



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), noviembre-diciembre 2024,
Volumen 8, Número 6.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6

EVOLUCIÓN DE LAS MICROFISURAS EN LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DEL CONCRETO EN PAVIMENTOS RÍGIDOS EVALUADO CON VELOCIDAD DE ULTRASONIDO

**EVOLUTION OF MICROCRACKS IN TENSILE STRENGTH OF
CONCRETE IN RIGID PAVEMENTS EVALUATED WITH
ULTRASOUND VELOCITY**

Roberto Bonifacio Cáceres Flores
Universidad Nacional del Santa

Evolución de las microfisuras en la resistencia a la tracción del concreto en pavimentos rígidos evaluado con velocidad de ultrasonido

Roberto Bonifacio Cáceres Flores¹

rcaceresf@unsa.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0001-7377-2456>

Universidad Nacional del Santa

Perú

RESUMEN

El deterioro de los pavimentos rígidos se observa al final de su periodo de vida, y se manifiesta principalmente mediante fisuras en las losas, por el uso dinámico, estas fisuras iniciales se magnifican, medir estos cambios previos a este deterioro es de vital importancia para medidas oportunas de rehabilitación. Por ello, ensayos no destructivos con fines de evaluar el concreto a flexión aplicando velocidad de ultrasonido es una alternativa, básicamente por el menor tiempo de evaluación, gran cantidad de mediciones y la inalterabilidad de las estructuras evaluadas.

A la aplicación de carga, a partir de las micro fisuras de fábrica del concreto, se genera una zona de proceso de micro fisura, en donde las tensiones se magnifican sobre todo el borde la misma, tal que, al vencer la energía específica del conjunto concreto, sobre todo en la zona de contacto pasta – agregado, se inician o continúan las micro fisuras.

Conocer la relación entre la aplicación de la carga y la evolución de la micro fisura es el objetivo principal de esta investigación y es importante para poder monitorear en qué grado de deterioro se puede encontrar un concreto, ello se puede evaluar mediante la velocidad de ultrasonido en medios no metálicos.

Se han efectuado vigas prismáticas para ensayo, apegados a los estándares de fabricación y de ensayo, en el proceso mismo de ensayo se ha adecuado la forma de lectura para conseguir los objetivos planteados, con variantes de carga controlada.

Los resultados de laboratorio en vigas prismáticas indican un reducido rango de aplicación de carga en la cual se produce la falla del concreto a flexión, en general, es posible encontrar una correlación de carga con la velocidad de ultrasonido, la evolución de las micro fisuras es de tendencia lineal, aunque se observa dos zonas: la primera hasta el orden del 80% de aplicación de la carga de falla en donde la pendientes baja y la una segunda zona posterior al 80% en donde la tendencia es lineal con incremento de pendiente y/o tendencia a correlación cuadrática, en esta segunda zona puede asumirse que se produce la generalización de dichas micro fisuras.

Palabras clave: velocidad de ultrasonido, flexión, microfisura, evolución de microfisura

¹ Autor principal

Correspondencia: rcaceresf@unsa.edu.pe

Evolution of microcracks in tensile strength of concrete in rigid pavements evaluated with ultrasound velocity

ABSTRACT

The deterioration of rigid pavements is observed at the end of their lifespan and is mainly manifested through cracks in the slabs. Due to dynamic use, these initial cracks become more pronounced. Measuring these changes prior to this deterioration is of vital importance for timely rehabilitation measures. Therefore, non-destructive testing aimed at evaluating concrete flexural strength using ultrasonic velocity is an alternative, primarily because of the shorter evaluation time, the large number of measurements, and the non-alteration of the evaluated structures.

When a load is applied, microcracks already present in the concrete begin to propagate. These microcracks create a stress concentration zone, particularly at their edges. When the specific energy of the concrete, especially at the paste-aggregate interface, is exceeded, new microcracks initiate or existing ones continue to propagate.

Understanding the relationship between load application and microcrack evolution is the primary objective of this research. This knowledge is crucial for monitoring the degree of deterioration in concrete, which can be evaluated through ultrasonic velocity in non-metallic media.

Prismatic beams were fabricated for testing, adhering to manufacturing and testing standards. During the testing process, the reading method was adjusted to achieve the stated objectives, with variations in controlled load.

Laboratory results from prismatic beams indicate a narrow range of load application where concrete fails in flexion. Generally, it is possible to establish a correlation between load and ultrasonic velocity. The evolution of microcracks follows a linear trend, with two distinct zones: the first up to approximately 80% of the failure load, where the slope decreases, and a second zone after 80%, where the trend is linear with an increasing slope and/or tends toward a quadratic correlation. In this second zone, the generalization of microcracks likely occurs.

Palabras clave: ultrasound velocity, deflection, microcrack, microcrack evolution

Artículo recibido 02 diciembre 2024

Aceptado para publicación: 28 diciembre 2024



INTRODUCCIÓN

La durabilidad y resistencia de los pavimentos rígidos son aspectos cruciales en la ingeniería civil, especialmente en infraestructuras sometidas a cargas dinámicas como carreteras y autopistas. A medida que los pavimentos envejecen, se vuelven más susceptibles a la aparición de fisuras, que pueden acelerar su deterioro y disminuir su vida útil. Comprender cómo se desarrollan y evolucionan estas microfisuras bajo la aplicación de cargas es fundamental para anticipar fallas y diseñar estrategias de mantenimiento efectivas.

