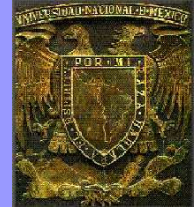

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LA PRUEBA DE ULTRASONIDO



PROYECTO PAPIME CLAVE: PE101110.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2010

PROYECTO PAPIME

Desarrollo e implementación de prácticas sobre pruebas no destructivas y material didáctico asociado para el Laboratorio de Tecnología de Materiales de la FES-Cuautitlán. Clave PE101110.

INTRODUCCIÓN:

Un famoso dicho pregunta: "Si se cae un árbol en el bosque y no hay nadie en las cercanías, ¿se produce algún sonido?" Podríamos plantearnos el mismo interrogante respecto de las ondas sonoras de frecuencias superiores a 20.000 ciclos por segundo. Estas frecuencias se denominan ultrasónicas porque están fuera del alcance del oído humano. (El mundo de los sonidos ultrasónicos llega mucho más allá de los 20.000 cps. Se midieron frecuencias ultrasónicas de hasta muchos millones de ciclos por segundo) En una habitación en pleno silencio se podría emitir una onda ultrasónica a 30 centímetros del oído humano, y no se tendría la impresión de que hubiese siquiera algo a esa distancia.

Pero los sonidos ultrasónicos no dejan de ser sonidos, si no para el hombre, por lo menos; para otros seres vivos. Muchos animales o insectos emiten sonidos en frecuencias inaudibles para el hombre. Sin embargo, para otro ser vivo del mismo tipo, la onda sonora puede ser tan estruendosa y nítida como el trueno o el crujido de una rama al quebrarse. Sabemos por ejemplo, que los perros acuden a nuestro llamado con silbatos ultrasónicos y que los murciélagos poseen un sistema de comunicaciones basado en ultrasonidos cuyo desarrollo es asombroso. El murciélago no sólo emite ondas ultrasónicas para comunicarse con otros murciélagos, sino para enviar haces sonoros destinados a "ver" durante el vuelo. El murciélago interpreta los ecos de estos sonidos para no chocar con los objetos y para perseguir y capturar los insectos que le sirven de alimento.

La ultrasónica reviste gran interés para quienes se dedican a las ciencias puras. En años recientes, se aplicaron estos conocimientos al desarrollo de muchos productos que ayudan al ser humano en muchos otros sentidos.

Se inventaron nuevos instrumentos basados en principios ultrasónicos que abarcan prácticamente todos los ámbitos de interés humano, desde la medicina hasta la construcción de naves espaciales. Se comprobó que los haces ultrasónicos pueden servir para inspeccionar la presencia de fallas en el espesor de los materiales sólidos,

sin alterarlos en absoluto. Por el contrario, un tipo de haz ultrasónico totalmente distinto es capaz de soldar materiales muy duros, o de modelarlos, dándoles formas muy complejas

Desde que el hombre tuvo conocimiento de la existencia de estas ondas ultrasónicas apenas han transcurrido unos 50 a 60 años. Los naturalistas fueron los que descubrieron los primeros indicios sobre ellas. Se había observado que ciertos insectos parecían mover ciertas partes del cuerpo las unas contra las otras, de tal manera que cabía suponer la emisión de algún sonido, pero para el observador humano este movimiento era silencioso. Además, algunos animales, como los murciélagos, parecían comunicarse entre ellos sin generar ningún sonido. Con el correr del tiempo, algunos hombres de ciencia de otras especialidades -físicos, ingenieros electrotécnicos- también obtuvieron indicaciones de que podrían existir ondas sonoras que están fuera de la percepción humana. El problema radicaba en cómo demostrar que era así.

Después, a fines del siglo XIX, sobrevino el rápido desarrollo de los sistemas eléctricos, y en la década del 1900 surgió la ciencia afín de la electrónica. Estos ámbitos no tardaron en proporcionar a los investigadores los instrumentos necesarios para medir el sonido inaudible. Las ondas sonoras, por ejemplo, pudieron convertirse en trazados visibles. Una manera de lograrlo consiste en pasar las ondas de las superficies vibrátiles a captadores eléctricos especiales.

Tal como sucede con cualquier micrófono, el trazado de la onda sonora se reproduce formando un trazado de ondas eléctricas similares. Esta onda eléctrica puede emplearse de diversos modos para que los investigadores vean el trazado sonoro. Por ejemplo, la señal eléctrica puede servir para accionar una pluma con tinta, que trace una línea sinuosa en un papel, o bien se puede medir la intensidad de la señal con voltímetros o amperímetros eléctricos comunes, que reflejan la frecuencia de la onda sonora.

Otro medio para "ver" el sonido consiste en recurrir al osciloscopio. Este es un tubo electrónico similar al del aparato de televisión. Este tubo tiene un revestimiento

químico sensible especial en su cara interior, que se torna luminiscente al llegar a él una corriente de partículas de materia con carga eléctrica que se denominan electrones.

El trazado de la onda sonora se convierte en un trazado eléctrico y éste, a su vez, hace que el yugo magnético del tubo oriente un haz de electrones hacia la faz del tubo. A raíz de esto se forma en el tubo una línea sinuosa que reproduce la forma de la onda sonora original.

Con estos instrumentos se obtuvo una idea de los ultrasonidos. Por ejemplo, se podía hacer vibrar una muestra de alambre a mayor o menor frecuencia. Al llegar a un determinado punto, el observador comprobaba que el alambre seguía vibrando pero que ya no emitía sonido. Desde ese punto en adelante las ondas del ultrasonido se observaban con el osciloscopio o con algún otro dispositivo.

El factor primordial para dar explicación práctica al ultrasonido era obtener un dispositivo susceptible de controlarse con exactitud, que emitiese ondas ultrasónicas de determinadas frecuencias. El instrumento ideado para este fin es el transductor, que transforma la energía eléctrica en energía mecánica, o viceversa. Se trata de un aparato similar al micrófono o al cristal que se empleaba en los antiguos radiorreceptores.

Pero para obtener vibraciones ultrasónicas se requerían mejores materiales y métodos nuevos para emplearlos. Hubo que desarrollar cristales especiales y también nuevos tipos de cerámica. Los primeros transductores se remontan al año 1917, cuando un físico llamado Langevin (físico francés, 1872-1946) empleó una corriente eléctrica oscilante proveniente de un circuito en un tubo de vacío, para excitar un cristal de cuarzo. Langevin demostró que implantando una señal eléctrica cambiante en el cristal, éste vibra y desprende sonido. Por el contrario, aplicando una onda sonora al cuarzo en frecuencias adecuadas, se genera en él una corriente eléctrica que circula por el sistema. Este efecto se denominó "piezoeléctrico".

Al poco tiempo otros científicos se dedicaron a estudiar distintos cristales, entre ellos la turmalina, la sal de Rochelle y el fosfato biácido de amonio. Ninguno de ellos, empero, era tan eficaz como el cuarzo, aunque éste no constituye el recurso más adecuado para convertir la electricidad en sonido. Es decir, para que el cristal entre en vibración se requiere más electricidad de lo conveniente. No obstante, el cuarzo es de fácil aplicación y se trata de un material muy resistente. Se lo puede hacer vibrar casi a cualquier frecuencia si se lo emplea con el espesor apropiado.

En su empeño por obtener transductores de mejor calidad, los investigadores buscaron otros enfoques. No mucho después de los trabajos de Langevin, otros científicos produjeron un transductor basado en el principio de la "magnetostricción". Se comprobó que aplicando una corriente eléctrica cambiante a una varilla metálica magnética, ésta se comprime y se expande ligeramente de conformidad con las variaciones de la corriente. Las vibraciones de la varilla emiten una onda sonora. Tal como sucede con los transductores de otro tipo, el sistema también funciona a la inversa, de modo que al incidir una onda sonora sobre la varilla, ésta genera un flujo eléctrico variable. Los metales que se emplean para hacer las varillas magnetizadas son el hierro, el níquel y el cobalto. La desventaja del método de la magnetostricción es que sólo sirve para una frecuencia limitada. La frecuencia máxima de salida es de 50,000 cps, mientras que el cuarzo da bastante más de 1,000,000 de ciclos.

Después de la Segunda Guerra Mundial, con el rápido desarrollo de materiales sólidos que pasaron a reemplazar a los tubos o válvulas de vacío, los científicos hallaron la manera de conseguir transductores mejores todavía. Ante todo, se logró construir transductores pequeñísimos y de mucho rendimiento (algunos hasta menores que una moneda de las más pequeñas), uniendo el cristal vibrador a una pequeña chapa de material semiconductor electrónico. Además, se comprobó que algunas nuevas cerámicas electrónicas exhibían propiedades similares a las varillas metálicas cuando se las sometía a la acción de un campo magnético. Estas piezas se denominan ferrocerámica y, a diferencia de muchas cerámicas anteriores, pueden producirse en una gran variedad de formas. Mediante el cuidadoso diseño de la forma y de la manera de arrollar el conductor eléctrico a su alrededor, se generan ondas

sonoras de extraordinaria intensidad. El principio por el cual funcionan estos transductores, basado en el cambio de tamaño de la ferrocerámica imantada por acción de una corriente eléctrica variable, se denomina piezomagnetismo. Las ondas sonoras que estos materiales emiten llegan a tener frecuencias varios centenares de veces superiores a las que se consiguen con los transductores de cuarzo. En 1965 los hombres de ciencia generaban frecuencias de hasta 100.000 millones de ciclos por segundo.

