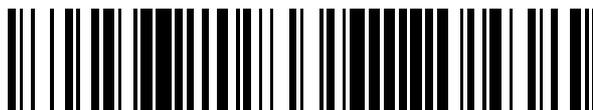


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 566 677**

51 Int. Cl.:

G01N 29/22 (2006.01)

G01N 17/00 (2006.01)

G01N 33/20 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.12.2006 E 06820674 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.03.2016 EP 1960766**

54 Título: **Detección de defectos en estructuras soldadas**

30 Prioridad:

16.12.2005 GB 0525528
16.12.2005 EP 05270093

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.04.2016

73 Titular/es:

BAE SYSTEMS PLC (100.0%)
6 Carlton Gardens
London SW1Y 5AD, GB

72 Inventor/es:

SARGENT, JEFFREY PAUL

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 566 677 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Detección de defectos en estructuras soldadas

Sector técnico de la invención

5 La presente invención se refiere a un procedimiento que utiliza ondas ultrasónicas para la detección de defectos de tipo corrosión en estructuras soldadas, tales como depósitos utilizados para el almacenamiento de agua, lastre o combustible.

Antecedentes de la técnica

10 Los procedimientos actuales utilizados para la inspección de depósitos de almacenamiento requieren acceso a sus superficies internas y una evaluación visual de la corrosión. Esto es un procedimiento tanto prolongado como costoso, requiere el vaciado de los depósitos y unas condiciones de trabajo inhóspitas. Una alternativa a la inspección local es utilizar ondas guiadas para inspeccionar grandes áreas desde un sensor. Este enfoque ha sido utilizado para la detección de corrosión en oleoductos, y más recientemente en el desarrollo de procedimientos para la inspección de grandes áreas de placas; ver P Wilcox, M Lowe y P Cawley, "An EMAT array for the rapid inspection of large structures using guided waves" ("Una matriz EMAT para la inspección rápida de grandes estructuras utilizando ondas guiadas") Review of progress in quantitative NDT, ed. D O Thompson y D E Chimenti, A.I.P. Conference Proceedings, volumen 22, 2003; P Wilcox, M Lowe y P Cawley, "Omni-directional Guided Wave Inspection of Large Metallic Plate Structures Using an EMAT Array" ("Inspección por ondas guiadas omnidireccionales de grandes estructuras de placa metálica utilizando una matriz EMAT"), IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2004; P Wilcox, M J S Lowe y P Cawley, "The effect of dispersion on long range inspection using ultrasonic guided waves" ("El efecto de la dispersión en la inspección de largo alcance utilizando ondas ultrasónicas guiadas") NDT & E International, 34, páginas 1 a 9, 2001. La técnica utilizada implica la exploración de una placa bidimensional en todas las direcciones, generando un haz ultrasónico dirigido electrónicamente con un transductor EMAT de una construcción especial.

25 El documento de Sylvie Legendre et al: "Neural classification of Lamb Wave Ultrasonic Weld Testing Signals Using Wavelet Coefficients" ("Clasificación neuronal de señales ultrasónicas de prueba de soldaduras con ondas de Lamb utilizando coeficientes de ondícula"), IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, US, volumen 50, número 3, junio de 2001 (2001-06) ISSN: 0018-9456, da a conocer un procedimiento para detectar defectos en una estructura metálica soldada, que comprende montar un transductor ultrasónico a cierta distancia de un cordón de soldadura, emitir señales ultrasónicas hacia un lado del cordón de soldadura, y detectar reflexiones de las señales, que pueden ser indicativas de defectos en el interior del cordón de soldadura, o junto al mismo.

35 Las ondas ultrasónicas utilizadas en las placas en las aplicaciones de pruebas no destructivas (NDT, non-destructive testing) son normalmente ondas de Lamb. Las ondas de Lamb se definen y explican en el documento de Viktorov, Acoustic Institute, Academy of Sciences, USSR "Rayleigh and Lamb Waves" ("Ondas de Rayleigh y de Lamb"), Plenum, 1967:- "Lamb waves refer to elastic perturbations propagating in a solid plate (or layer) with free boundaries, for which displacements occur both in the direction of wave propagation and perpendicularly to the plane of the plate. Lamb waves represent one of the types of normal or plate modes in an elastic waveguide, in this case a plate with free boundaries. For this reason Lamb waves are sometimes simply called normal modes in a plate. But this definition is rather loose, insofar as another type of normal mode can exist in a plate with free boundaries, namely transverse normal modes, wherein the motion is perpendicular to the direction of propagation and parallel to the boundaries of the plate." ("Las ondas de Lamb se refieren a perturbaciones elásticas que se propagan en una placa (o capa) sólida de contornos libres, para lo que se producen desplazamientos tanto en la dirección de propagación de la onda como perpendicularmente al plano de la placa. Las ondas de Lamb representan uno de los tipos de modos normales o de la placa en una guía de onda elástica, en este caso una placa con contornos libres. Por esta razón, en ocasiones las ondas de Lamb se denominan simplemente modos normales en una placa. Pero esta definición es muy imprecisa, por cuanto que puede existir otro tipo de modo normal en una placa con contornos libres, en concreto los modos normales transversales, en los que el movimiento es perpendicular a la dirección de propagación y paralelo a los contornos de la placa").

40 Los análisis muestran que para el movimiento de las ondas perpendicular a la dirección de propagación, y perpendicular al grosor de la placa, existe en dos grupos de ondas, las denominadas ondas de Lamb simétricas (S) y las ondas de Lamb antisimétricas (A). En las ondas simétricas, el movimiento se asemeja a una expansión y contracción alternas de la placa en la dirección del grosor, mientras que en las ondas antisimétricas, el movimiento de la onda se asemeja a una flexión alternativa de la placa en sentidos opuestos a través del grosor de la placa. Existe un número finito de cada tipo de onda, denominados órdenes (n), estando la longitud de onda de los órdenes superiores relacionada armónicamente con el orden cero. Los órdenes se diferencian entre sí en sus velocidades de fase y de grupo.

55 Existen otros tipos de ondas, que se propagan en placas, que no se denominan normalmente ondas de Lamb, por ejemplo ondas de cizalla (SH) o transversales, en las que el movimiento de la onda es paralelo a los contornos de la placa.

Las ondas guiadas en placas perderán energía hacia el medio circundante si la placa está sumergida en un líquido. Esto será particularmente notable si el medio es viscoso, y ocurrirá en mayor medida cuando el tipo de modo tenga como resultado la deformación superficial sin movimiento fuera del plano, en lugar de un movimiento en el plano. En general, esto significa que los modos de ondas de Lamb antisimétricas tienen una alta atenuación, y los modos de ondas de Lamb simétricas con poco desplazamiento superficial fuera del plano presentarán una atenuación insignificante como resultado de la carga del líquido. Sin embargo, esto supone normalmente que son necesarios transductores especializados que sean sensibles al desplazamiento superficial en el plano. Pueden ser utilizados EMATs (Electromagnetic acoustic transducers, transductores acústicos electromagnéticos) y transductores piezoeléctricos de cizalla para generar y recibir modos simétricos, tales como los modos fundamentales S_0 o SH_0 .

- 5
- 10 Se presentan complicaciones asociadas con la inspección por ondas guiadas, en general, debido a que las ondas se propagan con velocidades diferentes a frecuencias diferentes (un fenómeno conocido como dispersión), y asimismo debido a que la excitación y recepción de modos no deseados tiene como resultado señales superpuestas y confusas. Surgen asimismo problemas prácticos habituales asociados con la utilización de ondas guiadas, a partir de las reflexiones desde los bordes de la placa, de la presencia de refuerzos, de la presencia de soldaduras y juntas, y de cambios de grosor.
- 15

Resumen de la invención

Normalmente se acepta que la junta de soldadura es el área más crítica desde el punto de vista del rendimiento, dado que se puedan producir muchas características perjudiciales; incluyendo éstas cambios en la microestructura, imperfecciones en la soldadura y la presencia de tensión residual. Se considera asimismo que estas imperfecciones pueden tener como resultado una corrosión selectiva, ya sea en la propia soldadura o en la zona afectada por el calor (HAZ, heat affected zone) adyacente a la soldadura. La presente invención se dirige a la detección de corrosión en la soldadura o en la zona afectada por el calor. En particular, dado que la soldadura puede tener un acabado imperfecto, o que la propia soldadura puede ofuscar señales originadas en áreas corroídas, implícitamente existe asimismo la necesidad adicional de detectar y diferenciar las reflexiones originadas en la soldadura respecto de las que se originan por corrosión.

20

25

El concepto de la presente invención consiste en introducir una onda de Lamb ultrasónica, de un modo y frecuencia predeterminados tales que se propague a lo largo de la longitud de un cordón de soldadura, donde el cordón de soldadura constituye una guía de onda para la onda ultrasónica. La diferencia entre el grosor y las propiedades materiales de la soldadura y de la placa provoca velocidades de propagación (de fase) en la soldadura diferentes comparadas con la placa y esto, a su vez, hace que la soldadura actúe como una guía de onda, tal como se describe a continuación. A los efectos de esta descripción, se entiende que "guía de onda" significa un medio de transmisión que confina y guía la energía de una onda ultrasónica. El confinamiento se produce por la reflexión interna de las ondas en las paredes en los contornos de la guía de onda. Para una acción de guía de onda perfecta, se tiene una reflexión interna total en los contornos, y ninguna fuga de energía desde la guía de onda. Sin embargo, en la práctica puede existir pérdida de energía desde la guía de onda cuando la reflexión interna no llega a ser total. De acuerdo con la teoría de guías de onda, existe una onda evanescente que se extiende en una corta distancia hacia el exterior de los contornos de la guía de onda, y esta propiedad puede ser explotada con la presente invención tal como se explica a continuación.

30

35

De acuerdo con la invención, se pueden detectar defectos muy pequeños en la soldadura y en el área afectada por el calor adyacente a la soldadura. Dado que la energía de la señal transmitida se transmite a lo largo del cordón de soldadura, solamente se pueden producir reflexiones desde lugares interiores al cordón de soldadura o adyacentes al mismo. Además, se reduce sensiblemente el problema común con la NDT de excitación y recepción de modos no deseados, dado que se ha descubierto que para ciertas zonas de frecuencia, las ondas transmitidas se propagarán solamente en un único modo a una frecuencia predeterminada.

40

En un primer aspecto, la invención da a conocer un procedimiento de detección de defectos en una estructura metálica soldada, tal como se define en la reivindicación 1.

45

El transductor se puede montar en el borde de la placa en la que está situado el cordón de soldadura, tal como se describe más adelante. Alternativamente, el transductor se puede montar en la superficie de la placa adyacente al cordón de soldadura. El transductor se sujeta a la placa metálica, o se fija de otro modo. El transductor puede ser un transductor piezoeléctrico o un transductor de tipo EMAT, un transductor interdígital u otro tipo de transductor utilizado en pruebas no destructivas.

50

El transductor está dispuesto preferentemente tanto para transmitir señales como para recibir señales reflejadas. Un medio transceptor está acoplado al elemento transductor para proporcionar señales para transmisión y para procesar señales recibidas. La señal transmitida preferida tiene una forma pulsada, de manera que las reflexiones desde los potenciales puntos defectuosos se pueden detectar como pulsos de "eco". La señal pulsada se transmite como un paquete de ondas, con frecuencias centradas en torno a una frecuencia de base. El pulso está conformado de manera que reduce el ancho de banda, por ejemplo por medio de una ventana de Hanning (función coseno alzado), para reducir la dispersión del pulso y debido a que se pueden producir frecuencias superiores en zonas en las que el cordón de soldadura no funciona de la manera deseada. Preferiblemente, y tal como se describe a continuación, los pulsos tienen la forma de una ráfaga de tonos definida dentro de una ventana de Hanning, de entre

55

60

5 y 20 ciclos de longitud. Cuanto mayor es la ráfaga de tonos, más monocromática es y por lo tanto menos propensa a la dispersión. Sin embargo, puede haber más dificultad en la discriminación de reflexiones con un pulso más largo. Se pueden utilizar otras formas de ventana para reducir el ancho de banda, y éstas serán bien conocidas por los expertos en la materia.

5 Se ha descubierto que, de acuerdo con la invención, para ciertas zonas de frecuencia, las ondas transmitidas se propagarán solamente en un único modo dentro del cordón de soldadura. Por lo tanto, es deseable determinar previamente, mediante observación o cálculo, el modo adecuado de la onda ultrasónica, si es una onda simétrica (S), antisimétrica (A), de cizalla (SH) u otro modo, el orden del modo (indicado por un subíndice) y la frecuencia de funcionamiento en la que el cordón de soldadura actuará como una guía de onda. Se ha descubierto, de manera
10 fortuita, que un modo adecuado es el modo simétrico fundamental (S_0) de una onda de Lamb, tal como se describe a continuación, dado que se puede generar dentro de una zona de frecuencia en la que otros modos no se pueden propagar en el interior de un cordón de soldadura.

15 El efecto de guía de onda se produce en el interior de la soldadura debido principalmente a que ésta es más gruesa que la placa, y por lo tanto la velocidad de fase en la placa es mayor que en la soldadura. Esto tiene como resultado la reflexión interna total en el interior de la soldadura, de manera análoga a lo que se encuentra en las guías de onda ópticas. Además, se propaga una onda evanescente en una zona adyacente a la soldadura, con una amplitud que decae exponencialmente con la distancia desde la soldadura, con una distancia característica determinada por la longitud de onda. La eficacia con la que la onda es guiada dependerá parcialmente de la medida en que la velocidad
20 en la placa es mayor que en la soldadura, lo que viene determinado por la diferencia en grosores, módulos y densidades, y parcialmente de la monocromaticidad del paquete de ondas; esto se explica en mayor detalle a continuación.

25 La presencia de una onda evanescente existente en el exterior del cordón de soldadura de la guía de onda implica que es posible detectar defectos que puedan existir, cuando la intensidad de la onda evanescente es apreciable. Además, cabe la posibilidad de colocar el transductor en el interior de una zona de la onda evanescente fuera de la guía de onda, y seguir acoplando energía en la guía de onda. En general, la zona útil para una onda evanescente es de una longitud de onda de la onda ultrasónica (digamos, 50 mm) desde el contorno de la guía de onda, dado que es aquí donde la intensidad de la onda está reducida por un factor de $1/e$. Sin embargo, si se utiliza una gran cantidad de energía para excitar las ondas ultrasónicas, se puede extender dicha zona útil.

30 Dado que la energía de la señal transmitida se transmite a través del cordón de soldadura, solamente se pueden producir reflexiones desde los lugares interiores al cordón de soldadura o adyacentes al mismo. Además, se reduce sensiblemente el problema común con la NDT de excitación y recepción de modos no deseados, dado que se ha descubierto que para ciertas zonas de frecuencia, las ondas transmitidas se propagarán solamente en un único modo a una frecuencia predeterminada. Esto implica que se puede reducir la magnitud del filtrado y de otro procesamiento de las señales recibidas, y se simplifica el proceso global de la recepción.

35 **Breve descripción de los dibujos**

Se describirá a continuación una realización preferida de la invención, haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 es un ejemplo de sección transversal de soldadura entre dos placas metálicas. La placa tiene 6 mm de grosor. Se muestra una moneda de 1 £ para comparar tamaños.

40 La figura 2a) es un diagrama esquemático que define las coordenadas y muestra la posición de un ejemplo de defecto de orificio en la placa de acero soldado. b) Fotografía de un orificio de fondo plano de 3 mm de profundidad y 20 mm de diámetro situado junto a la soldadura.

La figura 3 es una fotografía que muestra el montaje de un transductor simple en el borde de una placa de acero.