La tecnología de ultrasonido es una herramienta prometedora para evaluar el concreto en pavimentos rígidos de manera no destructiva. Permite medir la propagación de ondas sonoras, revelando la presencia y evolución de microfisuras sin alterar el pavimento, ideal para monitoreo continuo.

Esta investigación busca establecer la relación entre la carga aplicada y la evolución de microfisuras en pavimentos, usando la velocidad de ultrasonido como indicador, y se enfoca en cómo estas microfisuras evolucionan hasta convertirse en macrofisuras que pueden afectar la integridad estructural.

El estudio de la propagación de microfisuras usualmente es analizado con el uso de la mecánica de la fractura y su aplicación a los medios cuasi frágiles como el concreto, la tecnología del ultrasonido puede aportar y/o validar los resultados de dicha mecánica de la fractura.

METODOLOGIA

Para el presente trabajo se utilizarán los estándares y siguientes normativas:

- ASTM C31: Standard practice for making and curing concrete testing test specimens in the field.
- ASTM C33: Standard specification for concrete aggregates
- ASTM C192: Standard practice for making and curing concrete testing specimens in the laboratory.
- RNE E-060: Norma técnica peruana E-060 Concreto Armado.
- ASTM C 597 – 16 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- ASTM C 293-02 Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)

- ASTM C 78-02 Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third Center-Point Loading)

El estudio investigó la evolución de microfisuras en el concreto y su impacto en la resistencia a la tracción, utilizando la velocidad de ultrasonido como herramienta de evaluación. La microestructura del concreto endurecido, que incluía microporos y microfisuras, está relacionada directamente con la relación agua/cemento, por lo que se analizó varias relaciones. Se prepararon muestras de concreto controlando la calidad de los agregados y se diseñó mezclas para resistencias estructurales de 350, 280 y 210 kg/cm² a los 28 días. Se fabricaron 23 vigas prismáticas para realizar ensayos de flexión y compresión. Los ensayos de flexión se llevaron a cabo con incrementos de carga hasta alcanzar la resistencia de diseño o la falla del concreto.

Cuadro 1. Cuadro de distribución de muestras

		210 kg/cm2	280 kg/cm2	350 kg/cm2	Total
Ensayo	Ensayo para probetas	3	3	3	9
Deformación	Carga controlada con aplicación en el centro	7	7	7	17

Se emplearon técnicas de observación para registrar la propagación de microfisuras durante los ensayos, los resultados se analizaron mediante regresión para establecer una correlación entre la carga aplicada y la propagación de las microfisuras.

La población de la investigación incluyó concretos estructurales para pavimentos rígidos con resistencias de 210, 280 y 350 kg/cm², se realizaron 9 ensayos de compresión y 18 de flexión. Las técnicas de recolección de datos incluyeron registros de laboratorio y observaciones directas. El procedimiento de carga siguió normas nacionales (NTP 339.078:2012) e internacionales (ASTM C78:2002, ASTM C283).

El análisis de los resultados buscó correlacionar la aplicación de carga con la propagación de microfisuras en el concreto.

Figura 1. Fabricación del concreto



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para poder hallar la correlación indicada primero se busca el procedimiento más adecuado para cuantificar la variación de la velocidad de ondas de ultrasonido y segundo se evalúa con dicho procedimiento las vigas prismáticas.

Diseño de mezclas

Con fines de la presente investigación, los agregados son seleccionados y cumplen las especificaciones técnicas, aunque ello no es materia de investigación, si se analizan los agregados más usados en la localidad de Arequipa.

Otro aspecto con fines de correlación y trazabilidad entre el concreto en laboratorio y los que corresponden a la macro estructura o estructuras reales es que los trabajos de laboratorio están referenciados principalmente a los siguientes estándares:

- ASTM C31: Standard practice for making and curing concrete testing test specimens in the field.
- ASTM C33: Standard specification for concrete aggregates
- ASTM C192: Standard practice for making and curing concrete testing specimens in the laboratory.
- RNE E-060: Norma técnica peruana E-060 Concreto Armado.

Estas son las principales referencias normativas, es necesario observar las indicaciones y criterios de la normatividad con fines de tener trazabilidad de los resultados.

Especímenes de ensayo

Para los ensayos de flexión el tamaño estándar las vigas son de 15 cm* 15 cm* 50 cm, en función del tamaño máximo nominal de agregado grueso puede ser de 10cm*10cm*40cm, el análisis del agregado grueso utilizado en la investigación es menor a 1", por tal motivo se fabrica los prismas de 10cm*10cm*40cm dado que el TMN es de $\frac{3}{4}$ ". Utilizar tamaño reducido, sin afectar el comportamiento mecánico, es conveniente desde el punto de vista que a menor longitud estamos reduciendo la probable de atenuación y absorción con fines de concentrar la variación de velocidad en la parte central de la viga en donde se espera que ocurran las micro fisuras.

Figura 2. Fabricación de prismas para flexión



Curado de prismas y cilindros de concreto

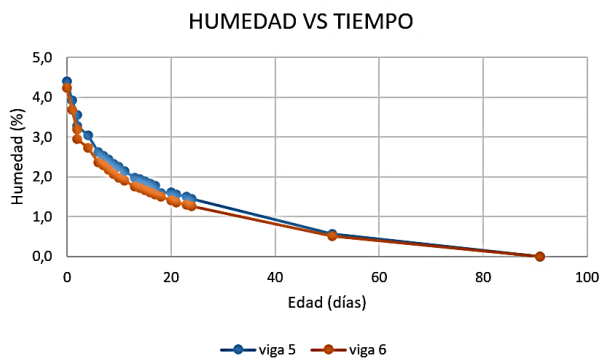
El concreto se evalúa a los 28 días, en concordancia con la norma ASTM C192 para el proceso de curado. La microestructura del concreto está en función del proceso de curado, por lo que es crucial seguir la normativa para asegurar uniformidad de las vigas. Es importante ensayar las muestras después de sacarlas de la poza o cuando estén secas, ya que la humedad puede afectar la medición de las microfisuras.

