de 24 kHz. En el caso del transductor de 55 kHz, se observa un incremento, pasando de 46 % a 84 % de la velocidad máxima de ultrasonido durante el mismo periodo, mostrando que el concreto de acuerdo a los rangos establecidos en la Figura 18 pasa de ser un concreto muy pobre a pobre, siendo un comportamiento similar al ensayo directo. Los valores obtenidos permiten determinar que, a tempranas edades del proceso de curado, se puede desarrollar este ensayo para la determinación de la condición interna del concreto, lo que favorece a los tiempos de desarrollo de la obra.

Tabla 34

Velocidad de ultrasonido por el método indirecto

Día posterior al colado	Promedio de Velocidad de Ultrasonido (m/s)			
	Transductor (kHz)	Velocidad máxima alcanzada (%)	Transductor (kHz)	Velocidad máxima alcanzada (%)
	24		55	
3	2049,74	59	1504,46	46
7	3037,86	87	2758,53	84
14	3054,53	87	2837,51	87
28	3499,83	100	3269,83	100

La ejecución del ensayo por ultrasonido por el método indirecto se basó en la medición de la velocidad del pulso ultrasónico a diferentes distancias entre los transductores, correspondientes a 30, 40 y 50 cm. En la Tabla 34 se presentan los resultados del ensayo, evidenciando un crecimiento lineal en la velocidad de ultrasonido de 3 a 7 días del curado, con valores que varían de 2049,74 a 3037,86 m/s para el transductor de 24 kHz y de 1504,46 a 2758 m/s para el de 55 kHz. La representación gráfica de los datos mostrados anteriormente se muestra en la Figura 18, donde se observa la variación de la velocidad del ultrasonido en función del progreso del curado del concreto. De acuerdo con el máximo valor alcanzado en relación con los parámetros de clasificación de calidad el concreto a los 28 días corresponde a un concreto cuestionable según la Figura 18.

Figura 18*Velocidad de ultrasonido por el método indirecto*

Los resultados obtenidos con el transductor de 24 kHz evidencian una tendencia similar al ensayo directo. Este comportamiento se presenta en la Figura 18, donde la velocidad de ultrasonido presenta valores mayores implementando el transductor de 24 kHz en relación con la frecuencia de 55 kHz, de acuerdo con los parámetros de clasificación del concreto de acuerdo con la velocidad de ultrasonido obtenida. Esto se explica a partir de la Ecuación 2, empleada para la estimar la longitud de onda, cuyos valores son presentados en la Tabla 36. En esta se observa un incremento de la longitud de onda conforme avanza el tiempo de curado del concreto, esto está directamente relacionado con el aumento de la resistencia mecánica.

Este resultado concuerda con el estudio realizado por Torres et al. (2018), en el cual se evidencia que el proceso de curado es fundamental para alcanzar las propiedades mecánicas esperadas del concreto. Con los datos mostrados anteriormente, se estima la diferencia porcentual entre los ensayos directos e indirectos para los transductores de 24 y 55 kHz (véase la Tabla 35).

Tabla 35
Error relativo

Día	Error relativo	
	Ensayo Indirecto	Ensayo Directo
	Diferencia	
3	26,63%	0,78%
7	9,18%	1,26%
14	7,10%	3,27%
28	6,57%	1,64%

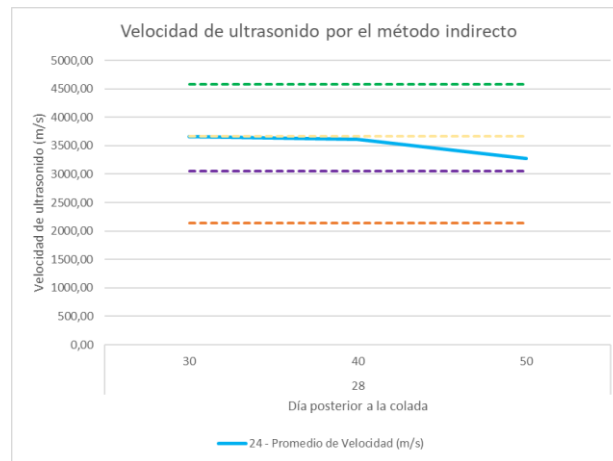
El error relativo del ensayo se puede observar en la Tabla 35, los resultados de los transductores implementados por el método directo varían entre 0,78 a 3,27 %, siendo un rango aceptable de acuerdo con la norma ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete. La mayor variación se presenta a los 14 días, posiblemente por un acoplamiento inadecuado, con la presencia de residuos en la vaselina o una falla en la calibración lo que perjudica directamente en la calidad en la recepción del pulso ultrasónico.

Los errores relativos presentados en la Tabla 35, son más significativos en el método indirecto, variando de 26,63% a 6,57%. De igual forma, se aprecia una disminución progresiva de este conforme transcurren los días de curado del concreto, lo cual es asociado al incremento del endurecimiento y consolidación interna del concreto.

En la Figura 19 y Figura 20 se presenta la relación entre la distancia entre los transductores y la velocidad del ultrasonido obtenida, de forma que se pueda verificar el comportamiento de los resultados a medida que se alejan entre si los transductores en los ensayos con diferentes frecuencias.

Figura 19

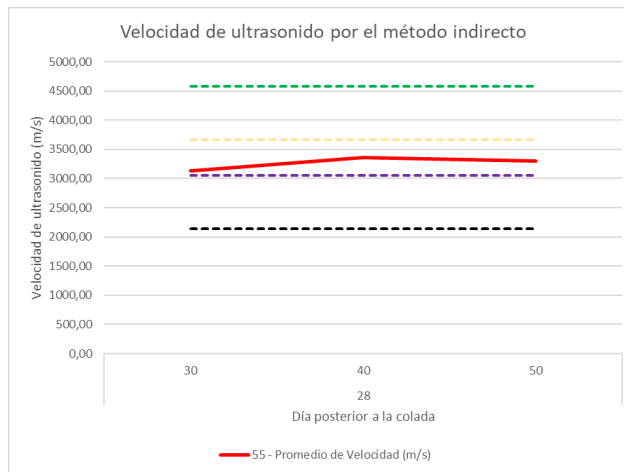
Relación entre la distancia entre transductores y la velocidad de ultrasonido para 24 kHz



En la Figura 19 se presenta el ensayo por ultrasonido a los 28 días aplicando una frecuencia del transductor de 24 kHz. Se puede observar cómo cambia la velocidad del pulso ultrasonido a medida que se alejan entre si los transductores, variando de 3659 a 3275,07 m/s. En la medición de 50 cm se evidencia una disminución considerable de la velocidad del ultrasonido, esto debido posiblemente a la dispersión de la energía del pulso ultrasónico en la superficie. Por lo tanto, exceder los 40 cm entre los transductores en estudios de estructuras de concreto con una frecuencia de 24 kHz, no es recomendable, ya que los datos pueden presentar una variación en los resultados.

Figura 20

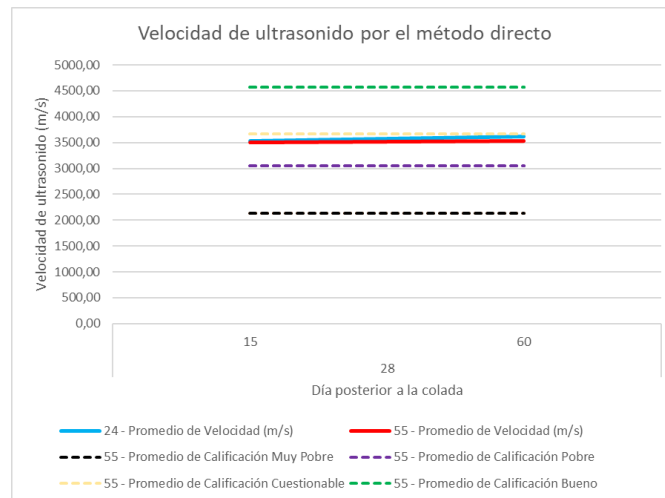
Impacto de la distancia entre los transductores a la velocidad de ultrasonido con 55 kHz



En la Figura 20 se presenta el comportamiento de la velocidad del ultrasonido a medida que se alejan entre sí los transductores. Se puede evidenciar como la tendencia de la velocidad del ultrasonido no disminuye a medida que incrementan las distancias entre los transductores a diferencia de la implementación de la frecuencia de 24 kHz. Por lo tanto, a medida que se incrementa la amplitud de la onda al disminuir la frecuencia implementada, los datos evidencian una disminución de la velocidad de ultrasonido medida, en caso contrario, al disminuir la amplitud de la onda, los datos no presentan variaciones significativas. Para verificar este comportamiento, se realiza el estudio del método directo para ambas frecuencias, considerando las distancias entre los transductores, esto se observa en la Figura 21.

Figura 21

Impacto de la distancia entre los transductores a la velocidad de ultrasonido con 24 kHz



En la Figura 20 se puede observar el comportamiento de la velocidad de ultrasonido al variar las distancias, entre 15 y 60 cm, donde no se presenta una variación considerable como el caso de la frecuencia de 24 kHz. El método directo es el más preciso de las metodologías del ensayo por ultrasonido, por lo que, la dispersión de la energía del pulso ultrasónico es mínima a comparación al ensayo indirecto. En este caso para realizar un estudio preciso, con base a los resultados obtenidos, de forma que no exista un alto margen de error al momento de realizar los ensayos indirectos, se recomienda no exceder la distancia de los 40 cm entre los transductores, para evitar una pérdida de precisión en el estudio de estructuras de concreto.

