



Aplicación de ondas guiadas. Ultrasonic guided waves application.

C. Desimone ¹, P. Katchadjian ², M. Tacchia ³

ENDE– CNEA – ARGENTINA
Av. General Paz 1449, 1650 San Martín
desimone@cnea.gov.ar

Resumen

El trabajo presenta los resultados experimentales de ensayos de ultrasonido y el análisis de señales obtenidas desde diferentes reflectores artificiales y defectos reales en varillas individuales y en sectores de obenques dañados, así como inspecciones de obenques montados en puentes colgantes. El comportamiento de la onda guiada que se propaga a lo largo de la varilla muestra un filtrado sobre algunos componentes del espectro de frecuencia de la onda, lo cual induce a utilizar para el ensayo ultrasónico un transductor con una frecuencia central que coincida preferentemente con los picos máximos del espectro de frecuencia de la señal del eco.

1. Introducción

Los puentes colgantes están sujetos a cargas dinámicas provocadas por el tránsito y el viento. Su estabilidad depende principalmente de las buenas condiciones de trabajo de los obenques que sostienen la bandeja colgante. Los defectos pueden generarse en los obenques mediante procesos de corrosión y vibración o fatiga.. La corrosión en el interior del obenque produce una seria degradación la que es a menudo difícil de detectar mediante una inspección visual. Condiciones del entorno o ambientales y una deficiente protección, son causa del inicio de corrosión externa e interna. Como consecuencia de ello pueden generarse los siguientes deterioros: a) corrosión por disolución, localizada o generalizada, formando óxidos y la consecuente reducción de la sección del alambre, y b) inicio de fisuras por corrosión bajo tensiones, llevando a una rotura frágil.

Diferentes tipos de obenques han sido diseñados y desarrollados para la construcción de puentes colgantes. El puente Zárate - Brazo Largo utiliza un diseño de obenques del tipo de “alambres paralelos” y se componen, según la carga de trabajo, desde 100 hasta 350 varillas de acero de $\varnothing 7$ mm cada una, abrazadas en hélice por un cable de acero, todo protegido por una funda de polietileno gruesa, de 10 a 15 mm de espesor. Una vez tensados los alambres, el espacio anular entre la funda y las varillas es llenado con cemento para protegerlos de la corrosión.

En los extremos para el anclaje, las varillas se abren en forma cónica pasando cada una a través de una placa de anclaje donde luego son remachados en frío. En el anclaje, el espacio entre las varillas es relleno con una mezcla, patentada como Hi-Am, compuesta de resina epoxy y de pequeñas bolitas de acero. El diseño de obenque que estamos considerando tiene una sección de 5” a 6” de diámetro, compuesta por el manojito de 200 a 300 varillas de acero de $\varnothing 7$ mm. Dicha sección es aún mayor en la zona de anclaje. Debido a condiciones de trabajo o envejecimiento, y a efectos climáticos, las protecciones pueden degradarse y resquebrajarse, haciendo posible el ingreso de agua, el consecuente proceso de corrosión y posterior origen de fallas en las varillas. En estos puentes y con estos obenques las fallas se producen en general dentro del metro desde ambos extremos de los mismos. Tal fue el caso de la causa de la rotura de un obenque en el puente Paraná Guazú a mediados de la década del '90.

Diferentes métodos de inspección no destructiva se han desarrollado y aplicado según sea el diseño y accesibilidad de los obenques. Una inspección visual puede ser efectiva sobre los alambres en el

caso de que éstos no tengan una protección externa, o eventualmente para observar el estado de la protección.

Para la detección de defectos internos, o en áreas no visibles, será necesario pensar en otros métodos alternativos como: radiografía X o γ , aceleradores lineales, ultrasonido, métodos electromagnéticos, flujo disperso y otros.

De acuerdo con el diseño, tipo y orientación de las fallas que ocurren en estos obenques, la técnica ultrasónica de pulso-eco, aplicada desde los extremos ribeteados de cada varilla, ha resultado ser la más apropiada para la detección de defectos.

2. Fundamentos del método.

Considerando ondas elásticas planas, ilimitadas en espacio y tiempo, propagándose en un medio sólido homogéneo y sin efectos de borde o interfases, la velocidad de propagación de las ondas es determinada por la densidad " ρ " y las constantes elásticas del material, módulo de elasticidad " E " y la relación de Poisson " σ ", tal como sucede para las ondas longitudinales, transversales y superficiales, por lo que sus velocidades también serán constantes características del material.

