



CONFIABILIDAD DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO PARA ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CONCRETO CONVENCIONAL CON ADICIÓN DE FIBRA DE ACERO Y POLIPROPILENO

RELIABILITY OF THE ULTRASONIC PULSE VELOCITY FOR ANALYSIS AND COMPARISON OF THE COMPRESSION STRENGTH OF CONVENTIONAL CONCRETE WITH ADDITION OF STEEL FIBER AND POLYPROPYLENE

Honorio Rigoberto, Jaramillo Machacuay¹; Roberto Roland, Yoctun Rios²

Recibido 04/11/2022: Aprobado: 27/12/2022

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica241.2>

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar la confiabilidad del método de la velocidad del pulso ultrasónico. Se estimó la resistencia del concreto establecido por curvas de correlación por las pruebas de Velocidad de Pulso Ultrasónico e Índice Esclerométrico, desarrollándose curvas de correlación simple y múltiple por la metodología de SonReb. Utilizando un concreto convencional con la adición de fibras de acero 5% y polipropileno 0,21%, con un diseño de mezcla $f'c = 21$ MPa. Se prepararon setenta y dos cilindros de concreto de 150 x 300 mm. En los días 7, 14, 21 y 28, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, índice esclerométrico y velocidad del pulso ultrasónico. En conclusión, las mediciones de la velocidad de pulsos ultrasónicos revelaron una buena categorización de calidad de los concretos como excelente y una correlación de dependencia fuerte. En general, el porcentaje de error que presentan las ecuaciones analíticas se mantienen dentro del $\pm 10\%$.

Palabras clave: *velocidad de pulso ultrasónico para concreto; resistencia a la compresión del concreto; índice esclerométrico para concreto*

¹Honorio Rigoberto, Jaramillo Machacuay, Estudiante en Ingeniería Civil Universidad Peruana Unión. Lima, Perú, Correo: honoriojaramillo@upeu.edu.pe, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3070-6456>

²Roberto Roland, Yoctun Rios. Asesor de Investigación Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Universidad Peruana Unión, Lima, Perú, Correo: robertoyoctun@upeu.edu.pe, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0927-7829>

ABSTRACT

The research aimed to evaluate the reliability of the ultrasonic pulse velocity method. The resistance of the concrete established by correlation curves by the ultrasonic pulse velocity and sclerometric index tests was estimated, developing simple and multiple correlation curves by the *SonReb* methodology. Using conventional concrete with the addition of 5% steel fibers and 0.21% polypropylene, with a mix design $f'c = 21$ MPa. Seventy two 150 x 300 mm concrete cylinders were prepared. On days 7, 14, 21, and 28, tests for compressive strength, sclerometric index, and ultrasonic pulse velocity were performed. In conclusion, the ultrasonic pulse velocity measurements revealed a good categorization of concrete quality as excellent and a strong dependency correlation. In general, the percentage of error presented by the analytical equations remains within $\pm 10\%$.

Keywords: *ultrasonic pulse velocity for concrete; compressive strength of concrete; sclerometric index for concrete*

1. INTRODUCCIÓN

En la experiencia que aquí se presenta, se utilizó la velocidad del pulso ultrasónico para predecir la resistencia del concreto, de acuerdo a la teoría, la velocidad del pulso ultrasónico mejora la respuesta de la calidad del concreto al agregar fibras de polipropileno [1]. Se obtuvo que esta velocidad disminuye con el aumento del volumen de fibra, y a su vez las dosis altas de fibra reducen la trabajabilidad provocando bolas de fibra, lo que genera falta de homogeneidad [2].

Es posible calcular la resistencia mecánica a partir de la velocidad ultrasónica, este valor de la resistencia del concreto no sustituye al valor de la prueba de rotura de la muestra, y a medida que la velocidad del pulso ultrasónico aumenta, también lo hace la resistencia [3]. La precisión de la estimación de la resistencia del concreto depende de la correlación entre la de compresión y la prueba de Velocidad del Pulso Ultrasónico (*VPU*) [4].

Se identificaron curvas de correlación simple y combinada para determinar la resistencia del concreto a partir del ultrasonido, obteniéndose una fuerte relación entre los datos experimentales y las ecuaciones analíticas al comparar los resultados experimentales y teóricos [5]. Los resultados no serán correctos si sólo se utiliza una técnica de prueba, como la prueba de martillo de rebote o la prueba de velocidad del pulso por ultrasonidos. Las influencias para la estimación de la resistencia del concreto a partir de estudios de la *VPU*, el cemento, agregados, curado y presencia de grietas y vacíos en el concreto [6].

El objetivo de este estudio fue determinar la confiabilidad del método de *VPU*, a fin de estimar la resistencia del concreto. Para tres tipos de diseños de mezcla a $f'c = 21$ MPa para concreto convencional, adicionado 5% fibra de acero y 0,21% polipropileno. En tiempos de

curado 7, 14, 21 y 28 días, mediante ensayos de *VPU*, ensayo de Índice Esclerométrico (*IE*) y resistencia a la compresión ($f'c$).

2. DESARROLLO

K. Seonguk y S. Hong en su investigación utilizaron la técnica de *VPU* para estimar la resistencia del concreto reforzado con fibras de acero, confirmando su gran fiabilidad y la importancia de las técnicas de ensayo no destructivas [7]. Presentaron la influencia de las características estructurales de los agregados en la resistencia a rotura del concreto y la *VPU*. Se señaló que el aspecto y la redondez del agregado grueso afectan la resistencia del concreto. Por su lado K. Güçlüer determinó, que la resistencia a la rotura del concreto y la *VPU* aumentan cuando se incrementa la rugosidad de las superficies del agregado grueso [8].

T. Lee y J. Lee midieron la resistencia del concreto mediante pulsos de velocidad ultrasónicos y máquina universal. Demostraron que la resistencia a la rotura y la velocidad disminuyeron a medida que aumentaba la proporción de agua, y que las muestras con agregados más pequeños tenían velocidades de pulso más altas que las muestras con agregados más gruesos [9]. En otro estudio, se evidenció que la velocidad del pulso comienza a aumentar para el concreto resistente, sin embargo, la resistencia del concreto no siempre aumenta al añadir más fibra de acero [10]. La velocidad ultrasónica es muy útil para estudiar la calidad del concreto reforzado con fibra de acero, el ultrasonido es efectivo para evaluar el nivel de resistencia del concreto durante y después del curado [11].

En otra investigación se calculó que la diferencia entre el pulso ultrasónico y el ensayo de compresión tradicional es de alrededor del $\pm 20\%$, siendo la *VPU* un método fiable para determinar la resistencia del concreto es [12]. La relación entre la resistencia a la compresión estándar y la técnica de ultrasonidos para cilindros de concreto sirve como línea de ajuste para predecir la resistencia en el concreto, la velocidad de la onda es tan buena como el método de prueba estándar [13].

3. METODOLOGÍA

3.1. Materiales y Diseño de Mezcla

El estudio adoptó una metodología cuantitativa, de naturaleza transversal, ya que mide las variables durante un período de tiempo predeterminado, y el diseño de investigación es experimental, nivel de estudio es correlacional, ya que examino la relación entre dos variables. Para efectos de la investigación se generaron 72 muestras en su totalidad lo que hace que la muestra sea no probabilística. En la Figura 1 se proporciona un diagrama de flujo

de los pasos desde la recolección de la muestra hasta la correlación entre los ensayos f'_c y los no destructivos.