Al respecto dos apreciaciones, la primera es que el agua o la humedad hacen que se incremente el volumen de la masa de concreto y la segunda es que el agua parcialmente presente en el concreto genera tensiones en la transición del concreto seco y húmedo.

Análisis de humedad de las muestras

La evaluación de la humedad tiene por objetivo medir la variación en la velocidad de ultrasonido en muestras saturadas y su cambio a medida que pierden humedad. La humedad relativa en promedio es del orden de 20% en la zona investigación. En vigas de 10x10x40 cm, la humedad de saturación varía entre 4% y 4.5%, y se monitorea continuamente hasta 30 días. El gráfico siguiente se muestra esta disminución.

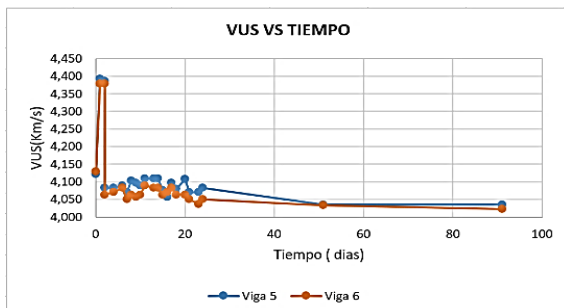
Figura 3. Variación de humedad



Humedad y velocidad de ultrasonido

La naturaleza de las ondas ultrasónicas indica que solo se propagan en medios que presentan módulo de elasticidad, en ese sentido el efecto no debería ser significativo en la velocidad de las ondas. En las mediciones efectuadas se ha observado que en promedio el agua incrementa en 2% la velocidad de ultrasonido, ello podría atribuirse a que el agua al aumentar el volumen del concreto también lo hace de sus vacíos internos y por ello se observa un incremento de la velocidad de ultrasonido.

Figura 4. Variación de velocidad

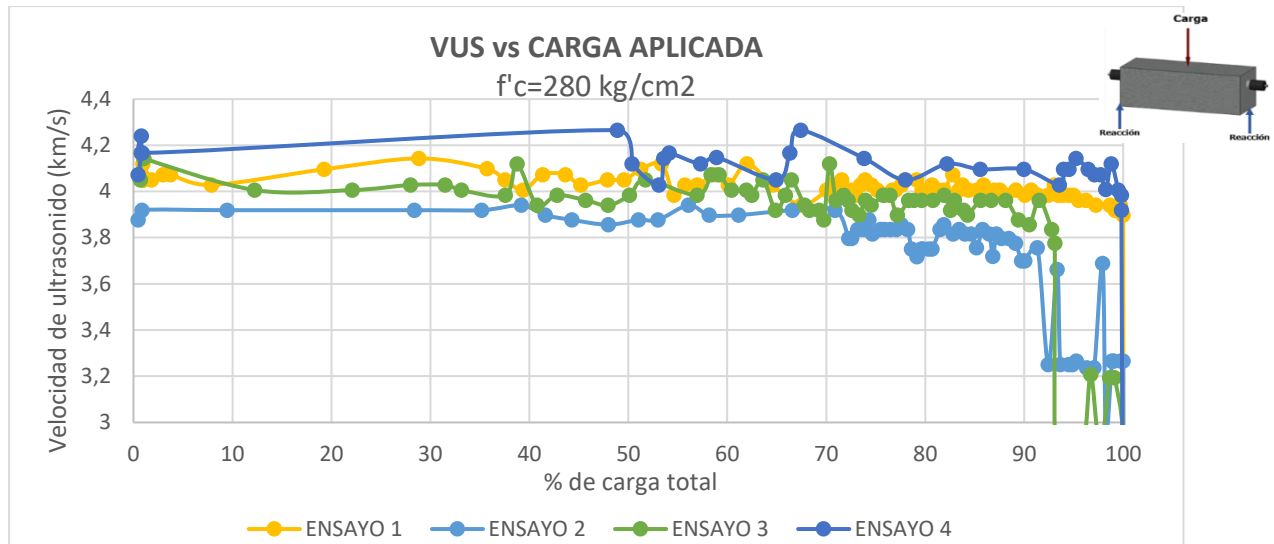


Ensayos preliminares Carga-VUS (velocidad de ultrasonido)

- Medición en los extremos de la viga con carga controlada

En los ensayos preliminares, se midió la velocidad de ultrasonido con aplicación de carga a 0.10 MPa/s. Mediante una evaluación de 4 vigas de 280 kg/cm² se observó una disminución abrupta en la velocidad de 4200 km/s a menos de 2000 km/s en los últimos centésimas de segundos antes de la falla.

Figura 5. Variación típica de VUS con carga controlada



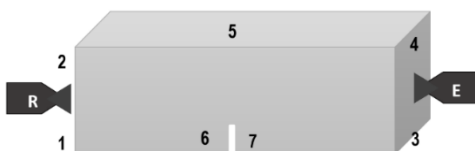
Este aumento inesperado en la velocidad de ultrasonido antes de la falla, puede atribuirse a que las ondas encuentran menos resistencia en la parte superior comprimida de la viga. Este hallazgo sugirió que era necesario ajustar la metodología para obtener resultados más precisos.