45 La figura 4a) muestra la velocidad de fase calculada para una placa de acero de 6 mm de grosor. b) Velocidad de grupo para una placa de acero de 6 mm de grosor.

La figura 5 muestra la comparación predicha de ecos de ráfagas de tonos de 5 y 10 ciclos a 200 kHz, después de una propagación de 4 m (por ejemplo, un borde de placa, en modo de eco de pulsos).

50 La figura 6 muestra formas de modo calculadas para el modo S_0 a 200 kHz en una placa de acero de 6 mm de grosor.

La figura 7 es un diagrama esquemático de una prueba inicial, en un ejemplo de la invención, que define la posición de la soldadura, la posición del orificio de fondo plano, junto con las posiciones aproximadas del transductor simple montado en el borde.

La figura 8 muestra las trazas de tiempo registradas en función del tamaño del orificio para la disposición de la figura 7, con el transductor simple montado en el borde, alejado de la soldadura. El diagrama pequeño en la parte inferior muestra la posición del transductor (flecha roja). Ráfagas de tonos de 10 ciclos, 200 kHz.

5 La figura 9 muestra, para otra prueba, las trazas de tiempo registradas en función del tamaño del orificio para el transductor simple montado en el borde, cerca de la soldadura. El diagrama pequeño en la parte inferior muestra la posición del transductor (flecha). El transductor genera una ráfaga de tonos de 10 ciclos a 200 kHz.

10 La figura 10 muestra trazas de tiempo más detalladas, registradas junto a la soldadura, en función de la posición del transductor simple montado en el borde, generando una ráfaga de tonos de 200 kHz, 10 ciclos. El diagrama esquemático pequeño muestra un ejemplo de las posiciones del transductor (flechas rojas). $x = 1000$ define la posición de la soldadura. Orificio de 6 mm.

La figura 11 muestra trazas de tiempo detalladas, registradas junto a la soldadura, en función de la posición para el transductor simple montado en el borde, generando ráfagas de tonos de 200 kHz, 20 ciclos. Orificio de 6 mm -por lo además, la configuración es similar a la de la figura 10.

15 La figura 12 es una traza de tiempo detallada, registrada para el transductor simple montado en el borde, situado en la soldadura en el extremo opuesto de la placa -por lo además, la configuración es similar a la ráfaga de tonos de 20 ciclos a 200 kHz de la figura 11. El diagrama esquemático muestra la posición del transductor en $x = 1000$ y $x = 2000$ (flecha).

20 La figura 13 es un diagrama esquemático que muestra la posición de otro orificio de fondo plano de 2 mm y el transductor (indicado por la flecha roja en $x = 1000$ y $y = 0$).

La figura 14 muestra trazas, que comparan la utilización de transductores Ultrason y Panametrics utilizando diversas frecuencias, ganancias y ciclos de ráfagas de tonos. Transductores situados en $x = 1000$, $y = 0$.

25 Figura 15. Resumen de señales reflejadas medidas utilizando un transductor simple. Se muestran asimismo ajustes lineales y extrapolaciones para indicar el tamaño de orificio detectable mínimo predicho probable, en base a los niveles de ruido coherente indicados.

La figura 16 muestra curvas de dispersión para una soldadura de acero de 8 mm de grosor, que se utiliza en este ejemplo. Se muestra el punto de funcionamiento a 200 kHz. a) Velocidad de fase, b) Velocidad de grupo.

Descripción de la realización preferida

30 En una realización preferida, una onda de Lamb S_0 es guiada de forma natural a lo largo de un cordón de soldadura que actúa como guía de onda, proporcionando un procedimiento muy sensible para la detección de defectos de tipo corrosión en la soldadura, o en la zona afectada por el calor adyacente a la soldadura. El ejemplo descrito a continuación ha mostrado un modo de funcionamiento de guías de onda en el que una onda de Lamb simétrica fundamental (S_0) se propaga a lo largo de la soldadura. Este modo se generó utilizando en la placa un transductor de inmersión montado en el borde. Los resultados se pueden resumir como sigue:

- Fue posible detectar fácilmente un orificio de fondo plano de 2 mm de profundidad, 20 mm de diámetro, que representa un defecto de soldadura, a una distancia de 1 m utilizando un transductor amortiguado, excitación de 20 ciclos y una frecuencia de 161 kHz. En base a estos resultados, se predijo que la profundidad mínima detectable para un orificio de fondo plano de 20 mm de diámetro era probablemente de unos 0,3 mm. Esto representa aproximadamente el 5% de grosor de la placa. Se consiguió esta sensibilidad debido al bajo nivel de ruido de fondo coherente y a la naturaleza del funcionamiento de la guía de onda. Por lo tanto, se pueden detectar defectos muy pequeños provocados por corrosión, imperfecciones de soldadura, etc.
- Se midió un coeficiente bajo de atenuación para la propagación en el interior de la guía de onda. Esto implicó que sería posible la detección sobre muchos metros.
- 45 – Dado que el modo S_0 es guiado de manera preferente en la soldadura, es probable que la interferencia procedente de otros modos, tales como los modos fundamentales antisimétrico y de cizalla A_0 y SH_0 , sea pequeña. Esto da lugar a un bajo nivel de ruido de fondo coherente.
- La excitación del modo de guía de onda fue posible a través de la propia zona de soldadura, o bien en zonas alejadas a una distancia de $\sim \lambda$ (aproximadamente a la distancia de una longitud de onda -unos 50 mm), gracias a la onda evanescente que existe fuera del cordón de soldadura.
- 50 – La detección de defectos puede estar limitada a la soldadura y la zona afectada por el calor a distancias alejadas $\sim \lambda$ de la soldadura, debido a la onda evanescente que existe fuera del cordón de soldadura. A 200 kHz es probable que ésta sea de ~ 50 mm de distancia.

El ejemplo descrito en este caso evalúa la posibilidad de discriminar y detectar un defecto de tipo corrosión, en una zona de soldadura utilizando ondas de Lamb So. Mediciones iniciales no optimizadas con un transductor simple montado en el borde mostraron una propagación preferencial, en las guías de onda, del modo S_0 a lo largo de la soldadura. Ésta surgió, de manera muy significativa, como resultado del mayor grosor de la soldadura con respecto a la placa circundante. Este modo de prueba tuvo como resultado una reducción del eco parásito inherente, con un nivel de ruido coherente de aproximadamente -39db con respecto al borde de la placa. Esto permitió la fácil detección de un orificio de fondo plano (que representa un defecto) de 2 mm de profundidad, 20 mm de diámetro, a una distancia de 1 metro, utilizando una excitación de ráfagas de tonos de 20 ciclos a una frecuencia de 161 kHz. Se predijo que en la profundidad mínima detectable utilizando este modo de guía de onda para un orificio de fondo plano de 20 mm de diámetro era probablemente de aproximadamente 0,3 mm a una distancia de muchos metros.

EJEMPLO

Una muestra de prueba se compuso de dos placas de acero de calidad DH de 1 m x 2 m x 6 mm de grosor soldadas a tope juntas, para proporcionar una placa de prueba acabada de 2 m cuadrados con una soldadura por la mitad. La placa se suministró con ambos lados pintados y tenía un cordón de soldadura, tal como se muestra en la figura 1. La configuración de la soldadura fue: borde de placa cortado con láser, recto, soldado sin separación, con hilo de soldadura de 3,2 mm de diámetro en posición vertical, contra una baldosa de soporte, con una entrada de calor de 2,38 kJmm.

Se formó un orificio de fondo plano de 20 mm de diámetro a una distancia de 1,5 m desde el borde inferior. Este se taladró utilizando una broca sujetada magnéticamente. Las profundidades de los orificios fueron de 0,98 mm, 2,17 mm, 3,0 mm y 3,85 mm, y el grosor transversal del orificio de 6 mm, situado en una zona adyacente a la soldadura. Las coordenadas de la placa y la posición del orificio con respecto a la soldadura y los bordes de la placa se muestran esquemáticamente en la figura 2a. La figura 2b muestra una fotografía del orificio creado junto a la soldadura después de la perforación a una profundidad de 3,0 mm.

El equipo necesario para adquisición de datos y mediciones con un solo transductor comprendió un transductor de inmersión de un solo elemento (un transductor Ultrason de 200 kHz o un Panametrics de ancho de banda de 100 kHz a 500 kHz) montado en el borde sobre la placa de acero, acoplado utilizando un acoplador de gel. La excitación y la recepción fue mediante un generador de impulsos receptor "Wavemaker duet", con visualización de forma de onda y digitalización por medio de un osciloscopio de almacenamiento digital LeCroy 9400 A. El almacenamiento de formas de onda se realizó por medio de una interfaz IEEE a un PC independiente utilizando un paquete de software de colecciones de formas de onda. La figura 3 muestra el transductor montado en el borde sobre la placa de acero de la figura 1, mediante una disposición de sujeción mecánica a modo de ejemplo que comprende pinzas de papelería y una goma elástica.

Las velocidades de fase y de grupo calculadas para una placa de acero de 6 mm de grosor se muestran en las figuras 4a) y 4b) respectivamente. La velocidad de fase se refiere a la velocidad con la que los planos de igual fase, crestas o valles, se propagan a través del medio. Cabe recordar que una serie de ondas de frecuencias, longitudes de onda y velocidades diferentes se pueden superponer para formar un grupo, que se propaga con una velocidad conocida como la velocidad del grupo. Por supuesto, un grupo este tipo se podría dispersar con el tiempo debido a que la velocidad de onda de cada componente sería diferente. La importancia de la velocidad de grupo consiste en que es la velocidad con la que se transmite la energía en el grupo de ondas, y en la aplicación utilizada en este caso, representa la velocidad con la que se pueden observar "ecos" reconocibles a partir de reflexiones desde los orificios de fondo plano.

Haciendo referencia a continuación a la figura 16, ésta muestra curvas de dispersión para una soldadura de 8 mm de grosor, e indica el efecto de guía de onda que se produce en el interior de la soldadura, principalmente debido a que ésta es más gruesa que la placa, y por lo tanto la velocidad de fase en la placa es mayor que en la soldadura. Esto tiene como resultado la reflexión interna total en el interior de la soldadura, de manera análoga a lo que se encuentra en las guías de onda ópticas. Además, se propaga una onda evanescente en una zona adyacente a la soldadura, con una amplitud que decae exponencialmente con la distancia desde la soldadura, con una distancia característica determinada por la longitud de onda. La eficacia con la que la onda es guiada dependerá en parte de la medida en que la velocidad en la placa es menor que en la soldadura, lo que viene determinado por la diferencia en grosores, módulos y densidades.

Los gráficos de la figura 4 y la figura 16 que muestran la velocidad de fase frente a la frecuencia se pueden representar de manera más general como gráficos de velocidad frente al producto frecuencia/grosor. De manera que, por ejemplo, se obtendría el mismo punto en el gráfico utilizando una frecuencia de 166 kHz y un grosor de 6 mm, que con una frecuencia de 125 kHz y un grosor de 8 mm. Por lo tanto, a la misma frecuencia de funcionamiento de, digamos, 160 kHz, esto implica un producto frecuencia grosor para la placa de 6 mm de ~ 1 MHz-mm y de $\sim 1,3$ MHz-mm para la soldadura de 8 mm. Tomando esta lectura de la curva de dispersión, esto implica una velocidad mayor para el material de la placa de menor grosor, que para la soldadura. Por lo tanto, una pendiente negativa para la curva de velocidad de fase es importante para determinar que, para una frecuencia dada, la velocidad de la soldadura es entonces menor que en el material, más delgado, de la placa.

Es posible asimismo contemplar la situación opuesta si la soldadura fuera más delgada que la placa circundante, en cuyo caso la condición necesaria sería entonces que se requiere una pendiente positiva en la curva de dispersión.

5 La eficacia con la que la onda es guiada en el interior de la soldadura dependerá parcialmente asimismo de la monocromaticidad del paquete de ondas. De este modo, por ejemplo, aunque se produce una mayor diferencia de velocidades a 200 kHz que a 160 kHz, que tiene como resultado un guiado más eficaz, esto se vera compensado por el requisito de una mayor monocromaticidad como resultado del aumento en la dispersión, tal como se muestra en la curva de velocidad de grupo a 200 kHz (ver la figura 16b). Además, es probable asimismo que la eficiencia de la guía de onda esté influida por cambios en la geometría de la soldadura.

10 Una consecuencia de las pendientes de las curvas de dispersión de la velocidad de fase mostradas en la figura 16a es que solamente S_0 será guiada en el cordón de soldadura, en el rango de frecuencias utilizado en este caso. Esto se debe a que la pendiente para A_0 es positiva con respecto al aumento de grosor, y a que para S_0 no está influida por el grosor. Esto significa de hecho que se producirá para S_0 una mayor pureza del modo a medida que se produce la propagación a lo largo de la soldadura, con una menor influencia de los ecos parásitos provocados por los otros modos A_0 y SH_0 .

15 La fuente de excitación "Wavemaker" utilizada en este caso, podía proporcionar ráfagas de tonos en ventanas de Hanning que comprendían un número de ciclos seleccionable por el usuario, a una frecuencia particular. En la práctica, se utilizaron en este caso ráfagas de tonos de 5, 10 ó 20 ciclos a entre 150 kHz y 200 kHz. Observando a partir de la figura 4b) que la velocidad de grupo a 200 kHz para el modo S_0 cambia muy rápidamente en función de la frecuencia, entonces el paquete de ondas más corto, que tendría un ancho de banda mayor, tendría como resultado una dispersión mayor que un paquete de ondas más largo, que tendría un ancho de banda menor, y por lo tanto menor dispersión. En las figuras 5a) y 5b) se muestra respectivamente un ejemplo que muestra el resultado de la dispersión de una ráfaga de tonos de 5 ciclos y de 10 ciclos, para una frecuencia central de 200 kHz, y una distancia de propagación de 4 m en una placa de acero (por ejemplo, un pulso reflejado desde el borde de la placa, de la placa de 2 m cuadrados). Existe claramente un compromiso entre el deseo de aumentar la longitud del pulso para impedir la dispersión y la reducción en la amplitud, y el requisito de mantener el pulso tan corto como sea posible para distinguir un eco de otro. Además, longitudes de pulso más cortas con un ancho de banda mayor pueden asimismo tener como resultado la excitación de modos de orden superior no deseados. Las formas de modo para el modo S_0 a 200 kHz se muestran en la figura 6. Ésta muestra la amplitud relativa para el desplazamiento en plano y fuera del plano de la placa de acero. Se puede observar que para este modo el desplazamiento en el plano, tal como se ha indicado anteriormente, es mucho mayor que el desplazamiento fuera de plano. Por lo tanto, el modo S_0 debe ser el preferido para mediciones, por ejemplo, en un depósito en el que la vibración puede ser absorbida por el líquido almacenado en el interior del depósito.

25 En una prueba inicial, se realizaron mediciones de un solo transductor de pulso/eco a 200 kHz, en las posiciones mostradas en la figura 7. Éstas se realizaron en el estado inicial de la placa sin ningún orificio presente, y asimismo en función del tamaño del orificio. La figura 8 muestra el resultado de esta prueba en forma de típicas trazas de tiempo registradas en función del tamaño del orificio, lejos de la zona de soldadura, con el transductor situado en la parte inferior de la placa en la posición $x = 1300$, $y = 0$, mirando en una dirección paralela a la línea de soldadura. La línea de soldadura está situada en $x = 1000$. El borde superior de la placa, que se ve en la figura 8, fue visible claramente como una gran reflexión en un tiempo de aproximadamente $800 \mu s$ después de la excitación inicial en el tiempo $t = 0$. Las señales entre el tiempo $t = 0$ y aproximadamente $200 \mu s$ (a la izquierda de la imagen) fueron debidas probablemente a reverberaciones producidas dentro de la sonda. No fue visible ninguna señal para ningún tamaño de orificio que pudiera estar correlacionada con la posición esperada del orificio de fondo plano.