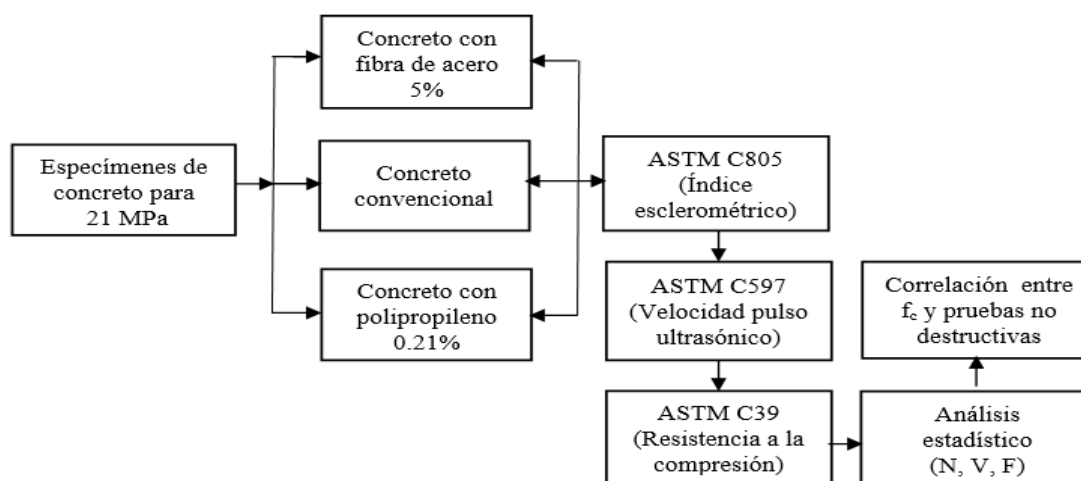


Figura 1. Diagrama de flujo para el cálculo analítico de la resistencia del concreto. Fuente: el autor

Los materiales empleados para producir el concreto fueron cemento *Portland* Tipo I, arena, grava, fibras de polipropileno y acero. La arena de peso específico de $2,62 \text{ kg/m}^3$ y un módulo de finura de $2,52\text{mm}$. La grava se clasificó como grava de 1" con un peso específico de $2,66 \text{ kg/m}^3$. Para determinar el módulo de finura se utilizó la norma ASTM C136 [14]. Los áridos de tamaño grueso y fino son procedentes de la cantera trapiche. La longitud de la fibra de polipropileno fue de $12\text{-}19\text{mm}$, la absorción de agua cero y la resistencia a la tensión es de $300\text{-}400\text{MPa}$, descrito en aditivos especiales [15]. La fibra de polipropileno está clasificada como fibra sintética de tipo 3 ASTM C1116 [16]. La resistencia a la rotura de la fibra de acero es de 1200MPa , aumenta la resistencia del concreto en 24 horas y es resistente al desgaste conforme indica en aditivos z [17]. La fibra de acero pertenece a la fibra de acero tipo 1 ASTM A820 [18] y la cantidad de materiales indicada en la tabla por el método de dosis de referencia ACI 211.1 [19]. En la Figura 2, presenta las fibras utilizadas, y en la Tabla 1 se muestra el diseño de mezcla.

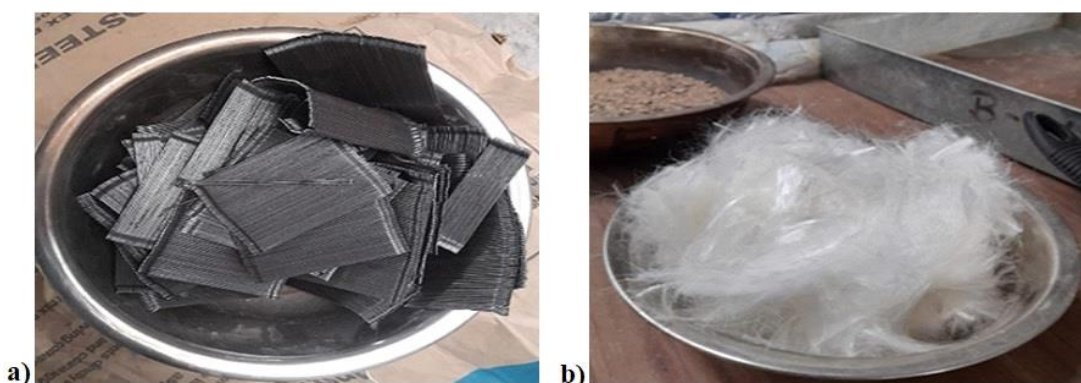


Figura 2. a) Fibra de acero, b) Fibra de polipropileno. Fuente: el autor

Tabla 1. Diseño de mezcla resumen, volumen de diseño: 0,051m³. Fuente: el autor

Diseño de mezcla	Cemento (kg)	AG (kg)	AF (kg)	Agua (kg)	Fibra P (g)	Fibra A (g)	R (a/c)	Slump (")	Temp. (C°)
C1	19,11	52,11	37,89	10,95	N/A	N/A	0,54	7 1/2"	25,5
C2	19,11	52,11	39,93	10,93	N/A	955,6	0,54	5"	25,6
C3	19,11	52,11	37,77	10,95	40,1	N/A	0,54	3 1/2"	26,7

Con la finalidad de presentar la investigación, se moldearon 72 especímenes cilíndricos de 150x300mm para tres tipos diferentes de diseños de concreto, utilizando convencional para 24 especímenes y añadiendo un 5% de fibras de acero, y un 0,21% de polipropileno para 24 especímenes para cada diseño. Se ensayaron tres especímenes por cada tiempo de prueba, con un total de 12 por ensayo, para lograr una resistencia del concreto de 21MPa. Para el análisis de los datos se utilizaron los obtenidos de las pruebas de resistencia a la compresión, *IE* y la *VPU*, en efecto fueron pruebas realizadas en el laboratorio de Ingeocontrol S.A.C. en Lima, Perú. La hoja de control fue el instrumento utilizado para recopilar los datos, y profesionales calificados de la empresa certificaron el procedimiento de las pruebas.

El concreto se produce de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM C192 [20]. Las muestras cilíndricas se mantuvieron en el molde durante 24 horas a temperatura ambiente y luego del desmoldeo, se dirigieron a una cámara de curado hasta las pruebas. El nivel de resistencia del concreto curado en laboratorio debía cumplir la condición de que la media de tres ensayos de resistencia consecutivos sea igual o superior a la *f'c* de diseño según ACI-318 [21]. Para estudiar y desarrollar el comportamiento de la resistencia del concreto, el análisis de los resultados se realizó sobre la media de tres probetas cilíndricas. En este caso, se ensayaron a los 7, 14, 21 y 28 días, las pruebas se iniciaron a los 7 días de edad para asegurar un mayor período de curado del cemento para obtener diferencias de resistencia significativas entre los concretos estudiados.

3.2. Prueba de Determinación de Velocidad de Pulso Ultrasónica

Las pruebas se llevaron a cabo de acuerdo con los procedimientos especificados en la norma ASTM C597 [22]. Los transductores del dispositivo fueron calibrados con una barra de referencia; la vaselina se usó en la superficie de la muestra del concreto para transmitir ondas ultrasónicas de manera más eficiente entre el transductor y el concreto. El equipo utilizado fue el *Pundit Lab*, y la longitud de propagación de la onda tenía que ser lo suficientemente para no afectar los resultados. Por lo tanto, para concretos que contengan áridos de tamaño nominal máximo de 20 a 40mm, se recomienda una longitud de 150mm. La distancia mínima de propagación ultrasónica para un transductor con una frecuencia de 54kHz es igual a

150mm [23]. Se utilizo una varilla de calibración de 25 μ s para el transductor con una frecuencia de 54kHz. Para cada muestra se tomaron 2 lecturas, y la clasificación del concreto se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación del concreto. Fuente: [24]

Clasificación del concreto	Excelente	Bueno	Cuestionable	Pobre	Muy pobre
Velocidad ultrasónica v (m/s)	V > 4,575	4,575 a 3,660	3,660 a 3,050	3,050 a 2,135	V < 2,135

3.3. Prueba de Determinación Número de Rebote – Índice Esclerométrico

Se determinó de acuerdo con la guía ASTM C805 [25]. Se utilizaron muestras cilíndricas con un diámetro de 150 mm y una altura de 300mm; la división del área de prueba se realizó mediante una cuadrícula de 10 áreas, y luego cada muestra se somete a 10 impactos distribuidos uniformemente en el área de prueba. Después de 10 mediciones, se calculó la media según el procedimiento indicado en la norma. El equipo utilizado es un martillo de rebote de ensayo basado en el principio de *Schmidt* o energía cinética, y el rango de medida es de 10 a 70MPa y una energía del martillo de 2207Nm. La medición se realizó a una temperatura de 10°C a 50°C, siendo la distancia de prueba de 2cm del punto de impacto. Para la prueba funcional, se ejecutó el yunque de prueba en el esclerómetro durante aproximadamente 10 golpes comparándose los resultados con el valor de calibración especificado en el yunque de prueba. El dispositivo requirió probarse después de 1000 golpes o cada 3 meses [26].