La longitud de onda permite analizar el comportamiento del pulso ultrasónico en el concreto, la cual se presenta en la Tabla 36, además en la Tabla 37 y Tabla 38 se presentan la impedancia acústica y el número de ondas respectivamente.

Tabla 36
Longitud de onda

Día de curado	Longitud de onda (cm)			
	Ensayo indirecto		Ensayo directo	
	Transductor (kHz)		Transductor (kHz)	
	24	55	24	55
3	8,54	2,74	9,77	4,23
7	12,66	5,02	12,89	5,70
14	12,73	5,16	14,18	5,98
28	14,58	5,95	14,89	6,39

El transductor de 24 kHz presenta longitudes de onda muy próximas al espesor del prisma (15 cm), de acuerdo con la norma ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, en el apartado 5.4, indica que el espesor del objeto de estudio debe ser mayor a la longitud de onda del ensayo de ultrasonido. Esta condición limita el número de ondas que pueden propagarse dentro del material, provocando posibles interferencias y dispersión en los datos obtenidos. En la Tabla 37 se presenta los valores correspondientes al número de ondas en el prisma; a los 28 días se presenta 0,43 ondas, lo que explica la dispersión de los resultados obtenidos en el ensayo. Esta condición reduce la precisión en la detección de grietas o discontinuidades, aunque el método es válido para el control de calidad del concreto, al proporcionar información representativa de la condición interna de la estructura.

En el caso del transductor de 55 kHz, la longitud de onda obtenida a los 28 días del curado del concreto es de 5,95 cm, valor inferior al espesor del prisma (15 cm), cumpliendo con lo establecido en la ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete. Esta relación permite una propagación de onda más estable dentro del material, reduciendo los efectos de la interferencia y dispersión. En la Tabla 37 se muestra el número de ondas correspondiente a 1,06, lo que favorece la precisión en la determinación de la velocidad ultrasónica y mejora la capacidad del método para detectar discontinuidades o variaciones internas del concreto

Tabla 37
Número de onda

Día de curado	Número de onda (k)			
	Ensayo indirecto		Ensayo directo	
	Transductor (kHz)		Transductor (kHz)	
	24	55	24	55
3	0,74	2,30	0,64	1,49
7	0,50	1,25	0,49	1,10
14	0,49	1,22	0,44	1,05
28	0,43	1,06	0,42	0,98

La impedancia acústica permite analizar la consolidación del concreto, la estimación de este parámetro se presenta en la Tabla 40. En relación con los resultados obtenidos se observa que en los ensayos directos presentan valores más altos de impedancia en relación con los ensayos indirectos, esto en todas las edades del curado del concreto, lo cual evidencia una propagación de la energía ultrasónica más eficiente, siendo lo esperado dado que el ensayo directo es más preciso que el indirecto. Cabe mencionar que los valores obtenidos para la frecuencia de 24 kHz presentan una mayor estabilidad en relación con la frecuencia de 55 kHz, lo que se concluye en que estas son menos afectadas por las irregularidades locales brindando resultados más representativos de la condición interna del concreto, mientras que la frecuencia de 55 kHz es más sensible a defectos y heterogeneidades.

Tabla 38
Impedancia acústica

Día de curado	Impedancia acústica (kg/(m ² s))			
	Ensayo indirecto		Ensayo directo	
	Transductor (kHz)		Transductor (kHz)	
	24	55	24	55
3	5125000,00	3760000,00	5860619,64	5815000,00
7	7595000,00	6897500,00	7735328,70	7832500,00
14	7637500,00	7095000,00	8505970,82	8227500,00
28	8750000,00	8175000,00	8933753,73	8787500,00

3.1.4 Factor de ajuste

Con los datos obtenidos, se realiza el análisis por ANOVA, tanto para la metodología directa como indirecta para ambos transductores implementados, esto se presenta a continuación.

Tabla 39

Promedio y varianza del método directo

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
24 kHz	61	217983,59	3573,50	3588,11
55 kHz	49	172232,92	3514,96	1095,15

Tabla 40

Análisis de varianza de un factor, para el método directo

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	93131,62	1	93131,62	37,55	1,4783E-08	3,93
Dentro de los grupos	267854,14	108	2480,13			
Total	360985,76	109				

Tabla 41

Promedio y varianza del método indirecto

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
24	144	503976,07	3499,83	85637,05
55	139	454506,55	3269,83	67536,70

Tabla 42

Análisis de varianza de un factor, para el método indirecto

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3741590,92	1	3741590,92	48,75	2,0981E-11	3,87
Dentro de los grupos	21566162,5	281	76747,9093			
Total	25307753,4	282				

El análisis de varianza (ANOVA) determinó la presencia de diferencias estadísticamente significativas. En el caso del método directo, presenta varianzas de 3 588.11 y 1095.15 para las frecuencias de 24 y 55 kHz respectivamente. La probabilidad al ser menor que 0.05 indica que este caso no cumple, de igual forma con el parámetro F al ser mayor que el valor crítico de F, la hipótesis se rechaza, dando a entender que existe gran variabilidad entre los grupos. Donde el transductor de 55 kHz presenta un menor rango de variación en relación con el transductor de 24 kHz.

Para el método indirecto, la varianza para el transductor de 24 y 55 kHz corresponde a 85.637,05 y 67.536,70, siendo valores muy elevados, al ser la metodología indirecta menos precisa es el comportamiento esperado. De igual forma en relación con las hipótesis en ambos grupos la probabilidad es menor a 0.05 y el parámetro F al ser mayor que el valor crítico de F, lo que indica que la hipótesis se rechaza, evidenciando una gran variabilidad entre los grupos.

Tabla 43

Factor de ajuste para el método indirecto con una frecuencia de 24 kHz

Día de curado	Factor de ajuste con el método directo	Factor de ajuste a 28 días
3	1,14	1,74
7	1,02	1,18
14	1,11	1,17
28	1,02	1,02

El factor de ajuste para el método indirecto con la implementación del transductor de 55 kHz se observa en la Tabla 44.

Tabla 44

Factor de ajuste para el método indirecto con una frecuencia de 55 kHz

Día de curado	Factor de ajuste con el método directo	Factor de ajuste a 28 días
3	1,55	2,34
7	1,14	1,27
14	1,16	1,24
28	1,07	1,07

En los factores de ajuste del método directo e indirecto el transductor de 24 kHz presenta factores de ajuste menores en relación con la frecuencia de 55 kHz, esto se presenta en la Tabla 43 y Tabla 44. En comparación al transductor de 24 kHz, presenta un menor factor de ajuste para equiparar los resultados del ensayo indirecto con el directo a diferencia de la frecuencia de 55 kHz. Al implementar la frecuencia de 24 kHz se presentan factores de ajuste de 1,14, 1,02, 1,11 y 1,02 para los 3, 7, 14 y 28 días del curado respectivamente. Para la frecuencia de 55 kHz se obtuvieron los factores de ajuste de 1,55, 1,14, 1,16, y 1,07 de igual forma para los 3, 7, 14 y 28 días del curado del concreto.

No obstante, el análisis indica que la frecuencia de 55 kHz presenta una menor variabilidad en ambos métodos ultrasónico y que, en relación con la longitud de onda generada, sugiere que su aplicación es la más adecuada para la detección de fisuras o agrietamientos, esto se relaciona con los resultados obtenidos por Kaylan-S. y Kishen-C (2013), donde para un cubo de 15 cm, detectó fisuras por el método indirecto como consecuencia de la baja resolución permitiendo la detección de grandes defectos en la estructura, siendo más eficaz la metodología indirecta que la directa en este caso. En contraste, la frecuencia de 24 kHz resulta más conveniente para el control de calidad del concreto, al proporcionar información más representativa de la condición general del concreto

La determinación de los factores de ajuste obtenidos en la presente investigación permite calibrar los resultados obtenidos al implementar el método indirecto, de manera que sean comparables con los valores obtenidos por el método directo, incrementando la confiabilidad del método indirecto para aplicaciones de control de calidad del concreto fresco en campo.

Estos factores pueden emplearse para corregir las mediciones realizadas con el método indirecto en el estudio de estructuras donde no es posible la aplicación del método directo, permitiendo estimar de una forma más precisa la velocidad de ultrasonido equivalente, infiriendo la calidad del concreto. Los resultados obtenidos serán aplicables a otros estudios con condiciones similares de materiales, dosificaciones y procedimientos de ensayo. De igual forma la implementación de los factores de ajuste que proyectan la velocidad de ultrasonido aproximada a los 28 días se podrá implementar en edades tempranas del curado del concreto.

En la Tabla 45 se puede observar la resistencia a la compresión obtenida de los prismas estudiados, estos no forman parte del alcance de la presente investigación, sin embargo, su análisis será complementario a los resultados obtenidos en la velocidad de ultrasonido.