En materiales de estructura cristalina, la anisotropía elástica puede ser pronunciada. La velocidad del sonido en los materiales puede variar también debido a heterogeneidades, variación de temperatura, tensiones residuales o tensiones aplicadas externamente en el material.

En algunos casos como en chapas o varillas, las reflexiones en los bordes generan superposiciones entre sí que pueden originar interferencias. Además, la misma geometría actúa como guía de onda. Si en un medio con estas características se propaga una onda longitudinal, transversal o superficial, las ondas sufrirán cambios de modo y su forma será afectada en mayor medida cuando menor sea el espesor de la chapa o el diámetro de la varilla.

En una chapa se genera la llamada "onda de Lamb", con los dos tipos principales, la simétrica y la asimétrica, y sus armónicas. En una varilla pueden generarse otro tipo de ondas, como la de dilatación, de flexión, de torsión o radiales, y sus armónicas. Estas ondas desarrollan procesos dispersivos y su velocidad depende no solo de la densidad y las constantes elásticas del material, sino también de su espesor o diámetro y de la frecuencia de la onda.

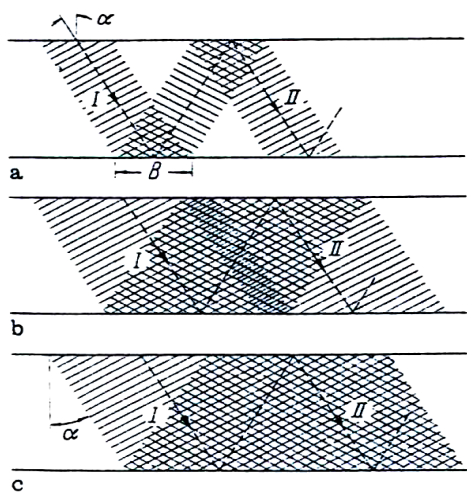


Figura 1: generación de ondas de Lamb.

Este tipo de ondas como la de Lamb o la de varilla cuya propagación es influenciada por los límites de la pieza, se las denomina "ondas guiadas". La Figura 1 ilustra la generación de una onda de Lamb a partir de las reflexiones en zigzag de una onda plana ilimitada. Para un haz angosto no hay influencia entre las reflexiones, pero en un haz más ancho las secciones que se propagan en el mismo sentido se solapan pudiendo generarse una interferencia constructiva o destructiva. Las velocidades pueden presentar desviaciones importantes entre los valores teóricos y los reales. En la práctica se utilizan pulsos con un ancho de haz limitado y un ángulo de propagación y de divergencia determinado, en vez de una onda plana ilimitada y continua con una frecuencia única.

Un pulso no se compone de una sola frecuencia sino de una banda de frecuencias que será más amplia cuando menor sea la duración del pulso. O sea que en un pulso de una onda dispersiva, las componentes de diferente frecuencia contenidas en él, tendrán diferente velocidad y un pulso relativamente corto en su origen se verá progresivamente distorsionado y ensanchado durante su propagación (ver Figura 9). Las componentes de alta frecuencia viajan más rápido que las de menor frecuencia. La medición del tiempo de vuelo se torna mas incierta.

Ondas en un cilindro. Si una onda longitudinal, continua y monofrecuencia, se propaga en un cilindro isótropo de largo infinito y de diámetro limitado, se espera que debido a sucesivas reflexiones en la superficie cilíndrica, el frente de onda se modificará. El movimiento de las partículas del medio será de dirección axial en la cercanía del emisor, pero debido a la divergencia del haz y a las reflexiones de borde, el movimiento puede cambiar a una dirección radial o transversal a la anterior. La onda que se propaga estará caracterizada por la oscilación de las partículas en dirección axial y/o radial y la velocidad de la onda se verá influenciada por ambos componentes.

En el cilindro se desarrollarán ondas longitudinales, torsionales y flexurales. Las velocidades de fase “w” y de grupo “u” dependen de la relación entre el diámetro “d” del cilindro y la longitud de onda “λ”.

Un gran número de ondas podrán ser propagadas, cada una de ellas identificada por el movimiento de las partículas y conformando un modo de onda singular.