35 En otra prueba, el transductor se montó cerca del extremo del cordón de soldadura. Los parámetros de la ráfaga de tonos se mantuvieron sin cambios. Los resultados se muestran en la figura 9. La figura 9 muestra una secuencia similar de ecos a la de la figura 8, mirando en una dirección paralela a la línea de soldadura, pero registrados en cambio en una posición adyacente a la soldadura para la posición $x = 1050$, $y = 0$. Diferencias notables entre los resultados de la figura 8 y la figura 9 fueron la menor amplitud, los múltiples picos, y una mayor extensión de tiempo para reflexiones originadas en el borde superior de la placa, y asimismo el aspecto de las reflexiones que parecen ser las del orificio de fondo plano, que se producen aproximadamente a 600 microsegundos y antes del final de las reflexiones de la placa.

45 Dado que los resultados mostrados en la figura 9 parecían indicar muy señales grandes, que parecía indicaban la presencia del orificio cuando el transductor estaba situado junto a la soldadura, y no alejado de la soldadura, se obtuvo otra serie de resultados más detallados en la zona de la soldadura. Hubo dificultad en el acoplamiento del transductor en este área debido a que la soldadura y los bordes adyacentes de la placa eran muy irregulares. Por lo tanto, la soldadura y el borde adyacente de la placa se limaron suavizándolos lo suficiente para proporcionar un acoplamiento razonable del transductor, y se obtuvieron resultados detallados aproximadamente a 100 mm a cada lado de la soldadura. La figura 10 muestra los resultados utilizando excitación de 10 ciclos a 200 kHz mirando en una dirección paralela a la soldadura, y la figura 11 muestra una excitación de 20 ciclos, mirando asimismo en la misma dirección. Cada traza de tiempo se refiere a un montaje específico del transductor en una posición indicada por la coordenada x . El cordón de soldadura está situado a $x = 1000$.

La comparación de las figuras 10 y 11 muestra niveles menores de ruido coherente, mayores amplitudes de señal y una discriminación más fácil de distintas características de forma de onda cuando se utiliza excitación de 20 ciclos. Esto se puede observar comparando las trazas de tiempo de la excitación de 10 ó 20 ciclos para reflexiones ya sea desde el orificio de 6 mm o desde el borde posterior de la placa. La inspección de la figura 11 muestra asimismo que el orificio de 6 mm fue claramente visible para posiciones del transductor entre aproximadamente $x = 920$, $y = 0$ y $x = 1050$, $y = 0$.

En la figura 11 están comentadas características específicas la forma de onda, correspondientes al orificio y al borde de la placa. En particular, ésta muestra que la reflexión de la placa en el borde superior se produjo en dos posiciones discretas en el dominio de tiempo, es decir aproximadamente a $t = 844 \mu\text{s}$ con propagación a través de la placa, y aproximadamente a $t = 792 \mu\text{s}$ con propagación adyacente a la soldadura. La reflexión desde el orificio de 6 mm se produce en una única posición de aproximadamente $t = 625 \mu\text{s}$. Observando que el trayecto total atravesado por las señales en el modo pulso-eco es el doble de la longitud de la placa, es decir 4 m, esto implica velocidades de aproximadamente 5050 ms^{-1} para la velocidad de grupo de la placa, lo cual es consistente con la curva de velocidad de grupo mostrada anteriormente en la figura 6b para la placa de 6 mm, y una velocidad de aproximadamente 4740 ms^{-1} para la velocidad de grupo adyacente a la soldadura, que implica un grosor eficaz de aproximadamente 8 mm.

Observando que este grosor era próximo al grosor medio para la soldadura de aproximadamente 8 mm (ver la figura 1), y que la excitación de la onda con la velocidad menor se produjo solamente dentro de ~ 50 mm desde la soldadura, es decir $\sim \lambda$ a esta frecuencia, esto implica que la soldadura estaba actuando probablemente como una guía de onda. Además, observando que el orificio estaba situado a $\frac{3}{4}$ de la distancia a lo largo de la longitud de la placa, y observando que el $\%$ de $844 \mu\text{s}$ fue $633 \mu\text{s}$, es decir aproximadamente el retardo de tiempo que se observó para la reflexión desde el orificio, esto implica asimismo que el eco reflejado desde el orificio fue mediante el modo propagándose a lo largo de la guía de onda de la soldadura. Probablemente, el resultado más importante a señalar en términos de relaciones señal/ruido fue, sin embargo, que la amplitud del eco reflejado desde el orificio de 6 mm fue muy grande. Si se supone que el orificio tuvo solamente una influencia menor sobre la reflexión del borde posterior de la placa, entonces la reflexión del orificio de 6 mm fue de aproximadamente -12dB con respecto a la procedente de la reflexión del borde posterior de la placa.

La confirmación de que la reflexión desde el orificio de 6 mm se originó de la manera descrita, se obtuvo colocando el transductor en el extremo opuesto de la soldadura, en la posición $x = 1000$, $y = 2000$. La traza de tiempo se muestra en la figura 12 para una excitación de 20 ciclos a 200 kHz. La reflexión del orificio de 6 mm, a una amplitud de aproximadamente -10dB con respecto a la reflexión de la pared posterior de la placa, se indica en la figura 12 y se produce aproximadamente a $210 \mu\text{s}$, es decir aproximadamente en $\frac{1}{4}$ de la longitud de la placa. Observando la diferencia en amplitud entre la reflexión a la distancia de $\frac{1}{4}$ y la reflexión a la distancia de $\frac{3}{4}$ para el orificio de 6 mm, y suponiendo que la reflexión del borde de la placa en ambos extremos era la misma, fue posible asimismo estimar que había una pérdida aproximada de solamente 2 dB sobre una distancia de propagación total de 2 m.

Se taladró otro orificio de fondo plano de 2 mm de profundidad junto a la soldadura, a medio camino a lo largo de la longitud de la placa en una posición mostrada en la figura 13. Además, se aprovechó asimismo la oportunidad para desarrollar un estudio limitado sobre la optimización de la sonda y de la frecuencia cuando se utiliza un transductor simple montado en el borde. Los resultados se obtuvieron utilizando tanto el transductor "Ultran" de 200 kHz existente, como asimismo un transductor "Panametrics" de banda ancha mejor amortiguado, con un ancho de banda comprendido entre 100 kHz y 500 kHz. Se obtuvieron resultados solamente cuando se montaron en la soldadura en una posición $x = 1000$ y $y = 0$. Estos se muestran en la figura 14. La inspección de la figura 14 mostró que las señales de máxima amplitud con mínimo ruido coherente se obtuvieron para el transductor Panametrics a 161 kHz utilizando una excitación de 20 ciclos, con escasa evidencia de señales parásitas significativas producidas en la traza de tiempo hasta la reflexión desde el borde posterior de la placa. En este caso, si se descuentan las reverberaciones iniciales del transductor entre el tiempo $t = 0$ y aproximadamente el tiempo $t = 300 \mu\text{s}$, entonces las relaciones señal/ruido tanto para el transductor Ultran existente a 200 kHz como para el transductor Panametrics a 161 kHz, utilizando una excitación de 20 ciclos, fueron:

Transductor Panametrics 161 kHz, 20 ciclos

Orificio de 6 mm = -15,5 dB, orificio de 2 mm = -22dB, nivel de ruido coherente = -39dB

Transductor Ultran 200 kHz, 20 ciclos

Orificio de 6 mm = -12 dB, orificio de 2 mm = -19dB, nivel de ruido coherente = -30dB

Estos resultados están resumidos, junto con resultados existentes de un comprobador de placas de la técnica anterior, en el gráfico mostrado en la figura 15. Cabe señalar que los niveles de señal del transductor simple para el orificio de 2 mm tanto a 161 kHz como a 200 kHz se han reducido en 1 dB para proporcionar la misma posición equivalente que para el orificio de 6 mm. Este ajuste se basó en la pérdida medida anteriormente utilizando distancias en la placa de $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$. La figura 15 muestra asimismo los resultados de un ajuste aproximado de una línea de regresión lineal a un promedio de resultados de 200 kHz y 161 kHz. Esto se ha extrapolado para proporcionar un tamaño predicho del orificio, en base a un nivel de ruido coherente de -39 dB.

5 Cabe destacar que debido a que la sonda Panametrics no proporcionó señales parásitas observables, y proporcionó un nivel de ruido coherente de -39 dB con respecto a la reflexión en el borde de la placa utilizando excitación de 20 ciclos a 161 kHz, esto implicó una predicción del límite de detección de la profundidad del orificio de 0,3 mm (asumiendo la validez de la extrapolación lineal que se muestra en la figura 15). Esto representaría un límite de detección de tan sólo el 5% del grosor de la placa.

10 Este ejemplo muestra que un modo de onda de Lamb So guiado de manera natural a lo largo de la soldadura es el procedimiento más sensible para la detección de defectos de tipo corrosión en soldaduras con la geometría utilizada en este caso, o en la zona afectada por el calor adyacente a la soldadura. Este ejemplo se limita a la utilización de orificios de fondo plano como indicadores útiles de la sensibilidad a posibles defectos de tipo corrosión. En la práctica, es probable que los defectos de corrosión reales se desvíen de esta geometría idealizada, y sea necesario considerar asimismo otras geometrías, por ejemplo, corrosión de tipo lineal junto a la soldadura. La detectabilidad de los defectos para defectos de tipo lineal dependerá de la profundidad, de la sección transversal subtendida con la onda incidente de interrogación, del tipo de modo y asimismo de la posición con respecto a otras características, por ejemplo, la propia soldadura.

15 El diseño funcional y el desarrollo de un transductor específico de tipo guía de onda se simplifica considerablemente, debido a que el modo de funcionamiento de guía de onda no requiere orientación ni enfoque del haz, ni por lo tanto grandes transductores de múltiples elementos. Un transductor específico tendrá factores de diseño tales como el tipo de transductor, por ejemplo de excitación electromagnética o piezoeléctrica, el tamaño del transductor, el acoplamiento y la influencia de las capas de pintura y de la rugosidad superficial sobre la transducción, y, la repetitividad y la fiabilidad de la transducción en presencia de ecos parásitos.

20 Dado que otros modos de orden superior tales como A_1 o S_1 presentan asimismo en las curvas de dispersión de la velocidad de fase una pendiente negativa con el aumento del grosor, es posible asimismo que esto pueda servir también como un medio útil para una inspección detallada, en particular debido a su mayor frecuencia. Además, aunque en este caso se ha hecho énfasis en la utilización del procedimiento de guía de onda para detectar corrosión en la soldadura y en la zona afectada por el calor, el modo de guía de onda descrito en la presente memoria puede ser adecuado asimismo como una alternativa a procedimientos radiográficos para la inspección de la soldadura per se.

25 La excitación y recepción con un transductor simple de modos de onda de Lamb So por medio de la guía de onda ofrecida por la soldadura, ofrece un procedimiento muy prometedor para detección de corrosión en la zona afectada por el calor y para la inspección de la soldadura, con el potencial de detección de pequeños defectos de tipo corrosión y defectos de soldadura, probablemente sobre distancias de muchos metros.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un procedimiento de detección de defectos en una estructura metálica soldada, que comprende sujetar o fijar de otro modo un transductor ultrasónico en, o junto a un cordón de soldadura, y emitir señales de ondas de Lamb ultrasónicas, de tal modo que las señales se propaguen a lo largo del cordón de soldadura que actúa como una guía de onda, y detectar reflexiones de la señales guiadas, procedentes de la guía de onda, que pueden ser indicativas de defectos en el interior del cordón de soldadura, o adyacentes al mismo.
2. Un procedimiento según la reivindicación 1, en el que dichas señales ultrasónicas se transmiten como ondas en modos de vibración de placa.
- 10 3. Un procedimiento según la reivindicación 1 ó 2, en el que dichas señales ultrasónicas se transmiten en un único modo de transmisión.
4. Un procedimiento según la reivindicación 3, que incluye determinar previamente, mediante cálculo u observación, una frecuencia de funcionamiento en la que el cordón de soldadura actuará como una guía de onda para solamente un único modo de transmisión.
- 15 5. Un procedimiento según la reivindicación 4, que incluye determinar dicha frecuencia de funcionamiento considerando la variación de la velocidad de fase de los modos de transmisión con la frecuencia.
6. Un procedimiento según la reivindicación 2 y 3, en el que dicho modo de transmisión comprende un modo simétrico de una onda de Lamb.
7. Un procedimiento según la reivindicación 2 y 3, en el que dicho modo de transmisión es el modo simétrico fundamental de la onda de Lamb.
- 20 8. Un procedimiento según cualquier reivindicación anterior, en el que dichas señales ultrasónicas comprenden un pulso.
9. Un procedimiento según la reivindicación 8, en el que el pulso comprende por lo menos una ráfaga de tonos de entre 5 y 20 ciclos de longitud.
- 25 10. Un procedimiento según la reivindicación 7 ó 8, en el que el pulso está conformado para reducir el ancho de banda de la frecuencia.
11. Un procedimiento según la reivindicación 10, en el que el pulso tiene la forma de una ventana de Hanning.
12. Un procedimiento según cualquier reivindicación anterior, en el que dicha estructura metálica soldada comprende por lo menos una placa metálica, extendiéndose dicho cordón de soldadura a lo largo de un borde de la misma.
- 30 13. Un procedimiento según la reivindicación 12, en el que el transductor está montado en el borde de una placa metálica en la que está situado el cordón de soldadura.
14. Un procedimiento según la reivindicación 12, en el que el transductor está montado en la superficie de una placa metálica junto al cordón de soldadura.
- 35 15. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 14, en el que el transductor está sujeto magnéticamente o sujeto mecánicamente a una placa metálica.
16. Un procedimiento según cualquier reivindicación anterior, en el que el transductor es operativo para detectar señales recibidas.
17. Un procedimiento según la reivindicación 16, que incluye medios de transceptor para proporcionar una señal de excitación al transductor, y para procesar señales recibidas del mismo.
- 40 18. Un procedimiento según cualquier reivindicación anterior, que comprende emplazar el transductor dentro de aproximadamente una longitud de onda de las señales ultrasónicas hasta el cordón de soldadura, para acoplar energía en el cordón de soldadura gracias a una onda evanescente, y detectar señales dentro de dicha una longitud de onda.

Fig.1.

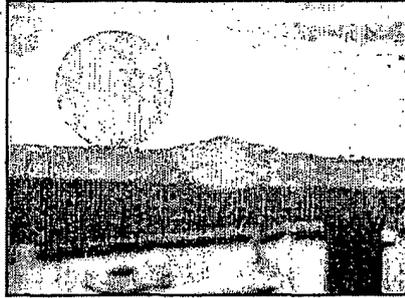


Figura 1. Sección transversal de soldadura. La placa tiene 6 mm de grosor. Se muestra una moneda de 1£ para comparar tamaños.

Fig.2a.

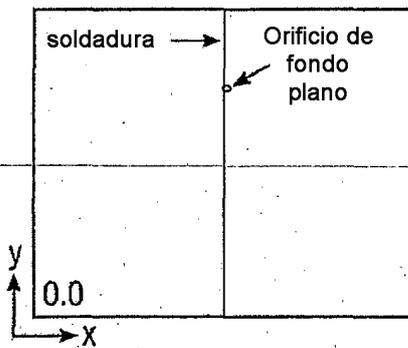


Fig.2b.

