

The methodology non-destructive test inspection by ultrasound for predict the beginning of the failure of a material subject to rolling contact fatigue.

J. C. León^a, M. A. Pinto^a, J. E. Romero C.^{*,b}

^aEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bLaboratorio de Predicciones de la Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

The methodology of inspection of the non-destructive testing by means of ultrasound was proposed and implemented to predict the beginning of the failure of an element under rolling contact fatigue, since it is not counted on norms that specify it. For this purpose a series of instructions appears step by step that are necessary to follow to make a reliable inspection by means of the ultrasound technique, using as foundation that is established in ASME BPVC section V code. An artificial reproduction of the fatigue failure by rolling contact in steel material was used, with the purpose of verifying the feasibility of the developed methodology, in replacement of a fatigue test of contact in tribometer of pending execution.

Keywords: ultrasound, rolling contact, fatigue, tribology.

La metodología de ensayo de inspección no destructiva por ultrasonido para predecir el comienzo de la falla de un material sujeto a la fatiga de contacto rodante.

Resumen.-

La metodología de inspección del ensayo no destructivo mediante ultrasonido fue propuesta e implementada para predecir el inicio de la falla de un elemento sometido a fatiga por contacto rodante, dado que no se cuenta con normas que lo especifiquen. Para ello se presenta una serie de instrucciones paso a paso que son necesarios seguir para realizar una inspección confiable mediante la técnica de ultrasonido, usando como fundamento lo establecido en el código ASME BPVC sección V. Se utilizó una reproducción artificial de la falla de fatiga por contacto rodante en material de acero, con el fin de verificar la factibilidad de la metodología desarrollada, en reemplazo de un ensayo de fatiga de contacto en tribómetro de ejecución pendiente.

Palabras clave: ultrasonido, contacto de rodadura, fatiga, tribología.

Recibido: Enero 2015

Aceptado: Marzo 2015

1. Introducción.

El desgaste o falla de fatiga por contacto de rodadura (FCR), se presenta entre cuerpos que

tienen entre si un movimiento de rodadura con o sin deslizamiento. Esto produce, sobre un punto cualquiera del camino de rodadura, la aplicación de cargas variables en el tiempo que conducen a la nucleación y propagación por fatiga de pequeñas fisuras o grietas. Numerosos elementos mecánicos, tales como: engranajes, levas, pistas de rodamientos o sistemas rueda-riel, están sometidos

* Autor para correspondencia

Correo-e: joromer@uc.edu.ve (J. E. Romero C.)

a este tipo de desgaste.

La inspección por ultrasonido es una técnica no destructiva, en el cual un haz o un conjunto de ondas de alta frecuencia son introducidos en los materiales para la detección de fallas en la superficie y la subsuperficie. El haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades. Esta técnica ha sido ampliamente empleada para la detección de fallas en materiales como producto de en condiciones estáticas. Matzkanin y Yolken [1] realizaron estudios sobre las pruebas de ultrasonido como un método para detectar fallas o discontinuidades en un material. Para ello evaluaron los principios físicos que rigen este método, en la cual la información del ensayo se recolecta mediante la generación y propagación de una onda sonora de alta frecuencia a través del material a inspeccionar, y la onda al encontrarse con una discontinuidad genera una respuesta espectral que es registrada por un computador. Concluyeron que las pruebas por ultrasonido son una tecnología madura, con una base física sólida que proporciona resultados confiables y puede ser fácilmente aplicada a los metales, materiales compuestos, cerámicas y polímeros para ubicar y definir discontinuidades.

Para el caso de fallas de material originadas como consecuencia de condiciones dinámicas, la información disponible en literatura es escasa. Dwyer-Joyce [2] realizó estudios sobre la aplicación del ultrasonido como ensayo no destructivo en el área de la tribología. En primer lugar, se enfocó en evaluar los principios físicos que rigen el método, como la generación y propagación de ondas ultrasónicas, así como las respuestas que ofrecen estas ondas al pasar por superficies secas y superficies lubricadas. Además indicó, que en el campo de la tribología, los ensayos por ultrasonido son adecuados para inspeccionar algunos elementos de ingeniería como por ejemplo sellos mecánicos, uniones atornilladas, contacto rueda-riel, detección de grietas superficiales o subsuperficiales, medición de espesor de película de lubricante, rodamientos de rodillos entre otros. Mi y otros [3] determinaron que los sensores ultrasónicos pueden detectar cambios causados

por el inicio de una grieta y su crecimiento, si la ruta de la onda se dirige a través del área de formación crítica de la misma. Se basaron en la dinámica que tiene la apertura de la grieta, la carga no lineal que recibe la señal de ultrasonido, permitiendo a las pequeñas grietas ser detectadas por los sensores fijos. Presentaron una metodología basada en el comportamiento de las señales ultrasónicas versus carga aplicada para detectar y vigilar la formación y crecimiento de grietas procedentes de pequeños orificios.