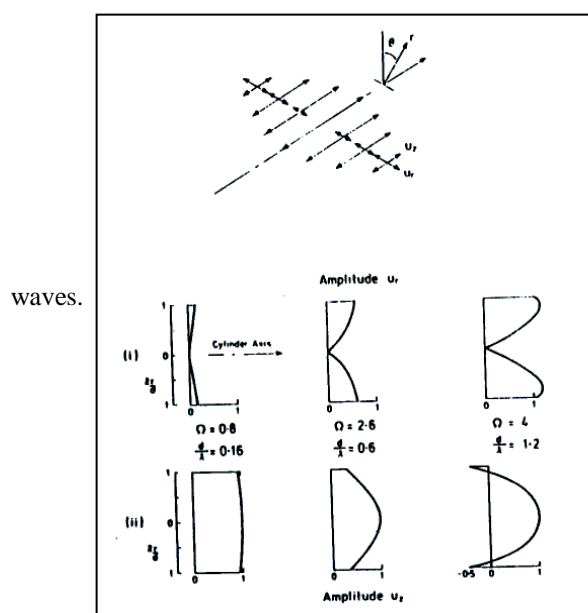


Figura 2: movimiento de las partículas radial (r) y axial (z), del 1er modo de onda longitudinal.

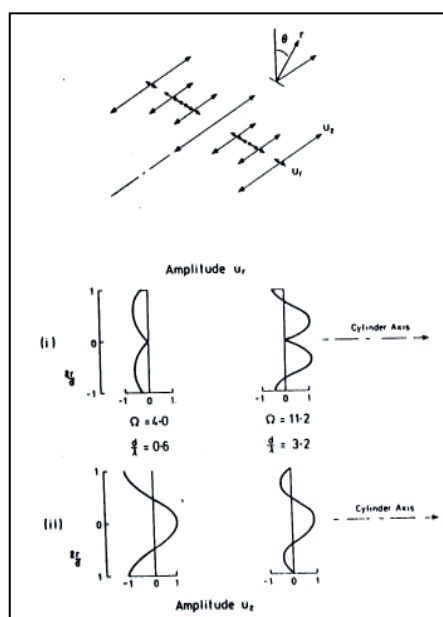


Figura 3: movimiento de las partículas radial (r) y axial (z), del 2do modo de onda longitudinal.

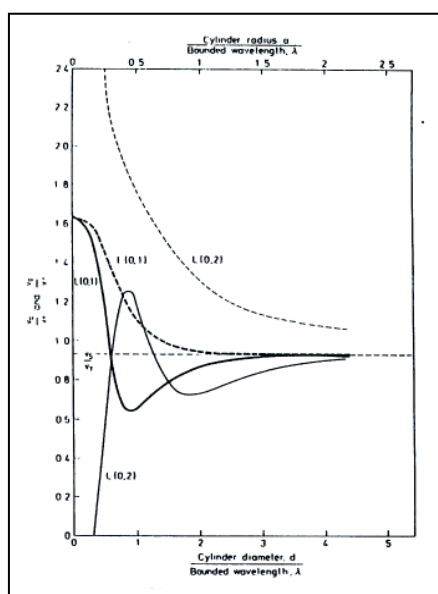


Figura 4: velocidad de fase y de grupo en el 1er y 2do modo de onda longitudinal en un cilindro, en función de d/λ .

Para **ondas longitudinales**, la Figura 2 muestra el movimiento simétrico de las partículas del 1er. modo de onda. La Figura 3, el del 2do modo de onda. En la zona (i) el movimiento radial “ u_r ”, en la zona (ii) el axial u_z , ambos en función de d/λ . El movimiento torsional u_θ es nulo.

La Figura 4 muestra el comportamiento dispersivo de la velocidad de fase (---) y de grupo (—) en el 1er. y 2do modo de onda longitudinal en un cilindro, en función de d/λ .

Teóricamente vemos que para relaciones $d/\lambda \ll 1$, las velocidades de fase y de grupo son ambas controladas por el módulo de Young “E” y la densidad “ρ” de los materiales mediante la relación $\sqrt{E/\rho}$.

Sin embargo para relaciones de d/λ en aumento, próximas a la unidad o mayores, ambas velocidades se diferencian entre sí y luego convergen al valor de la velocidad de las ondas superficiales.