Tabla 45
Resistencia a la compresión

Cilindro	Día de fallo posterior a la colada	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Promedio a los 28 días (kg/cm ²)
1	14	140,85	161,46
2	28	139,29	
3	28	161,12	
4	28	183,96	

La elaboración de la mezcla de concreto fue realizada en los laboratorios del CIVCO del Tecnológico de Costa Rica, mediante las especificaciones que brinda el ACI 211.1 (2022), esta norma permite determinar las proporciones ideales para alcanzar la resistencia a la compresión deseada. Durante la caracterización de los agregados se identificó una alta presencia de humedad en el agregado fino, situación que pudo perjudicar la relación agua/cemento del concreto, y a su vez la resistencia a la compresión. Las pruebas realizadas para la determinación de la resistencia a la compresión brindaron que el concreto a los 28 días alcanzó una resistencia de 161,46 kg/cm², valor inferior al deseado de 210 kg/cm². Esto a su vez se vio reflejado en las velocidades de ultrasonido obtenidas con valores inferiores a 4500 m/s, según la IAEA (2002), velocidades superiores a este valor corresponden a concretos de calidad excelente. Por lo tanto, los resultados de las velocidades de ultrasonido obtenidas corresponden a un concreto que no alcanzó su resistencia a la compresión de diseño.

3.2 Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones producto de esta investigación.

3.2.1 Conclusiones

El análisis de varianza (ANOVA) determinó una mayor variación en los resultados de la velocidad de ultrasonido con el método indirecto, esto al implementar el transductor de 24 kHz, especialmente a edades tempranas del proceso de curado. Sin embargo, los errores relativos demuestran que el método indirecto bajo la aplicación del transductor de 24 kHz presenta diferencias aceptables en las mediciones. La mayor discrepancia es presentada a los 14 días, esto puede deberse a problemas de acoplamiento o residuos en la superficie lo que afecta directamente el pulso ultrasónico. Sin embargo, la aplicación del transductor de 24 kHz ofrece resultados más precisos de la condición general del concreto.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (ANOVA) y los errores relativos entre las metodologías, el transductor de 55 kHz presentó una menor variabilidad en las mediciones obtenidas mediante el método indirecto, lo que indica una mayor estabilidad en los valores registrados. Esta menor variabilidad permite evaluar la estructura con mayor eficacia desde el punto de vista del control de calidad, en concordancia con la finalidad del ensayo por ultrasonido. De acuerdo con la ASTM C597-22 (2023), Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete, variaciones significativas en las mediciones de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico pueden interpretarse como indicios de la posible presencia de discontinuidades internas o deterioros en el concreto. En contraste, el transductor de 24 kHz resulta más adecuado para la evaluación de la condición general del concreto, mientras que el de 55 kHz se perfila como una alternativa para análisis más detallados cuando se requiera un mayor nivel de resolución.

La precisión de la metodología indirecta con la frecuencia de 24 kHz se debe a la longitud de onda obtenida, en este caso corresponde a 14,58 cm siendo cercano al espesor del prisma de 15 cm, por lo tanto se obtienen resultados más representativos de la condición general del concreto, aunque esta condición limita el número de ondas que pueden propagarse en el material, reduciendo la precisión en la detección de grietas o discontinuidades, sin embargo, su aplicación sigue siendo válida para el control de calidad del concreto.

En el caso del transductor de 55 kHz, la longitud de onda resultó menor al espesor del prisma con un valor de 5,95 cm, lo que permitió una propagación más estable dentro del material y redujo los efectos de interferencia y dispersión observados con frecuencias inferiores. Esta característica favoreció la precisión en la detección de discontinuidades y variaciones internas. Aunque esta frecuencia requiere un factor de ajuste mayor para ser congruente con el método directo, su aplicación resulta favorable para la detección de defectos en la estructura, siendo un método complementario en la evaluación integral del concreto. Por lo tanto, en la investigación se determinó que se debe garantizar que la longitud de onda no exceda el espesor del elemento ensayado, ya que al superarlo pueden presentarse interferencias entre la onda incidente y la reflejada, lo que afecta la propagación del pulso y reduce la precisión en la determinación de la velocidad ultrasónica.

El proceso de curado favorece el endurecimiento interno del concreto, lo cual se ve reflejado en el incremento progresivo de las velocidades de ultrasonido registradas en las diferentes edades del curado. Entre los 3 y 7 días del curado, se presenta el crecimiento más significativo donde se alcanza de un 46 - 59 % hasta un 84 - 87 % de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico en el concreto para ambas frecuencias empleadas, por consiguiente, este comportamiento evidencia una mejora sustancial en la calidad del concreto a edades tempranas, identificando daños prematuros en el concreto permitiendo la intervención de estructuras a tempranas edades, todo esto aplicando los factores de ajuste obtenidos en esta investigación. A partir de los 14 días el incremento fue moderado lo que indica una etapa de estabilización del endurecimiento.

Los resultados evidencian que, a medida que avanzó el periodo de curado, se produjo un crecimiento de la calidad del concreto. Este comportamiento se refleja entre los 3 y 7 días, donde el concreto pasó de una condición de calidad de muy pobre a pobre, mientras que entre los 7 y 14 días dicha clasificación se mantuvo constante. A los 28 días, se observó una mejora significativa de la calidad del concreto, pasando de una condición de pobre a cuestionable, según en las clasificaciones basadas en la velocidad de ultrasonido obtenida. Este comportamiento confirma que el ensayo por ultrasonido es sensible a los cambios internos del concreto y permite evaluar su calidad global durante el proceso de curado, constituyéndose el incremento progresivo de la velocidad en un indicador confiable para el control de calidad en distintas etapas de servicio.

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que el incremento en la distancia entre los transductores genera variaciones significativas en la velocidad del ultrasonido, especialmente al emplear una frecuencia de 24 kHz en comparación con la de 55 kHz. Las velocidades de pulso ultrasónico variaron de 3659 m/s a 3275,07 m/s. Dado que esta pérdida de precisión compromete la evaluación de la calidad de estructuras de concreto, al utilizar el equipo Matest del CIVCO bajo el método indirecto, la separación entre transductores no debe exceder los 40 cm.

Con base en estos resultados se determinaron los factores de ajuste necesarios para que el método indirecto fuese congruente con el directo en diferentes etapas del curado. Para la frecuencia de 24 kHz, los factores obtenidos fueron de 1,14; 1,02; 1,11 y 1,02 a los 3, 7, 14 y 28 días de curado del concreto, respectivamente, mientras que para 55 kHz correspondieron a 1,55; 1,14; 1,16 y 1,07 en los mismos intervalos de tiempo. Para obtener los valores esperados a los 28 días, se obtuvieron factores de ajuste de acuerdo con el día posterior al colado que brinda el dato estimado, para la frecuencia de 24 kHz, los factores corresponden a 1,74; 1,18; 1,17 y 1,02 y para 55 kHz estos factores son los siguientes, 2,34; 1,27; 1,24 y 1,07. La aplicación de estos factores para la metodología indirecta permite un análisis confiable de la estructura en casos donde la implementación del método directo no sea posible complicando la realización del ensayo, siendo esta investigación una solución ante estos escenarios.

3.2.2 Recomendaciones

Para futuras investigaciones realizadas en el laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) de la Escuela de Ingeniería en Construcción del Tecnológico de Costa Rica, se presentan una serie de recomendaciones en el control de calidad de estructuras de concreto, esto con la finalidad de contribuir en el área investigativa de ensayos no destructivos.

En estructuras de concreto con un espesor de 15 cm, se recomienda la aplicación de un transductor de 24 kHz para obtener resultados más representativos sobre la condición general del concreto, al presentar valores más cercanos al método directo y un factor de ajuste menor en relación con la frecuencia de 55 kHz. Para la detección de fisuras o deterioros superficiales, se recomienda el uso de la frecuencia de 55 kHz para el ensayo de ultrasonido, al presentar una longitud de onda de 5.95 cm, el análisis de la estructura será superficial.

El análisis de estructuras con espesor mayor a 15 cm es recomendado evaluar la longitud de onda obtenida para determinar su relación con el espesor de la estructura. Una frecuencia baja de transductor implica una amplitud de onda mayor, caso contrario al implementar una frecuencia alta, se obtiene una longitud de onda menor. Por lo tanto, para un estudio preciso, es importante que la longitud de onda pueda penetrar por completo la matriz del concreto, evitando exceder el espesor de este, de esta forma se impide la dispersión de la energía de ultrasonido, afectando la precisión de la detección de imperfecciones internas del concreto que puedan comprometer su calidad.

En el proceso del ensayo de ultrasonido es importante tener un conocimiento técnico previo a la realización del ensayo y una correcta capacitación para la manipulación del equipo de ultrasonido, dado que los datos pueden variar por un error en el acoplamiento o calibración del equipo, ya que en la presencia de residuos en el agente acoplante puede inducir a la pérdida de energía ultrasónica y, por ende, irregularidades en las medidas obtenidas. De igual forma, es importante identificar los datos erróneos por las situaciones antes mencionadas, por lo tanto, el conocimiento del ensayo previo a su realización puede facilitar la toma de datos para el análisis posterior.

La aplicación del ensayo de ultrasonido a edades tempranas del curado permite ampliar el estudio de la condición interna del concreto, identificando la estabilización del proceso de hidratación, ya que, a las edades de 3 a 7 días, conociendo la velocidad total de ultrasonido, se llegó a alcanzar un porcentaje del 67 - 89 % de la velocidad total de ultrasonido respectivamente. Los procesos de curado del concreto en campo son fundamentales para resguardar las propiedades del concreto evitando perjudicar la resistencia a la compresión esperada. Los ensayos de ultrasonido podrán identificar posibles fallas en la estructura dado que una falencia en el curado se reflejará en la evolución de la velocidad de ultrasonido.