3.4. Prueba de Determinación de la Resistencia a la Compresión

La prueba de ensayo consistió en determinar la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto, donde la tasa de deformación se establece de acuerdo con la tasa de esfuerzo, que debe mantenerse entre 0,15MPa/s y 0,35MPa/s. Se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM C39 [27], utilizándose una prensa hidráulica universal estándar con una capacidad de 2000KN. El análisis estadístico se realizó con la ayuda de *IBM SPSS Statistics 26* y *Microsoft Excel 2019*. Los datos fueron verificados en promedio de 3 resultados; para la comparación de dichos resultados experimentales y analíticos, se verificó la normalidad de los datos por el método de *Shapiro-Wilk* con un nivel de significancia del 5%, identificando que los obtenidos son del tipo normal. Se adopto el proceso de análisis de normalidad de datos según M. Vinício de Camargo y V. J. Ferrari [28]. La metodología de investigación se siguió de acuerdo con Hernández y Mendoza [29]

4. RESULTADOS

4.1. Resistencia a la Compresión

La Tabla 3 muestra los valores medios y variación de los resultados empleando el software *Minitab 19*. Donde C representa el diseño de la mezcla.

Tabla 3. Resultado de las pruebas de resistencia a la compresión. Fuente: el autor

Resistencia a la Compresión $f'c$ (MPa)					
C	Días	7	14	21	28
C1	Media	24	29	30	30
	%	113	137	141	144
	<i>Sd</i>	0,58	0,58	0,58	0,58
	<i>CV%</i>	2,44	2,01	1,95	1,90
C2	Media	24	27	30	32
	%	113	130	144	151
	<i>Sd</i>	0,58	0,58	0,58	0,58
	<i>CV%</i>	2,44	2,11	1,90	1,82
C3	Media	25	30	32	33
	%	117	144	151	159
	<i>Sd</i>	0,58	0,58	0,58	0,58
	<i>CV%</i>	2,34	1,90	1,82	1,73

El valor de resistencia más alto obtenido para el concreto C3 a los 28 días fue de 33MPa, el valor más bajo para el concreto C2 y C1 a los 7 días fue de 24MPa. El coeficiente de variación más alto para el concreto C1 y C2 a los 7 días fue de 2,44%, estos resultados muestran una relación con la desviación estándar de no más del 10 %, por lo que los valores de resistencia del concreto son bien representativos. La evaluación superó el 100 % de resistencia promedio en MPa, el valor más alto fue 59% de C3 a los 28 días y el valor más bajo fue 13% de C1 y C2 a los 7 días. Este hecho también fue observado por S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, *et al.* [1], quienes encontraron que las fibras de polipropileno mejoraban las propiedades de resistencia a la compresión, sin embargo, por encima del 0,20% comienza a disminuir.

Se observa que para el diseño con $f'c= 2$ MPa, el porcentaje de resistencia aumentó significativamente a los 7, 14, 21 y 28 días para los diseños de 0,21% de fibra de polipropileno, diseño con 5% de fibra de acero y el diseño convencional. Los resultados de la comparación de la resistencia del concreto entre edades se muestran en la Figura 3, donde las barras verticales representan valores de resistencia del concreto, pudiéndose verificar que los valores de resistencia de todos los concretos aumentan con la etapa de madurez, y se observa un comportamiento representativo con adición de fibras.

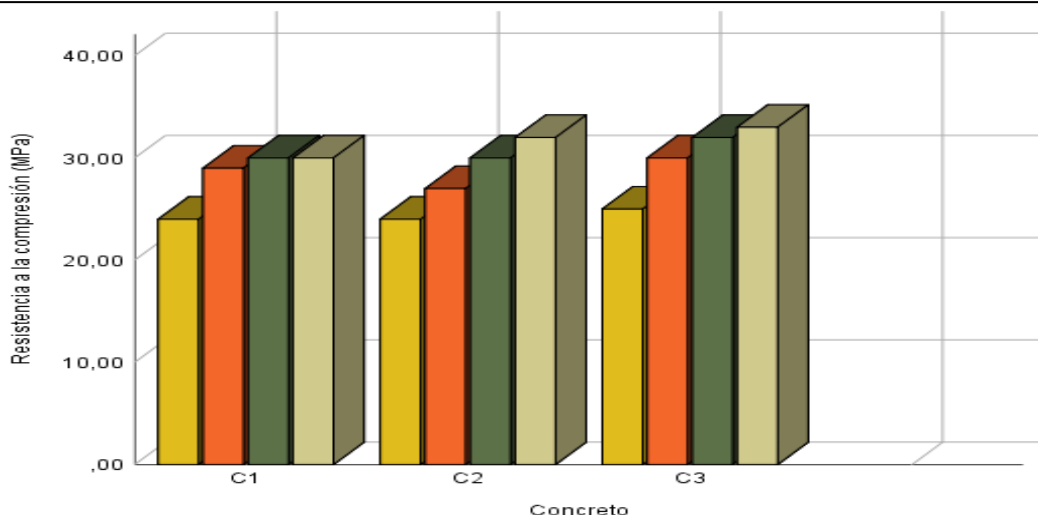


Figura 3. Resistencia a la compresión. Fuente: el autor

4.2. La Velocidad de Pulso Ultrasónico

La Tabla 4 muestra el valor de la *VPU*, el porcentaje de resistencia para el concreto y variación de los resultados.

Tabla 4. Resultado de las pruebas de Velocidad del Pulso Ultrasónico. Fuente: el autor

Velocidad de Pulso Ultrasónico <i>VPU</i> (m/s)					
C	Días	7	14	21	28
C1	Media	4,758	4,868	4,921	5,089
	%	121	133	137	146
	<i>Sd</i>	0,10	0,02	0,03	0,06
	<i>CV%</i>	2,12	0,33	0,61	1,22
C2	Media	4,651	4,710	4,762	4,877
	%	116	132	143	151
	<i>Sd</i>	0,02	0,02	0,03	0,07
	<i>CV%</i>	0,48	0,39	0,53	1,46
C3	Media	4,579	4,703	4,781	4,854
	%	121	144	154	157
	<i>Sd</i>	0,02	0,05	0,03	0,03
	<i>CV%</i>	0,35	1,06	0,53	0,64

El valor máximo de la *VPU* para el concreto C1 a los 28 días es igual a 5,089m/s una clasificación de calidad del concreto excelente. El valor mínimo para el concreto C3 a los 7 días es de 4,579m/s una clasificación excelente. A los 7 días, el mayor valor del coeficiente de variación del concreto fue del 2,12%. Estos resultados muestran una relación con la desviación estándar de no más del 10%, por lo tanto, tenemos valores de *VPU* bien representativos. La evaluación superó el 100 % de resistencia promedio en MPa, el valor más alto fue 57% de C3 a los 28 días y el valor más bajo fue 16% de C2 a los 7 días. En la investigación de S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, *et al.* [1] a modo de comparación los resultados de *VPU* mejoraron hasta que el volumen alcanzó el 0,20%, tras lo cual disminuyó

ligeramente con el 0,25% de polipropileno. En la Figura 4 se muestra la evolución de los resultados de la velocidad del pulso ultrasónico a través de las etapas de curado. Las barras verticales representan la *VPU*, sin embargo, los resultados obtenidos en cada diseño, son representativos.