Las **ondas torsionales y flexurales** también se propagan en diferentes modos, en los cuales sus velocidades de fase y de grupo son también función de d/λ . A medida que ésta relación crece a valores mayores que 1, ambas velocidades de fase y de grupo tienden al valor de la velocidad de las ondas transversales para el caso de las ondas torsionales, o al valor de las ondas superficiales para las ondas flexurales (2), (3).

3. Ensayos experimentales. Procedimiento de inspección.

La zona más crítica de los obenques se encuentra en sus extremos, hasta 1 o 2 metros dentro de la zona que conforma el anclaje y la transición al paquete de varillas paralelas. A fines de inspeccionar este sector se cuenta con el acceso a cada varilla desde el extremo ribeteado en el anclaje.

Se escogió entonces la técnica ultrasónica de pulso-eco mediante la aplicación de una onda longitudinal desde el frente plano de la varilla, propagándose en ella en forma de una onda guiada y de característica dispersiva.

Para la etapa experimental se seleccionaron muestras de varillas individuales en buen estado o con procesos de corrosión. También se utilizó una muestra de tramo de obenque rescatada de un recambio anterior.

Considerando los diferentes modos de onda que pueden generarse en la propagación, se analizó el comportamiento de la onda a diferente frecuencia para obtener condiciones óptimas de sensibilidad y transmisión, además de mínima atenuación.

Sobre estas varillas de $\varnothing 7$ mm, se generaron defectos artificiales por medio de ranuras y socavaciones transversales y longitudinales, simulando defectos como fisuras, corrosión, desgaste con disminución de la sección, o corte total del alambre, además de contar con alambres seleccionados con corrosión en diferente estado de avance.

Una pieza de alambre en buen estado de conservación, de 800 mm de largo, fue seleccionada para referencia del eco ultrasónico de fondo. Se tomaron registros del tiempo de vuelo, amplitud del eco y espectro de frecuencia del eco de fondo con la varilla en aire y con la varilla sumergida en agua, para analizar el efecto de atenuación debido a la pérdida de energía por transmisión en el medio circundante a la varilla, tal como ocurre en el anclaje del obenque.

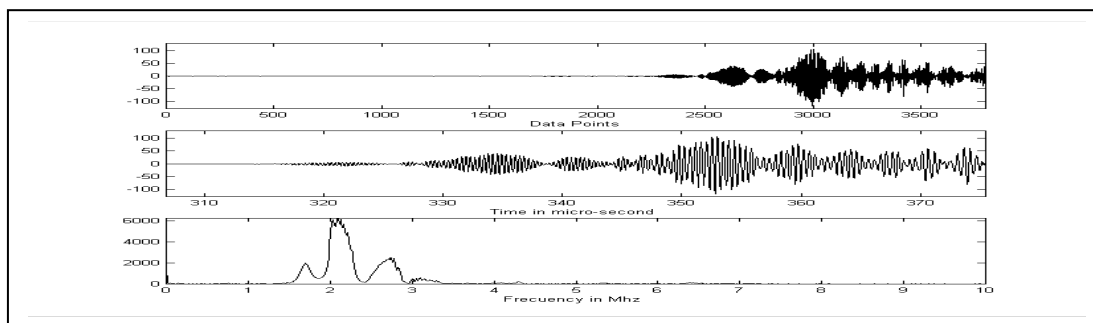


Figura 5: eco de fondo de una varilla en aire, para 2,25 MHz.

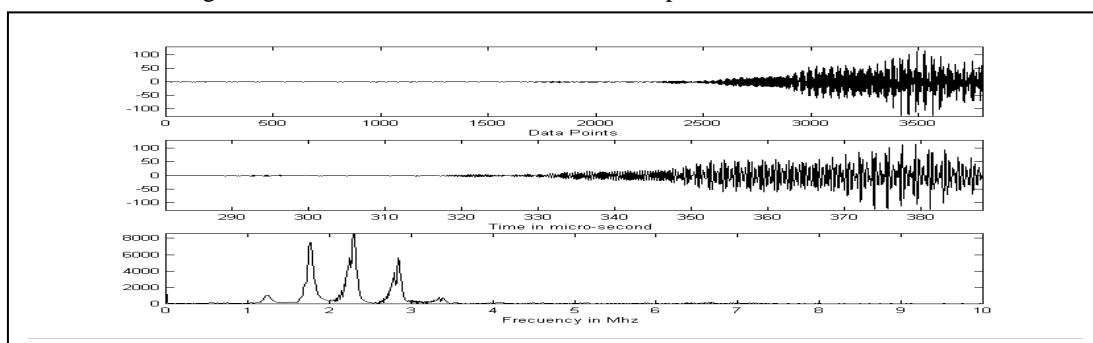


Figura 6: eco de fondo de una varilla en agua, para 2,25 MHz.