Los biólogos figuraron entre los primeros beneficiarios de los nuevos equipos para medir los ultrasonidos, pues así pudieron efectuar un cuidadoso análisis del efecto del sonido sobre los animales. Por ejemplo, se colocó un insecto en un recipiente y se lo sometió a un haz de ultrasonidos cuya intensidad y frecuencia se modificaba gradualmente. Si el insecto percibía el sonido, reaccionaba frente a él. O bien, en pruebas más detalladas, se insertaban minúsculos electrodos en determinadas partes del insecto para medir las modificaciones eléctricas de su sistema nervioso por influencia de las distintas frecuencias ultrasónicas.

El advenimiento de los grabadores de alambre y cinta agregó una dimensión más a esta labor. Los hombres de ciencia pasaron entonces a grabar los sonidos de los animales. Se leyó así el sonido inaudible de alta frecuencia grabado en la cinta, empleando los equipos especiales descritos arriba. Este trabajo demostró que las distintas clases de murciélagos poseen distintos lenguajes ultrasónicos, tal como sucede con las personas de países distintos. Los estudios revelaron que las siniestras caras de los murciélagos obedecen a una finalidad, pues sus rasgos faciales forman parte del sistema especial para enfocar los sonidos que estos animales requieren para generar las elevadísimas frecuencias de los ultrasonidos.

Pero, además, estos estudios condujeron a resultados de extraordinario valor práctico. Al determinar con exactitud el modo en que los murciélagos guían su posición mediante el eco, los científicos obtuvieron indicaciones sobre la manera de desarrollar sistemas sonoros para conducir vehículos hechos por el hombre, como las naves espaciales o los submarinos.

De igual importancia fue el hecho de que se despejó el camino para fiscalizar la acción de ciertos seres vivos por medio de los ultrasonidos. Dado que los ultrasonidos no influyen sobre el oído humano, los nuevos métodos pueden emplearse sin causar molestias a la humanidad. Un ejemplo de lo que antecede es la lucha contra los insectos. Se comprobó que ciertos mosquitos son sensibles a determinadas frecuencias ultrasónicas y se alejan de ellas. Esto puede llevar al desarrollo de dispositivos protectores; que eliminen la necesidad de los mosquiteros. Con las pantallas ultrasónicas para protegerse de los mosquitos, el hombre podrá disfrutar cómodamente las delicias de los días de verano. En los climas tropicales esto tiene considerable importancia porque habrá de contribuir a eliminar el flagelo del paludismo, enfermedad transmitida por los mosquitos. Los científicos también trabajan en la construcción de pequeños aparatos ultrasónicos portátiles que protegerían de los insectos en lugares como el automóvil, una pequeña zona de playa o una canoa. Los ratones y las ratas también son sensibles a los sonidos inaudibles. Las viviendas podrían liberarse, pues, de los roedores, empleando generadores ultrasónicos. [Lo que el autor está diciendo se aplica desde hace algunos años con muy buenos resultados]

Pero las investigaciones con ultrasonidos también podrían beneficiar a los agricultores. El desarrollo de grandes generadores ultrasónicos evitaría la destrucción de los cultivos por insectos nocivos. De este modo se reduciría el consumo de rociadores químicos en la granja. Los biólogos han señalado que el empleo excesivo de estas sustancias químicas para combatir las plagas, puede ser nocivo para el ser humano y para importantes especies de la fauna natural.

Pero los ultrasonidos tienen otras aplicaciones capaces de introducir cambios más revolucionarios todavía en la agricultura. Mediante experimentos se comprobó que las frecuencias ultrasónicas influyen sobre las bacterias, las levaduras, las semillas de los vegetales y las plantas en crecimiento. Estos efectos pueden ser útiles o nocivos, según la cantidad y frecuencia del ultrasonido que se aplique. Se requiere mucho estudio para establecer el modo correcto de aplicar cualquier tratamiento ultrasónico.

Por ejemplo, la intensidad de la onda sonora tiene que estar dentro de una determinada gama de decibeles para que se obtenga un efecto dado. Una frecuencia ultrasónica de 100.000 cps favorecería el crecimiento de determinada especie vegetal, pero conservando la misma frecuencia y duplicando la intensidad la planta se lesionaría. Del mismo modo, una onda ultrasónica de frecuencia inferior estimularía la germinación de las semillas, pero modificando la intensidad o el lapso de exposición de los ultrasonidos, la misma frecuencia sonora serviría para mezclar bacterias en los líquidos con mayor rapidez. O bien, modificando las propiedades del haz ultrasónico las bacterias se destruirían.

De todos modos, es evidente que los ultrasonidos pueden ser de mucha utilidad para producir mayor cantidad o alimentos de mejor calidad por hectárea. En la industria, la aplicación de los ultrasonidos para mejorar el mezclado de cosas como bacterias y líquidos, aceleraría algunos procesos, como la elaboración del vino o el vinagre. Otra aplicación sería la de matar bacterias para preservar así los alimentos. (Esta última propiedad también puede destinarse a la esterilización de instrumental médico o de heridas en el ser humano)

La industria naviera también ofrece otro ejemplo del control de plagas mediante los ultrasonidos. Uno de los principales problemas de los empresarios navieros es el de los moluscos. Estos se adhieren al casco de los barcos, y cuando se aglomeran en gran cantidad en la parte subacuática del casco, el agua no puede circular libremente alrededor de éste y la marcha de la nave se frena. En consecuencia, hay que llevar con frecuencia el barco a dique seco para eliminar los moluscos mediante rasqueteado y para volver a pintar el casco. Los estudios realizados en el departamento de zoología de la Universidad Estatal de Pennsylvania demostraron que aplicando ciertas frecuencias ultrasónicas, los moluscos cierran sus conchas. En la actualidad se trabaja con vibradores ultrasónicos especiales que se instalarán en los barcos para emitir ondas sonoras que mantengan los cascos libres de moluscos en todo momento.

En medicina los ultrasonidos prometen una revolución casi tan importante como la introducción de los rayos X. El rayo X permitió a los médicos obtener imágenes del

interior del cuerpo humano, para así determinar si existe alguna lesión, sin necesidad de recurrir a procedimientos quirúrgicos. Sin embargo, también se sabe que la exposición excesiva a los rayos X puede ser peligrosa. Además, los rayos X sólo aportan datos sobre determinadas partes del organismo, como los huesos y los tejidos duros. Los tejidos blandos, como el músculo, la grasa y el hígado, no se ven con los rayos X. En la actualidad, mediante equipos ultrasónicos, no sólo se llegan a ver estas partes del organismo, sino que aparecen en forma tridimensional.

William J. Fry, jefe del Laboratorio de Investigaciones Biofísicas de la Universidad de Illinois, describió el funcionamiento de la sonda ultrasónica en el Stanford Research Institute Journal. La onda sonora se obtiene mediante un transductor. El sistema eléctrico produce en primer término una pulsación de energía eléctrica de forma idéntica a la pulsación sonora que se desea. Esta energía hace vibrar un diafragma (fuelle en miniatura) situado en el transductor, impartiendo una onda sonora de alta frecuencia al aire circundante. La onda así obtenida se orienta hacia la parte del organismo que se desea examinar. Sólo se produce un ciclo de ultrasonido a la vez, canalizado de manera que produzca un eco en el tejido. El proceso se repite varias veces moviendo el transductor. Cada eco arroja información sobre la región del cuerpo explorada y el movimiento del transductor ocasiona el efecto tridimensional.

Se puede apreciar, entonces, que la combinación de ultrasonidos con los rayos X ofrece a los médicos la posibilidad de examinar cualquier parte del organismo. El ultrasonido también puede utilizarse para obtener placas semejantes a las que se logran con los rayos X. Esto significa que, cuando existan equipos ultrasónicos baratos y prácticos, se podrá reducir el uso de los rayos X. Correctamente empleados, los ultrasonidos no son nocivos para el cuerpo humano, evitándose así las posibles lesiones atribuidas a los rayos X.

La ultrasónica también promete despejar un nuevo camino para realizar exámenes cardíacos. Orientando las pulsaciones de energía ultrasónica hacia los tejidos del corazón y midiendo el tiempo requerido para que el eco retorne al aparato, los médicos determinan si el corazón funciona bien. Además los científicos también hallaron la posibilidad de aplicar el efecto Doppler. En este caso se enviaría una serie

de pulsaciones hacia la región cardíaca, observándose el cambio de tono motivado por el movimiento de sus superficies. Así se estudiaría el funcionamiento de las válvulas cardíacas y se verificaría si se abren y cierran correctamente. Contando con los ultrasonidos para estudiar los tejidos cardíacos y las partes móviles del corazón, dentro de poco los médicos estarán en condiciones de identificar las lesiones cardíacas mucho antes de que el paciente experimente algún síntoma. El diagnóstico temprano de los problemas cardíacos salvaría a un sinnúmero de vidas. En los casos de cirugía cardíaca, estos métodos también servirán para localizar cualquier problema, haciendo que las perspectivas de buen éxito sean mucho mayores.

Pero los ultrasonidos no sólo pueden emplearse para examinar el cuerpo humano sino también para mejorar su funcionamiento. Por ejemplo, la diatermia ultrasónica sirve para aliviar el dolor y el malestar en muchas enfermedades y lesiones traumáticas. El procedimiento consiste en aplicar ultrasonidos de baja intensidad que pasan al cuerpo desde un transductor aplicado a la piel. Las pequeñas dosis de esta energía reducen el dolor de los músculos resentidos, la bursitis, la fibrositis, la artritis y otros males. Sin embargo, los hombres de ciencia advierten que los ultrasonidos no son una panacea y que se deben aplicar con suma prudencia bajo la dirección del médico.