Para futuras investigaciones, se recomienda limitar la distancia entre los transductores a un máximo de 40 cm al operar el equipo Matest del CIVCO. Una separación excesiva incrementa la incertidumbre de las lecturas, lo que podría derivar en un diagnóstico erróneo de la calidad del concreto. Este comportamiento fue observado con el transductor de 24 kHz, donde las mediciones presentaron variaciones significativas al alcanzar los 50 cm, por el contrario, en el rango de 30 a 40 cm, los valores mantuvieron una estabilidad adecuada para el análisis.

Finalmente, se recomienda ampliar las investigaciones orientadas a la validación y adaptación de criterios internacionales de la evaluación de la calidad del concreto, como los propuestos por el IAEA (International Atomic Energy Agency), donde se presenta la tabla de referencia para la clasificación de la calidad del concreto, bajo los parámetros del ensayo por ultrasonido. No obstante, estos valores se fundamentan principalmente en estudios desarrollados bajo normativas, materiales y condiciones europeas, las cuales pueden diferir significativamente de las condiciones constructivas nacionales. Por lo tanto, se requiere desarrollar estudios sistemáticos en Costa Rica que consideren las particularidades locales como los agregados, las dosificaciones, reglamentos técnicos vigentes, con el fin de generar una base de datos más confiable y representativa del estudio de la calidad del concreto. Además, se recomienda realizar pruebas de normalidad para asegurar la robustez estadística de los hallazgos y permitir el procesamiento de datos más confiables.

4. Referencias bibliográficas

1. American Concrete Institute. (2015). Requisitos de Reglamento para concreto estructural (ACI 318S-14). Edición en español. Recuperado el 4 de agosto de 2025 de <https://ingenieriaymas.com/2022/02/aci-318-19-codigopara-concreto-estructural-en-espanol.html>
2. American Concrete Institute. (2022). Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete Guide (ACI PRC - 211.1-22). Recuperado el 14 de enero de 2026 de <https://storethinghiem.vn/uploads/files/ACI%20211.1-22.pdf>
3. American Concrete Institute. (2016). Guide to Cold Weather Concreting (ACI 306 R-16). Recuperado el 14 de enero de 2026 de https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/University/306R-16_excerpt.pdf
4. American Concrete Institute. (2020). Guide to Hot Weather Concreting (ACI 305 R-20). Recuperado el 14 de enero de 2026 de https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/University/306R-16_excerpt.pdf
5. American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM C566-19: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying. United States of America.
6. American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM C128-22: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of CoarseFine Aggregate (Withdrawn 2024). United States of America.
7. American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM C31/C31M-23: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. United States of America.
8. American Society for Testing and Materials. (2024). ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate (Withdrawn 2024). United States of America.

9. American Society for Testing and Materials. (2024). Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. United States of America.
10. American Society for Testing and Materials. (2010). Standard Practice for Radiographic Examination. United States of America.
11. American Society for Testing and Materials. (2025). ASTM C143/C143M-12: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. United States of America.
12. American Society for Testing and Materials. (2025). C192/C192M-25: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. United States of America.
13. American Society for Testing and Materials. (2025). ASTM C805/C805M-18 Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. United States of America.
14. American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM C803/C803M-18 Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete. United States of America.
15. American Society for Testing and Materials. (2022). ASTM C879-22b Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. United States of America.
16. American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM C39/C39M-2: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. United States of America.
17. American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM C273/C273M-16: Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials. United States of America.
18. American Society for Testing and Materials. (2022). ASTM C78/C78M-22: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). United States of America.
19. American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM C1064/C1064M-17: Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete. United States of America.
20. ASOCRETO. (2011). Tecnología de concreto Tomo I y II. Colombia.

21. Bakieva, M., González Such, J. y Jornet, J. (s.f.), SPSS: ANOVA de un Factor. Universidad de Valencia. Recuperado el 4 de noviembre de 2025 de https://www.uv.es/innovamide/spss/SPSS/SPSS_0702b.pdf
22. COGUANOR. (2012). Norma Técnica Guatemalteca NTG 41017 h43. Recuperado el 25 de agosto de 2025 de https://conred.gob.gt/normas/NRD3/2_concreto/NTG_41017_h_43Mtodo_de_ensayo_para_la_medicion_in_situ_de_la_permeabilidad_al_aire_del_concreto_Mtodo_Torrent.pdf
23. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. (2015,28 de julio). Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica. Fuente: <https://es.scribd.com/document/342109689/Codigo-Geotecnico-deTaludes-y-Laderas-de-Costa-Rica>.
24. Cordero G., Cárdenas J. y Rojas J. (2022). Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI. Universidad Francisco de Paula Santander. Recuperado el 01 de octubre de 2025 de <https://doi.org/10.22463/9789587717051>
25. CR-2020. (2022). Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes. MOPT. Recuperado el 4 de diciembre de 2025 de <https://www.mopt.go.cr/sites/default/files/destacados/planificacion-sectorial/normativa/manuales/cr-2020/cr-2020.pdf>
26. Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. División de Anestesiología. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado el 4 de noviembre de 2025 de <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>
27. Ergueta, G. A. y Quino, M. V. (2024). Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción. Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 82 – 95, Recuperado el 26 de agosto de 2025 de <https://doi.org/10.21041/ra.v14i1.715>
28. Fernández, A. y Salas, A. (2002). Evaluación y revisión de las proporciones recomendadas para mezclas de concreto en obras menores utilizando dos fuentes de agregados nacionales. Tecnológico de Costa Rica. Recuperado el 14 de enero de 2026 de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/243/Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

29. Holcim. (s.f.). Cemento fuerte ECOPlanet. Recuperado el 2 de octubre de 2025 de https://www.holcim.cr/sites/costarica/files/2022-08/ficha_cemento_fuerte.pdf
30. International Atomic Energy Agency. (2002, Setiembre). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Vienna, Austria. Recuperado el 28 de octubre de 2025 de https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-17_web.pdf
31. Jiménez A., Mujica, L. y Escalona, M. (2020). Ensayos destructivos y no destructivos. Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada. Recuperado el 26 de agosto de 2025 de <https://es.scribd.com/document/446760915/ensayos-destructivos-y-no-destructivos>
32. Kaylan, S. y Kishen, C. (2013). Experimental Evaluation of Cracks in Concrete by Ultrasonic Pulse Velocity. Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Indio de Tecnología de Kharagpur, Kharagpur, India. Recuperado el 8 de noviembre de 2025 de <https://www.ndt.net/article/apcndt2013/papers/009.pdf>
33. Lipa, L. y Alamo, J. (2015). Metodología para la detección de vacíos y medición de espesores en el concreto, por medio del pulso ultrasónico. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Recuperado el 26 de agosto de 2025 de <https://tesis.pucp.edu.pe/items/4a244a51-5540-4b6a-a205-3fef48640621>
34. Matest. (2025). C369N Probador de velocidad de pulso ultrasónico. Recuperado el 25 de agosto de 2025 de <https://www.matest.com/es/producto/c369n-ultrasonic-pulse-velocity-tester>
35. Matest. (2025). C372M Probador de velocidad de pulso ultrasónico de alto rendimiento. Recuperado el 25 de agosto de 2025 de <https://www-matest-com.translate.goog/en/product/c372m-ultrasonic-pulse-velocity-tester? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc>
36. Organización de Naciones Unidad. (2025). The Sustainable Development Goals Report 2025. Recuperado el 7 de noviembre de 2025 de <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/>
37. Sánchez, D. 2001. Tecnología del concreto y del mortero. Colombia: Bhandar Editores LTDA.
38. Sánchez, R. et al. (s.f.). The Coefficient of Determination in the Ridge Regression. Universidad de Granada. España.
39. Torres, R. et al. (2018). Análisis y evaluación de concretos dosificados a diferentes resistencias, edades y condiciones de curado mediante ensayos de ultrasonido. Universidad Central de

Venezuela. Facultad de Ingeniería, Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. Recuperado el 10 de noviembre de 2025 de <https://www.ing.ucv.ve/jifi2018/documentos/ambiente/AIS030.pdf>

5. Apéndice

Apéndice 1

Materiales para elaboración de concreto



Apéndice 2

Pesaje de material



Apéndice 3

Pesaje de material



Apéndice 4

Ensayo de medición de gravedad específica



Apéndice 5

Pesaje del agregado fino



Apéndice 6

Pesaje del agregado grueso compactado



Apéndice 7

Pesaje del agregado fino compactado



Apéndice 8

Mezclado de concreto



Apéndice 9

Concreto listo para colar



Apéndice 10

Especímenes de concreto



Apéndice 11

Desviación estándar, ensayos a 3 días con 24 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
1	30	0,67%	8,21
	40	1,65%	24,47
	50	0,51%	7,28
	15	0,98%	9,57
	60	1,00%	10,94
2	30	1,76%	12,28
	40	0,22%	2,11
	50	0,74%	4,47
	15	0,58%	6,75
	60	0,24%	1,81
3	30	1,62%	8,47
	40	0,31%	1,92
	50	0,16%	1,33
	15	0,52%	5,23
	60	0,47%	5,05
4	30	1,37%	11,63
	40	1,30%	8,53
	50	0,40%	2,81
	15	0,60%	5,69
	60	1,03%	18,89
5	30	0,42%	2,40
	40	1,26%	11,17
	50	0,54%	3,05
	15	0,95%	9,30
	60	0,47%	5,75