Evaluación de muescas en la zona de falla

Con fines de optimizar los resultados de medición de la VUS, en base a la naturaleza de la propagación de las ondas en el concreto se realiza muescas o ranuras en el concreto a 2.5 cm y a 5 cm. Ello porque, a saber, en flexión por encima del eje neutro se produce compresión y por debajo tracción, la idea es analizar cómo se propagan las ondas una vez producidas las fisuras o en el proceso mismo de fisuración.

- a) Muesca a 2.5 cm.

Figura 6. Registro zonificado de VUS



Cuadro 2. Registro zonificado de VUS

DE:	A:	V1	V2	V3	PROMEDIO
2	4	4,089	4,070	4,108	4,089
1	3	4,014	4,032	4,014	4,020
2	3	4,051	4,070	4,051	4,057
4	1	4,032	4,032	4,032	4,032
3	5	3,708	3,708	3,708	3,708
3	7	4,605	4,605	4,605	4,605
3	6	3,081	3,059	3,059	3,066
4	7	4,207	4,248	4,248	4,234
4	6	3,059	3,059	3,081	3,066

Las ondas de ultrasonido se propagan por toda la sección y longitud de la viga, en forma directa en las caras laterales e indirecta en la cara lateral y el lados o caras de la viga prismática.

Aunque la muesca no es en toda el área a tracción se observa que al no tener continuidad las ondas se redireccionan por la parte superior de la muesca, ello se evidencia cuándo se emite de los puntos 3 y 4 y la recepción es en el punto 6, la medición más baja de la velocidad ocurre en la medición en lo puntos 4-6.

a) Muesca de 5 cm

Figura 7. Registro zonificado de VUS**Cuadro 3.** Registro zonificado de VUS

De:	A:	V1	V2	V3	PROMEDIO
2	4	4,032	4,051	4,014	4,032
1	3	3,924	3,924	3,904	3,917
2	3	3,959	3,941	3,959	3,953
4	1	3,924	3,906	3,924	3,918
3	5	3,733	3,708	3,739	3,727
3	7	3,500	3,528	3,528	3,519
3	6	2,878	2,859	2,878	2,872
4	7	4,167	4,207	4,167	4,180
4	6	1,676	1,689	1,689	1,685

Se reafirma la tendencia de la muesca de 2,5 cm., en donde la medición en los puntos 4-6 registra la menor velocidad de ultrasonido es decir la presencia de vacío o discontinuidad afecta la velocidad, se puede atribuir que por las ondas tratan de seguir en diagonal por encima de la muesca evitando el punto

6, por principio de trabajo mínimo, por ello la medición en los puntos 3-6 en la cual la onda emitida y recepcionada siguen línea recta y las microfisuras son perpendiculares a la onda y debe ser captadas en forma más directa en los ensayos a efectuar.

Figura 8. Registro de VUS con muesca de 5 cm



Análisis de curvas de propagación con carga controlada

En base a la evidencia de la propagación de las ondas con las muescas de 2.5 y 5 cm. y los resultados preliminares de en los ensayos de carga controlada se puede observar que:

- Las ondas se propagan en la viga prismática y que si encuentran obstáculo se redireccionan.
- En las vigas prismáticas, en el proceso de ensayo, la zona inferior se debe originar microfisuras por lo cual las ondas se redireccionan por la parte superior, en compresión, en la cual los poros se comprimen y facilitan más aun el paso de las ondas, es por ello que se observa previo a la falla un incremento notorio de la velocidad de propagación.

Con estos nuevos hallazgos en el proceso ensayo con fines de evaluar la propagación de microfisuras en flexión, se debe redirecciona la ejecución de los ensayos.

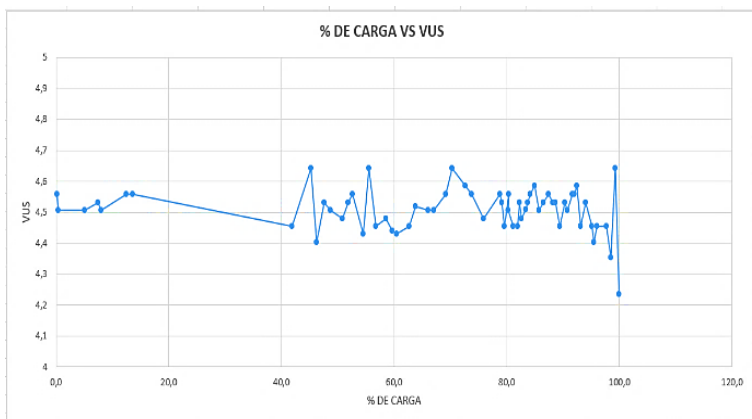
Figura 9. Registro de VUS con modificación de lectura



Optimización de resultados

Con base a los antecedentes de medición y la optimización en el proceso de registro de datos, se ha ejecutado ensayos de medición en posición 4-6, es decir el receptor se ubicó en la parte inferior y al costado de la probable zona de falla, según la muesca de 5 cm.

Figura 10. Gráfica típica de medición en adecuación 2-6



Se observa en estos resultados que los puntos tienen mayor consistencia para el análisis, las lecturas antes de falla prácticamente han sido eliminadas y de seguro refleja con más realismo la propagación de las micro fisuras.