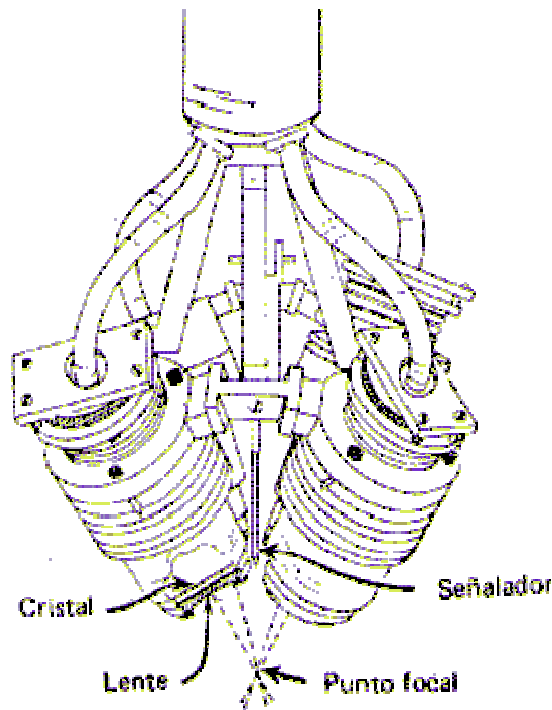
También se investiga mucho el empleo de los ultrasonidos para introducir cambios en el interior del organismo sin alterar las porciones de carne y hueso situadas entre medio. Para que este tipo de tratamiento resulte inocuo se requerirá una considerable labor, pero ya se han realizado estudios para modificar tamaños, formas y hasta posiciones de algunas estructuras del cuerpo. A frecuencias muy elevadas -1.000.000 a 4.000.000 de cps- se pueden realizar operaciones en las profundidades del cuerpo, sin punzar siquiera la piel ni los tejidos sanos.

Para ello es necesario enfocar con gran exactitud los haces ultrasónicos mediante un objetivo especial que cubre el cristal emisor del sonido. En la actualidad se emplean equipos que concentran el haz sonoro en el interior del cuerpo, en una superficie igual a la de la mina de un lápiz. Este sistema sirve hasta para realizar delicadas intervenciones en el cerebro. Para ello, empero, hay que extirpar una parte

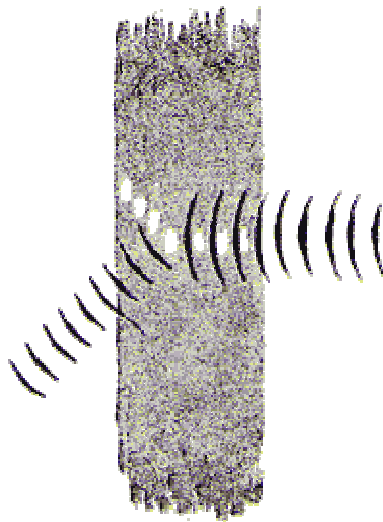
del hueso del cráneo, porque el hueso absorbe los sonidos mucho más que los tejidos blandos. Además, en las intervenciones cerebrales la frecuencia máxima que puede emplearse sin peligro es de unos 2.000.000 de cps.

El empleo de los ultrasonidos en terapéutica cerebral promete el surgimiento de una amplia gama de adelantos médicos. Ante todo, se elimina el peligro de lesionar por accidente alguna estructura importante del cerebro. Anteriormente, por ejemplo, había que recurrir a instrumentos mecánicos como bisturíes o aparatos de succión, a sustancias químicas que se introducían con tubos especiales, a estudios eléctricos en los que se implantaban minúsculos electrodos en los tejidos circundantes, o radiaciones. Por más cuidado que se tuviera, había que destruir un poco de tejido para introducir los instrumentos. Con los ultrasonidos, en cambio, todo lo que se requiere es enfocar bien los haces. Los estudios o los tratamientos con ultrasonidos se pueden realizar todas las veces que los médicos consideren necesario.

En la actualidad es posible recurrir a los haces ultrasónicos para hacer estudios prolongados y cuidadosos sobre el funcionamiento de las distintas áreas del cerebro. Con el tiempo se podrán conocer y diferenciar los millones de minúsculos circuitos eléctricos del cerebro y su funcionamiento. Con estos datos los médicos estarán en mejores condiciones de reparar casi todos los tipos de enfermedades cerebrales. (Los mismos datos así obtenidos también podrán conducir a la invención de computadoras mucho mejores.) Una vez analizado un problema, se aplicará la ultrasónica para obtener la curación.



Aplicación de los ultrasonidos en cirugía. Diseño de un dispositivo especial que enfoca las ondas ultrasónicas en el interior del cerebro, con el objeto de reparar una lesión.



Se pueden emplear haces ultrasónicos para reconocer fallas en los materiales. Como vemos en este diagrama, los puntos débiles que pueda contener el material, desvían a la onda ultrasónica. Esta desviación es captada por el instrumento, indicando al operario que el material presenta un defecto.

Por ejemplo, la modificación de ciertos circuitos del cerebro corregiría los defectos del habla y hasta repararía lesiones que en la actualidad paralizan a los pacientes o les dificultan el uso correcto de los brazos y piernas.

Los ultrasonidos también tienen una amplia gama de aplicaciones en la investigación de materiales y en la industria. En los trabajos con materiales, los ultrasonidos sirven para verificar el sonido de los átomos. La estructura del átomo es similar a la de un pequeño universo donde los electrones giran vertiginosamente alrededor del núcleo como si fuesen los planetas en torno del sol. Esta constante vibración en toda la materia, en realidad desprende un sonido de alta frecuencia que se registra mediante sondas ultrasónicas.

Existe una relación entre el movimiento de los átomos y la capacidad de los materiales para absorber el sonido. Enviando ondas sonoras de distintas frecuencias sobre distintos materiales y observando las alteraciones que ocurren en el sonido, los científicos obtienen datos fundamentales sobre la estructura del átomo. A partir de esto, entonces, se puede mejorar el material o desarrollar nuevas combinaciones de materiales dotados de propiedades especiales.

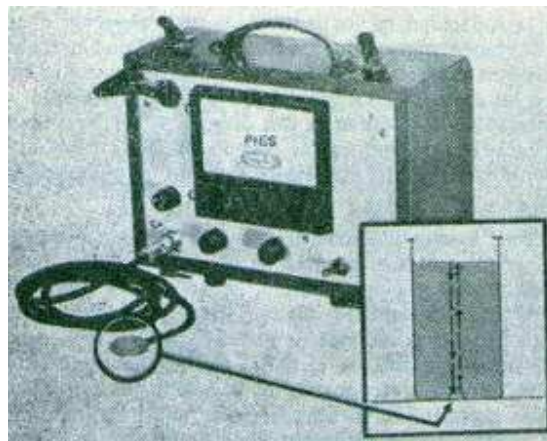
Merced a estos efectos relacionados entre sí, se pueden investigar las fallas existentes en el espesor de los materiales compactos. Si, por ejemplo, los átomos de una barra de acero están deformados en un determinado lugar, desvían la orientación del haz de sonidos de alta frecuencia. Para el ojo parecería que el metal es tan resistente adentro como afuera, pero gracias al haz sonoro el ingeniero sabe que presenta un peligroso punto débil en un determinado lugar. Por el contrario, si la pieza está en buenas condiciones, el haz ultrasónico lo revela sin alterar físicamente el material.

También se están empleando mucho los ultrasonidos en varias industrias para mejorar o fiscalizar los procesos de producción. Empleando haces de sonidos de alta frecuencia cuidadosamente seleccionados, se obtiene la mezcla más completa de dos materiales, por ejemplo. En algunos casos, el método ultrasónico logra mezclar dos sustancias que normalmente serían indiferentes la una frente a la otra. Estas mezclas

pueden ser líquidas o sólidas, puede tratarse de mezclas de sustancias químicas o de aleaciones de distintos metales fundidos en altos hornos.

Otra aplicación fabril de los ultrasonidos es la limpieza de piezas delicadas o de difícil acceso. En este caso, la enérgica vibración generada por los haces ultrasónicos sacude y desprende prácticamente todas las partículas de suciedad.

Entre las múltiples aplicaciones industriales de los ultrasonidos figura este medidor de nivel líquido. En el fondo del recipiente se coloca el pequeño transductor piezoeléctrico (en el círculo), que genera unos haces ultrasónicos enfocados de modo que se reflejen desde la superficie del líquido hacia abajo. Las señales pasan entonces a la aguja indicadora, que revela la altura del líquido en metros o pies.



Entre las aplicaciones de limpieza específica figuran las piezas de relojes, piezas de automóviles y partes constitutivas de giróscopos para proyectiles.