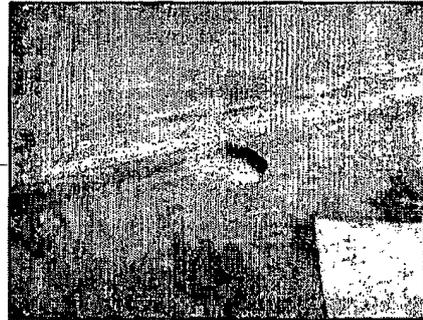


Figura 2a. Diagrama esquemático que define las coordenadas y muestra la posición del orificio en la placa de acero soldada. b. Fotografía de un orificio de fondo plano de 3 mm de profundidad y 20 mm de diámetro situado junto a la soldadura.

Fig.3.

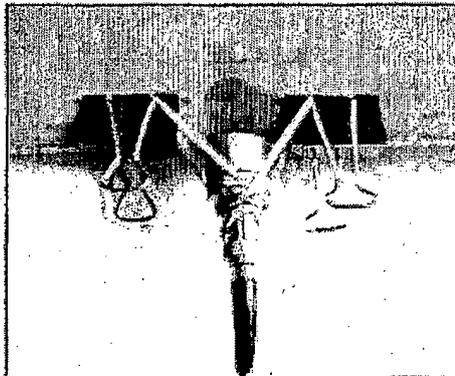


Figura 3. Fotografía que muestra el montaje del transductor simple en el borde de la placa de acero.

Fig.4a.

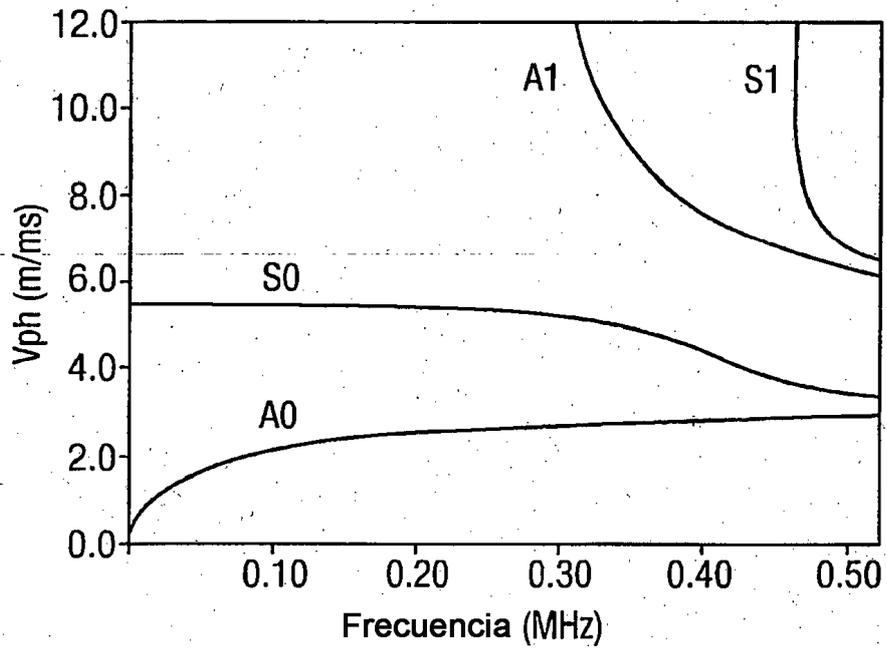


Fig.4b.

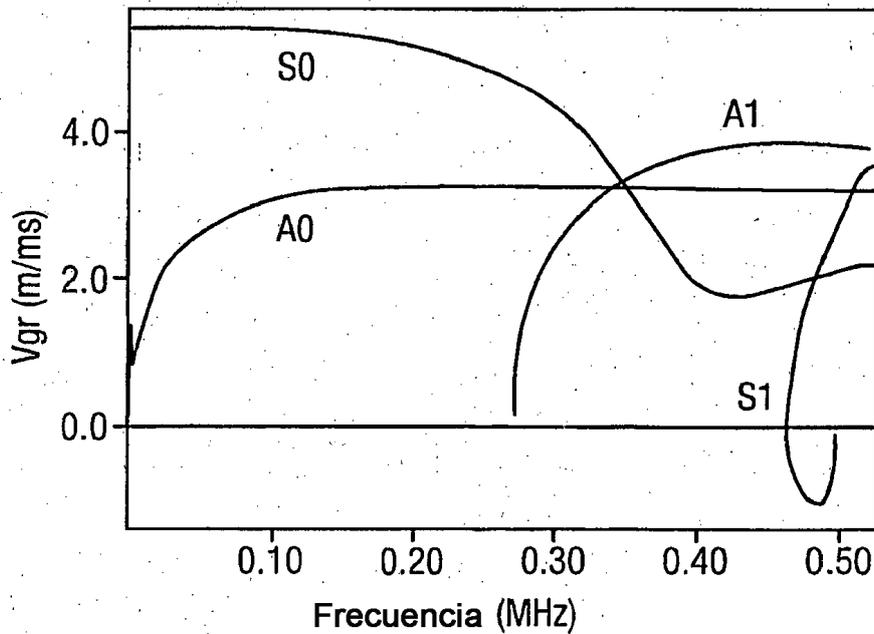


Figura 4a. Velocidad de fase calculada para un placa de acero de 6 mm de grosor. b. Velocidad de grupo para una placa de acero de 6 mm de grosor.

Fig.5a.

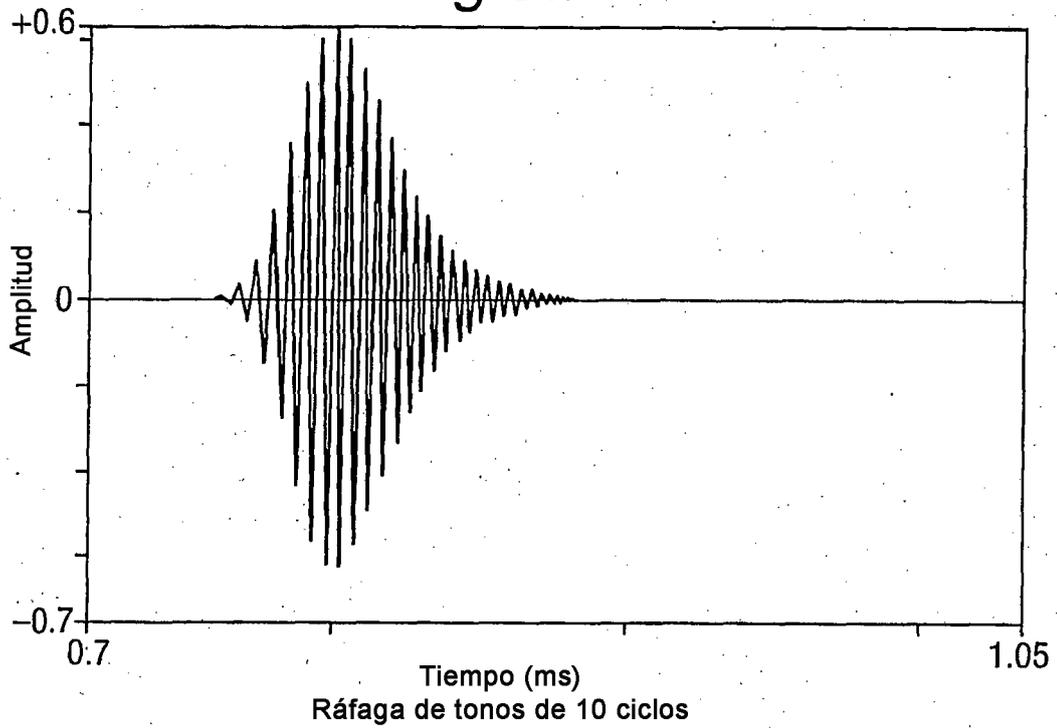


Fig.5b.

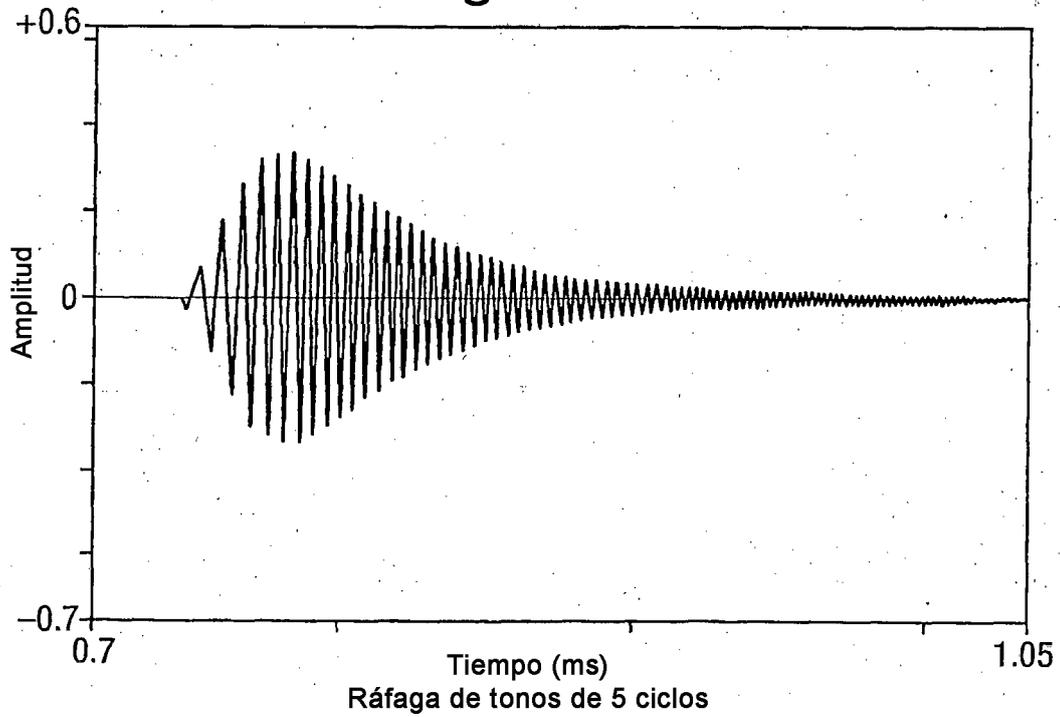


Figura 5. Comparación predicha de ecos utilizando Disperse a 200 kHz después de una propagación de 4 m (por ejemplo, un borde de placa, en modo de eco de pulsos).

Fig.6.

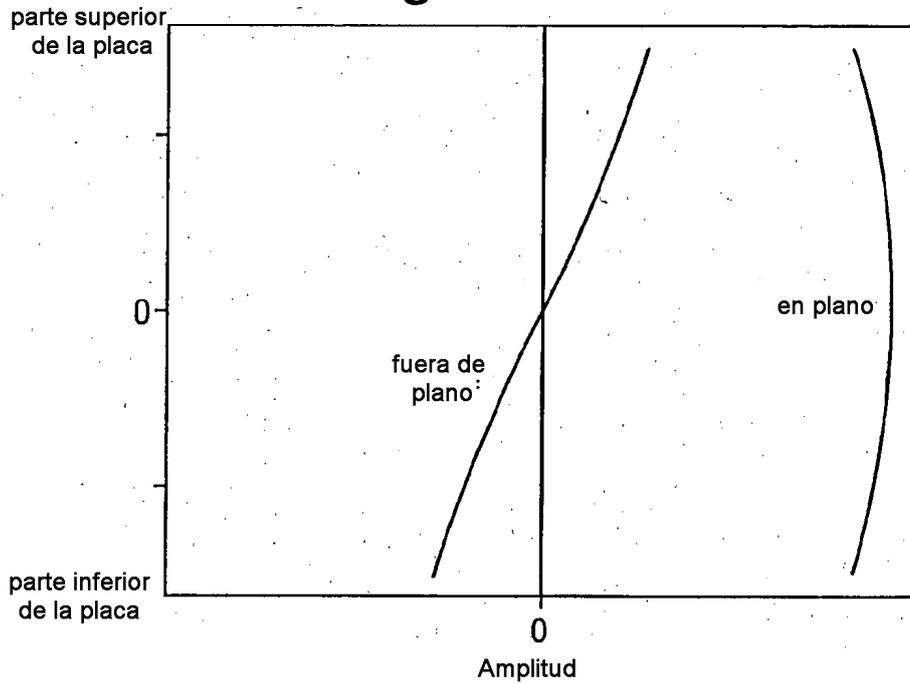


Figura 6. Formas de modo calculadas para el modo S_0 a 200 kHz en una placa de acero de 6 mm de grosor.

Fig.7.

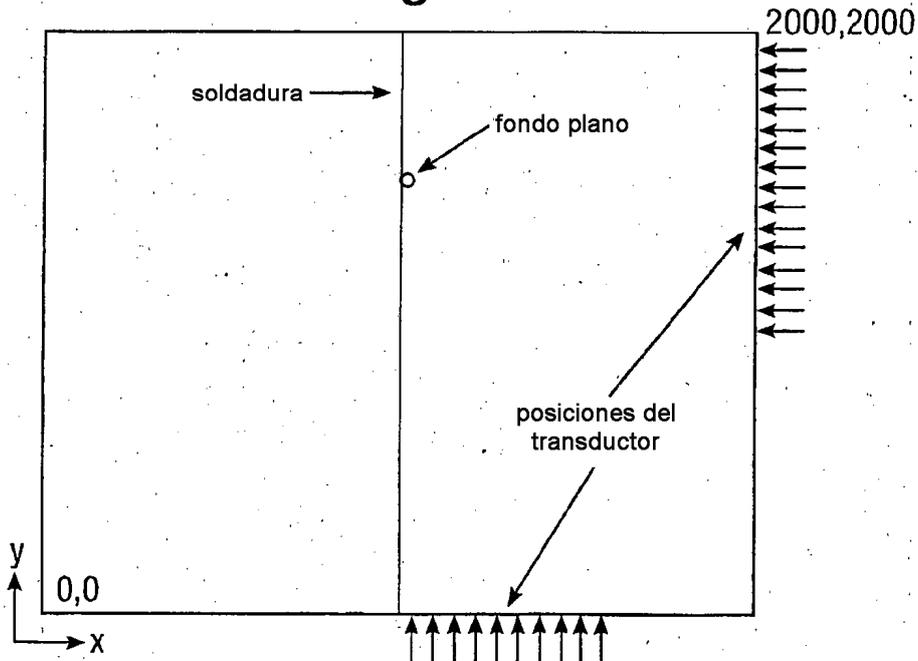


Figura 7. Diagrama esquemático que define la posición de la soldadura, la posición del orificio de fondo plano junto con las posiciones aproximadas para el transductor simple montado en el borde.

Figura 8. Trazas de tiempo registradas en función del tamaño del orificio para el transductor simple montado en el borde, alejado de la soldadura. El diagrama pequeño en la parte inferior muestra la posición del transductor (flecha negra). Ráfaga de tonos de 10 ciclos, 200 kHz

Fig.8.