Análisis integral de métodos, hipótesis y recolección de datos

En esta fase, luego de varios intentos en obtener la propagación de las micro fisuras, se ha logrado establecer una metodología que de seguro nos va a permitir la obtención de resultados consistentes y satisfactorios, ello básicamente se ha conseguido bajo dos aspectos:

- Baja tasa de carga
- Adecuar la lectura en posición en puntos 4-6 (emisión/recepción)

Respecto al análisis de la hipótesis los resultados preliminares tienden confirmar la validez de la hipótesis en el sentido que si es posible establecer una relación entre la carga y la propagación de las micro fisuras.

La recolección de datos se llevó de manera satisfactoria y se obtienen en simultaneo tres parámetros principales:

- Medición de tiempo
- Medición de carga
- Medición de velocidad de ultrasonido

Con estos resultados se hace más asequible la obtención de datos y parámetros que nos permitan conseguir los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación.

ANALISIS DE RESULTADOS

Velocidad aplicación de carga en el ensayo

La premisa del desarrollo del presente trabajo es en primer lugar la detección de la variación en la velocidad del ultrasonido, este es indicio de generación de micro fisuras.

En los ensayos en base a la velocidad que establece la normatividad oscila entre 0.9 a 1.2 Mpa/s para flexión en vigas y de 0.25 Mpa/s para ensayos de compresión. En los ensayos realizados con esta ratio de aplicación de carga se observa que ocurre la falla en forma abrupta y en un tiempo del orden de microsegundos, para poder medir estos cambios en poco tiempo podemos inferir dos procedimientos:

- Disminuir la velocidad de aplicación de la carga de tal manera que se pueda detectar los cambios por generación de micro fisuras
- Aplicar carga controlada tal que se pueda medir los cambios internos respecto a la generación de micro fisuras.

En el primer caso se fija la mínima velocidad permisible por el equipo de aplicación de carga y en el segundo caso con la resolución de los diales extensómetros, estos corresponden a:

- Velocidad de ensayo: 0.1 Mpa/s.
- Carga controlada a compresión.

- Con estas tasas de aplicación de carga se puede obtener las mínimas variaciones de velocidad de ultrasonido en la zona interna de las vigas.

El equipo de ultrasonido

El equipo de ultrasonido utilizado es el ZBL-U100, la premisa de investigación no es determinar la variación de velocidad como modulo, sin embargo, el equipo tiene su patrón de calibración, así como su autocorrección de cero. En referencia a los parámetros y procedimientos de uso es en cumplimiento de la norma ASTM C587, como la longitud de evaluación, la corrección de cero y la planitud de la superficie en donde se apoyan los sensores. El equipo detalla la amplitud de la onda que se propaga por el medio interno de concreto y la velocidad con la cual la onda se desplaza por el medio solido de la viga de ensayo.

Equipo de aplicación de carga

Para la aplicación de carga se utiliza una máquina de compresión automática PILOT PRO de 200 kN, cuya capacidad es suficiente para el desarrollo de la investigación. Una de las ventajas de este equipo es que se puede establecer velocidad de aplicación de la carga según los requerimientos del ensayo.

Resultados con carga controlada

La ejecución de los ensayos de flexión en prismas de concreto considera dos variantes según el número de puntos de aplicación de la carga:

ASTM C 293-02 Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)

En la fotografía siguiente se aprecia la aplicación de carga, la medición de la velocidad de ultrasonido y el tiempo transcurrido en forma simultánea, todo ello es filmado para obtener los registros correspondientes, carga-velocidad-tiempo.

Figura 11. Ensayo de carga vs velocidad de ultrasonido



Resultados con aplicación de carga en el centro

Se han efectuado en las tres resistencias correspondientes a 210, 280 y 350 Kg/cm², los registros de carga de han expresado en porcentaje en función de la máxima carga que resiste cada probeta sometida a flexión, a la velocidad indicada líneas arriba.

En los gráficos siguientes se plasman los parámetros obtenidos del proceso de evaluación mencionado en la figura N° 10, para cada una de las resistencias, se han integrado resultados de mediciones en las vigas, todas al 100% de la carga de falla.

Figura 12. $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, Ensayo de carga vs velocidad de ultrasonido

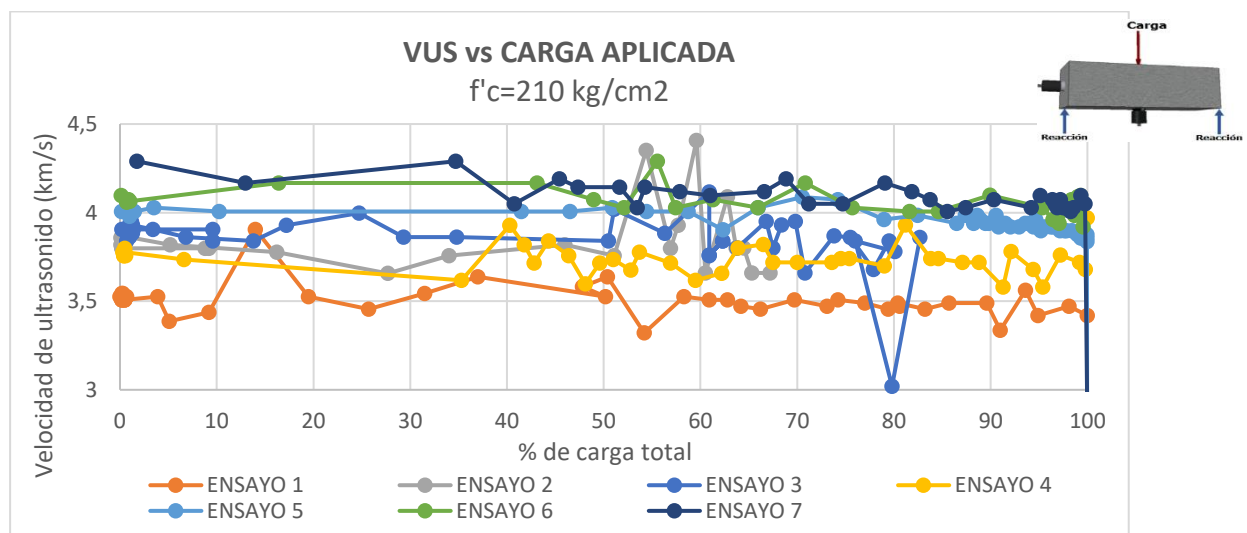


Figura 13. $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, Ensayo de carga vs Velocidad de ultrasonido