Este trabajo tiene como objetivo establecer los lineamientos a seguir para la inspección mediante la técnica no destructiva de ultrasonido, tomando como base el cumplimiento de lo establecido en la sección V del código ASME BPVC, y así disponer de una herramienta para predecir fallas subsuperficiales en condición de contacto rodante. Adicionalmente, se presenta los resultados preliminares de la implementación del método descrito.

2. Metodología.

A continuación se indica el procedimiento a seguir para la implementación de la técnica no destructiva de ultrasonido para el análisis de fallas sub superficiales por FCR [4]:

Actividades Previas. Validar la información de la orden de inspección, que debe contener lo siguiente:

1. Identificación del Equipo o Pieza
2. Material de fabricación del Equipo o Pieza.
3. Dimensiones de la pieza a inspeccionar.

Preparación de la Superficie. Verificar la condición de la superficie de la pieza a inspeccionar, la misma debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. La superficie del material está libre de óxido, o cualquier material extraño que pudiera dificultar el monitoreo manual o atenuar la transferencia del haz ultrasónico al material a ensayar.

2. Irregularidades en la superficie a monitorear son removidas en lo posible mediante algún proceso disponible, se debe verificar que la rugosidad en la superficie a monitorear no supere una rugosidad promedio de $0,8 \mu\text{m}$, se debe acondicionar la superficie eliminando con ello dificultades en el movimiento del transductor y/o transferencia del haz ultrasónico.

Calibración. Lista de equipos / implementos:

- Equipo de ultrasonido por pulso-eco de presentación A-Scan con generación de frecuencias con un rango de 1 a 5 MHz. La presentación del equipo de ultrasonido deberá proveer de linealidad vertical con error dentro de + 5 % de altura completa de la pantalla para 20 % a 80 % de altura completa de la pantalla y utilizar una exactitud en el control de la amplitud sobre su rango usual de + 20 % del radio de amplitud.
- Transductores de 2,25 MHz, y 45° y 0°
- Acoplante: Cola celulósica mezclada con agua, aceite de motor, KB-AEROTECH Exogen N° 7, 10 o 14, Echo Labs Ultragel, Ultragel II, o similares.
- Cables Coaxiales
- Bloque de calibración V2.
- Bloque de referencia.

Como operación previa al proceso de inspección es necesario proceder, en primer lugar, a una comprobación satisfactoria del estado de funcionamiento del equipo. Efectuado esto, es necesario realizar la calibración en su conjunto del equipo, palpador o palpadores, zapatas y cables de conexión que vayan a ser utilizados en el trabajo de inspección. Esta calibración, de acuerdo con las recomendaciones establecidas en el código ASME (sección V), deberá repetirse siempre que se produzca cualquier variación en las condiciones en que inicialmente fue realizada.

El inspector UT nivel I o II calibra el equipo tanto para haz normal como para haz angular,

La calibración y verificación de la linealidad del sistema equipo-palpador se hará teniendo en cuenta:

1. Punto de emisión del Haz Ultrasónico: este valor es fijado mediante la máxima indicación de la señal del palpador en el LCD o pantalla, donde se busca que la máxima señal no supere el 80 % de ganancia, y en una calibración que muestre la señal en la pantalla en la ubicación del 50 % de la horizontal. Una vez fijado el punto de emisión del haz de ultrasonido, se hará una marca permanente que identifique claramente este punto. Esta calibración se hará en el bloque de calibración V2.
2. Ángulo del Palpador: la calibración del ángulo del palpador se hace en el bloque de calibración IIW V2, y para esta inspección se determina la profundidad del reflector de referencia como una función del recorrido del sonido y la ubicación de la señal en la pantalla en su máxima altura y no mayor al 80 % de la ganancia. No se aceptaran diferencias mayores o menores de dos (2°) grados en los palpadores. NOTA: De llegarse a presentar una desviación en el ángulo del palpador mayor a dos (2) grados, este debe ser retirado hasta que sea corregido. A cambio se usa otro palpador de iguales características.
3. Verificación de la linealidad Vertical del Equipo: las variaciones de la señal en la vertical de la pantalla deben ser lineales, al menos, en un 80 % de su altura útil. Esta altura se fijará tomando como origen la línea base de la pantalla. Para su comprobación se dispondrá de un palpador de haz normal sobre el bloque de calibración, de modo que se observen en la pantalla un eco y su repetición. Se ajustará la posición del palpador de forma que la relación de las amplitudes de los dos ecos sea de 2 a 1 y se ajustará el aparato para que la amplitud del mayor de los dos ecos cubra el 80 % de la altura de la pantalla. Sin mover el palpador, se ajustará la sensibilidad o ganancia haciendo variar la altura del eco mayor, desde el 100 al 20 % de la altura total de la pantalla, e incrementando en un 10 % o

de 2 en 2 dB. En cada posición, la altura del eco debe ser igual al 50 % de la del mayor con un error máximo de ± 5 % de la altura total de la pantalla.