Las Figuras 5 y 6 muestran las mediciones hechas con una sonda de 2,25 MHz. sobre la probeta patrón de referencia de 800 mm de largo, ensayado en el aire y sumergida en agua, respectivamente. Se observa que el eco de fondo de la varilla, para el ensayo en agua, ha disminuido su amplitud en 10 dB y hasta en 14 dB respecto a la misma señal en el aire. Este ensayo fue realizado a diferentes frecuencias, entre 2 MHz y 10 MHz, lográndose el espectro de frecuencia de la señal del eco de fondo en cada una de ellas. Los espectros muestran una sucesión de picos de frecuencia de banda angosta, con valores similares en cada uno de ellos y separados los picos entre sí en alrededor de 540 KHz. Cuanto mayor es el diámetro “d” de la varilla, menor será la separación entre los picos máximos de frecuencia.

Las mediciones también muestran que las componentes de frecuencia mayores viajan más rápido y los tiempos empleados son por ende menores, para el eco de un mismo reflector, como puede apreciarse en la representación Tiempo-Frecuencia-Amplitud en la Figura 9.



Figura 7: varilla con ranura de 1,5 mm de profundidad.



Figura 8: varilla con corrosión incipiente.

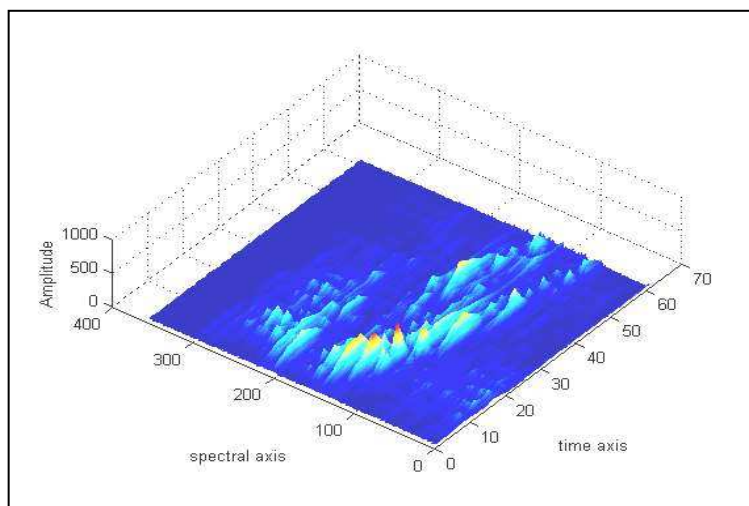


Figura 9: distribución Frecuencia-Tiempo-Amplitud del pulso de un eco.

Este comportamiento del pulso en su propagación en la varilla, muestra que en ciertos rangos de frecuencia se produce un filtrado de las mismas que se repite entre cada pico máximo del espectro. Todo induce por lo tanto, a utilizar transductores con frecuencia que sea lo más próxima posible a los valores de los picos máximos que se suceden en el espectro. Esta conclusión es corroborada por algunos trabajos de modelado y experimentales (4), donde se muestran curvas de atenuación, que aplicados a una varilla de acero de $\phi 7$ mm presenta picos de mínima atenuación en valores cercanos a 2,15 MHz, 2,7 MHz, 3,80, 4,35 MHz y otros valores intermedios.

Se realizaron otros ensayos con el mismo tipo de varillas, de 800 mm de largo, con ranura como la de la Figura 7, de 1,5 mm de profundidad (20% del diámetro) ubicada a 600 mm de un extremo, y otra varilla con zonas corroídas, como se aprecia en la Figura 8 y en la Figura 10.