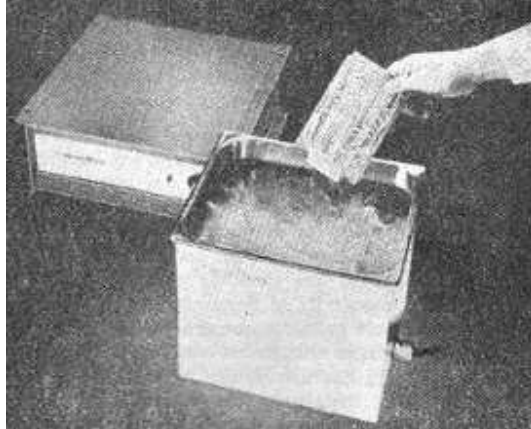
Es probable que la aplicación más importante de la ultrasónica en la industria actual sean las operaciones de maquinado y soldado. Las elevadísimas vibraciones del ultrasonido pueden utilizarse para desgastar partículas hasta de los metales más resistentes. En este caso un transductor transmite la frecuencia deseada a una herramienta, que puede ser un punzón o una piedra de amolar. La vibración de la herramienta, aunque enorme, es tan rápida que no se ve a simple vista. Sin embargo,

se la puede controlar cuidadosamente para obtener cortes, perforaciones y otros cambios exactos en todo tipo de material. El proceso es tan sensible que sirve para recortar partículas sumamente quebradizas como la cerámica o el vidrio. Uno de los nuevos métodos de esmerilar que se estudian, es el de los barrenos ultrasónicos para odontología, que algún día habrán de simplificar el relleno de las cavidades dentales.

La soldadura ultrasónica se emplea desde hace muchos años en las industrias de la aeronáutica y de los proyectiles dirigidos. Uno de los problemas que plantea la soldadura convencional es que hay que aplicar calor para fundir los metales en el sitio de unión y obtener así la soldadura. Lamentablemente, si bien la unión resultante es muy firme, el metal que circunda a la soldadura tiende a debilitarse. Después de la Segunda Guerra Mundial los hombres de ciencia hallaron que era posible unir materiales aplicando energía ultrasónica con herramientas de formas especiales. El haz ultrasónico hace vibrar los átomos de los dos cabos metálicos, logrando que se entrelacen. Lo más importante es que esta soldadura ultrasónica no requiere calor y, por lo tanto, el metal circundante no se debilita.

Pero la soldadura ultrasónica tiene sus limitaciones. Sólo se pueden unir de este modo finas láminas de metal de menos de 5 milímetros de espesor. En muchas piezas de aviones y de proyectiles, en que se emplean chapas finas, el método ultrasónico representa una gran ventaja.

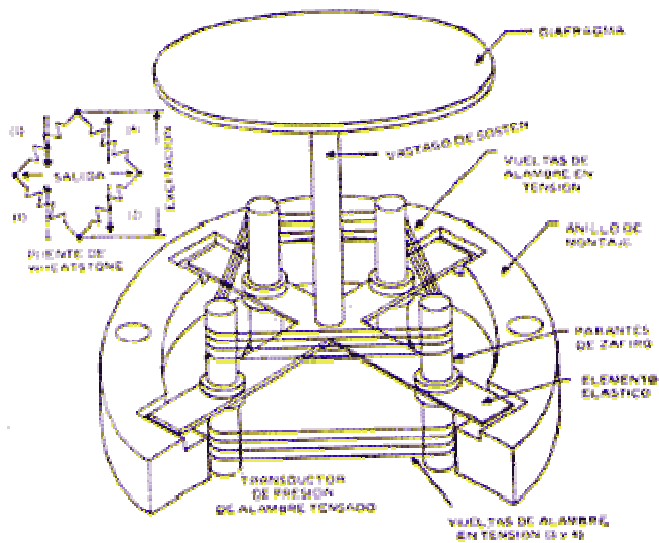
Además de los procesos de maquinado y soldadura, también se comprobó en trabajos recientes que la energía ultrasónica sirve para laminar metales. Los ingenieros rusos, por ejemplo, desarrollaron métodos que utilizan ultrasonidos para laminar las chapas metálicas, y obtener así hojas de muy poco espesor.



Limpienza ultrasónica para eliminar toda suciedad en piezas delicadas. Vemos aquí la inmersión de una pieza electrónica en un baño ultrasónico que está en plena agitación por las ondas de los ultrasonidos.

También se trabaja en fraguado, en trefilado de alambre y en la producción de tubos sin costura, todo por métodos ultrasónicos. Lo más promisorio ha sido el empleo de los ultrasonidos para dar formas a materiales normalmente difíciles de trabajar, como la cerámica.

Estas son apenas unas pocas de las múltiples aplicaciones de los ultrasonidos. En realidad hay centenares de aplicaciones más en estudio o en pleno funcionamiento en muchos ámbitos de la industria y la ciencia. El sonido inaudible promete ser uno de los auxiliares más importantes del hombre en los años por venir.



Existen transductores de muchas formas, tamaños y conformación interna, pero el principio general es el mismo. Como este diagrama indica, se monta un diafragma en lo alto de un circuito eléctrico, como aquí, o sobre algún fuelle mecánico. Al golpear las ondas de presión contra el diafragma, éste hace circular una corriente eléctrica por los conductores. Funcionando a la inversa, una corriente eléctrica de frecuencia muy alta que pase por el conductor, hace vibrar el diafragma para que emita ondas ultrasónicas.

INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO

La inspección por ultrasonido es un método no destructivo 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 sub-superficie.

Las ondas de sonido viajan a través del material disminuyéndose paulatinamente y son reflejadas a la interface. El haz reflejado es mostrado y analizado para definir la presencia y localización de fallas y discontinuidades.

El grado de reflexión depende grandemente en el estado físico de los materiales que forman la interface. Por ejemplo: las ondas de sonido son reflejadas casi totalmente en las interfaces gas/metál. Por otro lado existe una reflectividad parcial en las interfaces metal/sólido.

Grietas, laminaciones, poros, socavados y otras discontinuidades que producen interfaces reflectivas pueden ser detectadas fácilmente. Inclusiones y otras partículas extrañas pueden ser también detectadas causando baja reflexión.

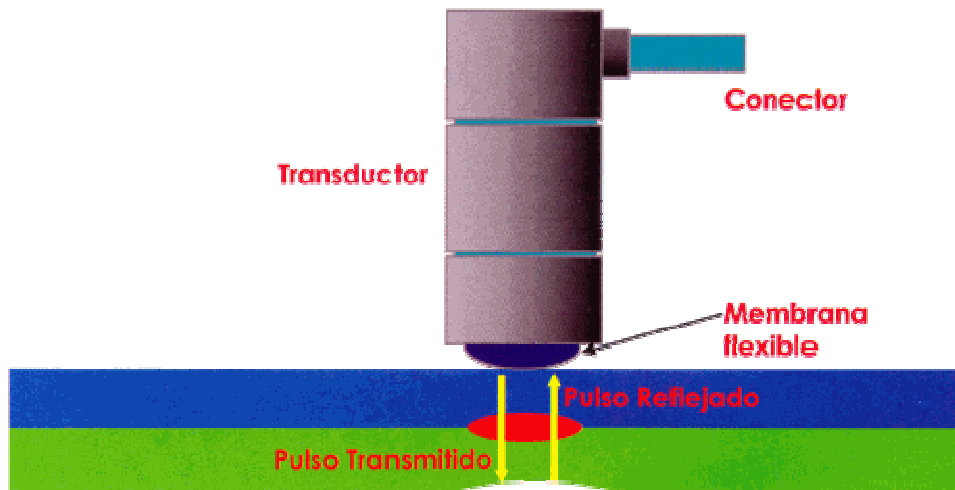


Figura 1. Imagen que muestra un esquema general del proceso

La mayoría de los instrumentos de inspección ultrasónica detectan fallas monitoreando uno más de los siguientes puntos:

- La reflexión del sonido de las interfaces consistentes en los límites del material o en discontinuidades dentro del material mismo.
- El tiempo de tránsito de la onda de sonido durante la prueba dentro de la pieza desde el punto de entrada del transductor hasta el punto de salida.
- La atenuación de las ondas de sonido en la pieza debido a la absorción y dispersión dentro de la pieza.

La mayoría de las inspecciones ultrasónicas son realizadas en frecuencias entre 0.1 y 25 MHz. Las ondas de ultrasonido son vibraciones mecánicas, las amplitudes de las vibraciones producen esfuerzos en las piezas por debajo de su límite elástico, de esta manera los materiales no producirán deformaciones plásticas.

La inspección ultrasónica es el método no destructivo más comúnmente utilizado. Su principal aplicación es la detección de discontinuidades y defectos internos, aunque también es utilizado para detectar defectos superficiales, para definir características de la superficie tales como: medida de corrosión y espesor. Y con frecuencias menores se sirve para determinar el tamaño de grano, estructura, y constantes elásticas.

Equipo básico

La mayoría de los equipos de inspección por ultrasonido incluyen el siguiente equipo básico:

- Un generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternadas.
- Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas.
- Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo.
- Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) de la pieza al transductor.
- Un transductor (puede ser el mismo que el transductor que inicia las ondas ultrasónicas o puede ser otro diferente) para aceptar y convertir las ondas de

ultrasonido de salida de la pieza de trabajo en ráfagas de voltaje. En la mayoría de los sistemas un transductor simple actúa como emisor y receptor.

- Un dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor.
- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte ya sea impresa o en pantalla.
- Un reloj electrónico o un cronómetro para controlar la operación de varios componentes del sistema.

Características generales de las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas (en contraste por ejemplo con los rayos x que son ondas electromagnéticas) que consisten en vibraciones oscilatorias de partículas atómicas o moleculares de una sustancia. Las ondas de ultrasonido se comportan igual que las ondas de sonido audible. Se pueden propagar a través de un medio elástico, ya sea sólido, líquido o gaseoso, pero no al vacío.

En varios aspectos, un haz de ultrasonido es similar a un haz de luz, ambos son ondas y obedecen a la ecuación general de ondas. Cada onda viaja con características diferentes las cuales dependen del medio en el que se propaguen no de las características de la onda. Como un haz de luz, un haz de ultrasonido es reflejado de las superficies, refractado cuando cruza las fronteras entre dos sustancias que tienen diferentes características de velocidades y difractados en los bordes o alrededor de los obstáculos.