4. Verificación de la linealidad Horizontal del Equipo: para comprobar la linealidad horizontal se debe utilizar un bloque de caras paralelas y a fin de poder medir la distancia correcta de los ecos en la base de tiempos, se hacen coincidir dos de ellos con divisiones exactas de la escala. Se lleva cada uno de los ecos al 80 % de la altura de pantalla con el mando de amplificación y se toma la distancia entre dos bordes izquierdos consecutivos. No serán admisibles errores de linealidad horizontal que sean superior al 5 %.

Monitoreo. Realizará el monitoreo a una velocidad no mayor de 15 mm por segundo según se describe a continuación, combinando el método del haz recto con el angular con el objetivo de buscar picaduras o grietas de fatiga presentes en las probetas de ensayo.

- **Haz Normal:** Se realiza un primer barrido en la cara frontal de la probeta, como muestra la Figura 1, con el objeto de detectar posibles imperfecciones que puedan generar una mala interpretación en una posterior evaluación con haz angular. Además de eso, se debe realizar un barrido minucioso en la cara frontal de la probeta con el objetivo de captar señales de picaduras o grietas generadas por la fatiga.

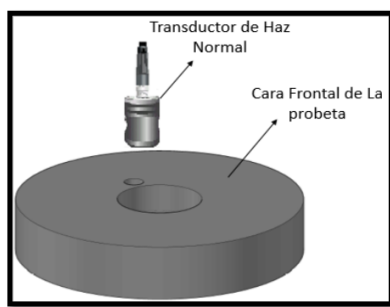


Figura 1: Barrido de la cara frontal de la Probeta.

- **Haz Angular:** Se realiza un barrido en el camino de la rodadura de la probeta como se muestra en la Figura 2, con el palpador de 45° con el objeto de buscar señales de fatiga ya sean grietas o picaduras que fueron pasadas por alto cuando se realizó el barrido con haz recto en la cara frontal.

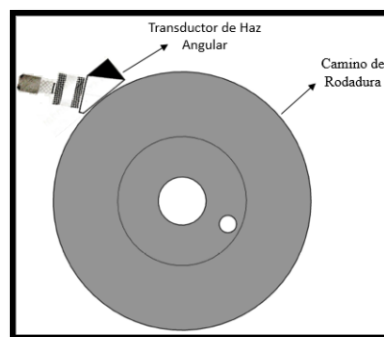


Figura 2: Barrido del camino de rodadura de la probeta.

Es importante resaltar que para facilitar el ensayo se puede realizar una zapata que se adapte a la superficie curva, con la finalidad de concentrar las ondas ultrasónicas al momento de realizar la inspección, permitiendo que el único método de ensayo sea por Haz Normal como se muestra en la Figura 3.

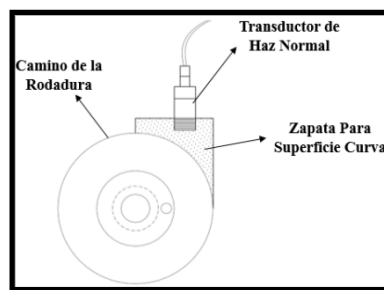


Figura 3: Zapata para la superficie curva e inspección con Haz Normal.

Durante el proceso de medición se debe tener en cuenta:

- La correcta indicación de acople entre el palpador y la superficie.
- La correcta lectura del valor del espesor. Esta indicación aparece cuando la señal de recibo e

indicación del respectivo valor del espesor es constante en la pantalla del equipo mientras permanece en contacto el palpador con la superficie.

- La indicación de carga de las baterías. Al presentarse esta indicación en la pantalla se debe suspender la medición y hacer el respectivo cambio de las baterías. Una vez reemplazadas se debe calibrar el equipo y verificar contra el patrón de referencia.

Examinación. La sensibilidad de la evaluación (ganancia) debe ser de al menos (+6 dB) del nivel inicial.

Evaluación de las Indicaciones.

Información General.

- Todas las indicaciones sospechosas se deben dibujar en un corte de la probeta para identificar acertadamente el origen específico del reflector. Como se muestra en la Figura 4.
- Todas las indicaciones sospechosas deben ser marcadas directamente en la probeta para identificar correctamente el origen de la señal del reflector.

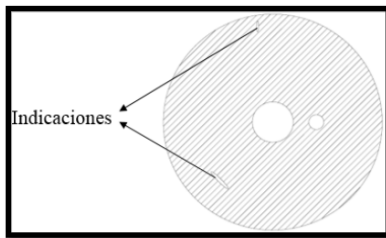


Figura 4: Indicación de los Defectos mediante un Corte.