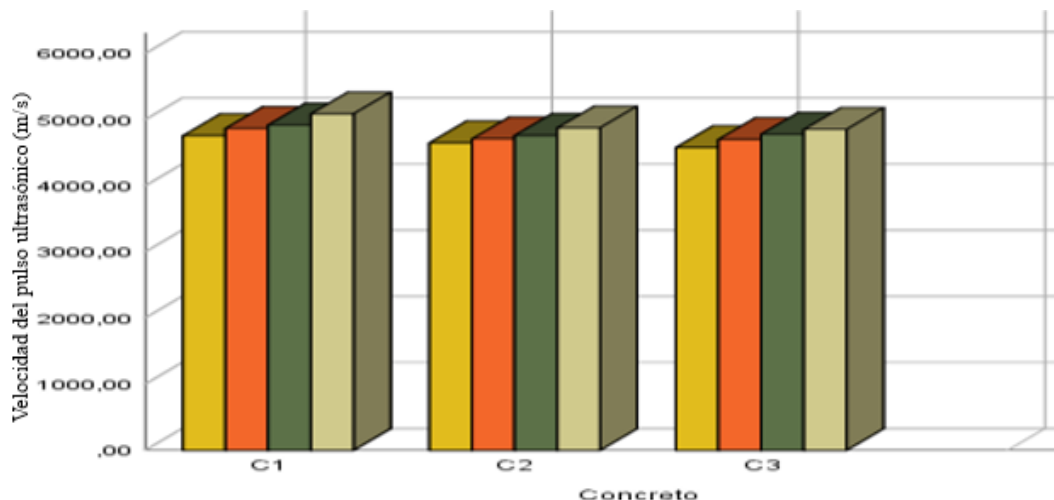


Figura 4. Resistencia a la compresión. Fuente: el autor

4.3. Número de rebote – Índice Esclerométrico

En la Tabla 5 muestra los valores *IE*, observándose el mayor valor de rebote es igual a 30 *IE* para el concreto C2 a los 28 días, mientras que el valor más bajo obtenido es de 24 *IE* para el concreto C2 y C3 a los 7 días. El concreto C1 tuvo el mayor valor de coeficiente de variación de 4,08% a los 28 días. Estos resultados muestran que la relación con la desviación estándar no supera el 10%, por lo que el valor de *IE* es bien representativo. La evaluación de datos supera el 100 % de resistencia promedio en MPa. El valor más alto es 57 % de C3 en 21 y 28 días y el valor más bajo es 14 % de C2 en 7 días.

Tabla 5. Resultado de las pruebas de número de rebote – Índice Esclerométrico. Fuente: el autor

		Índice Esclerométrico <i>IE</i>			
C	Días	7	14	21	28
C1	Media	25	25	27	28
	%	124	125	140	141
	<i>Sd</i>	0,00	0,58	0,58	1,16
	<i>CV%</i>	0,00	2,34	2,11	4,08
C2	Media	24	28	29	30
	%	114	135	149	152
	<i>Sd</i>	0,00	0,58	0,58	0,00
	<i>CV%</i>	0,00	2,09	1,97	0,00
C3	Media	24	26	29	29
	%	121	146	157	157
	<i>Sd</i>	0,58	0,58	0,58	0,58
	<i>CV%</i>	2,44	2,19	1,97	1,97

En la Figura 5 se muestra los valores de número de rebote para cada concreto. Las barras verticales representan el *IE*, y se puede comprobar que el valor de número de rebote de todos los concretos aumentó gradualmente con la madurez del concreto. Las lecturas de dureza de la superficie, representadas por los números de rebote, mostraron un aumento gradual en los resultados, al igual que los resultados de la resistencia a compresión del concreto.

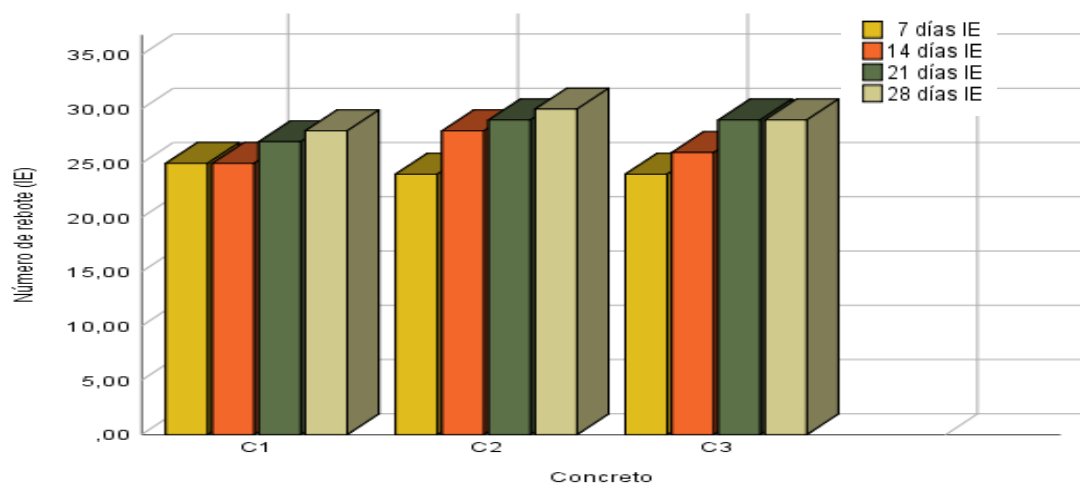


Figura 5. Número de rebote – Índice Esclerométrico. Fuente: el autor

4.4. Correlación entre *VPU* y $f'c$

Se realizó el estudio de confiabilidad entre *VPU* y $f'c$, a partir del software *Statgraphics Centurion XVI* para el concreto estudiado. Se desarrolló un análisis de regresión no lineal simple, comparado con ecuaciones: lineales, potencial, exponencial, logarítmica y polinómica de 2° grado. El coeficiente de determinación R^2 se utilizó para seleccionar la ecuación que mejor representaba los datos. La metodología fue observada analizada en otras investigaciones, como G. Valencia Elguera y M. A. Ibarra Navarro [30], y la elaboración de curvas de correlación usado para los concretos C1, C2 y C3 para cada diseño de concreto, teniendo como fin establecer una correlación confiable y representativa. Las curvas presentadas según diferentes correlaciones para un coeficiente de determinación R^2 , se interpretaron según A. P. Assis, T. J. Espósito, M. G. Gardoni *et al.* [31].

La relación correspondiente de una ecuación polinómica de 2° grado fue la que representó mayor coeficiente de determinación $R^2= 0,714$ entre las ecuaciones para concreto C1. Para concreto C2, el coeficiente de determinación $R^2= 0,8936$. Para concreto C3, el coeficiente de determinación de $R^2= 0,9369$. El modelo mostro una cifra comparable a las publicadas por investigadores anteriores para la *VPU*, por ejemplo, el valor de R^2 es bastante similar al que encontraron S. Hedjazi y D. Castillo [2]. El coeficiente de determinación R^2 del modelo de T. Lee y J. Lee [9], que llegó a ser de 0,90, demostró una confiabilidad adecuada. En las Figura

6, 7 y 8 se presentan las curvas de correlación de confiabilidad obtenidas para un intervalo de confianza del 95%, se utilizó el criterio de información según D. Lootens *et al.* [12].

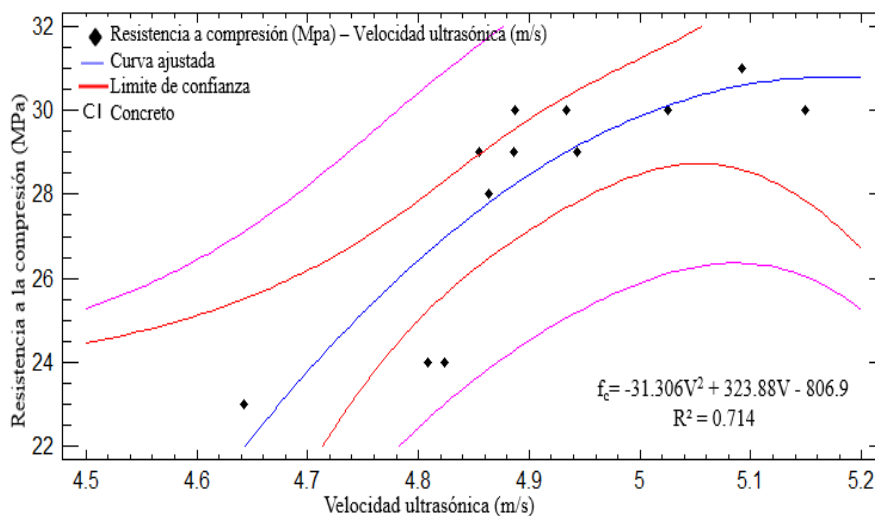


Figura 6. Curvas de correlación entre f'_c y VPU del concreto convencional. Fuente: el autor