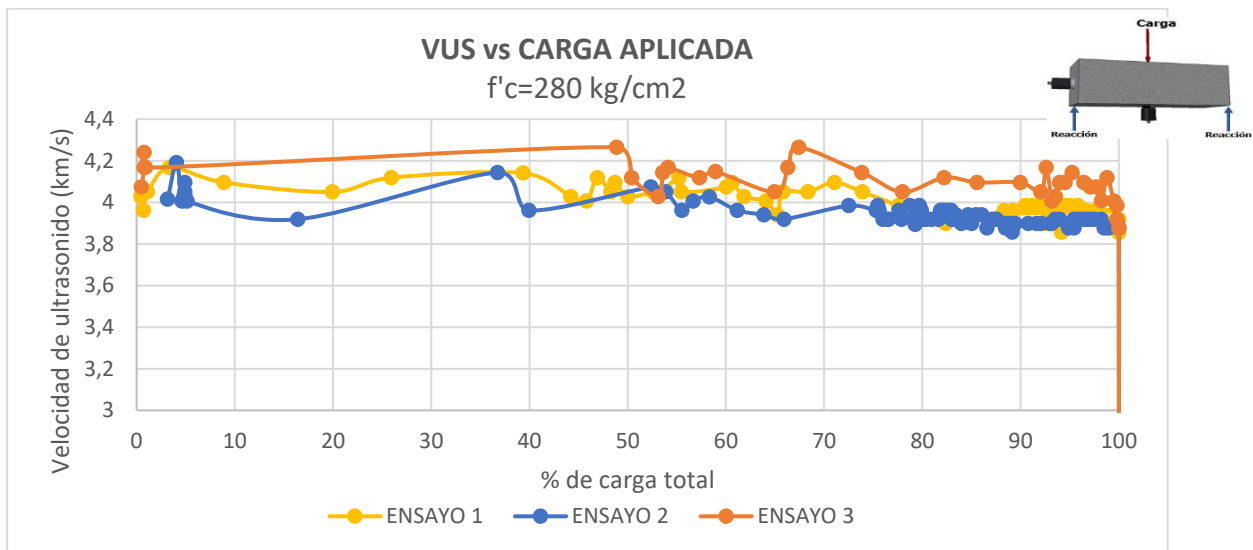
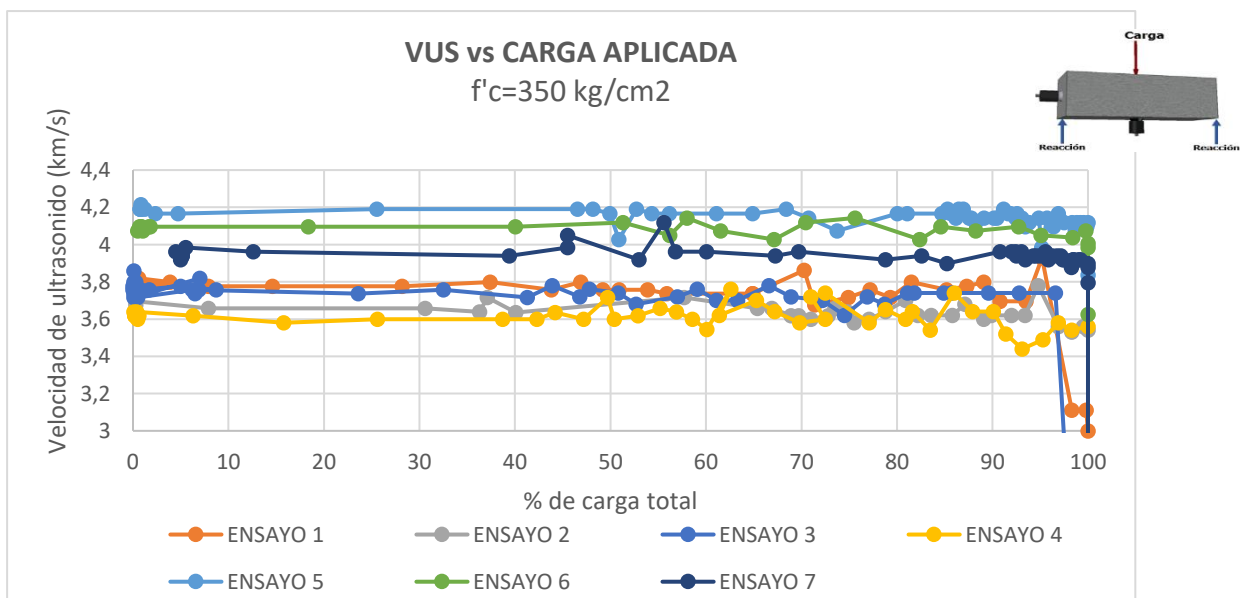


Figura 14. $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$, ensayo de carga vs Velocidad de ultrasonido