Indicaciones del defecto.

- Todas las indicaciones (grietas, picaduras, irregularidades, etc.) que sobrepasen el nivel mínimo de aceptación deben ser reportadas.

- Como no existe norma que definan los tamaños mínimos admisibles. La normativa utilizada como mínima serán grietas de fatiga de aproximadamente 1mm de longitud y de 2mm de profundidad.
- El criterio de aceptación y rechazo se establece de acuerdo a lo explicado en el punto anterior.

Registro de Resultados. Registrar las componentes de referencia usadas para la ubicación de la indicación.

Defectos. Debe proveerse la siguiente información.

- Dimensión del defecto.
- Ubicación de los defectos en la probeta con respecto al camino de la rodadura.
- Tipo de defecto.

No es necesario reportar las indicaciones no relevantes.

3. Resultados.

Se han realizado un conjunto de inspecciones con ultrasonido de acuerdo al procedimiento establecido en la sección anterior [4]. Debido a que no se dispone de probetas que emulen la falla y con la finalidad de validar el método de inspección se prepararon una serie de defectos artificiales en las probetas, del tamaño y en la posición considerados críticos, para representar la falla por FCR en el modo superficial prematuro [5].

Para llevar a cabo el estudio se prepararon las probetas 1A y 2A, donde se generaron entallas o grietas y perforaciones, a través de procesos de mecanizado. En la probeta 1A se indujeron un total de 3 entallas equidistantes, cada una de ellas paralela, perpendicular y con una inclinación de 45° con respecto al camino de rodadura a una profundidad de 2mm, con el fin de emular la propagación de grietas debido a FCR. En la probeta 2A se realizaron un total de 3 perforaciones

equidistantes de 2mm de diámetro y de 2, 3 y 4mm de profundidad, con el objetivo de representar la nucleación de la grieta debido a FCR. La forma de cada uno de los defectos se muestra en la Figura 5.

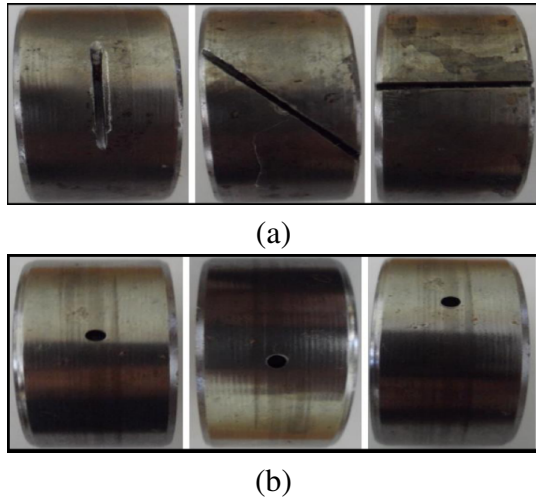


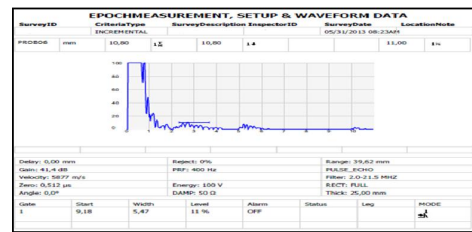
Figura 5: Detalles de los defectos artificiales inducidos (a) en la probeta 1A y (b) en la probeta 2A.

A continuación se presentan el análisis y comparación de cada una de las señales ultrasónicas obtenidas por cada uno de los defectos artificiales, evaluados en la pantalla del equipo ultrasónico, a una frecuencia fija.

Análisis de las perforaciones con haz normal.

Al examinar las ecografías correspondientes a la Figura 6, los resultados obtenidos son muy similares, esto se debe a que se trata del mismo defecto y mismo tipo de inspección ultrasónica. Claro que esto no lo explica todo, ya que si se observa detenidamente la Figura 6(c), el eco que representa la señal correspondiente a la perforación de 4mm de profundidad, está ubicado relativamente en la posición 3 de la línea horizontal del equipo, que representa la distancia en tiempo de recorrido de la onda. Donde los primeros ecos encontrados son debido a la zona muerta.