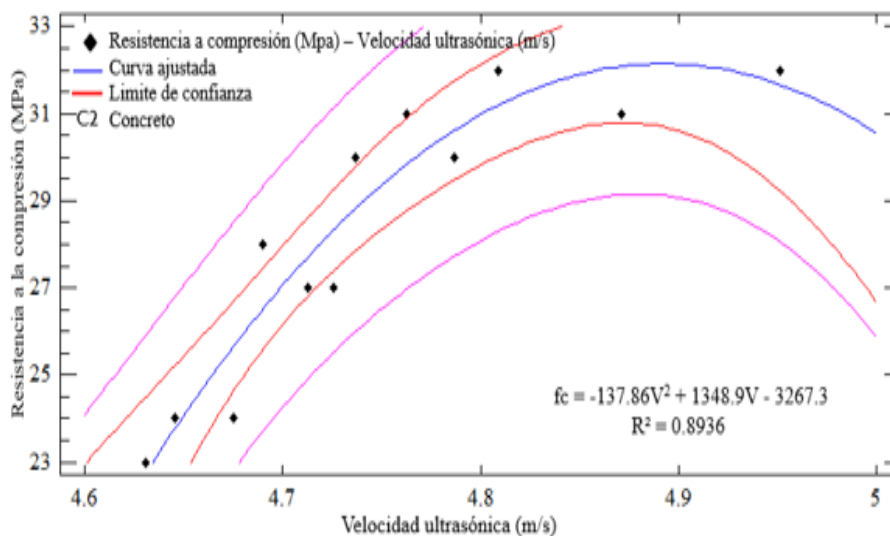


Figura 7. Curvas de correlación entre f'_c y VPU del concreto con fibra de acero 5%. Fuente: el autor

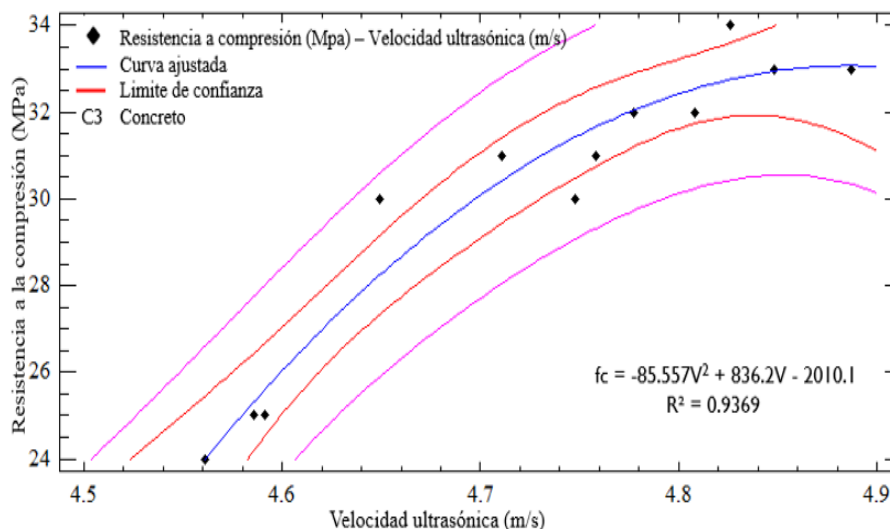


Figura 8. Curvas de correlación entre f'_c y VPU del concreto con polipropileno 0,21%. Fuente: el autor

4.5. Correlación entre IE y $f'c$

Al igual como se desarrolló la correlación $f'c * VPU$, se realizó el análisis de la correlación de $f'c * IE$ para los concretos C1, C2 y C3, la finalidad era presentar la ecuación que mejor se correlaciona a la resistencia del concreto. La curva correspondiente fue a una ecuación polinómica de tercer grado, representando mayor coeficiente de determinación $R^2= 0,5192$ entre las ecuaciones para concreto C1. Para concreto C2 el coeficiente de determinación $R^2= 0,9449$, concreto C3 el coeficiente de determinación $R^2= 0,946$. A modo de comparación [32], para cuatro tipos de concreto en unas probetas cilíndricas de 150x300mm, se encontró la correlación entre $f'c * IE$ en la ecuación polinómica con el valor $R^2= 0,61$, indicado que el modelo exhibe una correlación del 61%. En las Figuras 9, 10 y 11 se presentan las curvas de correlación de confiabilidad obtenidas a un intervalo de confianza del 95%.

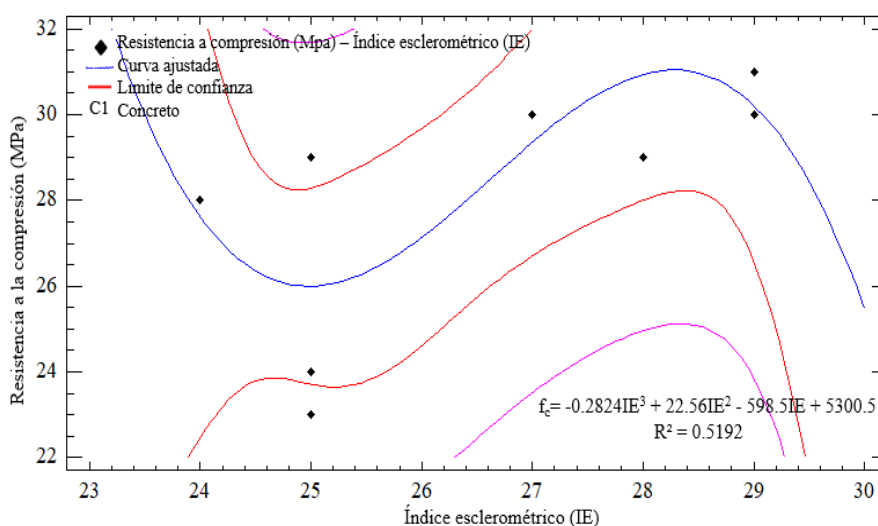


Figura 9. Curvas de correlación entre $f'c$ e IE del concreto convencional. Fuente: el autor

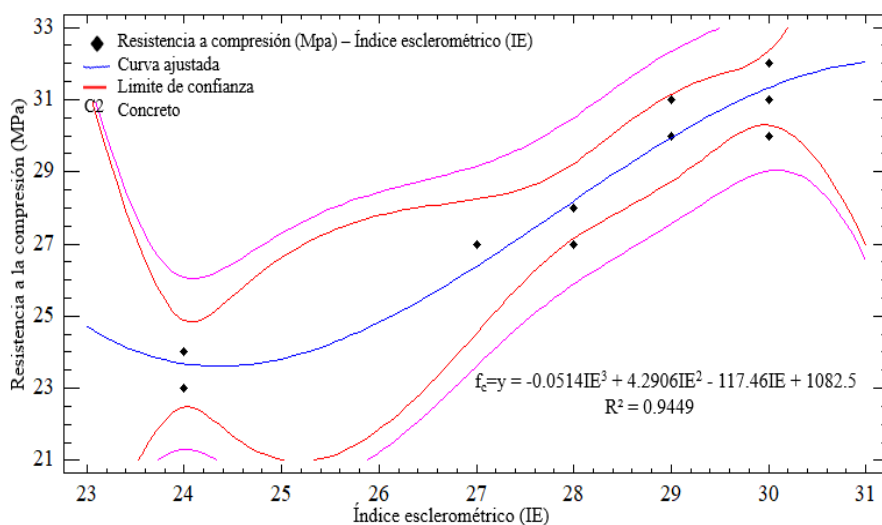


Figura 10. Curvas de correlación entre $f'c$ e IE del concreto con fibra de acero 5%. Fuente: el autor

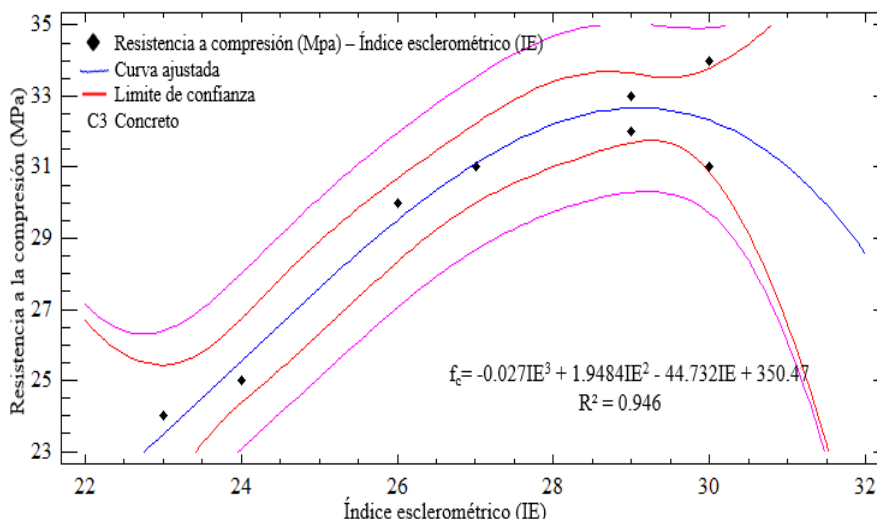


Figura 11. Curvas de correlación entre f_c e IE del concreto con fibra de polipropileno 0,21%. Fuente: el autor

4.6. Combinación del Método de SonReb

Se propuso un estudio de análisis estadístico de regresión lineal múltiple empleando *Statgraphics Centurion XVI* para obtener la línea de regresión y el modelo de R^2 , para el análisis de correlación a fin de estimar f_c . Se consideró como variable dependiente f_c y como variables independientes la VPU y el IE . Se utilizó la ecuación de mínimos cuadrados sugerido según N. R. Chandak y K. Hemraj R en el método *SonReb* [33], tal como se describe en la Tabla 6.