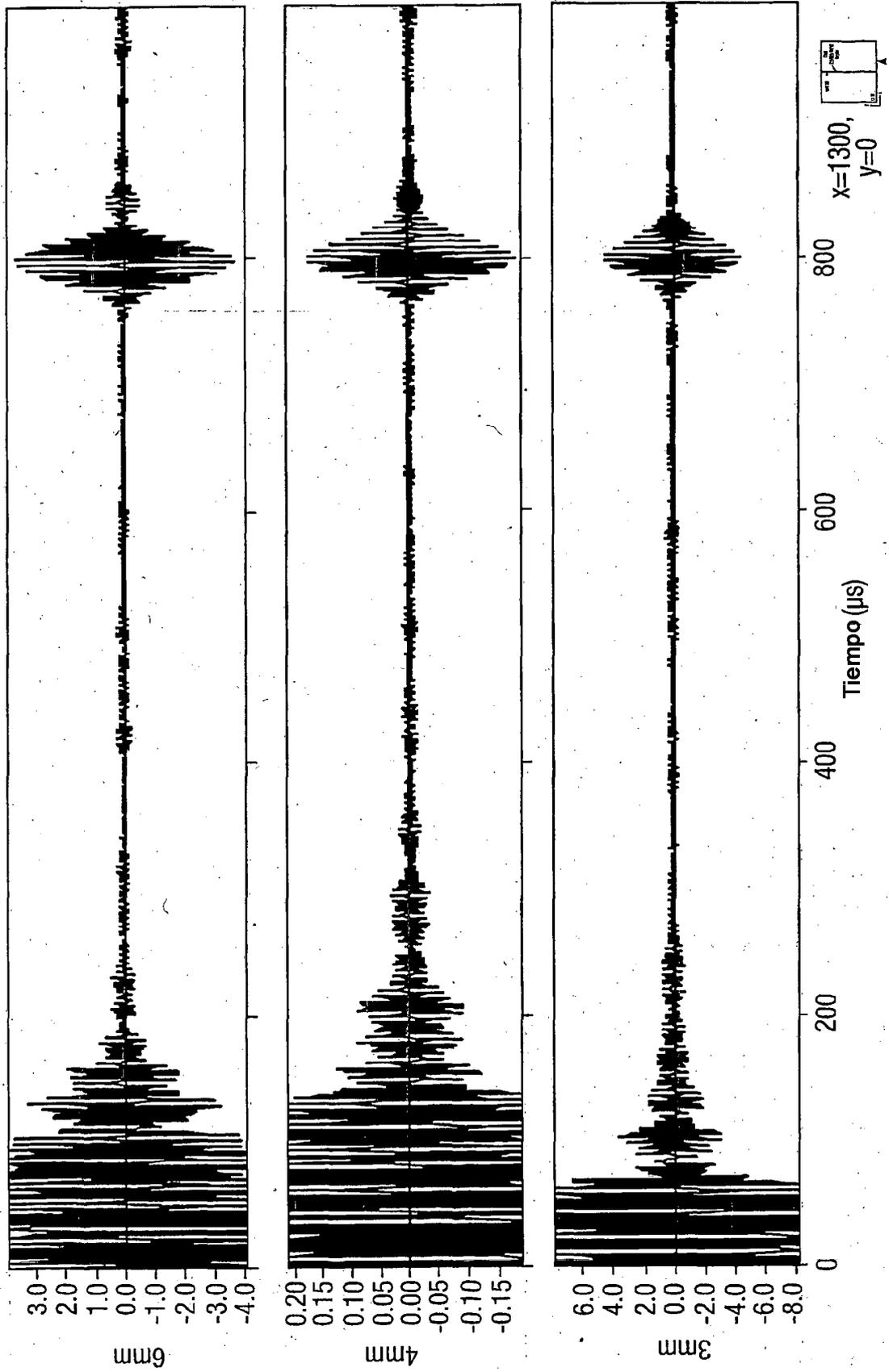


Fig.8(Cont).

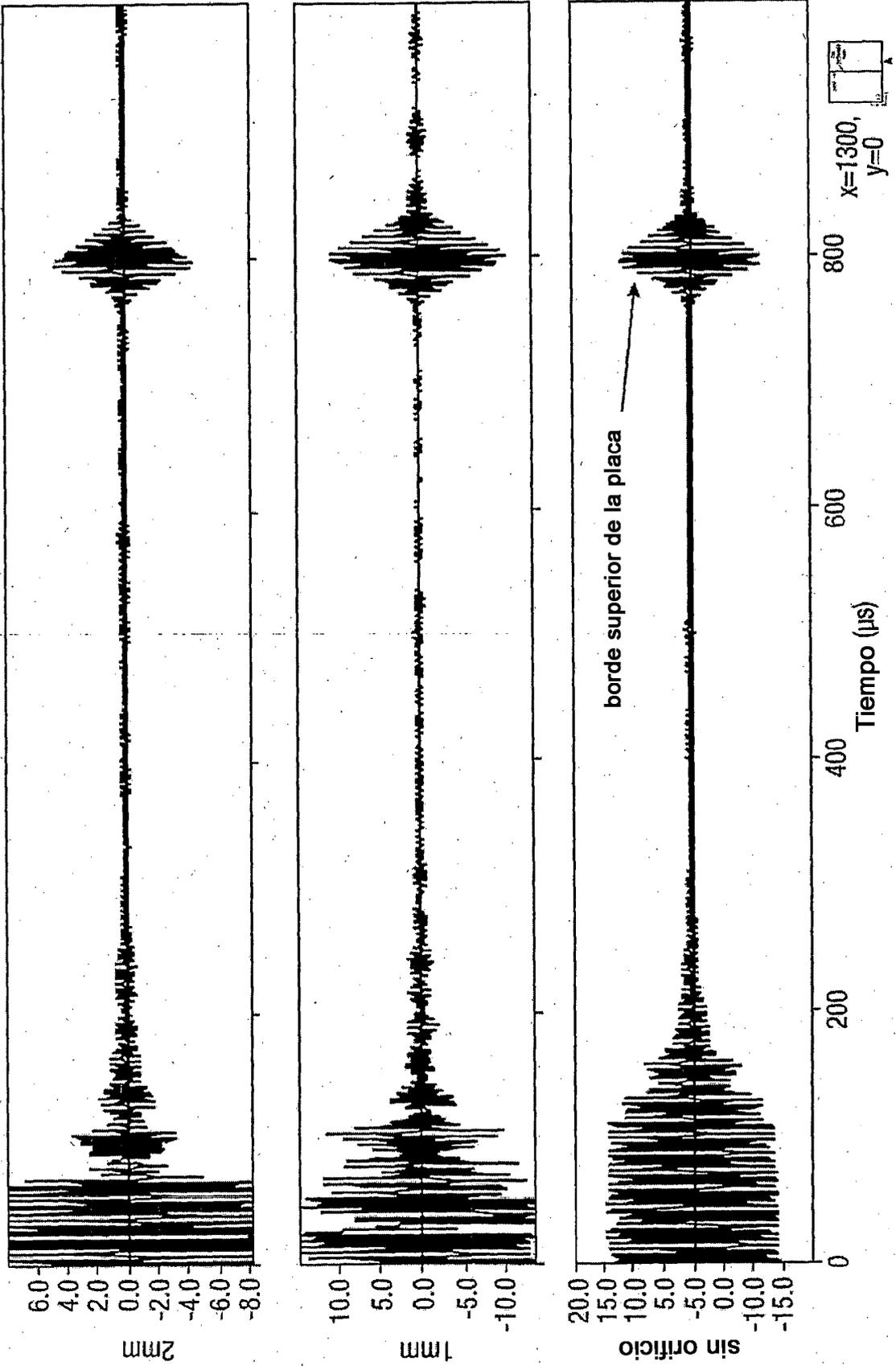


Fig.9. Trazas de tiempo registradas en función del tamaño del orificio para el transductor simple montado en el borde, cerca de la soldadura. El diagrama pequeño en la parte inferior muestra la posición del transductor (flecha negra). Ráfaga de tonos de 10 ciclos, 200 kHz

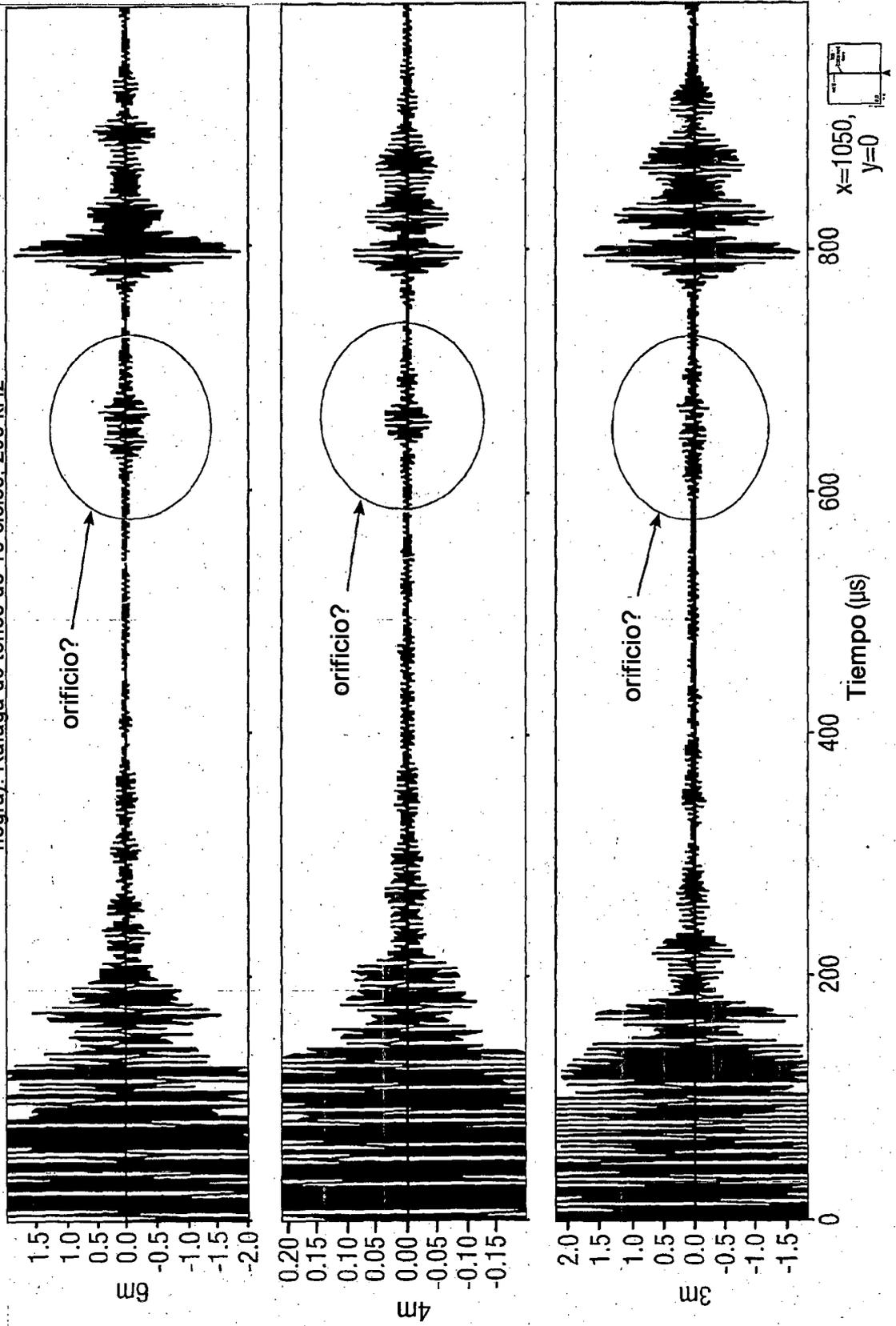


Fig.9(Cont).

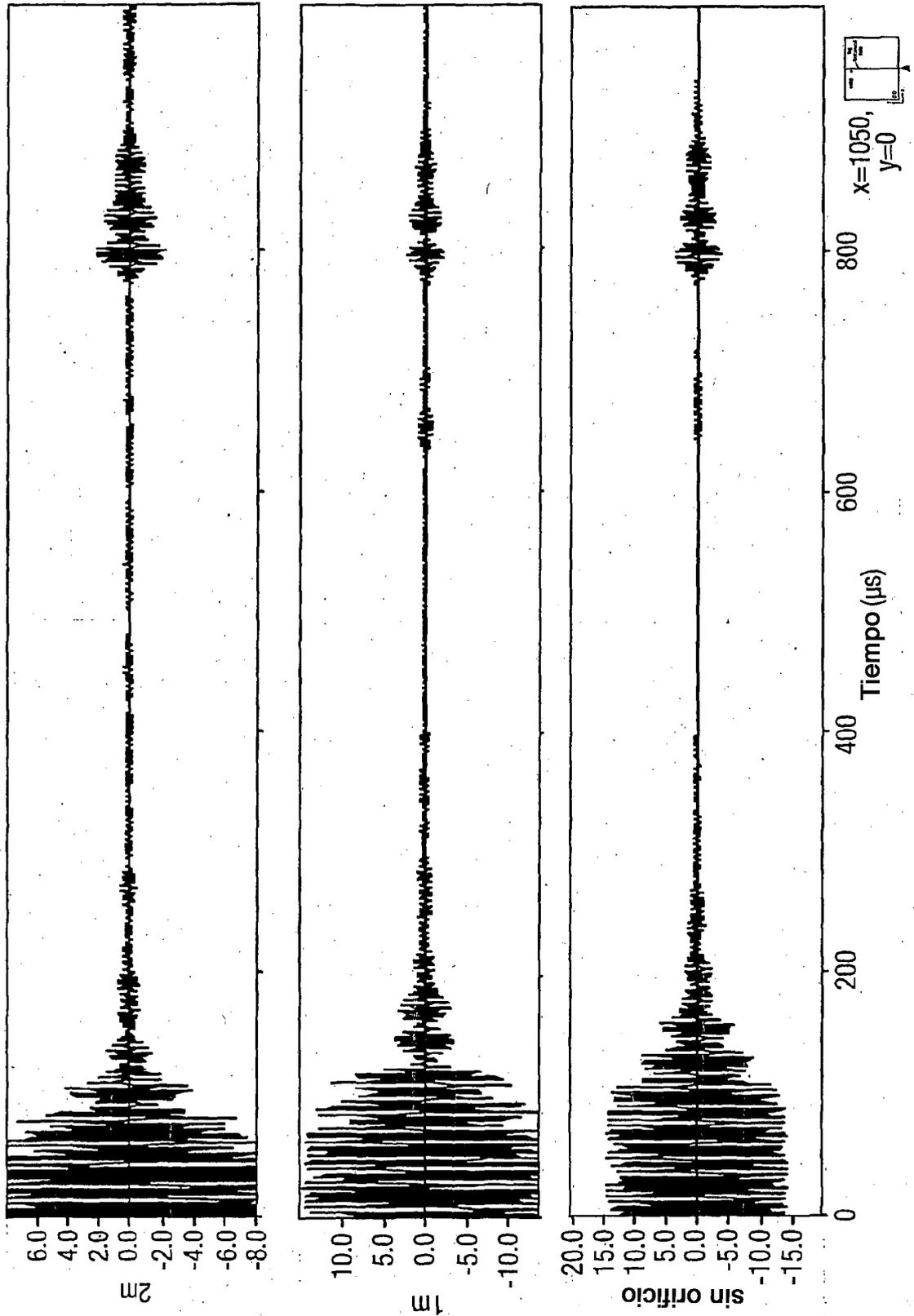


Fig.10.

Figura 10. Trazas de tiempo detalladas, registradas junto a la soldadura, en función de la posición para el transductor simple montado en el borde, 200 kHz, ráfaga de tonos de 10 ciclos. El diagrama esquemático pequeño muestra un ejemplo de las posiciones del transductor (flechas negras). x=1000 define la posición de la soldadura. Orificio de 6 mm.