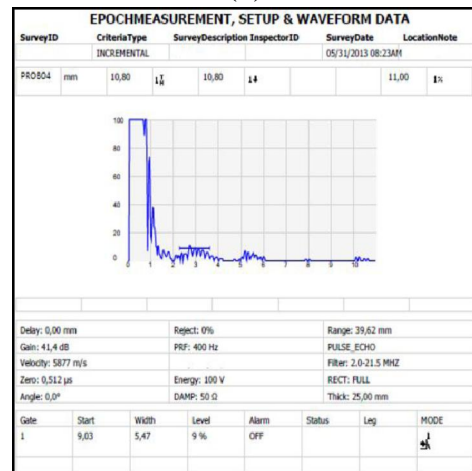
Cabe señalar que la inspección fue realizada con haz de incidencia normal en la cara frontal del disco por lo que el eco que aparece en la posición 5 del indicador de pantalla, corresponde a la reflexión de la pared posterior de la pieza, es decir, que indica el valor correspondiente al espesor



(a)



(b)

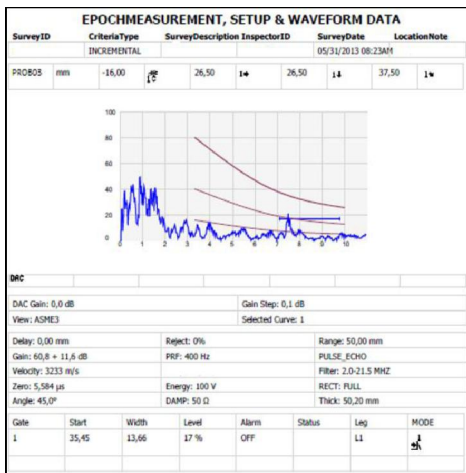


(c)

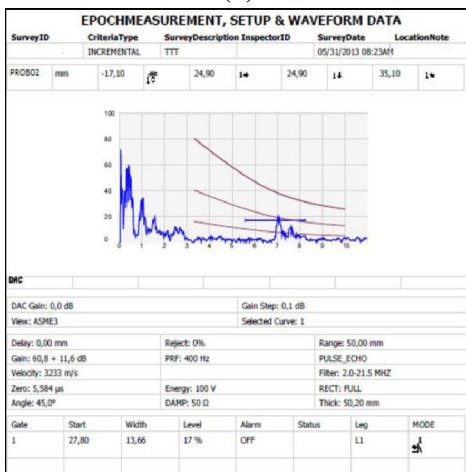
Figura 6: Eco probeta 2A correspondiente a la perforación de de profundidad, (a) 2mm, (b) 3mm, (c) 4mm, con haz normal.

nominal, también es posible detallar los ecos de rebotes del defecto y de la pared posterior ubicados en 8 y 10 respectivamente, en el indicador de pantalla.

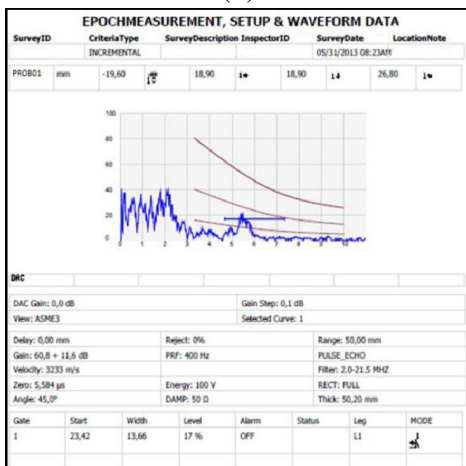
Si se comparan las ecografías, se puede notar que, el eco correspondiente al rebote del defecto va desapareciendo a medida que se va reduciendo la profundidad de la perforación, esto es debido a



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Eco probeta 2A correspondiente a la perforación de 4mm de profundidad con haz angular.

que mientras más pequeño sea el defecto que se inspecciona menor es la reflexión captada por el equipo hasta el punto de desaparecer, dificultando

en gran medida su detección. Como se había mencionado anteriormente, si la inspección se lleva a cabo con haz normal y de existir una grieta o defecto interno, se debe esperar que aparezca el eco de dicho defecto antes de la señal que indica la reflexión de la pared posterior correspondiente al espesor nominal.

Análisis de las perforaciones con haz angular.

Al realizar la inspección de las perforaciones con haz angular se obtienen como resultado las ecografías mostradas en la Figura 7. En ellas se observan la presencia de lo que se conoce como indicaciones parásitos o falsas indicaciones, ocasionadas por el aumento de la ganancia la cual se mide en decibeles (dB). El aumento realizado fue de 11,6 dB por encima de lo establecido para el ensayo y se debe a la dificultad del acople entre el palpador de haz angular y la superficie curva (camino de rodadura) además de los inconvenientes encontrados para captar las señales.

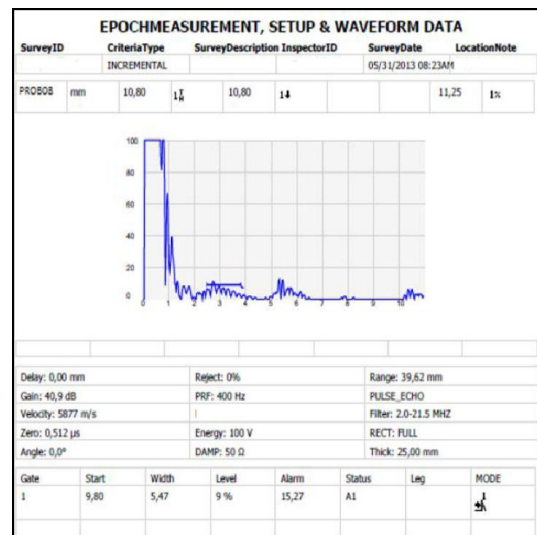


Figura 8: Eco probeta 1A correspondiente a la entalladura paralela al camino de rodadura haz normal.