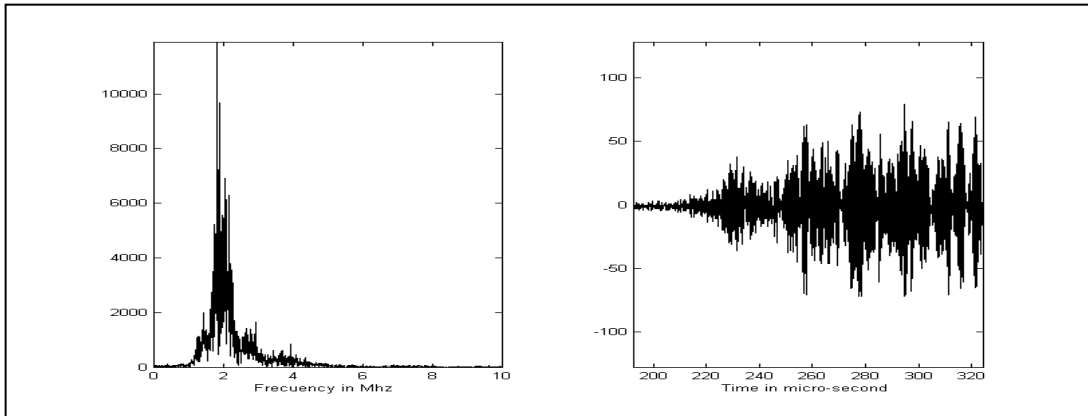


Figura 10: A-Scan del eco de corrosión de la Figura 8, ubicado entre 520 mm y 720 mm desde el extremo de ensayo con un transductor de 2,25 MHz, en una varilla de 2,4 mts. de largo, suspendida en aire.



Figura 11: muestra de un tramo de obaque.

De un obaque en desuso se escogió un tramo con más de 150 varillas rectas y paralelas formando un paquete cilíndrico cerrado rodeado de una capa de cemento y un forro exterior de polietileno, como se ve en la Figura 11.

Sobre el mismo se ensayó una varilla periférica de 870 mm de largo, de los cuales 550 mm están en contacto con el cemento.

En la Figura 12 se puede observar el eco de fondo plano de una varilla cortada, en un barrido A y el espectro de frecuencia con un transductor de 5 MHz.

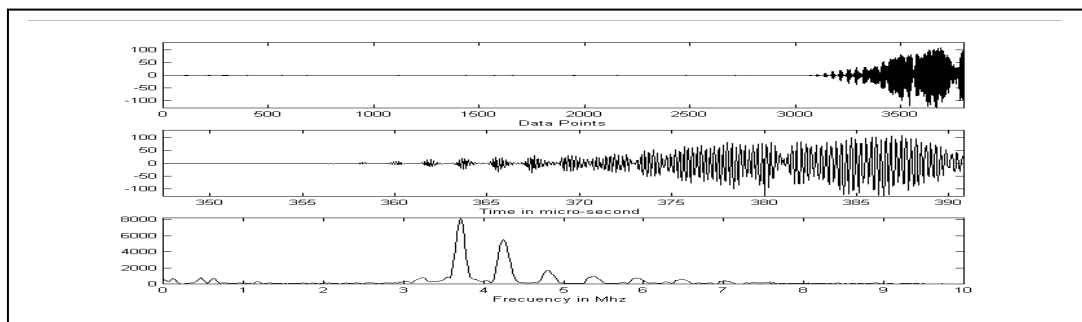


Figura 12: eco de fondo de una varilla periférica del tramo de obaque anterior, para 5 MHz.

Sobre esa misma varilla se practicó luego una ranura de 1,5 mm de profundidad a 700 mm desde un extremo, coincidiendo con la finalización del cementado, en el borde más lejano.

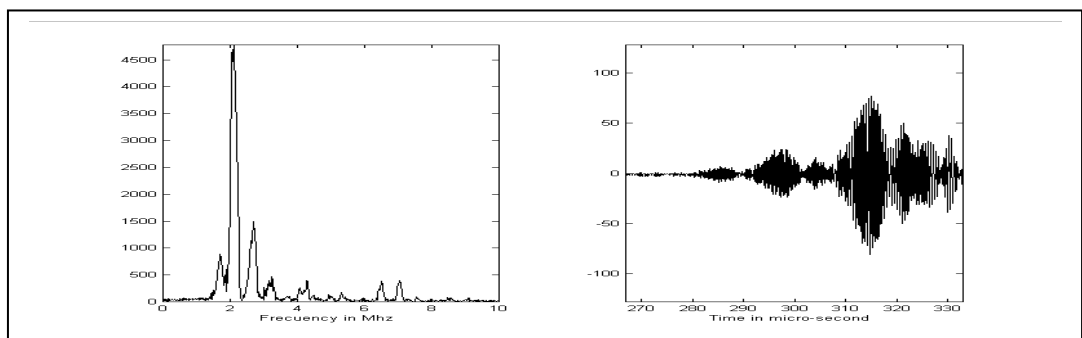


Figura 13: eco de una ranura de 1,5 mm de prof. sobre la varilla periférica anterior, para 2,25 MHz