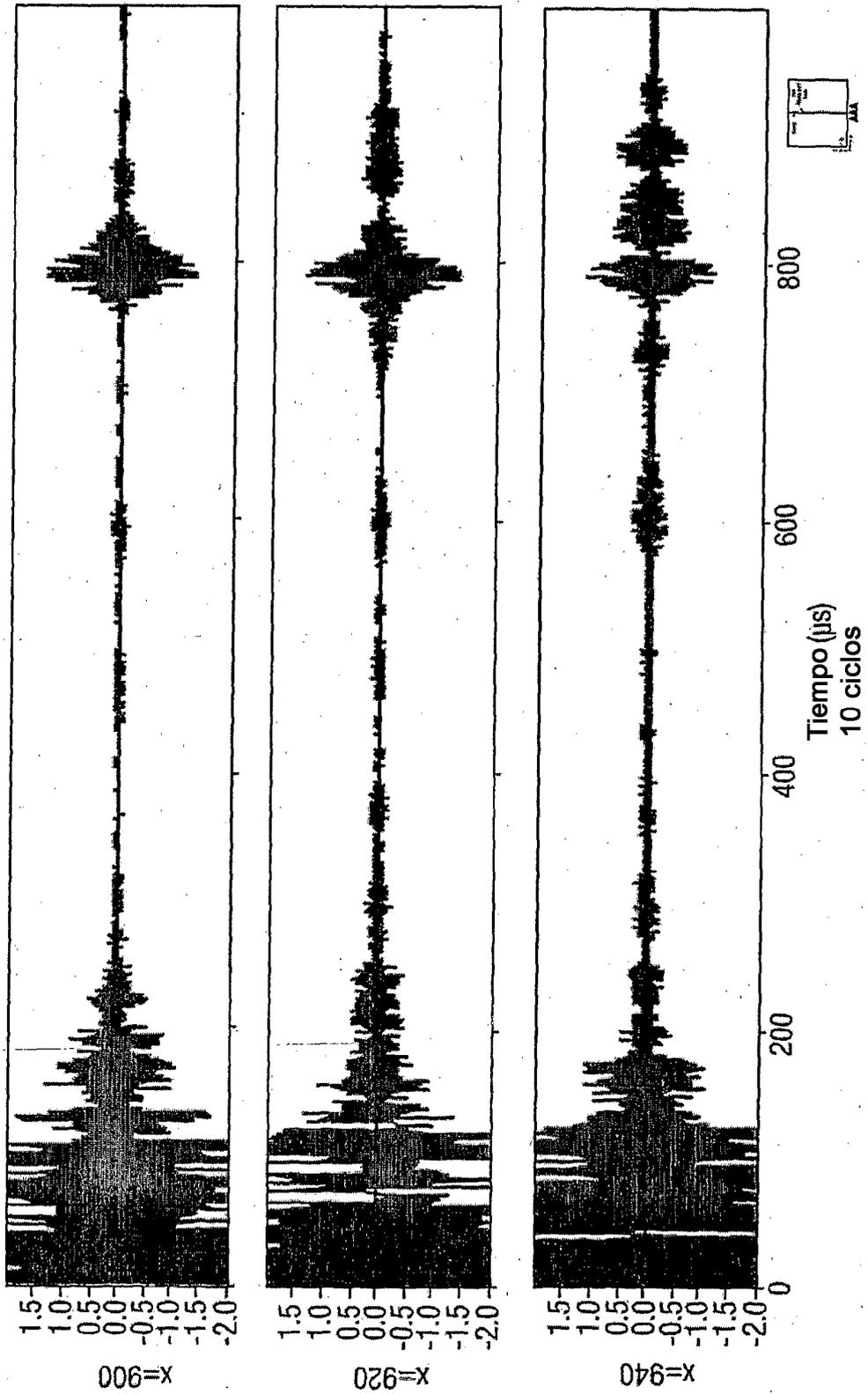


Fig.10(Cont).

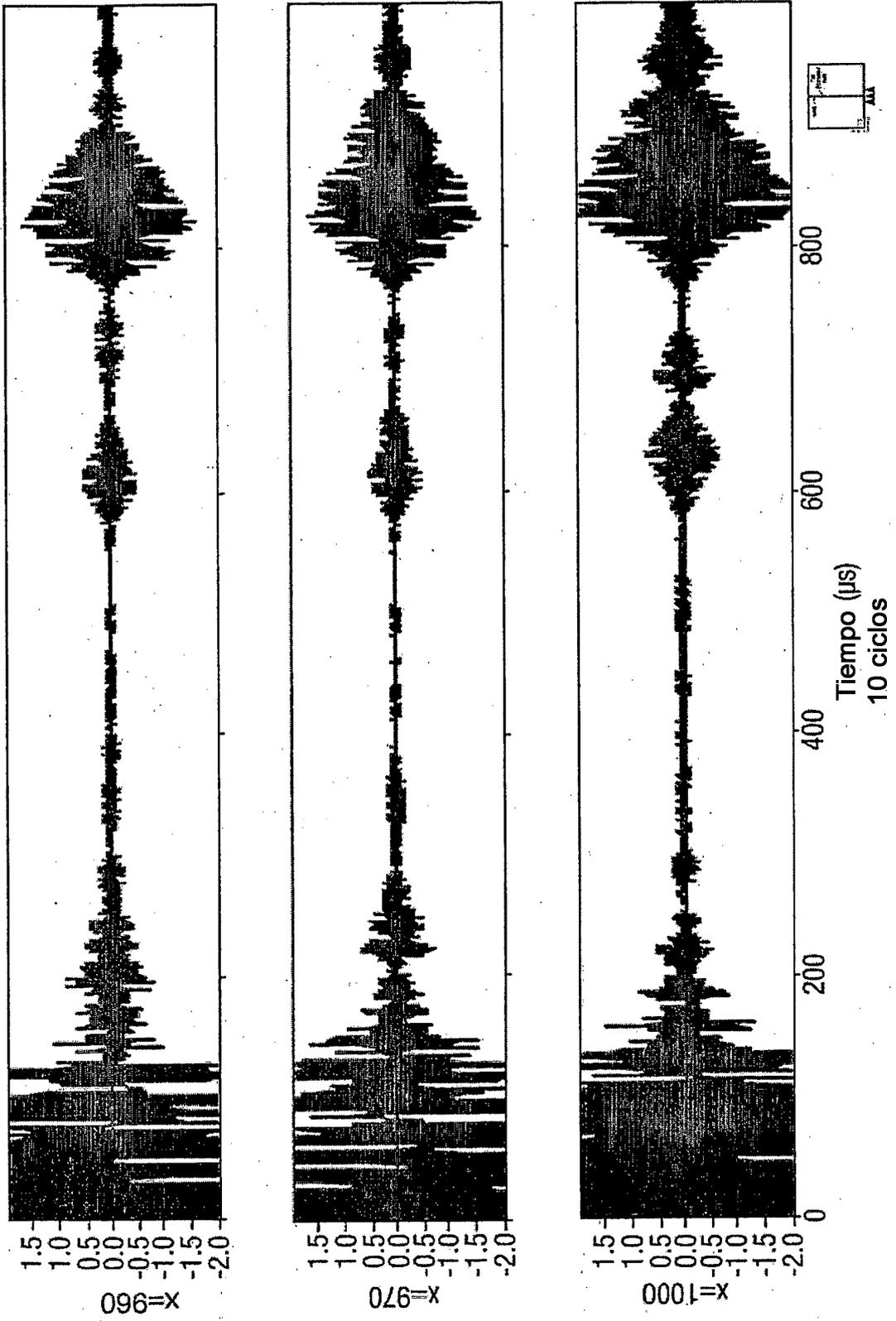


Fig.10(Cont.I).

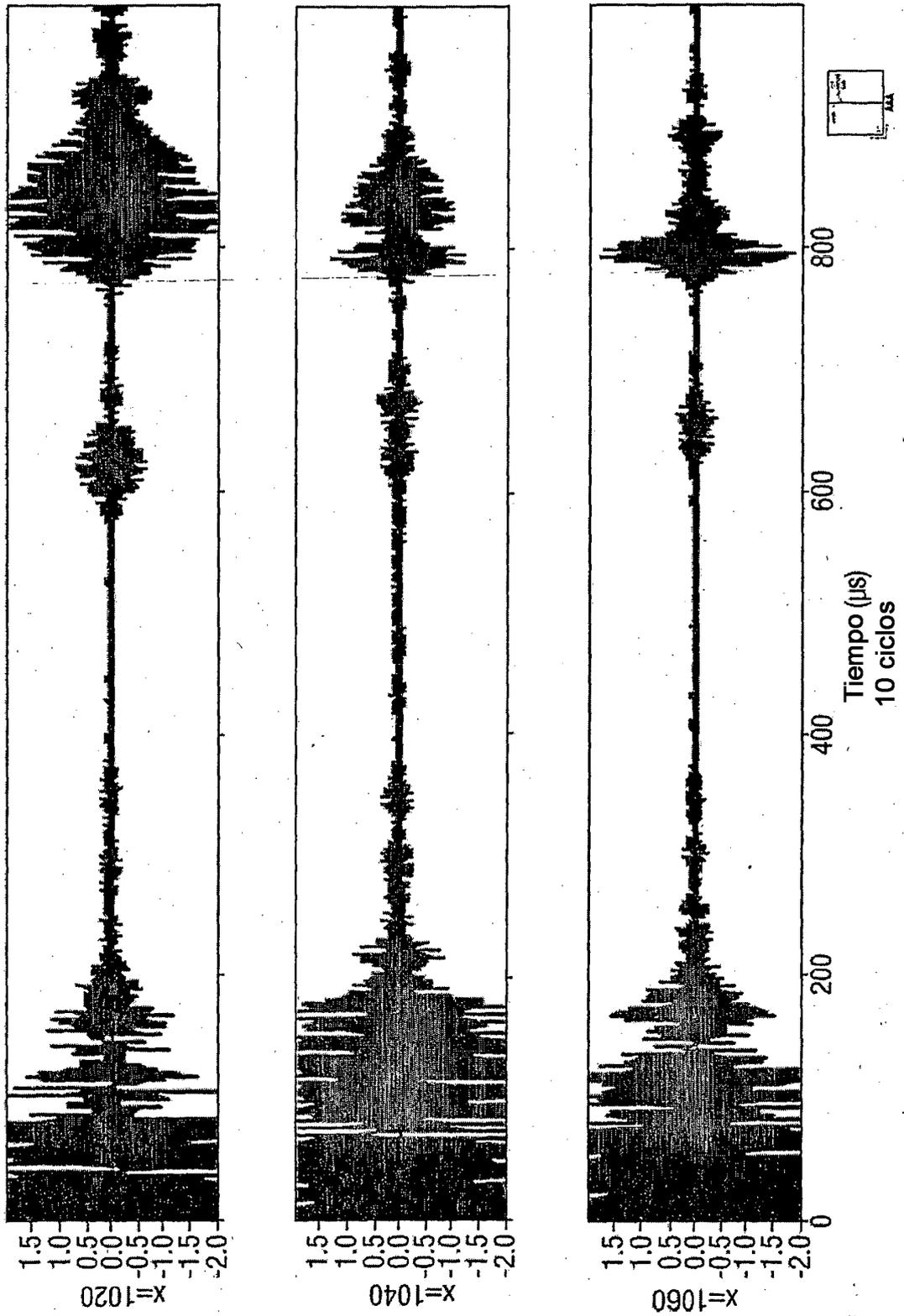
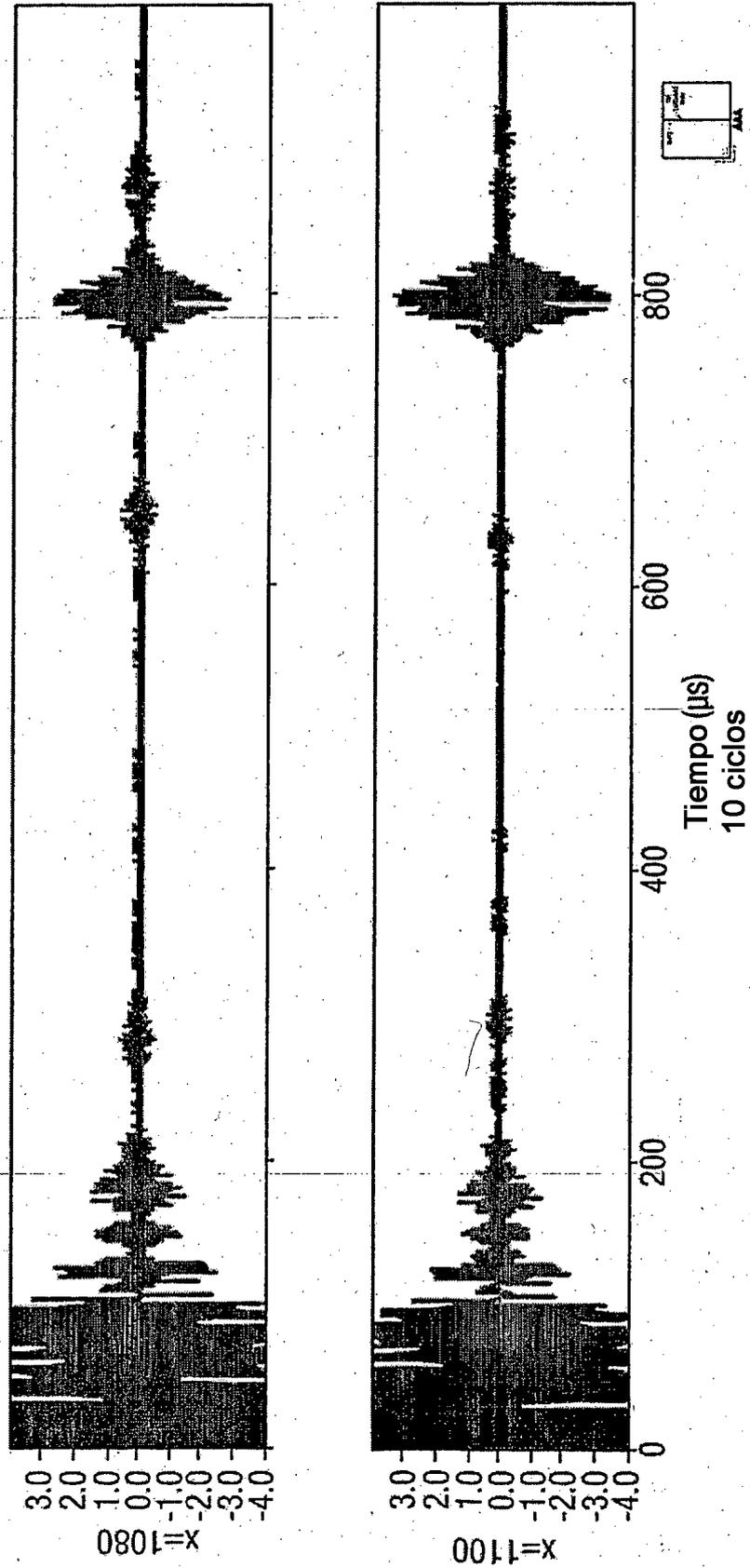


Fig. 10(Cont.II).