Es necesaria la habilidad del inspector para interpretar y descartar falsas indicaciones. Lo que origina que el método de haz angular no sea el más apropiado para este tipo de defecto, siendo sólo necesario aplicarlo para reafirmar la presencia de un defecto captado con anterioridad por el método de haz normal.

A pesar de la similitud de las ecografías, difieren entre ellas en la ubicación del eco debido al defecto en la horizontal de la pantalla del equipo, como se observa en la imágenes de la Figura 6, entonces resulta que a mayor profundidad o tamaño tenga el defecto más próxima será su señal en la pantalla del equipo.

Análisis de las entalladuras con haz normal.

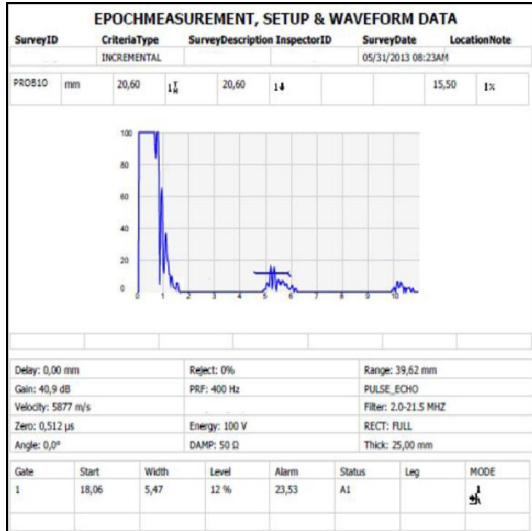


Figura 9: Eco probeta 1A correspondiente a la entalladura perpendicular al camino de rodadura haz normal.

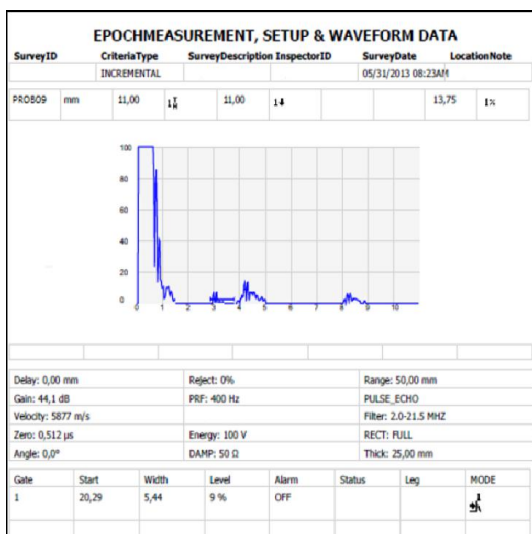


Figura 10: Eco probeta 1A correspondiente a la entalladura de 45° al camino de rodadura haz normal.

La ecografía obtenida en la Figura 8 corresponde a la entalladura paralela al camino de rodadura,

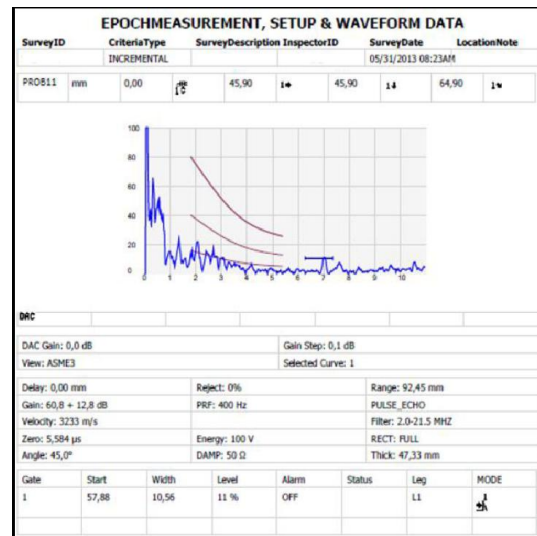


Figura 11: Eco probeta 1A correspondiente a la entalladura paralela al camino de rodadura haz angular.

inspeccionada con haz normal, la morfología del eco obtenido es similar a los ecos de la probeta con perforaciones, con la diferencia que este persiste durante el movimiento del palpador a lo largo de la entalladura, sirviendo como método para determinar la longitud de la misma, ya que se marcaría el punto de aparición de la señal y se movería el palpador hasta perder la misma, dando como resultado la longitud del defecto. La Figura 9 representa la ecografía de la entalladura perpendicular al camino de rodadura, se aprecia su similitud con la obtenida como eco control, representada en la Figura 6(a), esto se debe a que la entalla examinada se encuentra en dirección paralela al haz, lo que la hace imperceptible para el equipo con el método de haz normal.