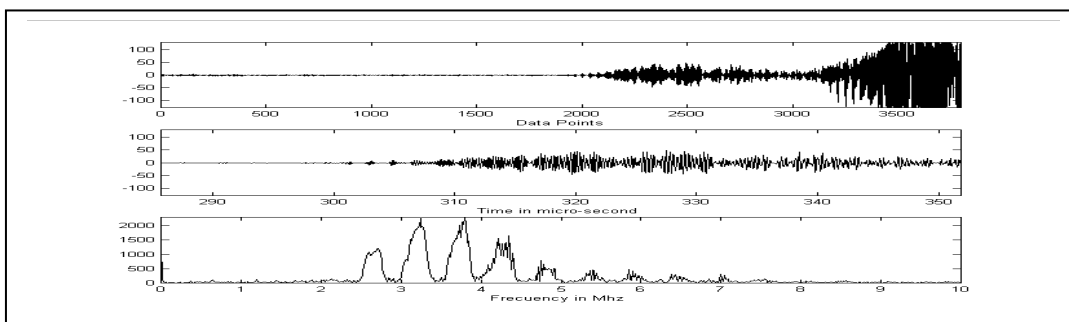


Figura 14: eco de una ranura de 1,5 mm de prof. sobre la varilla periférica anterior, para 5 MHz

El eco de dicha ranura fue analizado a diferentes frecuencias, desde 2 MHz a 10 MHz. En las Figuras 13 y 14 se observa el barrido A y el espectro de frecuencia para un transductor de 2,25 MHz y otro de 5 MHz, respectivamente.

Luego de los experimentos de laboratorio se procedió a elaborar un procedimiento de inspección para los obenques de los puentes colgantes del Complejo Zárate- Brazo Largo. Los extremos de cada varilla deben presentar un frente plano normal al eje, para facilitar el acople ultrasónico.

El procedimiento de inspección ultrasónica, luego de pasar la validación previa, fue ya aplicado con éxito en varias oportunidades en los obenques del puente demostrando buena sensibilidad para la detección de varillas dañadas parcialmente o con corte total, e inclusive con procesos de corrosión incipiente como el de la Figura 8, hasta una distancia máxima de 1,50 mts. desde el extremo de ensayo.

4. Conclusión

Tanto los experimentos de laboratorio como las inspecciones en servicio de los obenques dan un resultado confiable en la aplicación de ondas guiadas ultrasónicas desde el extremo ribeteado de las varillas, para la detección de defectos hasta una distancia de 1,5 mts. Afortunadamente los defectos se generan en éste caso en la zona de anclaje, dentro del primer metro desde ambos extremos de las varillas.

El filtrado de algunas frecuencias de la onda ultrasónica induce a utilizar para el ensayo un rango bien definido de frecuencias, preferiblemente centrado en los picos máximos del espectro de frecuencia de los ecos de una varilla de un determinado diámetro y considerando los efectos del material circundante en el amortiguamiento o atenuación de la onda durante su propagación.

Keywords: puente colgante, obenque, ultrasonido, ondas guiadas.

Referencias.

1. Ing. Tomás A. Del Carril, “Reparaciones en los puentes de Zarate-Brazo Largo”, Revista Ciencia y Técnica, 1997, p.p. 31-38.
2. “Ultrasonics”, Dale Ensminger, Second Edition.
3. Ultrasonic testing”, by J. Szilard, 1982.
4. Pavlakovic, Lowe, Cawley. “The inspection of Tendon in Post-Tensioned Concrete Using Guided Ultrasonic waves”. 7TH European Conference on NDT, 1998.

1 Ingeniero Mecánico, END Nivel 3 – CNEA - ARGENTINA
 2 Ingeniero Electricista, END Nivel 3 – CNEA - ARGENTINA
 3 Técnico, END Nivel 2 – CNEA - ARGENTINA