Tabla 6. Correlación múltiple. Fuente: el autor

C	Ecuaciones	R^2
C1	$f_c = -48,4189 + 14,3756*VPU + 0,225288*IE$	0,648485
C2	$f_c = -34,0491+6,89822*VPU+1,06425*IE$	0,945721
C3	$f_c = -62,6706+15,871*VPU+0,648367*IE$	0,919646

El análisis se basó en correlación múltiple $f_c * VPU * IE$, obtenidos a través de tres métodos. La ecuación proporcionada por M. Vinício de Camargo y V. J. Ferrari [28] tiene un valor R^2 de 0,901 según el enfoque *SonReb*, que es similar al estudio propuesto.

4.7. Análisis de los Resultados de Correlación de las Ecuaciones para determinar f_c

Se describe la variación espacial de la resistencia del concreto en MPa a partir del promedio de tres resultados para ecuaciones analíticas generándose gráficos de series de tiempos, demostrándose que los resultados analíticos son muy similares al resultado experimental. Se observó que los resultados analíticos de $f_c * VPU$ se ajustan a la ecuación polinómica de segundo grado, mientras que la ecuación polinómica de tercer grado se ajusta para $f_c * IE$. La metodología de correlación múltiple o *SonReb* se ajusta para $f_c * VCU * IE$ por mínimos

cuadrados, fue excelente para el diseño de concreto C2 y C3 en la etapa de madurez.

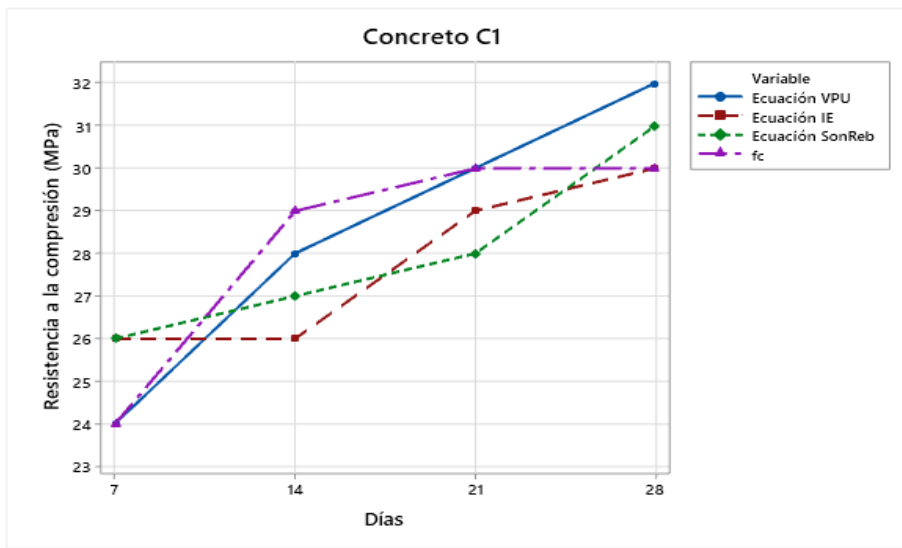


Figura 11. Análisis de la $f'c$ mediante modelos de ecuaciones para concreto convencional. Fuente: el autor

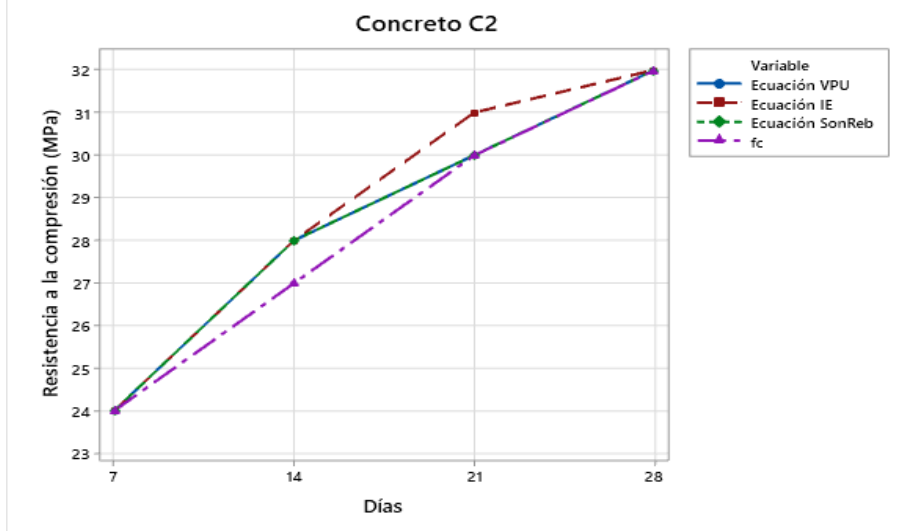


Figura 12. Análisis de la $f'c$ mediante modelos de ecuaciones para concreto con adición de fibra de acero 5 %. Fuente: el autor

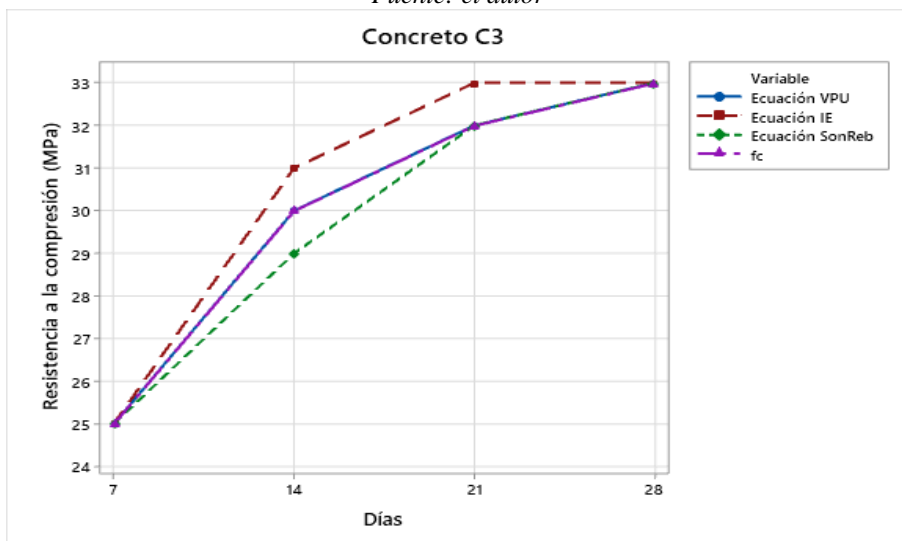


Figura 13. Análisis de la $f'c$ mediante modelos de ecuaciones para concreto con adición de fibra de de polipropileno 0,21%. Fuente: el autor

La $f'c$ mostrada aumenta y disminuye con el número de días, las curvas de correlación simple y múltiple fueron agrupadas para verificar la precisión de cada modelo de ecuación propuesto en este trabajo. En las Figura 11, 12 y 13 se muestran los resultados analíticos en las diferentes etapas de curado del concreto.