Propagación de las ondas

Las ondas ultrasónicas (y otras ondas de sonido) se propagan en cierta medida en cualquier material elástico. Cuando las partículas atómicas o moleculares de un material elástico son desplazadas de sus posiciones de equilibrio por cualquier fuerza aplicada, esfuerzos internos actúan para restaurar o reacomodar a sus posiciones originales.

Debido a las fuerzas interatómicas que existen entre las partículas adyacentes del material, un desplazamiento en un punto induce un desplazamiento en los puntos vecinos y así sucesivamente, originando entonces una propagación de ondas de esfuerzo-deformación. El desplazamiento real material que se produce en las ondas ultrasónicas es extremadamente pequeño.

La amplitud, modo de vibración y velocidad de las ondas se diferencian en los sólidos, líquidos y gases debido a las grandes diferencias que entre las distancias de sus partículas internas. Estas diferencias influyen las fuerzas de atracción entre partículas y el comportamiento elástico de los materiales.

La relación de velocidad con frecuencia y longitud de onda está dada por:

$$V = f \cdot \lambda$$

Dónde V es velocidad (en metros por segundo), f es la frecuencia (en Hertz) y λ es la longitud de onda (en metros por ciclo).

Velocidad.

La velocidad de propagación es la distancia recorrida por la onda dividido por el tiempo empleado para recorrer esa distancia. La velocidad de los ultrasonidos en un material determinado depende de la densidad y elasticidad del medio que a su vez varían con la temperatura. La relación es directa, es decir, a mayor densidad del medio, mayor será la velocidad de transmisión de los ultrasonidos.

Frecuencia.

Es el número de oscilaciones (vibración o ciclo) de una partícula por unidad de tiempo (segundo). La frecuencia se mide en Hertz (Hz). Un Hertz es una oscilación (ciclo) por segundo. Como los ultrasonidos son ondas de alta frecuencia, se utiliza como medida básica el MegaHertz (MHz) que es igual a un millón de Hz.

Longitud de onda.

Es la distancia que existe entre dos puntos que se encuentran en el mismo estado de vibración.

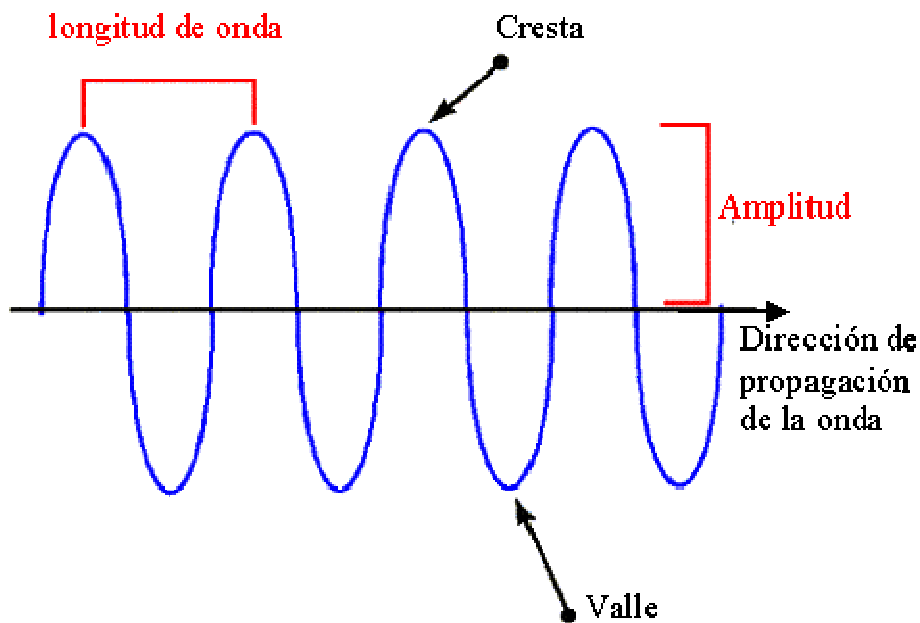


Figura 2. Esquema de longitud de onda.

Amplitud.

Es el máximo cambio producido en la presión de la onda, es decir la distancia máxima que alcanza la partícula vibratoria desde su posición inicial de reposo (altura de la curva senoidal).

La amplitud se relaciona con la intensidad. De este modo si aumentamos la intensidad de una onda determinada aumentaremos su amplitud. Durante la transmisión de las ondas, por efecto de su interacción con el medio, disminuye la intensidad de la onda en función de la distancia recorrida y como consecuencia se produce una disminución de su amplitud.

Período.

Es el tiempo de una oscilación completa, es decir lo que tarda el sonido en recorrer una longitud de onda.

Intensidad.

Es la energía que pasa por segundo a través de una superficie de área unidad colocada perpendicularmente a la dirección de propagación del movimiento.

La intensidad disminuye con la distancia.

Propiedades de las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas pueden desplazarse por el medio en forma de ondas longitudinales (las partículas vibran en la dirección de propagación de la onda), transversales (las partículas vibran perpendicularmente) o de superficie (los movimientos de las partículas forman elipses en un plano paralelo a la dirección de propagación y perpendicular a la superficie).

Los ultrasonidos van a tener una característica muy importante que los diferencia de los sonidos de menor frecuencia, la direccionalidad, es decir, la onda ultrasónica no se propaga en todas direcciones sino que forma un haz de pequeño tamaño que puede ser "enfocado".

Además, de un modo análogo a lo que sucede con una onda luminosa, se pueden aplicar lentes acústicas que pueden modular el haz ultrasónico. Esto permite focalizar nuestro haz sobre la zona a explorar, quedando fuera de foco las que están situadas por delante o detrás de ese punto, es decir, lo mismo que en las ondas luminosas, existe el concepto de "profundidad de foco", que se aplicaría a todas las estructuras que quedan enfocadas utilizando un haz de unas características determinadas.

Ondas longitudinales ultrasónicas

Algunas veces llamadas ondas de compresión, son el tipo de ondas ultrasónicas mayormente utilizadas en la inspección de materiales. Estas ondas viajan a través de los materiales como series alternadas de compresión y succión en las cuales las partículas transmiten las vibraciones de regreso y la dirección de viaje de las ondas.

Las ondas longitudinales ultrasónicas y su correspondiente oscilación de partícula y onda de succión y compresión resultante se muestran esquemáticamente en la siguiente figura

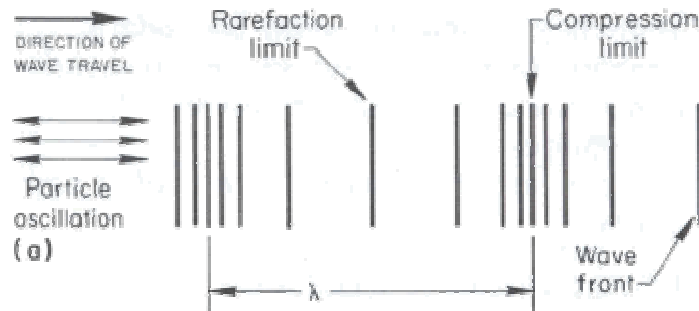
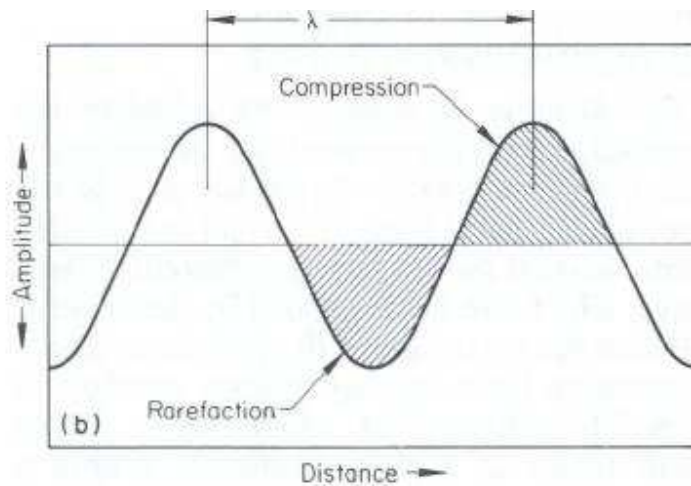


Figura 3. Esquema de ondas ultrasónicas longitudinales, oscilación de partícula, compresión y onda de succión

Una gráfica de la amplitud del desplazamiento de partícula versus viaje de onda en conjunto con la onda de succión a través de una cresta de compresión se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4. Amplitud del desplazamiento de partícula versus viaje de onda
La longitud de onda λ es la distancia correspondiente a un ciclo completo**

La distancia de una cresta a la otra (que es igual a la distancia de un ciclo completo de succión y compresión) es la longitud de onda λ . El eje vertical en la figura anterior

puede representar presión en lugar de desplazamiento de partícula. El eje horizontal puede representar tiempo en lugar de distancia de viaje debido a que la velocidad del sonido es constante en un material dado y porque esta relación es usada en mediciones en inspecciones por ultrasonido.

Las ondas longitudinales ultrasónicas se propagan rápidamente en líquidos y gases así también como en sólidos elásticos.

La velocidad de una onda longitudinal ultrasónica es de 6000 m/s en aceros, 1500 m/s en agua y 330 m/s en aire.