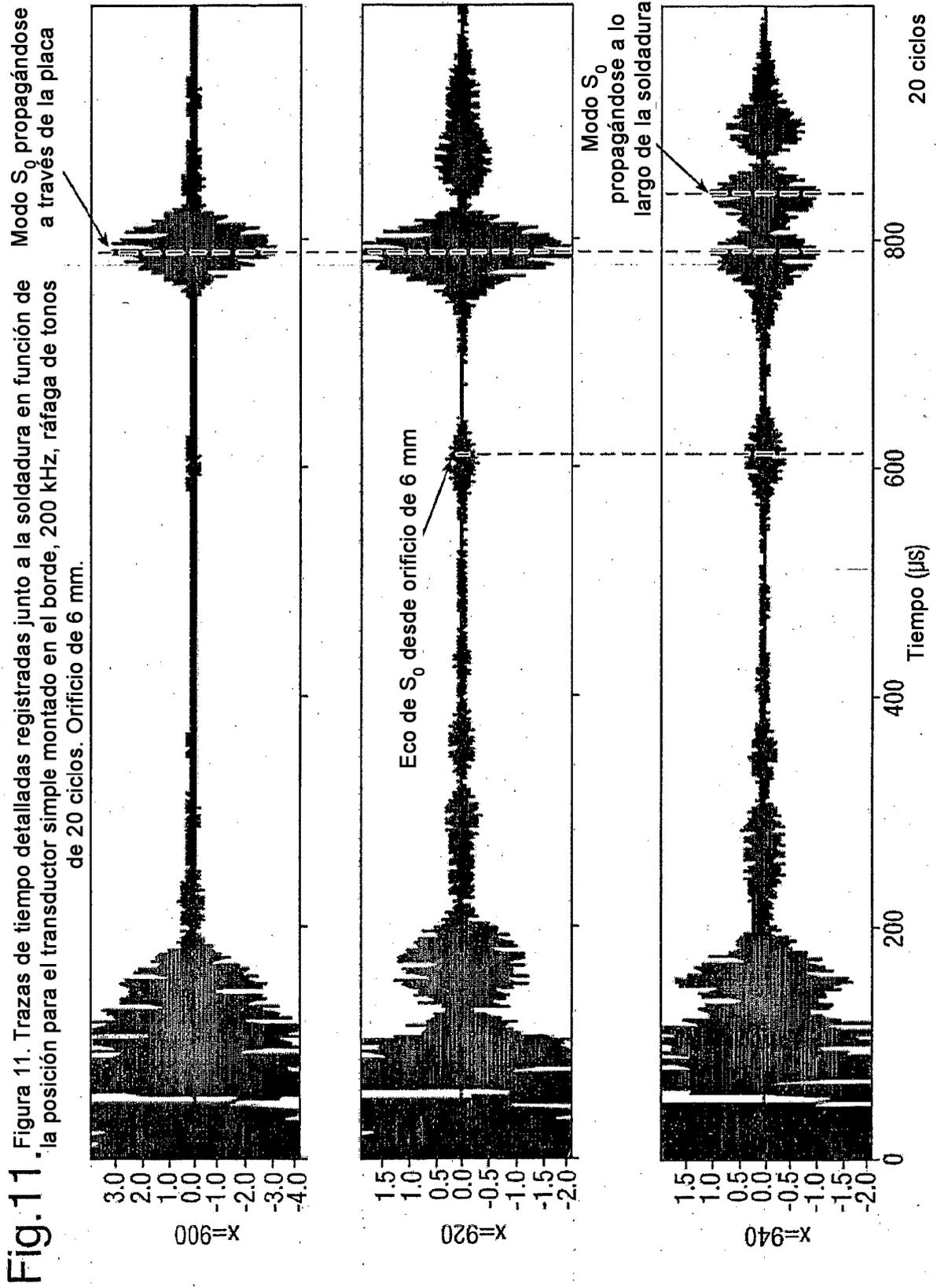


Fig.11(Cont).

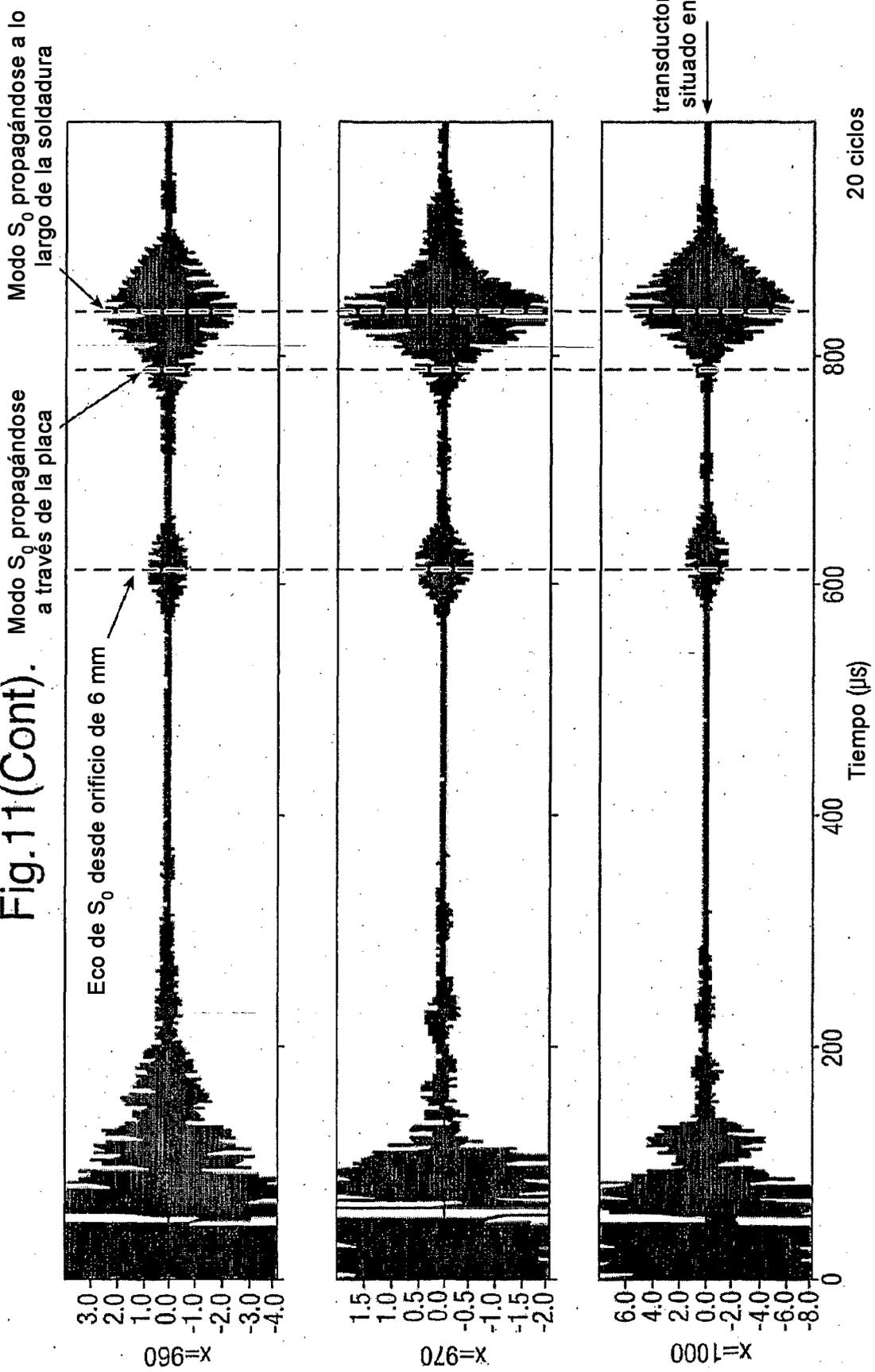


Fig.11(Cont.I). Modo S_0 propagándose a través de la placa

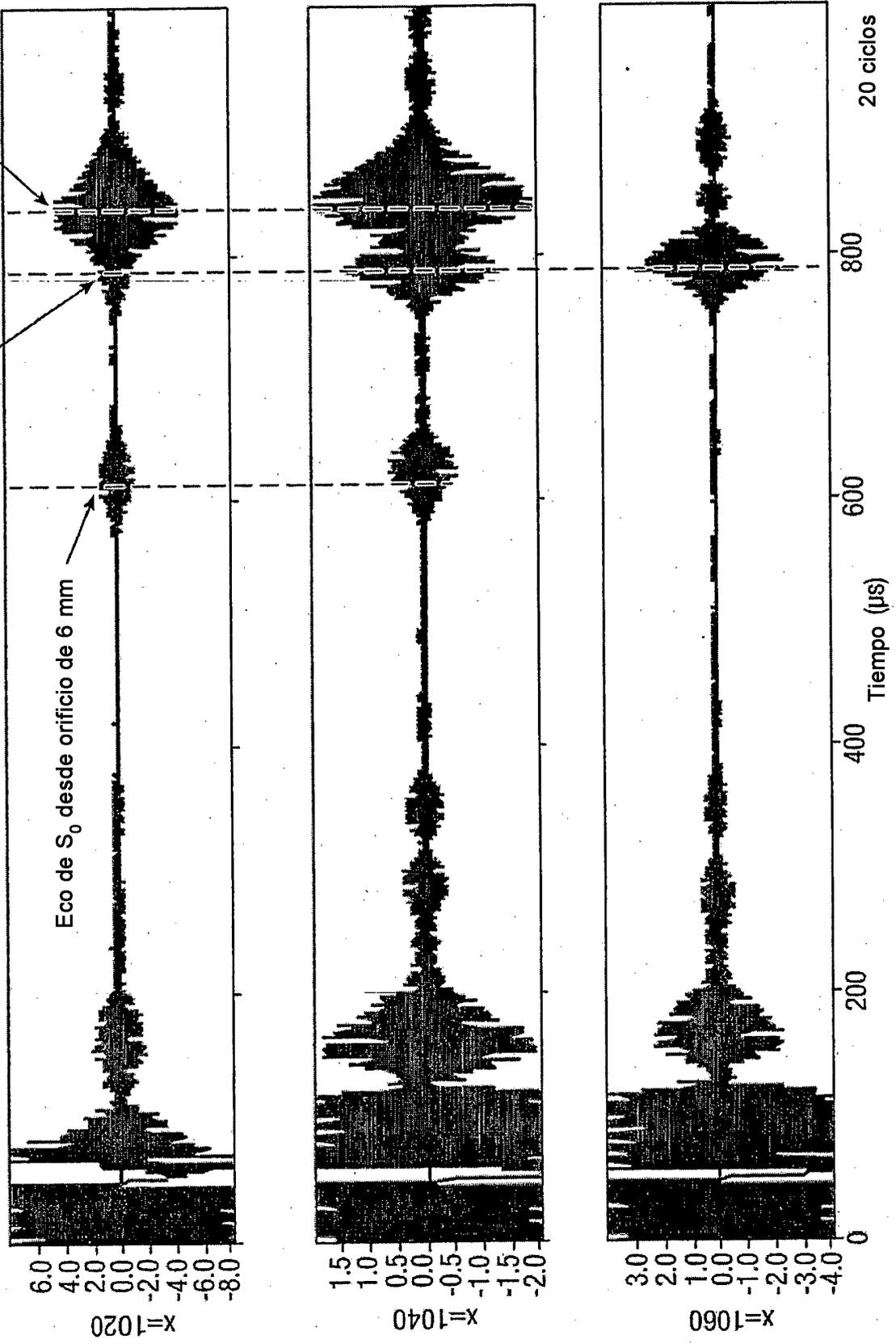


Fig.11(Cont.II).

Modo S_0 propagándose a través de la placa

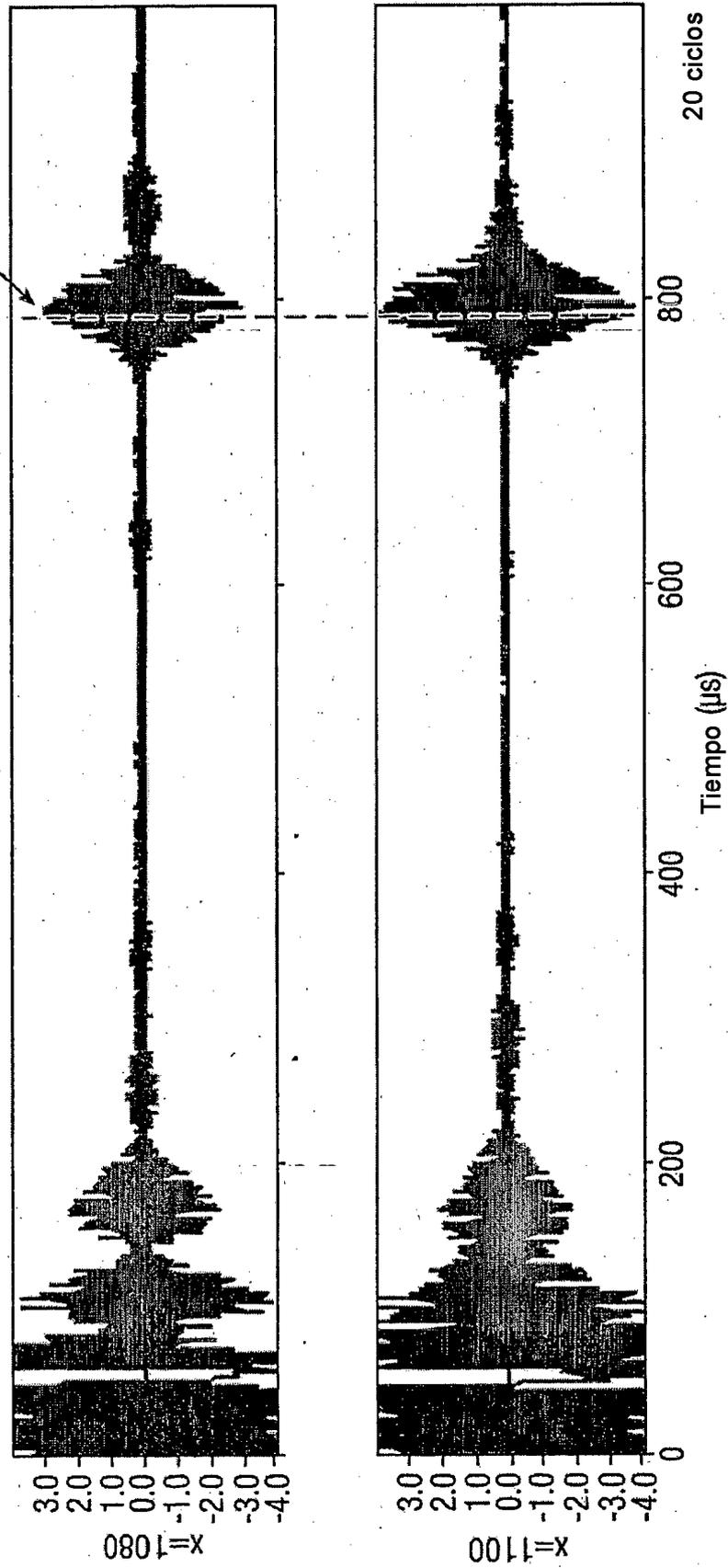


Fig.12.