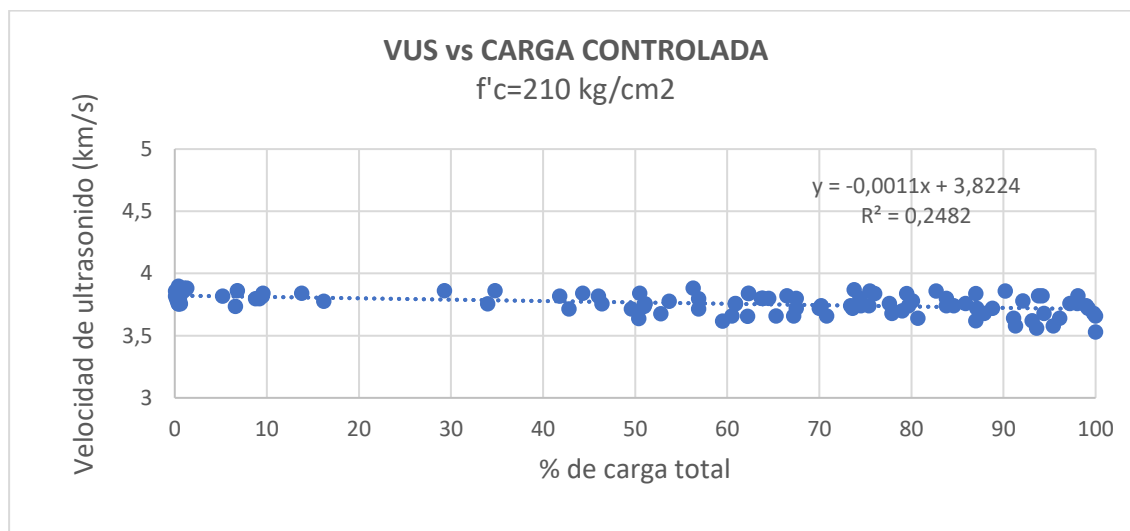


Discusión de micro fisuras con carga en el centro

Los resultados muestran que la progresión de las microfisuras, medida por la variabilidad en la velocidad de ultrasonido, es cuasi lineal hasta el 80% de la carga aplicada. Después de este punto, la pendiente aumenta ligeramente y presenta una tendencia cuadrática, aunque no está claramente definida. Los coeficientes de determinación de estas correlaciones no son óptimos debido a la evaluación en tiempo real y continua, pero se aprecia una disminución en la velocidad de ultrasonido, posiblemente causada por la interacción y reacomodo interno de los componentes del concreto. En los gráficos siguientes se

discretizó las lecturas de puntos singulares tratando de optimizar la curva de correlación según la tendencia de lectura de datos de velocidad de ultrasonido en el rango de 3.5 a 4 km/s.

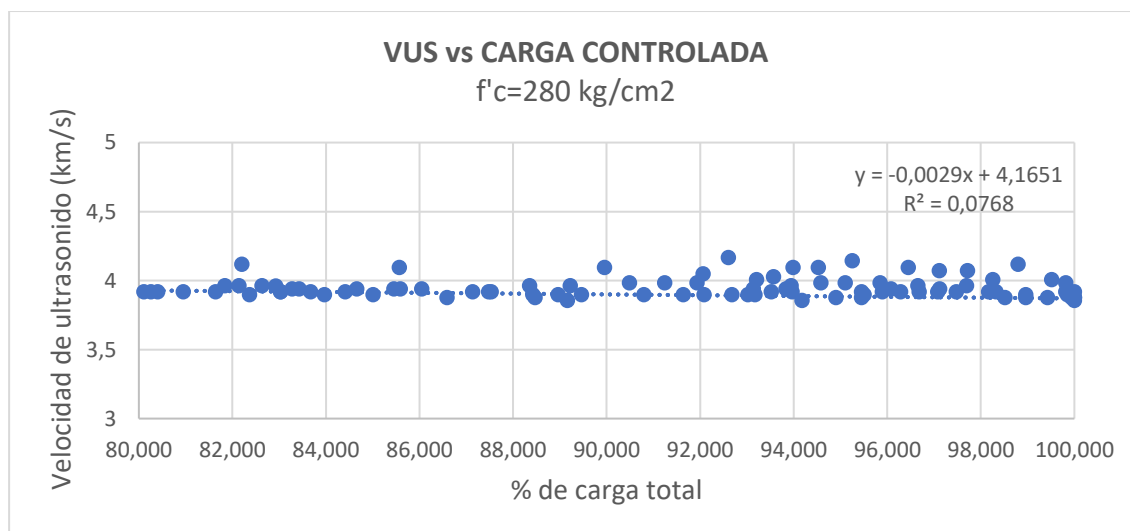
Figura 15. F'c: 210Kg/cm2, ensayo carga vs velocidad de ultrasonido