Apéndice 12

Desviación estándar, ensayos a 3 días con 55 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
6	30	0,60%	5,08
	40	0,29%	2,14
	50	2,82%	23,85
	15	0,39%	4,68
	60	0,42%	6,09
7	30	0,41%	2,50
	40	0,18%	0,91
	50	0,22%	0,79
	15	0,64%	6,15
	60	0,19%	1,88
8	30	0,39%	1,49
	40	0,38%	2,17
	50	0,22%	1,03
	15	1,78%	20,66
	60	0,40%	2,83
9	30	0,30%	1,60
	40	0,36%	1,22
	50	0,38%	1,98
	15	0,95%	9,90
	60	0,22%	2,40
10	30	1,13%	5,88
	40	0,44%	2,14
	50	0,42%	1,55
	15	1,03%	10,15
	60	0,08%	0,61

Apéndice 13

Desviación estándar, ensayos a 7 días con 24 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
1	30	0,74%	8,96
	40	0,34%	3,56
	50	0,52%	6,85
	15	0,82%	10,06
	60	0,45%	5,50
2	30	2,56%	24,70
	40	0,52%	4,26
	50	1,38%	15,81
	15	0,49%	6,83
	60	0,94%	12,63
3	30	1,77%	19,17
	40	0,74%	7,87
	50	1,18%	10,19
	15	1,70%	29,77
	60	1,25%	20,31
4	30	1,99%	19,04
	40	0,12%	1,84
	50	0,24%	2,14
	15	0,87%	10,25
	60	0,39%	4,45
5	30	1,97%	22,43
	40	1,39%	11,28
	50	0,67%	5,83
	15	0,48%	5,63
	60	0,31%	4,73

Apéndice 14

Desviación estándar, ensayos a 7 días con 55 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
6	30	0,23%	1,96
	40	0,60%	9,15
	50	0,89%	7,49
	15	1,56%	19,96
	60	7,03%	132,02
7	30	1,62%	13,01
	40	0,75%	6,75
	50	0,35%	3,28
	15	1,36%	17,72
	60	0,69%	8,45
8	30	1,28%	12,21
	40	0,63%	6,10
	50	0,32%	2,47
	15	1,71%	24,98
	60	0,81%	10,61
9	30	2,91%	23,76
	40	0,63%	6,10
	50	0,30%	2,78
	15	0,84%	10,85
	60	0,40%	4,68
10	30	0,60%	5,71
	40	0,59%	7,48
	50	0,51%	3,65
	15	1,41%	18,22
	60	0,73%	9,13

Apéndice 15

Desviación estándar, ensayos a 14 días con 24 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
1	30	0,11%	1,01
	40	0,21%	2,30
	50	0,26%	2,13
	15	2,67%	40,40
	60	0,58%	8,16
2	30	1,83%	19,83
	40	1,27%	13,01
	50	2,85%	32,67
	15	0,92%	12,94
	60	1,05%	15,23
3	30	0,48%	4,98
	40	1,15%	13,95
	50	0,37%	3,52
	15	1,31%	19,64
	60	0,79%	10,40
4	30	2,68%	26,76
	40	0,90%	8,48
	50	1,17%	11,60
	15	0,89%	12,12
	60	0,15%	2,37
5	30	2,17%	23,10
	40	0,62%	7,10
	50	0,45%	5,58
	15	0,84%	12,09
	60	0,16%	2,48

Apéndice 16

Desviación estándar, ensayos a 14 días con 55 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
6	30	1,78%	29,70
	40	1,60%	13,91
	50	1,71%	21,00
	15	0,61%	8,55
	60	1,14%	15,60
7	30	1,11%	13,41
	40	0,00%	0,00
	50	0,67%	7,52
	15	1,88%	25,64
	60	0,72%	9,53
8	30	1,23%	15,95
	40	1,12%	9,10
	50	0,12%	1,71
	15	1,10%	14,48
	60	8,87%	185,40
9	30	1,11%	12,87
	40	0,00%	0,00
	50	0,14%	1,50
	15	0,45%	7,49
	60	2,81%	34,95
10	30	1,31%	11,43
	40	1,24%	16,08
	50	0,61%	5,33
	15	0,91%	13,59
	60	1,45%	20,01

Apéndice 17

Desviación estándar, ensayos a 28 días con 24 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
1	30	1,49%	12,89
	40	1,17%	12,95
	50	0,59%	6,25
	15	1,29%	18,26
	60	2,12%	29,22
2	30	1,31%	20,53
	40	0,69%	9,67
	50	1,21%	12,00
	15	1,02%	19,41
	60	0,45%	5,83
3	30	0,94%	19,05
	40	1,65%	15,87
	50	2,02%	24,88
	15	0,58%	8,75
	60	0,80%	10,87
4	30	0,51%	7,44
	40	0,90%	11,94
	50	1,85%	24,04
	15	1,31%	14,00
	60	1,78%	23,60
5	30	1,71%	24,72
	40	1,08%	11,66
	50	1,84%	23,24
	15	2,07%	25,82
	60	1,77%	25,46

Apéndice 18

Desviación estándar, ensayos a 28 días con 55 kHz

Viga	Distancia (cm)	Error relativo (%)	Desviación estándar (σ)
1	30	2,12%	25,29
	40	1,18%	13,89
	50	0,65%	12,12
	15	1,02%	13,81
	60	0,83%	12,84
2	30	0,32%	3,66
	40	0,24%	2,88
	50	0,66%	7,23
	15	1,39%	24,26
	60	0,33%	5,55
3	30	1,76%	17,71
	40	0,58%	5,90
	50	0,79%	6,64
	15	0,82%	12,60
	60	0,79%	11,03
4	30	1,91%	17,03
	40	1,79%	22,27
	50	1,12%	11,12
	15	1,40%	20,26
	60	0,48%	7,21
5	30	1,88%	16,87
	40	0,60%	5,30
	50	0,60%	5,89
	15	1,19%	18,82
	60	1,62%	22,49

Id	Fecha Ensayo	F c (kg/cm²)	Edad (días)	Viga	insductor (k)	Longitud (cm)	Tiempo Vuelo (µs)	Velocidad (m/s)	Módulo Rotura (MPa)	Calificación	Método	Calificación Muy Pobre	Calificación Pobre	Calificación Cuestionable	Calificación Bueno	Calificación Excelente
1	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,8	3302,77		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
2	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,7	2906,23		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
3	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,5	3316,70		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
4	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,4	3319,90		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
5	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,4	3318,43		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
6	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,3	3320,79		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
7	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,2	3325,18		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
8	25/sept/25	210	3	1	24	30	90,2	3324,88		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
9	25/sept/25	210	3	1	24	40	125,7	3181,51		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
10	25/sept/25	210	3	1	24	40	125,9	3176,29		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
11	25/sept/25	210	3	1	24	40	126,10	3170,89		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
12	25/sept/25	210	3	1	24	40	127,60	3135,73		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
13	25/sept/25	210	3	1	24	40	127,80	3128,90		Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
14	25/sept/25	210	3	1	24	50	176,70	2828,04		Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
15	25/sept/25	210	3	1	24	50	176,40	2834,02		Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
16	25/sept/25	210	3	1	24	50	175,80	2843,62		Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
17	25/sept/25	210	3	1	24	50	175,80	2843,62		Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
18	25/sept/25	210	3	1	24	15	62,60	2396,75		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
19	25/sept/25	210	3	1	24	15	62,20	2450,52		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
20	25/sept/25	210	3	1	24	15	62,10	2414,22		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
21	25/sept/25	210	3	1	24	15	62,00	2420,42		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
22	25/sept/25	210	3	1	24	15	62,00	2419,48		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
23	25/sept/25	210	3	1	24	60	231,80	2587,86		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
24	25/sept/25	210	3	1	24	60	231,30	2594,09		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
25	25/sept/25	210	3	1	24	60	230,50	2601,30		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
26	25/sept/25	210	3	1	24	60	229,80	2610,50		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
27	25/sept/25	210	3	1	24	60	229,50	2613,93		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
28	25/sept/25	210	3	2	24	30	152,30	1970,24		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
29	25/sept/25	210	3	2	24	30	149,70	2003,93		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
30	25/sept/25	210	3	2	24	30	150,00	2000,42		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
31	25/sept/25	210	3	2	24	30	149,60	2005,64		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
32	25/sept/25	210	3	2	24	30	150,80	1989,35		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
33	25/sept/25	210	3	2	24	30	150,10	1998,83		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
34	25/sept/25	210	3	2	24	30	150,00	2000,00		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
35	25/sept/25	210	3	2	24	40	206,50	1993,20		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
36	25/sept/25	210	3	2	24	40	206,00	1941,49		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
37	25/sept/25	210	3	2	24	40	206,20	1939,84		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
38	25/sept/25	210	3	2	24	50	290,10	1721,56		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
39	25/sept/25	210	3	2	24	50	290,00	1723,98		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
40	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,40	1730,82		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
41	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,70	1731,82		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
42	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,40	1731,49		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
43	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,40	1734,44		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
44	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,30	1734,59		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
45	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,30	1734,11		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
46	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,20	1734,92		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
47	25/sept/25	210	3	2	24	50	288,00	1736,41		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
48	25/sept/25	210	3	2	24	15	63,40	2363,51		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
49	25/sept/25	210	3	2	24	15	63,30	2370,26		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
50	25/sept/25	210	3	2	24	15	63,00	2379,23		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
51	25/sept/25	210	3	2	24	15	63,10	2378,93		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
52	25/sept/25	210	3	2	24	60	365,20	1643,01		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
53	25/sept/25	210	3	2	24	60	364,90	1644,19		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
54	25/sept/25	210	3	2	24	60	364,40	1646,41		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
55	25/sept/25	210	3	2	24	60	364,30	1646,98		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
56	25/sept/25	210	3	2	24	30	364,30	1644,98		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
57	25/sept/25	210	3	3	24	30	190,80	1572,08		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
58	25/sept/25	210	3	3	24	30	188,60	1590,56		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
59	25/sept/25	210	3	3	24	30	189,10	1586,61		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
60	25/sept/25	210	3	3	24	30	188,50	1591,36		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
61	25/sept/25	210	3	3	24	30	188,10	1595,26		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
62	25/sept/25	210	3	3	24	30	188,20	1594,25		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
63	25/sept/25	210	3	3	24	30	187,70	1598,04		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
64	25/sept/25	210	3	3	24	30	187,80	1597,89		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
65	25/sept/25	210	3	3	24	40	205,80	1942,31		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
66	25/sept/25	210	3	3	24	40	206,40	1938,27		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
67	25/sept/25	210	3	3	24	40	206,00	1941,56		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
68	25/sept/25	210	3	3	24	40	205,80	1941,51		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
69	25/sept/25	210	3	3	24	40	206,10	1941,18		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
70	25/sept/25	210	3	3	24	40	206,10	1940,51		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
71	25/sept/25	210	3	3	24	40	206,00	1941,41		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
72	25/sept/25	210	3	3	24	40	206,40	1937,53		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
73	25/sept/25	210	3	3	24	50	307,20	1699,47		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
74	25/sept/25	210	3	3	24	50	307,70	1624,99		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
75	25/sept/25	210	3	3	24	50	307,20	1627,56		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
76	25/sept/25	210	3	3	24	50	307,60	1625,66		Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
77	25/sept/25	210	3	3	15	24	63,80	2349,88		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
78	25/sept/25	210	3	3	24	15	63,50	2362,22		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
79	25/sept/25	210	3	3	24	15	63,50	2362,22		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
80	25/sept/25	210	3	3	24	15	63,50	2360,47		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
81	25/sept/25	210	3	3	24	15	63,50	2360,77		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
82	25/sept/25	210	3	3	24	15	231,80	2588,66		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
83	25/sept/25	210	3	3	24	60	231,30	2593,82		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
84	25/sept/25	210	3	3	24	60	231,20	2594,61		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
85	25/sept/25	210	3	3	24	60	230,70	2600,97		Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
86	25/sept/25	210	3	4	24	3										