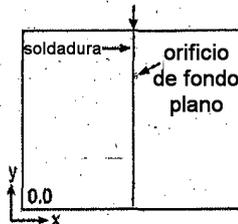
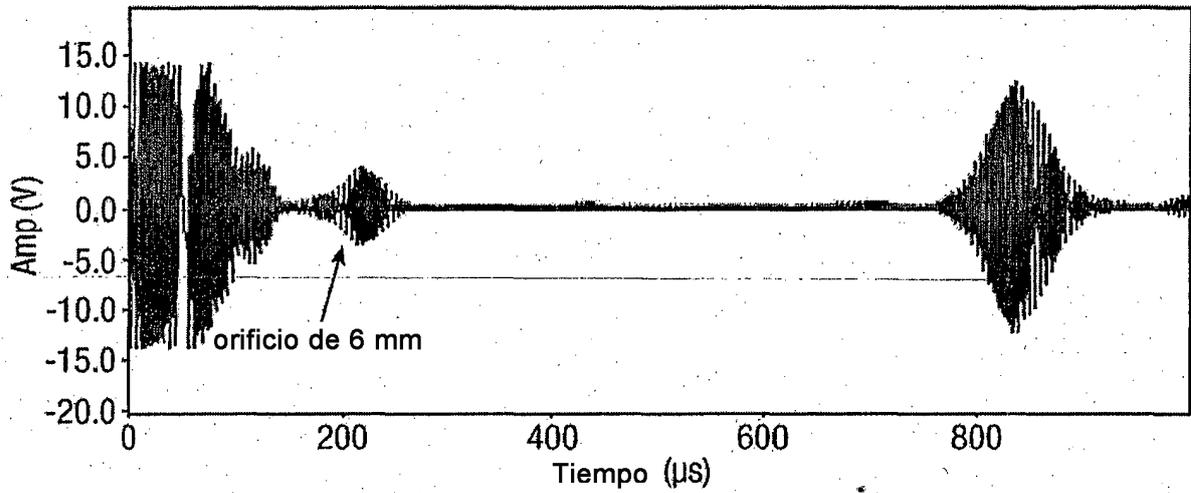


Figura 12. Traza de tiempo detallada, registrada para el transductor simple montado en el borde, situado sobre la soldadura en el extremo opuesto de la placa. Ráfaga de tonos de 20 ciclos a 200 kHz.

El diagrama esquemático pequeño muestra la posición del transductor en $x=1000$ $y=2000$ (flecha negra).

Fig.13.

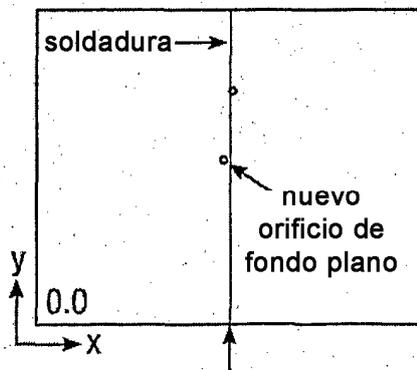
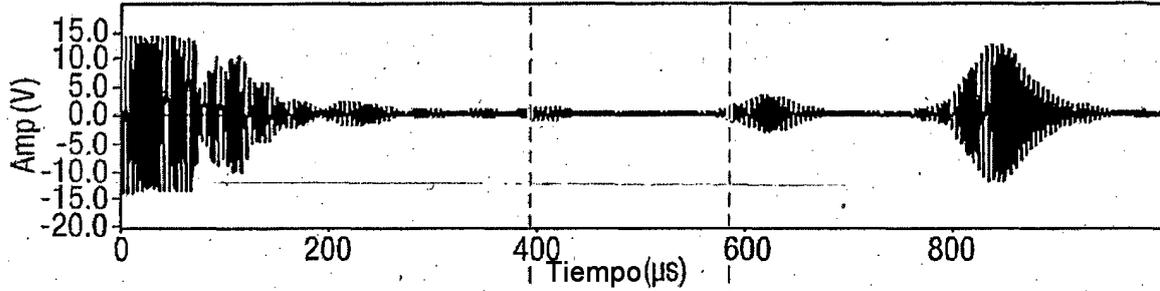


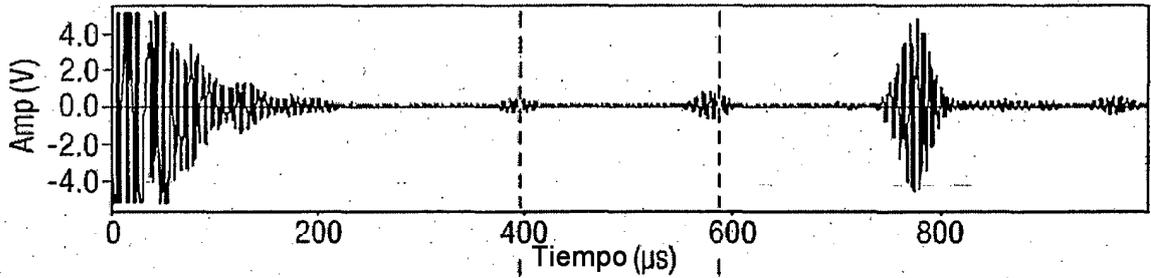
Figura 13. Diagrama esquemático que muestra la posición del nuevo orificio de fondo plano de 2 mm y el transductor (indicado por una flecha negra en $x=1000$, $y=0$).

Fig.14.

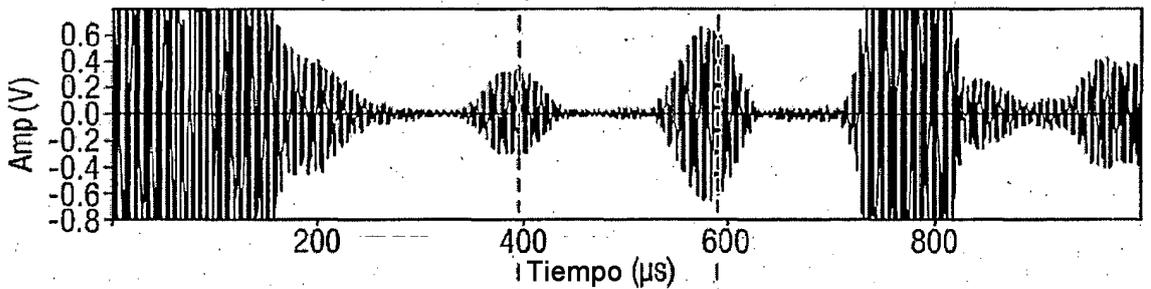
Figura 14. Comparación entre las sondas Ultrason y Panametrics utilizando diversas frecuencias, ganancias y ciclos de ráfagas de tonos. Transductores situados en $x=1000$, $y=0$.
 200 kHz, 20 ciclos, sonda Ultrason



161 kHz, 10 ciclos, sonda Panametrics



161 kHz, 20 ciclos, sonda Panametrics



170 kHz, 10 ciclos, sonda Panametrics

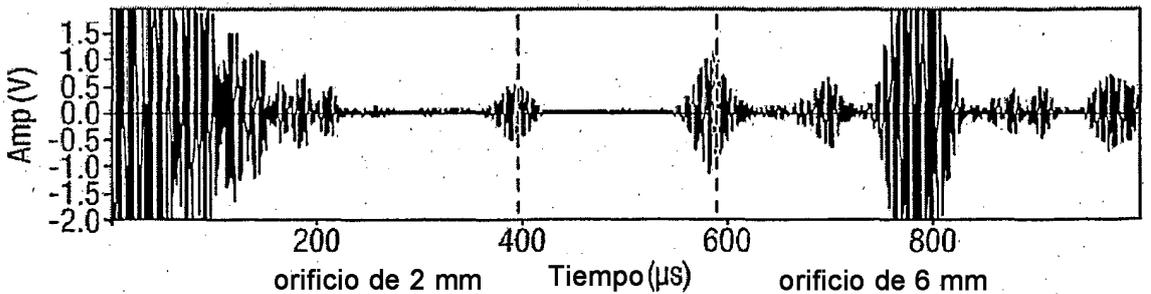


Fig.15.

Figura 15. Resumen de señales reflejadas medidas utilizando los transductores simples y el verificador de placas. Se muestran asimismo ajustes lineales y extrapolaciones para indicar el probable tamaño de orificio detectable mínimo predicho, en base a los niveles de ruido coherente indicados.

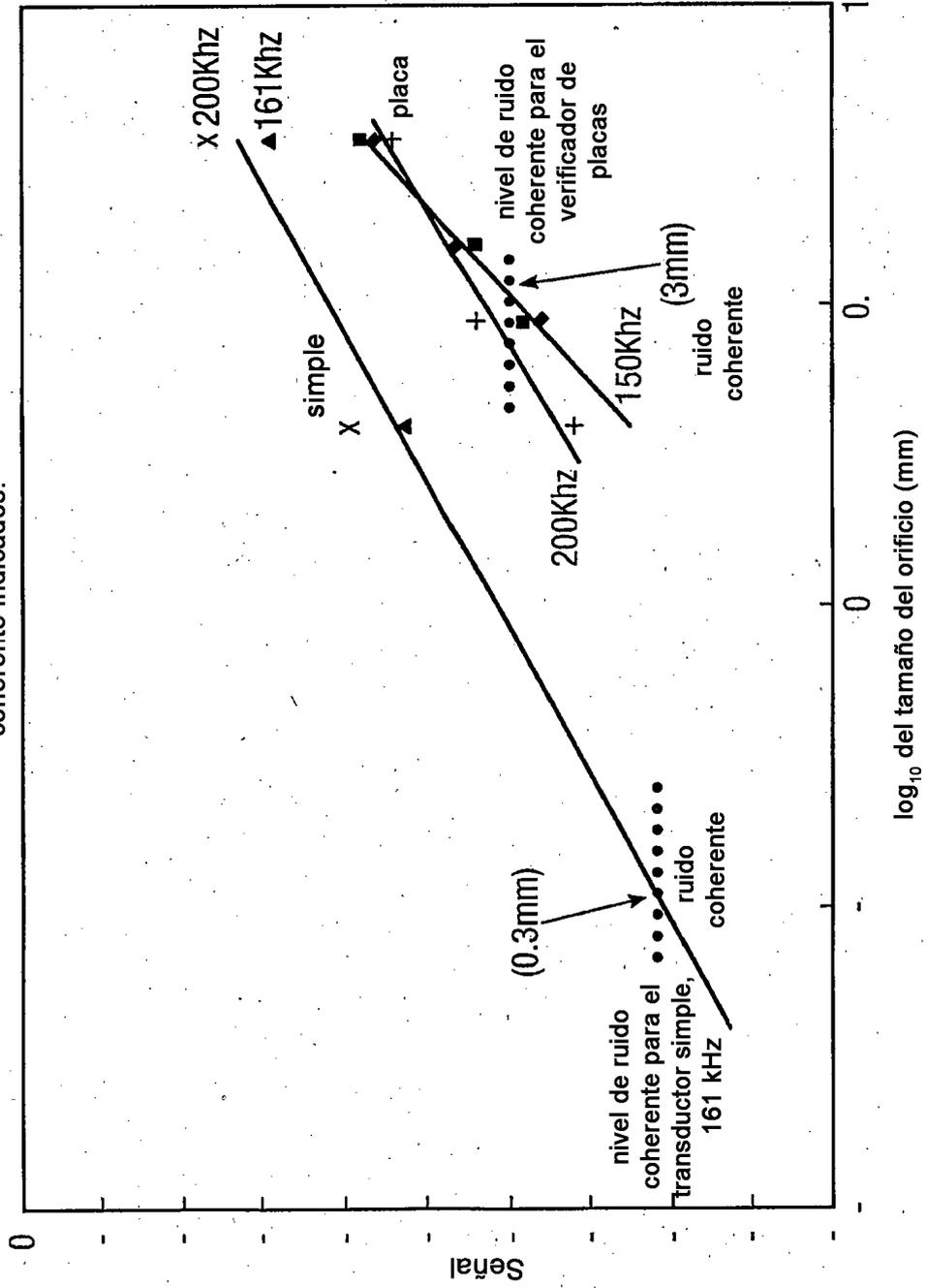


Fig.16a.

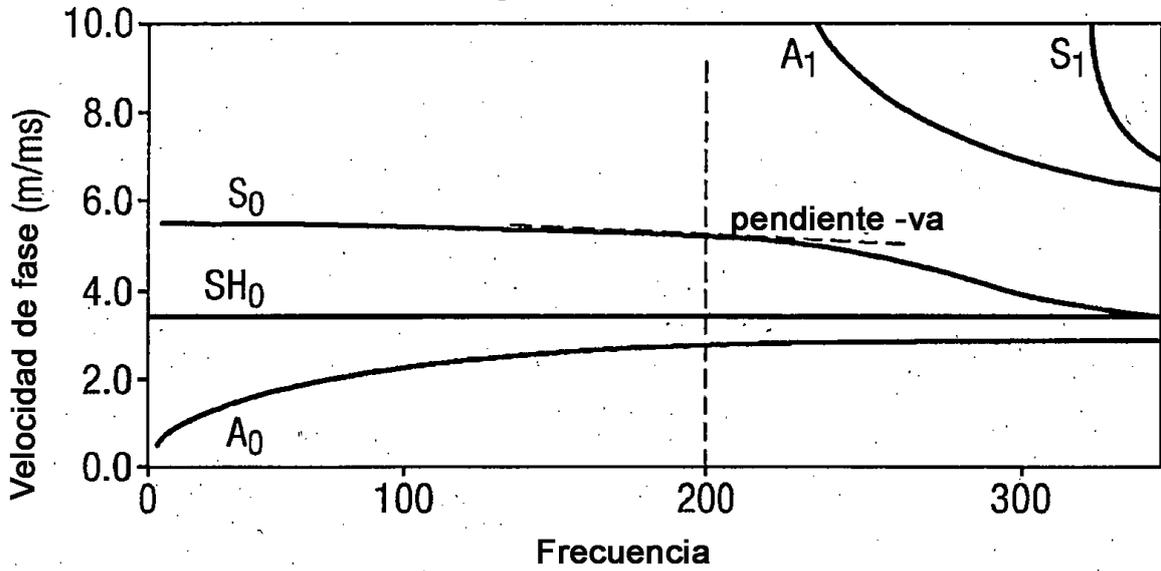


Fig.16b.

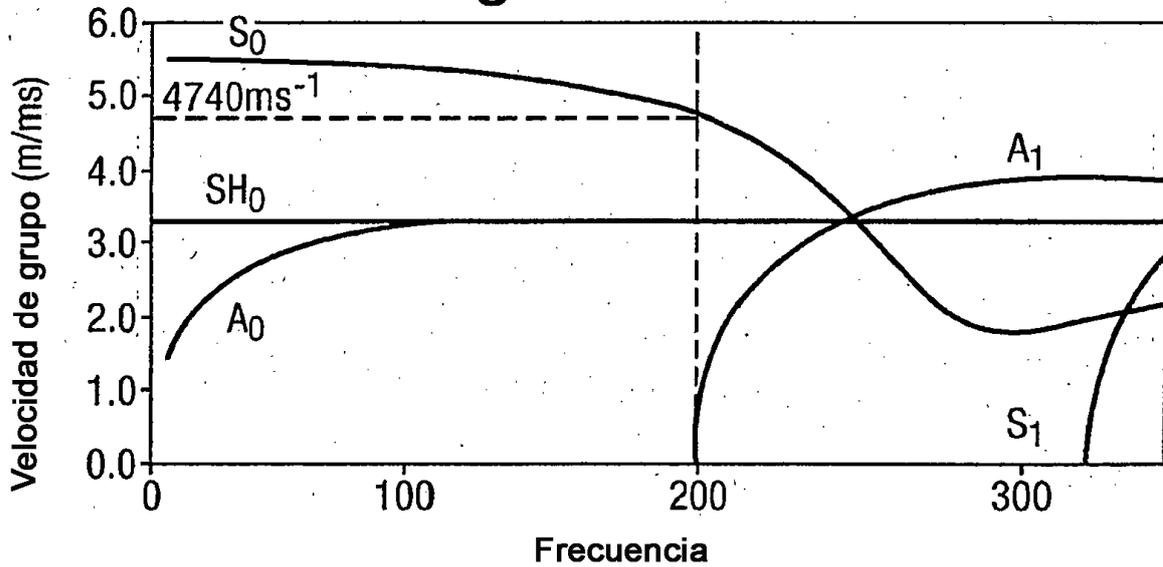


Figura 16. Curvas de dispersión para una soldadura de acero de 8 mm de grosor. Se muestra el punto de funcionamiento a 200kHz. a. Velocidad de fase. b. Velocidad de grupo.