Ecuación 1 Velocidad de los pulsos de ultrasonido

Tramo:	Ecuación
0 – 100 %	$y = -0.0011x + 3.8224$

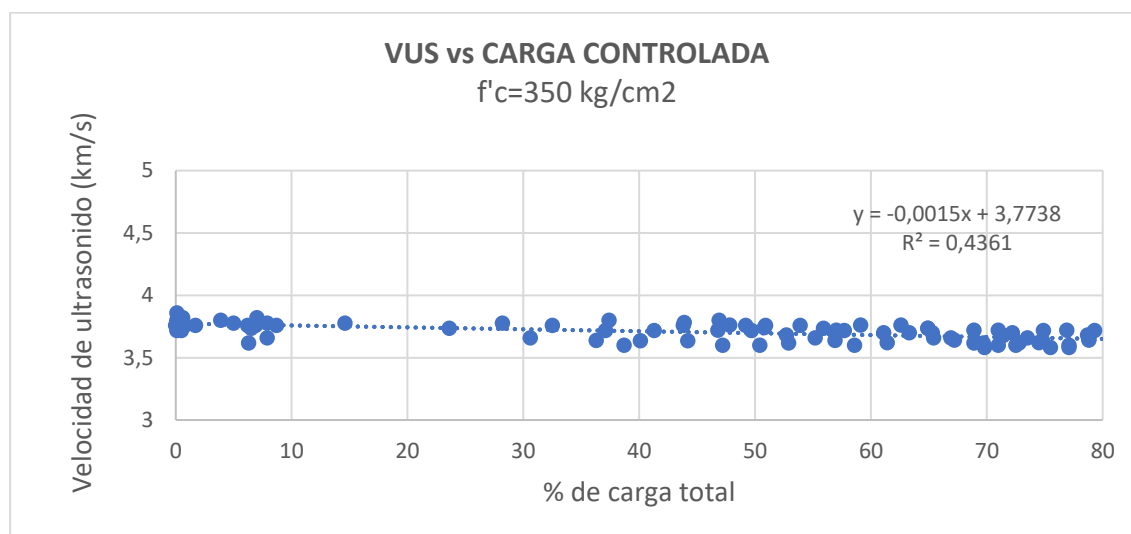
Figura 16. F'c: 280Kg/cm2, ensayo carga vs velocidad de ultrasonido



Ecuación 2 Velocidad de los pulsos de ultrasonido

Tramo:	Ecuación
0 – 100 %	$y = -0.0029x + 4.1651$

Figura 17. f'_c : 350Kg/cm², ensayo carga vs velocidad de ultrasonido



Ecuación 3 Velocidad de los pulsos de ultrasonido

Tramo:	Ecuación
0 – 100 %	$y = -0.0015x + 3.7738$

En la zona inferior de cada grafico se dan las ecuaciones de correlación buscando el mayor coeficiente de determinación, las vigas de la resistencia de 350 kg/cm² muestra un comportamiento lineal, atribuible a la mayor fragilidad por mayor relación agua/cemento, se confirma que la interacción de los primeros estudios de carga.

Análisis integral de los resultados y discusión

La tecnología de ultrasonido es efectiva para evaluar el estado de pavimentos, especialmente en etapas avanzadas de fatiga. Los resultados muestran que la velocidad de ultrasonido disminuye con la carga. Las microfisuras comienzan a desarrollarse temprano con una tendencia lineal, aunque al alcanzar el 80% de la carga, la pendiente puede disminuir o mostrar una tendencia cuadrática. En general, la evolución de las microfisuras es lineal, independientemente de la carga o la resistencia.

CONCLUSIONES

- La tecnología de ultrasonido es efectiva para determinar la evolución de las microfisuras en la resistencia a la tracción del concreto en pavimentos rígidos. Los resultados indican que la transición de microfisuras a macrofisuras ocurre después del 80% de la carga aplicada.

- Las microfisuras se desarrollan de manera constante, sin intervalos en los que no avancen. Incluso en las primeras etapas de carga, hasta el 80% de la aplicación, las microfisuras evolucionan linealmente, lo cual se atribuye a la redistribución interna de los esfuerzos en el concreto para prevenir la falla.
- Se establece correlación lineal, aunque se observa dos zonas ligeramente diferenciables, una de variación lineal entre hasta el 80% de la carga y otra tendencia lineal una poco más pronunciada en la zona final. En concordancia con la resistencia requerida en pavimentos rígidos se tiene para una resistencia de 350 kg/cm²:

	Ecuación
Carga controlada	$y = -0.0015x + 3.7738$

- El umbral en el cual una micro fisura se propaga y pasa al rango de macro fisura, no es muy claro en los resultados, pero pasado el 80% de aplicación de carga se observa un decaimiento notorio por lo cual podemos establecer que ese cambio de estado se da posterior a el 80% de la aplicación de la carga de falla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alhosseini A., De Borst R., & Van Mier J. (2022). Multiscale simulation of concrete fracture: A review. *Cement and Concrete Composites*, 125, 103968.
- American Concrete Institute. (2019). *Diseño estructural de edificios de hormigón (ACI 318-19)*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2022). *Causas, evaluación y reparación de grietas en estructuras de hormigón (ACI 224.1R-2022)*. American Concrete Institute.
- Bažant, Z., & Oliverio, F. (Eds.). (2019). *Fracture mechanics of concrete*. In *Mechanics of concrete structures* (Vol. 38). Springer, Cham.
- Cifuentes H., & Medina F. (2013). *Mecánica de la fractura aplicada al hormigón*. Editorial Universidad Católica de Chile.

- Cifuentes H., & Medina F. (2013). Mecánica de la fractura aplicada al hormigón. Editorial Universidad Católica de Chile.
- Jan G.M. van Mier. (2013). Concrete Fracture a Multiscale Approach. (1st ed.). CRC Press
- Malhotra, V. M. (2022). Fracture mechanics of concrete. In Mechanics of concrete structures. Cham, Suiza: Springer Nature.
- Nogueira C. (2009). Ultrasonic wave propagation in concrete. In Ultrasonic non-destructive testing (pp. 189-220). Springer, Cham.
- Shah, S. S., & Carpinteri, A. (2019). Fracture mechanics test methods for concrete. (2nd ed.). CRC Press.