Para analizar el nivel de precisión de cada modelo de la ecuación, se calculó la diferencia porcentual existente para estimar la resistencia del concreto. Se pudo observar que la curva de correlación simple elaborada para $f'c * IE$ presenta error de representación del 13% a 1 dato. La ecuación de correlación múltiple $f'c * IE x VPU$ y $f'c * VPU$ presentan un porcentaje de error del 12% para el concreto C1 a 3 datos. La correlación de los datos analíticos estuvo dentro del rango de error para concreto C2 y C3. El error de estimación para cada modelo de ecuación se validó dentro del $\pm 10\%$, como se muestra en las Figuras 14, 15 y 16.

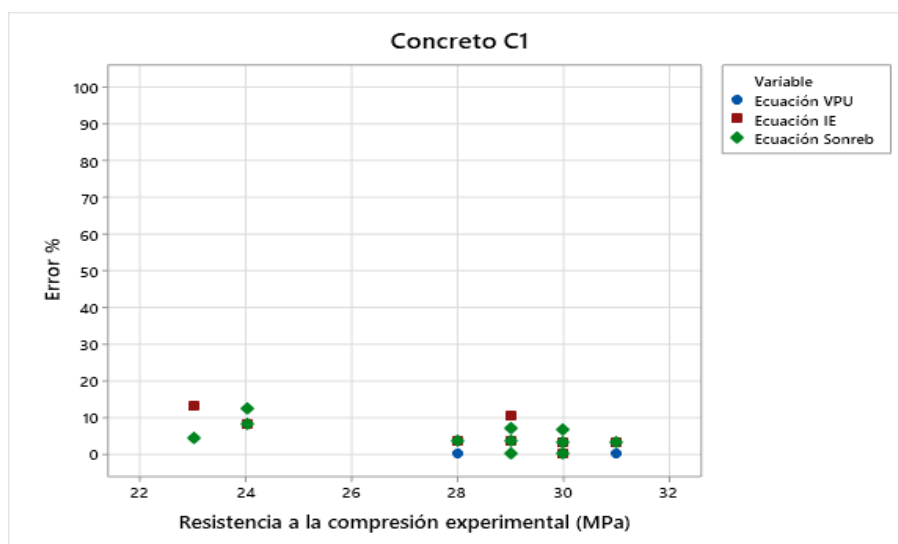


Figura 14. Estimación de $f'c$ a partir del porcentaje de error de ecuaciones analíticas para concreto convencional. Fuente: el autor

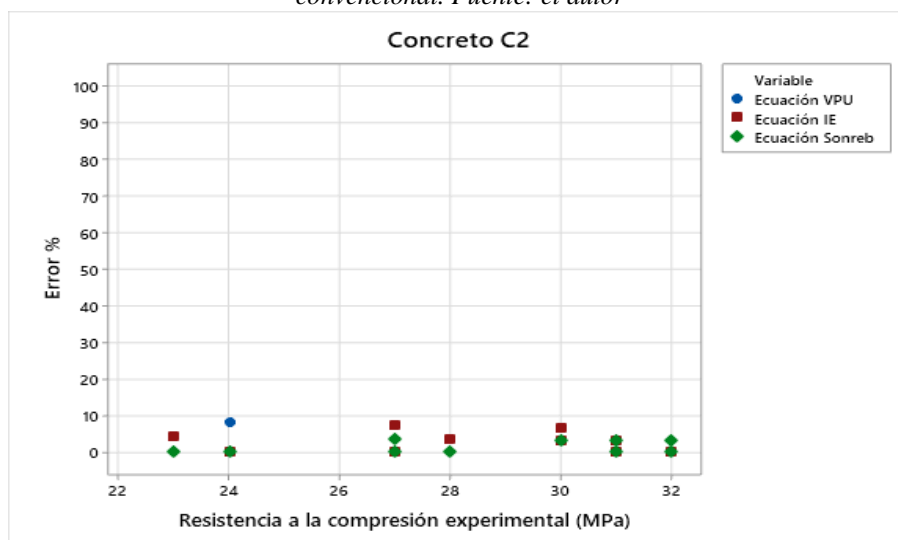


Figura 15. Estimación de $f'c$ a partir del porcentaje de error de ecuaciones analíticas para concreto con adición fibra de acero 5%. Fuente: el autor

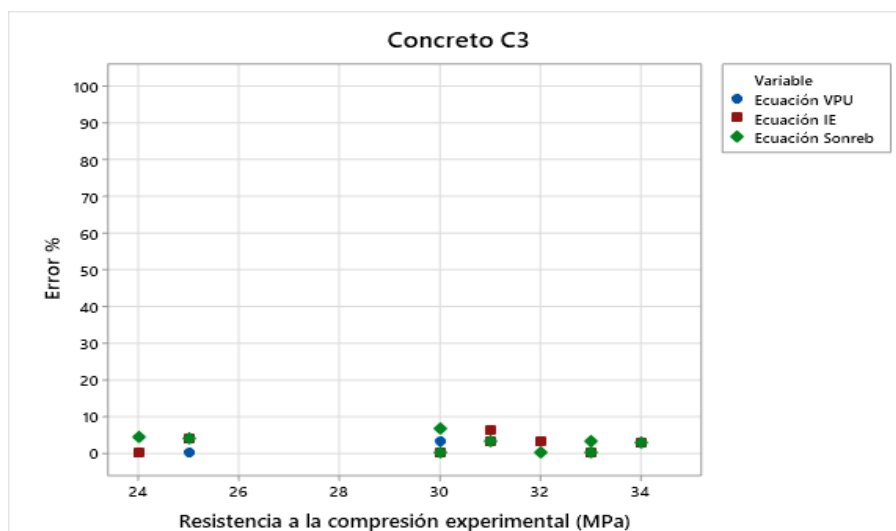


Figura 16. Estimación de $f'c$ a partir del porcentaje de error de ecuaciones analíticas para concreto con adición fibra de polipropileno 0,21%. Fuente: el autor

La relación entre la estimación analítica y la experimental de $f'c$ analítica / $f'c$ experimental ($f'c$ A/ $f'c$ E) muestra la relación de los resultados: la relación de correlación simple ($f'c$, A/ $f'c$, E) de $IE = 1,009$ para el concreto C1 muestra una sobreestimación, según los resultados analíticos. La relación ($f'c$, A/ $f'c$, E) de $VPU = 0,997$ señala una subestimación. El resultado de correlación múltiple muestra la relación ($f'c$, A/ $f'c$, E) = 0,994 está subestimado. La correlación de $f'c * IE$ tuvo un coeficiente de variación más bajo de $CV = 6,47\%$. La relación de $f'c * VPU$ tuvo un $CV = 8,41\%$. La ecuación de correlación múltiple mostró un $CV = 8,28\%$ para los concretos C1.

El resultado del concreto C2 evaluado muestra la relación ($f'c$, A/ $f'c$, E) de $IE = 0,997$ y $VPU = 0,994$. La ecuación de correlación múltiple muestra la relación ($f'c$, A/ $f'c$, E) = 1,003. La correlación entre $f'c * IE$ tuvo un CV del 11,56%, mientras que la correlación entre $f'c * VPU$ muestra CV del 10,55%. La ecuación de correlación múltiple mostro un CV más bajo del 11,00%, para el concreto C2.

El concreto C3 muestran la relación ($f'c$, A/ $f'c$, E) de $IE = 0,984$ y $VPU = 1,000$. La estimación de correlación múltiple ($f'c$, A/ $f'c$, E) = 0,997. La ecuación de correlación simple para $f'c * IE$ el coeficiente de variación $CV = 10,96\%$ y $11,28\%$ para $f'c * VPU$. La ecuación de correlación múltiple mostró el CV más bajo, del 10,36%. Los valores de CV de 10,5%, 8,3% y 11,1% encontrados según S. Hedjazi y D. Castillo [2] son muy semejantes a nuestra ecuación propuesta.

5. CONCLUSIONES

En cuanto al procedimiento estadístico, el uso del coeficiente de determinación se mostró

adecuado para la elección de curvas de relación, y para representar mejor la correlación estudiada para la evaluación. Este estudio presentó métodos no destructivos para estimar la resistencia del concreto a partir de curvas de correlación utilizando la *VPU* y el *IE*. Se realizaron ensayos a 7, 14, 21 y 28 días, para el desarrollo experimental y analítico, concluyéndose:

La mejor correlación entre *VPU* y $f'c$ se obtuvo mediante la ecuación polinómica de 2° grado, el coeficiente de determinación del concreto C1, mostró $R^2 = 0,714$. Para concreto C2, $R^2 = 0,8936$. Para el concreto C3, $R^2 = 0,9369$. La *VPU* fue clasificada como una fuerte dependencia para la correlación, y una buena confiabilidad del instrumento ultrasónico en cada diseño de concreto, la calidad de los concretos fue clasificada como excelente por el método de ultrasonido. La correlación de *IE* y $f'c$ se obtuvo mediante la ecuación polinómica de 3° grado con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,5192$ para el concreto C1. Para el concreto C2, $R^2 = 0,9449$, para el concreto C3 mostró $R^2 = 0,946$.