La Figura 10 representa la ecografía de la entalladura con la inclinación de 45° en ella se observa un eco relativamente pequeño ubicado en 3 del indicador horizontal de la pantalla del equipo, correspondiente al defecto, donde su orientación influye en el ángulo de incidencia y refracción del haz, es decir, que debido a la inclinación de la entalladura, al chocar la onda con la misma, esta es desviada y solo una parte es devuelta y captada por el palpador.

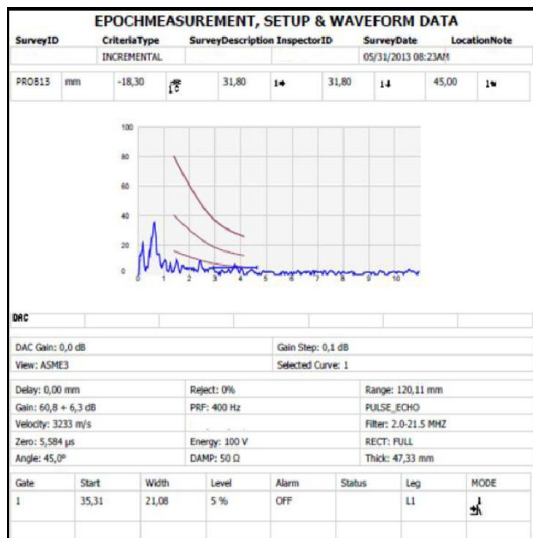


Figura 12: Eco probeta 1A correspondiente a la entalladura de 45° al camino de rodadura haz angular.

Análisis de las entalladuras con haz angular.

En la Figura 11 se muestra la ecografía de la entalladura paralela al camino de rodadura, donde el eco correspondiente a dicho defecto está ubicado aproximadamente a 7 del indicador de pantalla del equipo. Donde el resto de los ecos mostrados corresponden a la zona muerta y falsas indicaciones debido al aumento de los 12,8 dB por encima de lo establecido para el ensayo. Este aumento es requerido por la dificultad para captar el defecto debido a su orientación, ya que al reflejar el haz ultrasónico es muy poca la señal que es devuelta al palpador, lo mismo ocurre con la entalladura de 45° representada por la ecografía de la Figura 12, debido a su orientación es muy poca la reflexión que es devuelta al palpador lo que origina por el aumento de dB una gran cantidad de falsas indicaciones.

Lo contrario ocurre en la Figura 13 que representa la ecografía de la entalladura perpendicular al camino de rodadura, se observa un eco bien definido ubicado aproximadamente a 2,5 del indicador de pantalla del equipo, a la gran incidencia de la onda en el defecto lo que origina una gran reflexión que es devuelta al palpador. El tamaño mínimo del defecto que se puede detectar mediante ultrasonido está directamente relacionado con la frecuencia del palpador, a mayor frecuencia mayor es la sensibilidad del palpador para detectar defectos

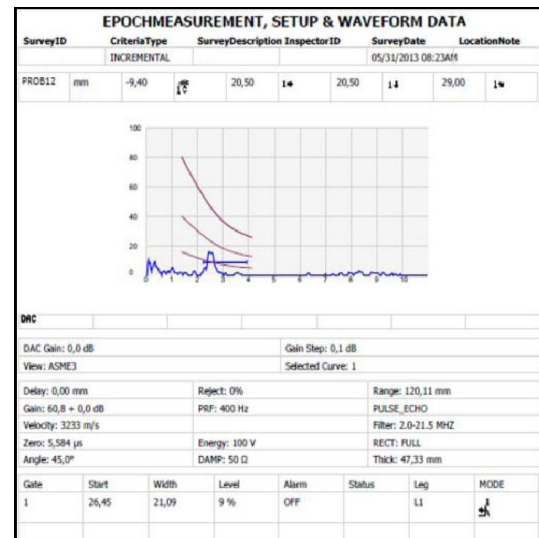


Figura 13: Eco probeta 1A correspondiente a la entalladura perpendicular al camino de rodadura haz angular.

más pequeños, pudiéndose detectar grietas de hasta 70 μm o inferiores.

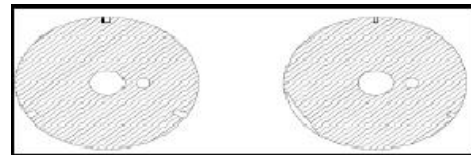


Figura 14: Indicación de los defectos artificiales mediante un corte.