298	25/sep/25	210	3	10	55	15	62,10	2416,93	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
299	25/sep/25	210	3	10	55	15	62,20	2413,18	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
300	25/sep/25	210	3	10	55	15	62,20	2407,25	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
301	25/sep/25	210	3	10	55	15	62,70	2392,12	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
302	25/sep/25	210	3	10	55	60	318,40	1884,51	Muy pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
303	25/sep/25	210	3	10	55	60	318,40	1884,41	Muy pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
304	25/sep/25	210	3	10	55	60	318,40	1884,32	Muy pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
305	25/sep/25	210	3	10	55	60	318,50	1883,89	Muy pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
306	25/sep/25	210	3	10	55	60	318,60	1883,03	Muy pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
307	29/sep/25	210	7	1	24	30	76,80	3904,78	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
308	29/sep/25	210	7	1	24	30	76,80	3904,17	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
309	29/sep/25	210	7	1	24	30	76,90	3903,55	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
310	29/sep/25	210	7	1	24	30	76,90	3903,55	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
311	29/sep/25	210	7	1	24	30	76,90	3899,84	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
312	29/sep/25	210	7	1	24	30	76,90	3900,66	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
313	29/sep/25	210	7	1	24	30	77,00	3897,04	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
314	29/sep/25	210	7	1	24	30	77,00	3898,24	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
315	29/sep/25	210	7	1	24	30	77,40	3875,94	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
316	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,10	3699,00	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
317	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,30	3694,59	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
318	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,30	3692,65	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
319	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,30	3692,37	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
320	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,30	3692,10	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
321	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,30	3693,76	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
322	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,40	3689,37	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
323	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,40	3690,47	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
324	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,50	3686,36	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
325	29/sep/25	210	7	1	24	40	108,50	3688,26	Bueno	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
326	29/sep/25	210	7	1	24	50	140,70	3554,40	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
327	29/sep/25	210	7	1	24	50	140,80	3552,35	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
328	29/sep/25	210	7	1	24	50	140,80	3551,76	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
329	29/sep/25	210	7	1	24	50	140,80	3550,53	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
330	29/sep/25	210	7	1	24	50	140,80	3552,25	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
331	29/sep/25	210	7	1	24	50	140,90	3547,69	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
332	29/sep/25	210	7	1	24	50	140,90	3549,33	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
333	29/sep/25	210	7	1	24	50	141,20	3541,41	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
334	29/sep/25	210	7	1	24	50	141,40	3535,97	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
335	29/sep/25	210	7	1	24	50	141,40	3536,17	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
336	29/sep/25	210	7	1	24	15	48,00	3127,50	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
337	29/sep/25	210	7	1	24	15	48,00	3124,32	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
338	29/sep/25	210	7	1	24	15	48,10	3121,75	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
339	29/sep/25	210	7	1	24	15	48,10	3121,68	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
340	29/sep/25	210	7	1	24	15	48,40	3101,95	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
341	29/sep/25	210	7	1	24	60	200,00	2999,51	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
342	29/sep/25	210	7	1	24	60	200,10	2998,77	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
343	29/sep/25	210	7	1	24	60	200,20	2997,09	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
344	29/sep/25	210	7	1	24	60	200,30	2994,91	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
345	29/sep/25	210	7	1	24	60	200,90	2985,92	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
346	29/sep/25	210	7	2	24	30	105,10	2851,28	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
347	29/sep/25	210	7	2	24	30	105,20	2851,56	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
348	29/sep/25	210	7	2	24	30	105,30	2849,83	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
349	29/sep/25	210	7	2	24	30	105,90	2832,46	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
350	29/sep/25	210	7	2	24	30	106,10	2824,46	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
351	29/sep/25	210	7	2	24	30	106,10	2824,60	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
352	29/sep/25	210	7	2	24	30	106,60	2815,15	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
353	29/sep/25	210	7	2	24	30	107,00	2802,44	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
354	29/sep/25	210	7	2	24	30	107,20	2797,79	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
355	29/sep/25	210	7	2	24	30	107,80	2782,11	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
356	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,30	2892,55	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
357	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,40	2889,18	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
358	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,40	2890,03	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
359	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,50	2888,52	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
360	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,60	2887,00	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
361	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,60	2886,17	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
362	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,70	2884,15	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
363	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,70	2883,49	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
364	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,70	2883,83	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
365	29/sep/25	210	7	2	24	40	138,80	2882,31	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
366	29/sep/25	210	7	2	24	40	139,00	2877,46	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
367	29/sep/25	210	7	2	24	50	165,10	3027,89	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
368	29/sep/25	210	7	2	24	50	165,20	3026,87	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
369	29/sep/25	210	7	2	24	50	165,30	3025,53	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
370	29/sep/25	210	7	2	24	50	165,30	3023,91	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
371	29/sep/25	210	7	2	24	50	165,40	3022,59	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
372	29/sep/25	210	7	2	24	50	165,60	3018,91	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
373	29/sep/25	210	7	2	24	50	166,90	2996,03	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
374	29/sep/25	210	7	2	24	50	167,40	2988,22	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
375	29/sep/25	210	7	2	24	15	47,60	3145,10	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
376	29/sep/25	210	7	2	24	15	47,60	3144,10	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
377	29/sep/25	210	7	2	24	15	47,60	3151,32	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
378	29/sep/25	210	7	2	24	15	47,80	3140,13	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
379	29/sep/25	210	7	2	24	15	47,80	3138,00	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
380	29/sep/25	210	7	2	24	60	202,40	2964,87	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
381	29/sep/25	210	7	2	24	60	202,50	2962,40	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
382	29/sep/25	210	7	2	24	60	203,70	2945,76	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
383	29/sep/25	210	7	2	24	60	204,00	2941,34	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
384	29/sep/25	210	7	2	24	60	204,30	2938,93	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
385	29/sep/25	210	7	3	24	30	104,60	2867,81	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
386	29/sep/25	210	7												

443	29/sept/25	210	7	4	24	60	202,50	2963,69	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
448	29/sept/25	210	7	4	24	60	202,80	2957,82	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
449	29/sept/25	210	7	4	24	60	202,80	2958,75	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
450	29/sept/25	210	7	4	24	60	203,10	2954,40	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
451	29/sept/25	210	7	4	24	60	203,20	2952,07	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
452	29/sept/25	210	7	5	24	30	104,50	2870,71	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
453	29/sept/25	210	7	5	24	30	104,60	2867,59	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
454	29/sept/25	210	7	5	24	30	105,80	2835,52	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
455	29/sept/25	210	7	5	24	30	106,20	2825,19	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
456	29/sept/25	210	7	5	24	30	106,30	2815,35	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
457	29/sept/25	210	7	5	24	30	106,30	2821,76	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
458	29/sept/25	210	7	5	24	30	106,50	2817,48	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
459	29/sept/25	210	7	5	24	30	106,60	2814,29	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
460	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,50	2914,71	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
461	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,70	2968,48	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
462	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,80	2967,23	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
463	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,80	2967,77	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
464	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,80	2967,44	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
465	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,80	2966,09	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
466	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,80	2966,36	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
468	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,80	2967,59	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
469	29/sept/25	210	7	5	24	40	134,90	2965,64	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
470	29/sept/25	210	7	5	24	40	136,40	2933,22	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
471	29/sept/25	210	7	5	24	50	197,20	2535,02	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
472	29/sept/25	210	7	5	24	50	197,50	2531,60	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
473	29/sept/25	210	7	5	24	50	197,70	2528,72	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
474	29/sept/25	210	7	5	24	50	198,10	2524,85	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
475	29/sept/25	210	7	5	24	50	198,20	2521,93	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
476	29/sept/25	210	7	5	24	50	198,40	2515,99	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
477	29/sept/25	210	7	5											