Ondas transversales ultrasónicas

Las ondas transversales son también utilizadas ampliamente en la inspección ultrasónica de los materiales. Podemos visualizar las ondas transversales en términos de vibraciones como una cuerda que se agita rítmicamente en la que cada partícula en lugar de vibración paralela a la dirección del oleaje como a la onda longitudinal, vibra hacia arriba y hacia abajo en un plano perpendicular a la dirección de propagación.

Una onda transversal se ilustra esquemáticamente en la siguiente figura, donde se muestra la oscilación de la partícula, el frente de onda, dirección del viaje de la onda y longitud de onda correspondiente a un ciclo.

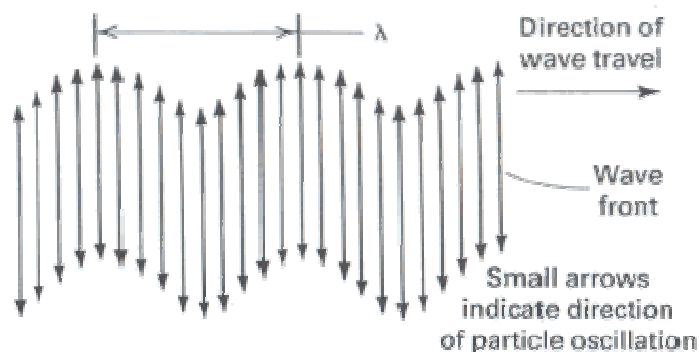


Figura 5. Esquema de ondas transversales (de corte).

La longitud de onda λ es la distancia correspondiente a un ciclo completo

A diferencia de las ondas longitudinales, las ondas transversales no pueden ser soportadas por una colisión elástica de las partículas o moléculas adyacentes. Para la propagación de ondas transversales es necesario que cada partícula exhiba una elevada fuerza de atracción con las partículas o moléculas vecinas de tal manera que la partícula se pueda mover hacia atrás y adelante moviendo a la partícula vecina causando de este modo que el sonido se mueva a través del material con la velocidad asociada a las ondas transversales que es aproximadamente el 50% de la velocidad de las ondas longitudinales para el mismo material.

Aire y agua no soportan las ondas transversales, en los gases las fuerzas de atracción de las moléculas son tan pequeñas que las ondas transversales no pueden ser transmitidas.

Ondas superficiales

Son otro tipo de ondas ultrasónicas utilizadas en la inspección de materiales. Estas ondas viajan a través de la superficie plana o curva de materiales sólidos. Para la propagación de ondas de este tipo, las ondas deben de viajar a través de una interface limitada. Por un lado por las fuerzas elásticas de un sólido y por el otro lado fuerzas prácticamente insignificantes producidas por moléculas de gas.

Las ondas superficiales están sujetas a sufrir atenuación en un material dado como lo hacen las ondas longitudinales y transversales. Tienen una velocidad aproximada de 90% de la velocidad de las ondas transversales en el mismo material. La región dentro de la cual estas ondas se propagan con energía efectiva no es más gruesa que una onda propagada debajo de la superficie del metal.

A esta profundidad la energía de la onda es cerca del 4% de la energía de la onda en la superficie y la amplitud de la oscilación disminuye hasta un valor despreciable a grandes profundidades.

En las ondas superficiales la oscilación de las partículas generalmente siguen un patrón elíptico

Propiedades acústicas de algunos metales

Las propiedades acústicas de algunos metales se listan en la tabla 1, las propiedades acústicas de los metales y aleaciones están influenciadas por variaciones en la estructura y condiciones metalúrgicas

Tabla 1. Propiedades acústicas de varios metales y no metales.

Material	Density (ρ), g/cm ³	Sonic velocities, 10 ³ cm/s			Acoustic impedance (Z_1), 10 ⁶ g/cm ² · s(d)
		V_L (a)	V_T (b)	V_S (c)	
Ferrous metals					
Carbon steel, annealed	7.85	5.94	3.24	3.0	4.66
Alloy steel					
Annealed	7.86	5.95	3.26	3.0	4.68
Hardened	7.8	5.90	3.23	...	4.6
Cast iron	6.95-7.35	3.5-5.6	2.2-3.2	...	2.5-4.0
52100 steel					
Annealed	7.83	5.99	3.27	...	4.69
Hardened	7.8	5.89	3.20	...	4.6
D6 tool steel					
Annealed	7.7	6.14	3.31	...	4.7
Hardened	7.7	6.01	3.22	...	4.6
Stainless steels					
Type 302	7.9	5.66	3.12	3.12	4.47
Type 304L	7.9	5.64	3.07	...	4.46
Type 347	7.91	5.74	3.10	2.8	4.54
Type 410	7.67	5.39	2.99	2.16	4.13
Type 430	7.7	6.01	3.36	...	4.63

MÉTODOS

Métodos básicos de inspección

Los dos métodos más importantes para la inspección por ultrasonido son el método de transmisión y el método eco-pulsado. La principal diferencia entre estos dos métodos es que el método de transmisión involucra solo la medición de la atenuación de la señal, mientras que el método eco-pulsado puede ser utilizado para medir el tiempo de tránsito y la atenuación o disminución de la señal.

Método eco-pulsado

Es el más utilizado en inspecciones ultrasónicas, involucra la detección de ecos producidos cuando un pulso ultrasónico es reflejado por una discontinuidad o una interface en una pieza de trabajo. Este método es utilizado para detectar la localización de la falla y para medir espesores.

La profundidad de la falla está determinado por el "tiempo de vuelo" entre el pulso inicial y el eco producido por la falla. La profundidad de la falla también se puede determinar por el tiempo relativo de tránsito entre el eco producido por una falla y el eco de la superficie de respaldo.

Las dimensiones de las fallas se estiman comparando la amplitud de la señal del sonido reflejado por una interface con la amplitud del sonido reflejado desde un reflector de referencia de tamaño conocido o por una pieza de respaldo que no contenga fallas.

Método de transmisión

EL método de transmisión el cual incluye tanto reflexión como transmisión, involucra solo la medición de la atenuación o disminución de señal. Este método también se utiliza para la detección de fallas. En el método eco-pulsado, es necesario que una falla interna reflecte al menos una parte de la energía sonora sobre un transductor de recepción.

Los ecos de las fallas no son necesarios para su detección. El hecho de la que la amplitud de la reflexión de una pieza de trabajo es menor que la de una pieza idéntica libre de fallas implica que la pieza tiene una o más fallas. La técnica para detectar la presencia de fallas por la atenuación de sonido es utilizada en los métodos de transmisión así como en los métodos eco-pulsados.

La principal desventaja de los métodos de atenuación es que la profundidad de la falla no puede ser medida.

OTROS METODOS

Método de frecuencia modulada

Este método fue el precursor de los métodos de eco-pulsado, es otro método de detección de fallas. En el método FM los pulsos ultrasónicos son transmitidos en paquetes de ondas los cuales su frecuencia varía linealmente con el tiempo.

La variación en la frecuencia es repetitiva en los paquetes de ondas sucesivos de tal manera que si se grafica frecuencia contra tiempo se obtendrá un patrón de diente de sierra en la curva graficada. Existe un tiempo de demora entre paquetes sucesivos.

Los ecos que retornan se muestran o visualizan en una unidad de salida.

Aun cuando el método de frecuencia modulada es un método no tan común, como lo es el método de eco-pulsado. El método FM tiene una baja relación: ruido-señal y por lo tanto una buena opción en ahorro de energía.

Análisis espectral

Este método puede ser utilizado en los métodos de transmisión o eco-pulsado, involucra la determinación de un espectro de frecuencia de una onda ultrasónica después de que se ha propagado a través de la pieza. El espectro de la frecuencia puede ser determinado por la transmisión de un pulso y utilizando un transformador de Fourier.

Los análisis espectrales pueden ser utilizados para medir especímenes de espesores delgados.

Conducción de sonido

Es utilizado en la detección de fallas por el monitoreo de la intensidad de formas de ondas arbitrarias en un punto determinado de la pieza a inspeccionar. Estas ondas transmiten energía ultrasónica las cuales son alimentadas a la pieza en algún otro punto sin la existencia de un patrón de haz bien definido entre los dos puntos.

MÉTODOS ECO-PULSADOS

En el método eco-pulsado pequeñas ráfagas de energía ultrasónica (pulsos) son introducidas dentro de la pieza de trabajo a intervalos regulares de tiempo. Si los encuentra una superficie reflectiva, toda o alguna parte de la energía es retornada. La proporción de energía que es reflexiva es altamente dependiente del tamaño de la superficie reflectiva en relación con el tamaño del haz incidente.

La dirección del haz reflejado (eco) depende de la orientación de la superficie reflectiva respecto a la dirección de incidencia del haz. La energía reflejada es monitoreada, ambas, la cantidad de energía reflejada en una dirección específica y el tiempo de demora entre la transmisión del pulso inicial.

Principio de los métodos eco-pulsados:

La mayoría de los equipos de eco-pulsado consisten en:

- En reloj electrónico.
- Un generador electrónico de señal o pulsador.
- Un transductor de envío.
- Un transductor de recepción.
- Un amplificador de eco-señal.
- Un dispositivo de salida.

PRESENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN ECO-PULSADA

La información del método de eco-pulsado puede ser desplegada en diferentes formas. Las formas básicas son:

Escaneos-A: Este formato provee un desplegado cuantitativo de señales y tiempo de vuelo obtenidos en un punto simple en la superficie de la pieza. El desplegado del escaneo tipo A, que es el formato más utilizado, puede ser empleado para analizar el tipo, localización y tamaño de una falla.