La vista de corte indicando la posición de los defectos se muestra en la Figura 14 y los resultados obtenidos de los defectos artificiales mediante UT en las probetas se registran en la Tabla 1.

Cabe destacar que la inclusión de defectos artificiales a las probetas de ensayo permitió la obtención de un patrón, para calibrar el equipo de inspección por Ultrasonido para ensayos del tipo FCR y con la geometría de las probetas descritas en este trabajo, ya que las mismas fueron calibradas con patrón normalizado.

4. Conclusiones.

Se encontró que el ensayo de ultrasonido es uno de los métodos más rápidos, fáciles y seguros de aplicar, debido a que posee una gran exactitud al momento de evaluar las condiciones de los

Tabla 1: Niveles de parámetros de corte.

| REPORTE DE EXAMINACION MEDIANTE ULTRASONIDO EN PROBETAS | | | | | |
|--|----------|--|--|----------------------------|--------------|
| Universidad de Carabobo | | Ubicación: Valencia | Fecha: 03/06/13 | | |
| Título Tesis: Elaboración de una metodología para detectar fallas subsuperficiales en condición de contacto rodante mediante el uso de ultrasonido | | Estructura / ISO N° ----- | N° REPORTE 3 | | |
| | | ELABORADO POR: JUAN LEÓN (UT NIVEL I) | REVISADO POR: MARIA GUTIERREZ (UT NIVEL II) | | |
| ESTANDAR DE INSPECCIÓN ASME SECCIÓN V | | ESTANDAR DE ACEPTACIÓN Establecido en el Procedimiento UT-RCF | | N° PROCEDIMIENTO UT-RCF | |
| PROBETA CILINDRICA DEL TIPO A DIÁMETRO: 50,8mm ESPESOR: 20mm | | | PROBETA CILINDRICA DEL TIPO B DIÁMETRO: 50,8mm ESPESOR: 8mm | | |
| EQUIPO | | | | | |
| MARCA/TIPO: OLYMPUS | | MODELO: EPOCH LTC | | SERIAL: SD010312 | |
| BLOQUE CALIBRADOR: V2 | | SENSIBILIDAD DEL BARRIDO: 1/8" | | ANGULO DE PRUEBA: 45° | |
| TRANSDUCTOR | | | | | |
| MARCA/MODELO: Krautkramer KB-A | | DIÁMETRO: 5 | | FRECUENCIA: 2,25 MHz | |
| PROBETA | FECHA | ESPEOR | NATURALEZA DEFECTO | A: ACEPTADA | R: RECHAZADA |
| 1A | 03/06/13 | 20mm | GRT, GRL | | R |
| 2A | 03/06/13 | 20mm | F | | R |
| LEYENDA: GRT: Grieta transversal GRL: Grieta Longitudinal P: Picadura | | | | | |

elementos con geometría similar a las del presente trabajo que son sometidos a FCR.

Para los defectos como perforaciones o picaduras internas, se obtienen mejores resultados aplicando el método de haz normal por su facilidad de interpretación y lectura en la pantalla del equipo ultrasónico.

Para los defectos como grietas internas paralelas al camino de rodadura el método adecuado de inspección es el de haz normal, ya que se obtiene ecos bien definidos y fáciles de interpretar.

Las grietas internas que se encuentren perpendiculares al camino de rodadura son imperceptibles con el método de inspección de haz normal.

Las grietas internas que tengan cierto grado de inclinación con respecto al camino de rodadura, su detección resulta muy complicada tanto con el método de haz normal como para el angular, debido al fenómeno de refracción que ocasiona la misma al desviar la onda ultrasónica que incide sobre ella.

Los defectos como grietas perpendiculares al camino rodante, son ideales para su inspección y detección con el método de Haz angular, debido a que hay una gran incidencia de la onda ultrasónica

lo que trae como resultado una excelente reflexión, captando un eco bien definido en la pantalla del equipo ultrasónico

Reconocimiento.

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2013.

Referencias

- [1] G. A. Matzkanin y H. T. Yolken. Selecting a nondestructive testing method, part v: Ultrasonic testing. *AMMTIAC Quarterly*, 2(3):9–13, 2008.
- [2] R. S. Dwyer-Joyce. The application of ultrasonic ndt techniques in tribology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 219(5):347–366, 2005.
- [3] B. Mi, J. E. Michaels, y T. E. Michaels. An ultrasonic method for dynamic monitoring of fatigue crack initiation and growth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 119(1):74–85, 2006.
- [4] J. León y M. Pinto. Elaboración de una metodología para detectar fallas subsuperficiales en condición de contacto rodante mediante el uso de ultrasonido. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2013.
- [5] R. Dommarco. *Fatiga de contacto por rodadura. Degradación y falla superficial*. Tesis doctoral, Fac. Ingeniería, Universidad Nacional Mar del Plata, Argentina, 1997.