597	29/sept/25	210	7	9	55	30	105,60	2840,66	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
598	29/sept/25	210	7	9	55	30	105,60	2840,85	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
599	29/sept/25	210	7	9	55	30	105,60	2841,51	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
600	29/sept/25	210	7	9	55	30	108,10	2774,31	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
601	29/sept/25	210	7	9	55	40	138,60	2886,07	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
602	29/sept/25	210	7	9	55	40	138,60	2885,15	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
603	29/sept/25	210	7	9	55	40	138,90	2879,99	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
604	29/sept/25	210	7	9	55	40	138,90	2879,99	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
605	29/sept/25	210	7	9	55	40	139,00	2876,98	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
606	29/sept/25	210	7	9	55	40	139,00	2876,98	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
607	29/sept/25	210	7	9	55	40	139,10	2876,31	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
608	29/sept/25	210	7	9	55	40	139,40	2869,68	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
609	29/sept/25	210	7	9	55	50	139,40	2868,51	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
610	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,20	2367,48	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
611	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,20	2367,03	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
612	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,40	2364,95	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
613	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,50	2364,31	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
614	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,70	2362,36	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
615	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,70	2362,26	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
616	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,80	2360,47	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
617	29/sept/25	210	7	9	55	50	211,80	2360,29	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
618	29/sept/25	210	7	9	55	50	46,20	3243,39	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
619	29/sept/25	210	7	9	55	15	46,20	3246,74	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
620	29/sept/25	210	7	9	55	15	46,40	3231,00	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
621	29/sept/25	210	7	9	55	15	46,40	3236,02	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
622	29/sept/25	210	7	9	55	15	46,40	3219,32	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
623	29/sept/25	210	7	9	55	60	197,00	3046,35	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
624	29/sept/25	210	7	9	55	60	197,10	3044,63	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
625	29/sept/25	210	7	9	55	60	197,20	3042,62	Pobre	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
626	29/sept/25	210	7	9											

745	06/sep/25	210	14	3	24	30	101,2	2965,82	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
746	06/sep/25	210	14	3	24	40	132,7	3013,86	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
747	06/sep/25	210	14	3	24	40	132,4	3021,24	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
748	06/sep/25	210	14	3	24	40	132,2	3025,60	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
749	06/sep/25	210	14	3	24	40	131,9	3033,54	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
750	06/sep/25	210	14	3	24	40	131,2	3040,23	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
751	06/sep/25	210	14	3	24	40	131,3	3047,48	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
752	06/sep/25	210	14	3	24	40	131,2	3048,99	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
753	06/sep/25	210	14	3	24	40	131,2	3048,61	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
754	06/sep/25	210	14	3	24	40	131,2	3048,80	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
755	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,6	3132,89	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
756	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,2	3140,97	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
757	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,6	3133,21	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
758	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,6	3132,89	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
759	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,7	3130,21	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
760	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,6	3132,89	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
761	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,8	3129,43	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
762	06/sep/25	210	14	3	24	50	159,7	3131,48	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
763	06/sep/25	210	14	3	24	15	45	3335,02	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
764	06/sep/25	210	14	3	24	15	44,8	3350,58	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
765	06/sep/25	210	14	3	24	15	44,5	3369,35	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
766	06/sep/25	210	14	3	24	15	44,4	3379,13	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
767	06/sep/25	210	14	3	24	60	174,3	3444,93	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
768	06/sep/25	210	14	3	24	60	173,6	3451,68	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
769	06/sep/25	210	14	3	24	60	173,2	3463,71	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
770	06/sep/25	210	14	3	24	60	173,2	3465,15	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
771	06/sep/25	210	14	3	24	60	172,9	3469,68	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
772	06/sep/25	210	14	3	24	60	172,9	3470,31	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
773	06/sep/25	210	14	4	24	30	105,2	2852,83	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
774	06/sep/25	210	14	4	24	30	104	2884,37	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
775	06/sep/25	210	14	4	24	30	102,7	2920,53	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
776	06/sep/25	210	14	4	24	30	102,6	2922,27	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
777	06/sep/25	210	14	4	24	30	102,6	2923,27	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
778	06/sep/25	210	14	4	24	30	102,6	2924,86	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
779	06/sep/25	210	14	4	24	30	102,5	2928,10	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
780	06/sep/25	210	14	4	24	30	102,4	2930,62	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
781	06/sep/25	210	14	4	24	30	102,3	2931,52	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
782	06/sep/25	210	14	4	24	40	131,8	3035,22	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
783	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,7	3060,98	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
784	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,7	3059,87	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
785	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,5	3059,68	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
786	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,8	3057,59	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
787	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,7	3060,25	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
788	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,7	3059,68	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
789	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,6	3062,70	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
790	06/sep/25	210	14	4	24	40	130,7	3061,55	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
791	06/sep/25	210	14	4	24	50	163	3067,94	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
792	06/sep/25	210	14	4	24	50	161,7	3092,07	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
793	06/sep/25	210	14	4	24	50	161,5	3095,91	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
794	06/sep/25	210	14	4	24	50	161,2	3100,85	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
795	06/sep/25	210	14	4	24	50	161,3	3099,16	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
796	06/sep/25	210	14	4	24	50	161,4	3098,69	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
797	06/sep/25	210	14	4	24	50	161,2	3101,77	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
798	06/sep/25	210	14	4	24	50	161,1	3104,41	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
799	06/sep/25	210	14	4	24	15	45	3329,69	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
800	06/sep/25	210	14	4	24	15	44,9	3337,43	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
801	06/sep/25	210	14	4	24	15	44,8	3340,37	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
802	06/sep/25	210	14	4	24	15	44,7	3353,01	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
803	06/sep/25	210	14	4	24	15	44,6	3359,71	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
804	06/sep/25	210	14	4	24	60	174,3	3441,97	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
805	06/sep/25	210	14	4	24	60	174,1	3446,10	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
806	06/sep/25	210	14	4	24	60	174,1	3446,74	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
807	06/sep/25	210	14	4	24	60	174,1	3447,06	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
808	06/sep/25	210	14	5	24	30	102,6	2925,09	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
809	06/sep/25	210	14	5	24	30	100,6	2980,76	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
810	06/sep/25	210	14	5	24	30	100,5	2980,73	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
811	06/sep/25	210	14	5	24	30	100,5	2986,48	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
812	06/sep/25	210	14	5	24	30	100,5	2985,75	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
813	06/sep/25	210	14	5	24	30	100,4	2988,86	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
814	06/sep/25	210	14	5	24	30	100,3	2990,07	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
815	06/sep/25	210	14	5	24	40	130,8	3058,73	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
816	06/sep/25	210	14	5	24	40	130,6	3063,27	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
817	06/sep/25	210	14	5	24	40	130,4	3067,79	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
818	06/sep/25	210	14	5	24	40	130,2	3072,55	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
819	06/sep/25	210	14	5	24	40	130,2	3073,10	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
820	06/sep/25	210	14	5	24	40	130	3076,91	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
821	06/sep/25	210	14	5	24	40	130	3077,85	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
822	06/sep/25	210	14	5	24	50	157,6	3172,54	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
823	06/sep/25	210	14	5	24	50	157	3184,09	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
824	06/sep/25	210	14	5	24	50	157,5	3175,32	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
825	06/sep/25	210	14	5	24	50	157	3185,39	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
826	06/sep/25	210	14	5	24	50	157	3188,23	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
827	06/sep/25	210	14	5	24	50	156,9	3187,04	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
828	06/sep/25	210	14	5	24	50	157,2	3180,01	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
829	06/sep/25	210	14	5	24	15	45,8	3273,54	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
830	06/sep/25	210	14	5	24	15	45,7	3285,68	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
831	06/sep/25	210	14	5	24	15	45,5	3294,98	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
832	06/sep/25	210	14	5	24	15	45,4	3301,38	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
833	06/sep/25	210													