Escaneos-B: Este formato provee un desplegado cuantitativo de "tiempo de vuelo" obtenido a través de una línea de la pieza. El escaneo tipo B muestra la profundidad relativa de los reflectores y es usado principalmente para determinar el tamaño

(longitud en una dirección), localización (posición y profundidad) y de alguna manera la forma y orientación de fallas largas.

Escaneos-C: Este formato provee un desplegado semi-cuantitativo o cuantitativo de señales de amplitudes obtenidos sobre un área de la pieza a evaluar.

Esta información puede ser utilizada para ubicar las fallas en una vista de la pieza de trabajo.

Los escaneos tipo A y B son generalmente presentados en la pantalla de un osciloscopio, los escaneos tipo C son almacenados por una máquina de de coordenadas o desplegados en un monitor de computadora.

Desplegado del escaneo tipo A.

Es básicamente una gráfica de amplitud versus tiempo, en la cual una línea horizontal sobre un osciloscopio indica el tiempo transcurrido mientras que el eje vertical indica las deflexiones (llamadas indicaciones o señales) representan los ecos.

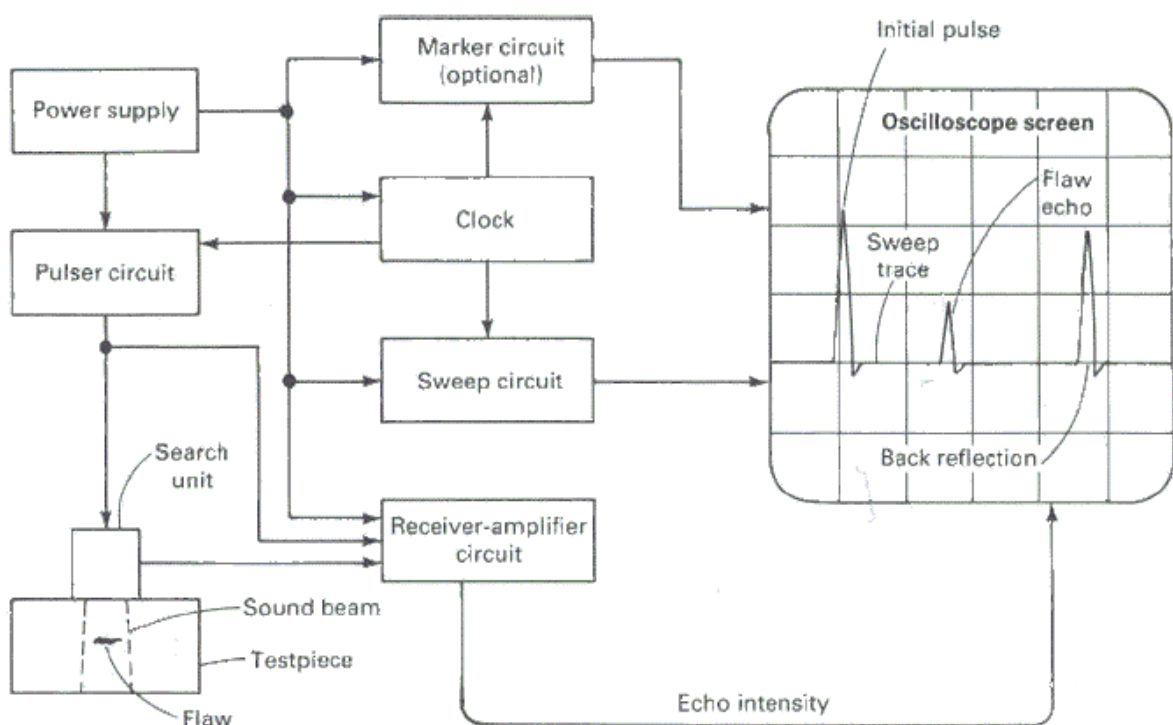


Figura 6. Diagrama típico de bloque de un escaneo tipo A, incluyendo el desplegado visual, para un ultrasonido eco-pulsado básico.

El tamaño de la falla se puede estimar comparando la señal de la amplitud de una discontinuidad con una señal de una discontinuidad de un tamaño y forma conocido. La señal de discontinuidad debe de ser corregida para evitar pérdidas de distancia.

La localización de la falla (profundidad) se determina por la posición del eco de la falla en la pantalla del osciloscopio.

Desplegado del escaneo tipo B.

Es básicamente una gráfica de tiempo versus distancia, en el cual un eje ortogonal en el desplegado corresponde al tiempo transcurrido, mientras que el otro eje representa la posición del transductor a través de una línea sobre la pieza de trabajo relativa a la posición del transductor al inicio de la inspección.

La intensidad del eco no es medida directamente porque ya es medida en el escaneo tipo A, pero es regularmente indicada semi-cuantitativamente por el brillo relativo del eco que generan las indicaciones en el osciloscopio.

Un arreglo típico de escaneo tipo B se muestra en la siguiente imagen.

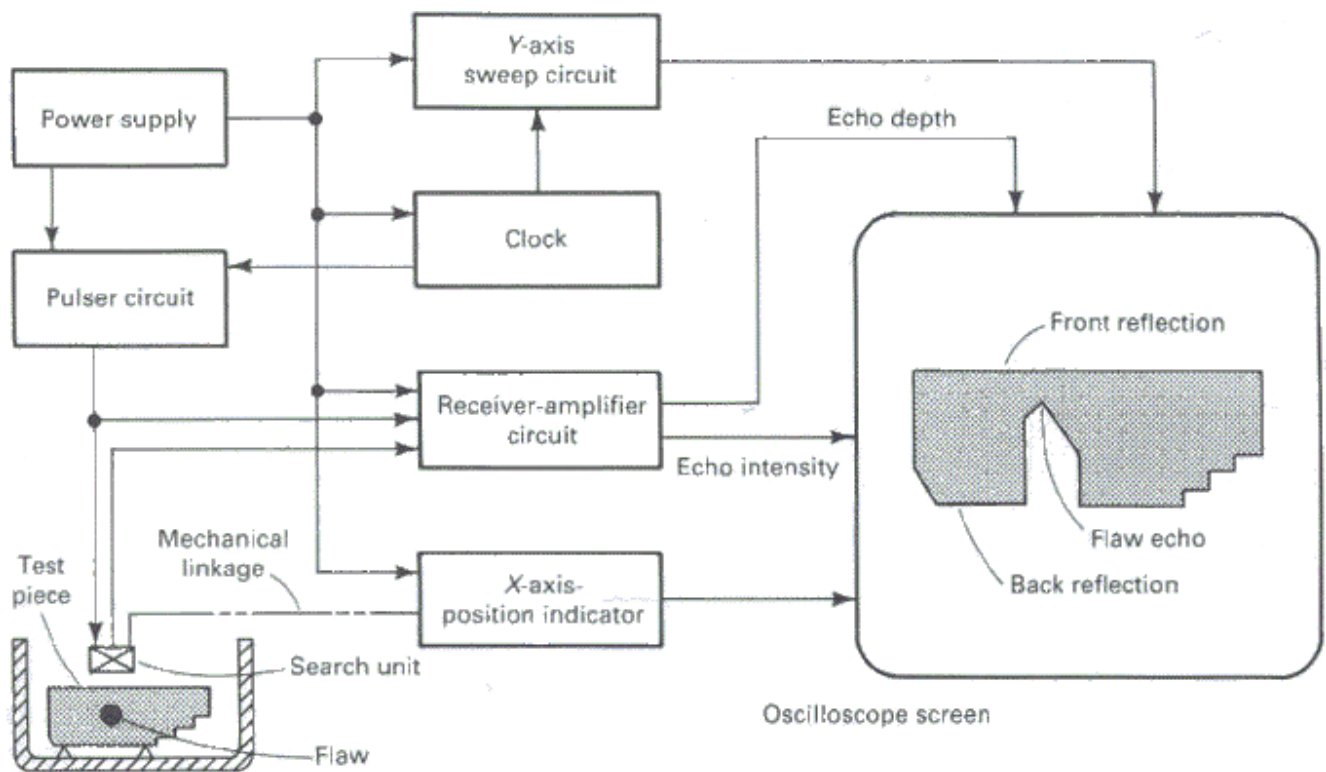


Figura 7. Imagen que muestra un arreglo de escaneo tipo B.

Las funciones del sistema son idénticas al tipo A excepto por que el desplegado es realizado sobre una pantalla de osciloscopio. Los ecos están indicados por puntos brillantes en la pantalla a diferencia del A que maneja deflexiones.

Desplegado del escaneo tipo C.

Almacena ecos de las porciones internas de las piezas a examinar como función de la posición de cada interface reflectiva dentro de un área.