Se estableció el método *SonReb* para estimar la resistencia del concreto. Los resultados de la prueba de correlación múltiple $f'c*VPU*IE$ arrojaron un valor R^2 de 0,648485 para el concreto C1. Para el concreto C2, presentó el valor de $R^2 = 0,945721$. El concreto C3, mostró un $R^2 = 0,919646$.

El porcentaje de error de las ecuaciones analíticas se mantuvo dentro de $\pm 10\%$. La estimación de la resistencia del concreto mediante la correlación múltiple presentó valores con un error porcentual menor de la correlación simple. Mostrando una buena confiabilidad analítica para la estimación de la resistencia del concreto.

6. AGRADECIMIENTOS

A INGEOCONTROL S.A.C. por realizar las pruebas de resistencia a la compresión, índice esclerométrico y velocidad de pulso ultrasónico.

7. FINANCIAMIENTO

Propio de los autores.

8. CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

9. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Investigación, H.J.; redacción, H.J.; supervisión, R.Y.

10. REFERENCIAS

- [1] S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, R. Roychand, y G. Zhang, “Evaluación preliminar de la viabilidad del uso de fibras de polipropileno de mascarillas faciales de un solo uso COVID-19 para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón,” *ScienceDirect*, vol. 296, no. 0, pp. 1–8, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126460
- [2] S. Hedjazi y D. Castillo, “Relaciones entre resistencia a compresión y UPV en hormigón armado con diferentes tipos de fibras,” *Heliyon*, vol. 6, no. 3, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03646
- [3] D. S. Masias Alburqueque, “Experimental study to evaluate the correlation of strength results, between breakage tests y ultrasonic pulse velocity in simple concrete,” Univ. Nac. de Piura, Perú, 2021
- [4] ACI 228.1R, “Métodos in situ para estimar la resistencia del concreto,” in *Instituto Americano del Concreto*, USA, 2013.
- [5] M. D. Machado, L. C. D. Shehata, y I. A. E. M. Shehata, “Curvas de correlación para caracterizar hormigones utilizados en Río de Janeiro por medio de ensayos no destructivos,” *Ibracon Estructuras e Mater.*, vol. 2, no. 2, pp. 100–112, 2009, doi: 10.1590/S1983-41952009000200001
- [6] A. Jain, A. Kathuria, A. Kumar, Y. Verma, y K. Murari, “Uso combinado de ensayos no destructivos para la evaluación de la resistencia del hormigón en la estructura,” *Procedia Eng.*, vol. 54, no. 0, pp. 241–251, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.022.
- [7] K. Seonguk y y S. Hong, “Estimación de la resistencia a la compresión y el tamaño de la barra de hormigón reforzado con fibras de acero utilizando métodos de ensayo no destructivos impulsados por ondas de tensión,” *Rev. Int. Concreto Estructuras y Mater.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–11, 2019, doi: 10.1186/s40069-019-0363-y.
- [8] K. Güçlüer, “Investigación de los efectos de las propiedades texturales de los agregados en la resistencia a la compresión (CS) y la velocidad del pulso ultrasónico (UPV) del concreto,” *J. Build. Eng.*, vol. 27, no. 0, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1016/j.job.2019.100949.
- [9] T. Lee y J. Lee, “Modelo de predicción del tiempo de fraguado y de la resistencia a la compresión del hormigón mediante ensayos no destructivos de velocidad de pulso ultrasónico a edades tempranas,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, no. 0, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119027.

- [10] J. A. Leòn Ramirez, J. Lizarazo Marriaga, y J. Carrillo, “Evolución del daño material para concreto simple y reforzado con fibra de acero bajo carga de compresión no confinada mediante pruebas ultrasónicas dinámicas,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 10, pp. 5667–5675, 2018, doi: 10.1007/s13369-018-3301-4.
- [11] M. Benaicha, O. Jalbaud, A. Hafidi Alaoui, y Y. Burtschell, “Correlación entre el comportamiento mecánico y la velocidad ultrasónica del hormigón reforzado con fibras,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, no. 0, pp. 702–709, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.047.
- [12] D. Lootens *et al.*, “Mediciones continuas de resistencia de pastas de cemento y hormigones por el método de reflexión de ondas ultrasónicas,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 242, no. 0, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117902.
- [13] G. Pia, B. J. Lee, S.-H. Kee, T. Oh, y Y.-Y. Kim, “Evaluación del módulo elástico dinámico del hormigón mediante mediciones de velocidad de onda de corte,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2017, no. 0, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1155/2017/1651753.
- [14] ASTM C136, “Método de prueba estándar para análisis de tamiz de agregados finos y gruesos,” in *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*, USA, 2019
- [15] Per Fibermix, “Monofilamentos de fibra de polipropileno,” in *Aditivos especiales s.a.c.*, Perú, 2021
- [16] ASTM C1116, “Especificación estándar para hormigón reforzado con fibras,” in *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*, USA, 2015
- [17] Fibra Metálica Z, “Fibra para concreto,” in *Z Aditivos*, Perú, 2019
- [18] ASTM A820, “Especificación estándar para fibras de acero para hormigón reforzado con fibras,” in *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*, USA, 2022
- [19] ACI 211.1, “Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal , pesado y en masa,” in *Instituto Americano del Concreto*, USA, 2002
- [20] ASTM C192, “Práctica estándar para fabricar y curar especímenes de prueba de concreto en el laboratorio,” in *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*, USA, 2019.
- [21] ACI-318, “Requisitos de reglamento para concreto estructural,” in *Instituto Americano del Concreto*, USA, 2005

- [22] ASTM C 597, “Método de prueba estándar para la velocidad del pulso a través del concreto,” in *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*, USA, 2016
- [23] Pundit lab, “Manual de operación instrumento ultrasónico,” in *Procep SA*, Suiza, 2021
- [24] R. G. Solís Carcaño, É. I. Moreno, y W. R. Castillo Pak, “Predicting concrete strength based on ultrasonic pulse velocity y an index of aggregate quality,” *Ingeniería*, vol. 8, no. 2, pp. 41–52, 2004, doi: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780204>
- [25] ASTM C805/C805M-18, “Método de prueba estándar para el número de rebote de hormigón endurecido,” in *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*, USA, 2018
- [26] Modelo N, “Manual de operación martillo para ensayos de hormigón,” in *Procep SA*, Suiza, 2017
- [27] ASTM C39/C39M-18, “Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón,” in *Sociedad Americana para Pruebas y Materiales*, USA, 2018
- [28] M. Vinício de Camargo y V. J. Ferrari, “Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón mediante ensayos no destructivos (END),” *Revistamateria*, vol. 26, no. 3, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1590/S1517-707620210003.13047
- [29] R. Hernández Sampieri y C. Mendoza, “Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta,” 1st ed., Mc Graw Hill, Ed. México, 2018
- [30] G. Valencia Elguera y M. A. Ibarra Navarro, “Experimental study to determine correlation patterns between compressive strength y ultrasonic pulse velocity in plain concrete.,” Pontif. Univ. Católica del Perú, 2013
- [31] A. P. Assis, T. J. Espósito, M. G. Gardoni, y P. D. E. A. Silva, “Métodos Estadísticos e probabilísticos em geotecnia,” in *Universidade de Brasília*, Brasília, 2002
- [32] J. Vicentini Mantovani y V. J. Ferrari, “Esclerometría aplicada a ensayos cilíndricos y de hormigón para la estimación de la resistencia a la compresión mediante curvas de correlación,” *Rev. técnico-científica*, vol. 0, no. 0, pp. 1–20, 2019, doi: K8284871U6.
- [33] N. R. Chandak y K. Hemraj R, “Método SonReb para la Evaluación de la Resistencia a la Compresión del Concreto,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 810, no. 0, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1088 / 1757-899X / 810/1/012071.