894	06/sep/25	210	14	7	55	60	184,40	3253,69	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
895	06/sep/25	210	14	7	55	60	184,50	3252,83	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
896	06/sep/25	210	14	7	55	60	185,00	3253,37	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
897	06/sep/25	210	14	8	55	30	93,90	3193,12	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
898	06/sep/25	210	14	8	55	30	94,00	3193,04	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
899	06/sep/25	210	14	8	55	30	94,30	3181,05	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
900	06/sep/25	210	14	8	55	30	94,30	3181,12	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
901	06/sep/25	210	14	8	55	30	95,10	3154,13	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
902	06/sep/25	210	14	8	55	40	140,80	2841,84	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
903	06/sep/25	210	14	8	55	40	140,80	2840,53	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
904	06/sep/25	210	14	8	55	40	140,90	2839,08	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
905	06/sep/25	210	14	8	55	40	140,90	2838,26	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
906	06/sep/25	210	14	8	55	40	141,00	2837,77	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
907	06/sep/25	210	14	8	55	40	141,00	2837,28	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
908	06/sep/25	210	14	8	55	40	141,00	2836,79	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
909	06/sep/25	210	14	8	55	40	141,10	2834,85	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
910	06/sep/25	210	14	8	55	40	141,10	2835,03	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
911	06/sep/25	210	14	8	55	40	142,30	2810,01	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
912	06/sep/25	210	14	8	55	50	171,20	2919,73	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
913	06/sep/25	210	14	8	55	50	171,30	2919,60	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
914	06/sep/25	210	14	8	55	50	171,30	2919,46	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
915	06/sep/25	210	14	8	55	50	171,50	2916,17	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
916	06/sep/25	210	14	8	55	15	44,20	3394,36	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
917	06/sep/25	210	14	8	55	15	44,30	3384,49	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
918	06/sep/25	210	14	8	55	15	44,30	3387,59	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
919	06/sep/25	210	14	8	55	15	44,40	3374,67	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
920	06/sep/25	210	14	8	55	15	44,70	3357,04	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
921	06/sep/25	210	14	8	55	60	111,40	2693,49	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
922	06/sep/25	210	14	8	55	60	203,00	2955,69	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
923	06/sep/25	210	14	9	55	30	93,70	3201,83	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
924	06/sep/25	210	14	9	55	30	93,90	3193,87	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
925	06/sep/25	210	14	9	55	30	94,10	3186,50	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
926	06/sep/25	210	14	9	55	30	94,20	3184,58	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
927	06/sep/25	210	14	9	55	30	94,20	3184,06	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
928	06/sep/25	210	14	9	55	30	94,70	3166,43	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
929	06/sep/25	210	14	9	55	30	94,70	3165,42	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
930	06/sep/25	210	14	9	55	30	94,70	3164,06	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
931	06/sep/25	210	14	9	55	40	144,50	2767,58	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
932	06/sep/25	210	14	9	55	50	249,60	2003,10	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
933	06/sep/25	210	14	9	55	50	249,90	2000,71	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
934	06/sep/25	210	14	9	55	50	250,00	2000,32	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
935	06/sep/25	210	14	9	55	15	44,90	3342,61	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
936	06/sep/25	210	14	9	55	15	45,00	3334,84	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
937	06/sep/25	210	14	9	55	15	45,10	3327,63	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
938	06/sep/25	210	14	9	55	60	182,80	3281,93	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
939	06/sep/25	210	14	9	55	60	183,10	3277,74	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
940	06/sep/25	210	14	9	55	60	183,20	3274,56	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
941	06/sep/25	210	14	9	55	60	183,30	3272,84	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
942	06/sep/25	210	14	9	55	60	184,10	3254,25	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
943	06/sep/25	210	14	9	55	60	188,10	3189,75	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
944	06/sep/25	210	14	10	55	30	111,50	2691,55	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
945	06/sep/25	210	14	10	55	30	111,60	2688,64	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
946	06/sep/25	210	14	10	55	30	111,60	2687,46	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
947	06/sep/25	210	14	10	55	30	111,60	2686,03	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
948	06/sep/25	210	14	10	55	30	111,80	2682,24	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
949	06/sep/25	210	14	10	55	30	111,90	2682,05	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
950	06/sep/25	210	14	10	55	30	112,10	2679,13	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
951	06/sep/25	210	14	10	55	30	112,40	2669,57	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
952	06/sep/25	210	14	10	55	30	112,90	2656,42	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
953	06/sep/25	210	14	10	55	40	162,40	2462,71	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
954	06/sep/25	210	14	10	55	40	164,00	2438,64	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
955	06/sep/25	210	14	10	55	40	164,50	2432,20	Pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
956	06/sep/25	210	14	10	55	50	234,90	2128,40	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
957	06/sep/25	210	14	10	55	50	235,10	2126,36	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
958	06/sep/25	210	14	10	55	50	235,40	2124,25	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
959	06/sep/25	210	14	10	55	50	235,80	2120,12	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
960	06/sep/25	210	14	10	55	50	236,20	2117,01	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
961	06/sep/25	210	14	10	55	50	236,30	2115,71	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
962	06/sep/25	210	14	10	55	50	236,40	2115,35	Muy pobre	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
963	06/sep/25	210	14	10	55	15	45,50	3298,81	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
964	06/sep/25	210	14	10	55	15	45,80	3278,47	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
965	06/sep/25	210	14	10	55	15	45,80	3271,57	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
966	06/sep/25	210	14	10	55	15	45,90	3268,68	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
967	06/sep/25	210	14	10	55	60	183,00	3282,57	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
968	06/sep/25	210	14	10	55	60	183,10	3277,02	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
969	06/sep/25	210	14	10	55	60	183,40	3272,12	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
970	06/sep/25	210	14	10	55	60	184,70	3248,58	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
971	06/sep/25	210	14	10	55	60	185,00	3239,96	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
972	20/10/2025	210	28	1	24	30	94,80	3163,88	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
973	20/10/2025	210	28	1	24	30	94,90	3161,20	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
974	20/10/2025	210	28	1	24	30	95,00	3159,09	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
975	20/10/2025	210	28	1	24	30	95,10	3156,58	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
976	20/10/2025	210	28	1	24	30	95,40	3145,10	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
977	20/10/2025	210	28	1	24	30	95,50	3141,16	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
978	20/10/2025	210	28	1	24	30	95,50	3141,43	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
979	20/10/2025	210	28	1	24	30	95,50	3141,52	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
980	20/10/2025	210	28	1	24	30	95,50	3140,90	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
981	20/10/2025	210	28												

1003	2010/2025	210	28	2	24	60	165.3	3629.07	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1004	2010/2025	210	28	2	24	60	165.3	3629.07	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1045	2010/2025	210	28	2	24	60	165.3	3629.77	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1046	2010/2025	210	28	2	24	60	165.4	3626.97	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1047	2010/2025	210	28	2	24	60	165.5	3625.74	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1048	2010/2025	210	28	2	24	60	166	3613.77	Cuestionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1049	2010/2025	210	28	3	24	30	76.90	3901.51	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1050	2010/2025	210	28	3	24	30	77.00	3896.66	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1051	2010/2025	210	28	3	24	30	77.40	3874.19	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1052	2010/2025	210	28	3	24	30	77.70	3873.49	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1053	2010/2025	210	28	3	24	30	78.10	3841.71	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1054	2010/2025	210	28	3	24	30	78.50	3821.44	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1055	2010/2025	210	28	3	24	30	78.60	3814.84	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1056	2010/2025	210	28	3	24	30	79.20	3785.65	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1057	2010/2025	210	28	3	24	40	106.70	3749.51	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1058	2010/2025	210	28	3	24	40	107.10	3733.21	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1059	2010/2025	210	28	3	24	40	107.20	3731.00	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1060	2010/2025	210	28	3	24	40	107.20	3732.03	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1061	2010/2025	210	28	3	24	40	107.30	3729.60	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1062	2010/2025	210	28	3	24	40	107.30	3728.48	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1063	2010/2025	210	28	3	24	40	107.30	3729.04	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1064	2010/2025	210	28	3	24	40	107.50	3719.35	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1065	2010/2025	210	28	3	24	40	107.50	3721.37	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1066	2010/2025	210	28	3	24	40	108.50	3687.08	Buena	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1067	2010/2025	210	28	3	24	50	152.90	3270.59	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1068	2010/2025	210	28	3	24	50	153.10	3264.96	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1069	2010/2025	210	28	3	24	50	153.30	3260.72	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1070	2010/2025	210	28	3	24	50	153.40	3259.20	Cuestionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1071	2010/2025	210	28	3	24	5									

1341	20/10/2025	210	28	10	55	40	124,60	■	3211,02	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1342	20/10/2025	210	28	10	55	40	125,00	■	3201,22	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1343	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,40	■	3260,21	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1344	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,40	■	3259,36	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1345	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,60	■	3255,91	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1346	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,70	■	3252,12	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1347	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,70	■	3253,85	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1348	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,70	■	3253,34	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1349	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,80	■	3250,07	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1350	20/10/2025	210	28	10	55	50	153,90	■	3248,19	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1351	20/10/2025	210	28	10	55	50	154,00	■	3247,16	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1352	20/10/2025	210	28	10	55	50	154,30	■	3240,68	Questionable	Indirecto	2135	3050	3660	4575	6000
1353	20/10/2025	210	28	10	55	15	42,40	■	3538,86	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1354	20/10/2025	210	28	10	55	15	42,40	■	3535,45	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1355	20/10/2025	210	28	10	55	15	42,40	■	3535,45	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1356	20/10/2025	210	28	10	55	15	42,80	■	3506,64	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1357	20/10/2025	210	28	10	55	15	42,80	■	3505,30	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1358	20/10/2025	210	28	10	55	15	42,90	■	3496,69	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1359	20/10/2025	210	28	10	55	60	169,30	■	3543,28	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1360	20/10/2025	210	28	10	55	60	169,30	■	3543,82	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1361	20/10/2025	210	28	10	55	60	169,40	■	3541,77	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1362	20/10/2025	210	28	10	55	60	169,50	■	3540,08	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1363	20/10/2025	210	28	10	55	60	169,70	■	3536,17	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000
1364	20/10/2025	210	28	10	55	60	172,10	■	3488,35	Questionable	Directo	2135	3050	3660	4575	6000