La profundidad de la falla normalmente no es almacenada, pero puede ser medida semi cuantitativamente

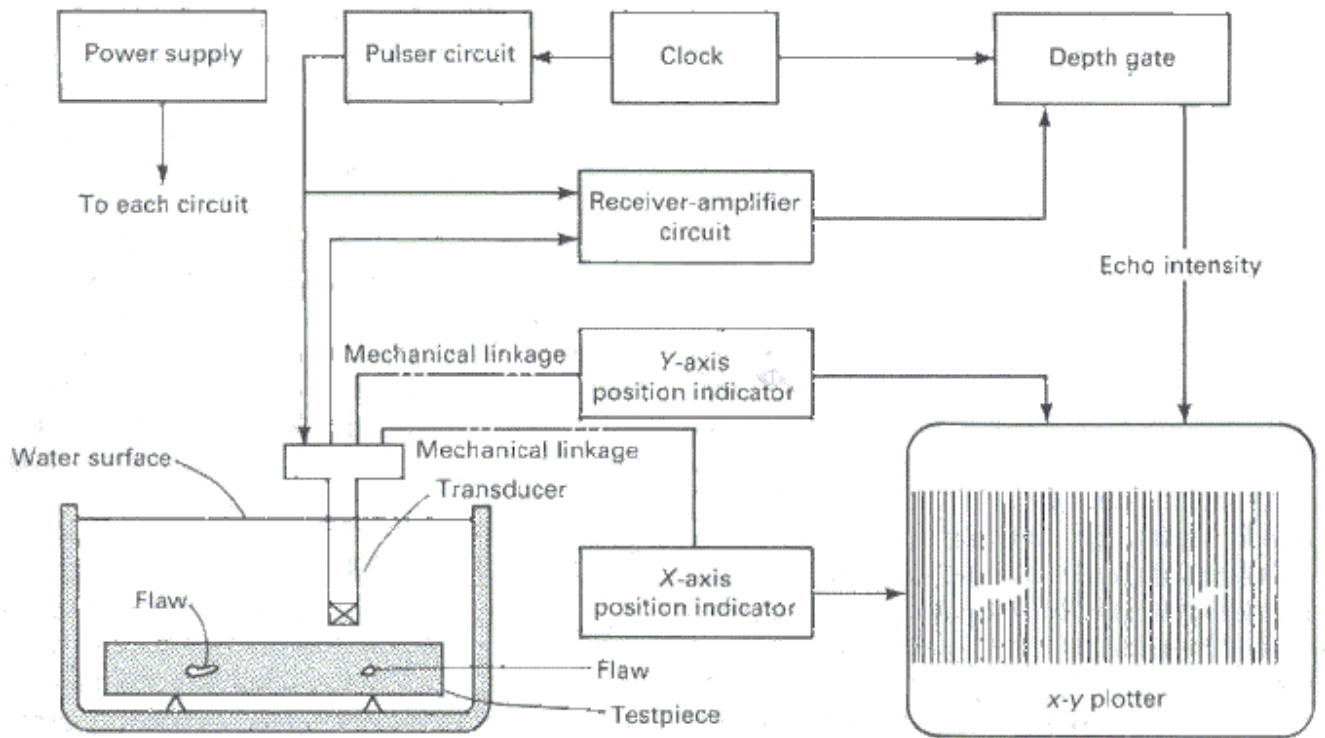


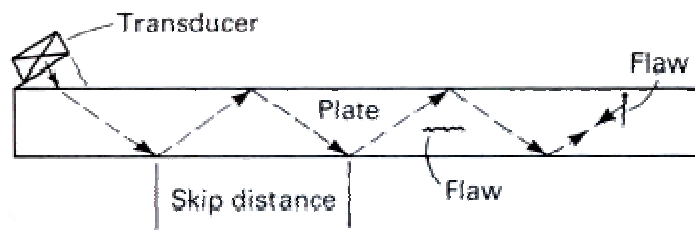
Figura 8. Diagrama típico de un arreglo de escaneo tipo C

INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN ECO-PULSADA

La interpretación de la información eco-pulsada es relativamente directa para el escaneo tipo B y tipo C. El escaneo tipo B siempre almacena la reflexión principal. Mientras que los ecos internos o pérdida de reflexión de respaldo o ambos son interpretados como indicaciones.

TÉCNICAS DE HAZ ANGULAR

En las técnicas de haz angular, el pulso de sonido incidente penetra la pieza a evaluar, en un ángulo oblicuo en lugar de un ángulo recto. En contraste con las pruebas de haz recto, este método elimina los ecos de la superficie posterior y frontal y solo despliega reflexiones causadas por discontinuidades que son normales al haz de incidencia



(a)

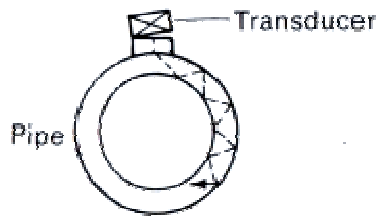


Figura 9. Imagen que muestra técnica de haz angular con un transductor en una placa y en un tubo.

El haz de sonido entra en el material a inspeccionar con cierto ángulo y se propaga por reflexiones sucesivas en forma de zigzag por los límites del espécimen hasta que sea interrumpido por una discontinuidad o un límite donde el haz se regrese de dirección y se refleje al transductor.

Las técnicas de haz angular son utilizadas generalmente para evaluar soldaduras, tuberías, hojas y placas de material y especímenes de forma irregular (como soldaduras) donde un haz recto es imposible que esté en contacto con toda la superficie.

Las técnicas de haz angular son también utilizadas en la localización de fallas cuando existe una pérdida de reflexión de retroalimentación

MÉTODOS DE TRANSMISIÓN

En este tipo de método la transmisión de es realizada por haz directo o reflectivo, las fallas son detectadas comparando la intensidad del ultrasonido transmitido a través de la pieza contra la intensidad transmitida a través de una referencia estándar fabricada del mismo material.

Las pruebas de transmisión requieren de dos unidades de búsqueda, una para transmitir las ondas ultrasónicas y otra para recibirlas.

Un buen acoplamiento es crítico para los métodos de transmisión debido a las variaciones de sonido durante la transmisión.

NORMAS AWS D1.1.

Prueba de ultrasonido en uniones de ranura soldadas.

6.20 General

6.20.1.- Estándares y procedimientos.

Los procedimientos y estándares establecidos en la sección F gobernarán la inspección por ultrasonido en soldaduras por ranura y ZAC entre espesores de 5/16" y 8" (8mm a 200 mm) inclusive cuando la examinación sea requerida por el punto 6.14 de código. Para espesores menores a 5/16" o mayores que 8", la prueba deberá de ser desarrollada conforme al anexo K. Estos procedimientos y estándares deberán prohibirse para evaluar conexiones tubo-tubo, T, Y o conexiones tipo K.

6.20.2 Variaciones.

El anexo K es un ejemplo del desarrollo de una técnica alternativa para desarrollar examinación por ultrasonido de soldaduras de ranura. Variaciones en el proceso de evaluación, equipo, y estándares de aceptación no incluidos en la parte F de la sección 6 podrán ser usadas en acuerdo con el ingeniero. Tales variaciones incluyen otros espesores, geometrías de las soldaduras, tamaño de transductores, frecuencias, superficies pintadas, técnicas de prueba, etc. Las variaciones aprobadas deberán ser registradas.

6.20.3 Porosidad en tubería.

Para detectar posible porosidad en tubería la práctica RT es recomendada para suplementar la examinación UT para soldaduras ESW o EGW.

6.20.4 Metal Base.

Estos procedimientos no intentan emplearse en para realizar pruebas sobre metal base. De todas formas, discontinuidades relacionadas con soldadura (grietas, laminaciones, etc.) en el metal base adyacente las cuales según este código no serían aceptables deberán de ser informadas al ingeniero en jefe.

6.21 Requerimientos de calificación.

En acorde con los requerimientos del punto 6.14.6 de éste código, la calificación de un operador para realizar pruebas UT debe de incluir una evaluación práctica que deberá de estar basada en los requerimientos de este código. Esta evaluación requiere que el operador de la prueba UT demuestre su habilidad para aplicar las reglas de este código para la adecuada detección de discontinuidades.

6.22 Equipo UT.

6.22.1 Requerimientos de equipo.

Los instrumentos utilizados en la prueba UT deberán de ser de tipo eco-pulsados diseñados para trabajar con transductores que oscilen en frecuencias entre 1 y 6 MHz.

6.22.2 Linealidad Horizontal.

La linealidad horizontal del instrumento de pruebas deberá de estar calificada de acuerdo a la distancia del patrón completo de sonido a ser utilizada en la prueba UT de acuerdo a lo establecido en el punto 6.30.1.

6.22.3 Requerimientos de los instrumentos de prueba.

Los instrumentos de prueba deberán de incluir una estabilización interna para que después de que el instrumentos se haya calentado previamente para su operación no existan variaciones mayores que +/- 1 dB debido a un cambio de voltaje nominal de 15%. Deberá de existir una alarma o un dispositivo que monitoree en caso de caída

de voltaje en la batería antes de que el equipo se apague debido a que la batería se descargó por completo.

6.22.4 Calibración de los instrumentos de prueba.

Los instrumentos de prueba deberán de tener un control de ganancia calibrado (atenuador) ajustable de 1 a 2 dB con un rango máximo de 60dB. El procedimiento de calificación deberá de estar de acuerdo con lo descrito en el punto 6.24.2. y 6.30.2.

6.22.5 Rango de despliegue.

El rango dinámico de despliegue de los instrumentos deberá de tener un grado de detección de 1dB en variación de amplitud.

6.22.6 Haz recto (onda longitudinal) unidades de búsqueda.

El haz recto (onda longitudinal) unidad de búsqueda deberán de tener un área activa no menor a ½ pulgada cuadrada y no más que 1 pulgada cuadrada. El transductor deberá de ser redondo o cuadrado. Los transductores deberán de ser capaces de manejar los tres tipos de reflexiones descritas en 6.29.13.

6.22.7 Unidades de haz angular

Las unidades de haz angular deberán de consistir en transductores. La unidad deberá de estar compuesta de dos elementos o de una unidad integral.

6.22.7.1 Frecuencia

La frecuencia de los transductores deberá de estar entre 2 y 2.5 Mhz.

6.22.7.2 Dimensiones de los transductores

El cristal del transductor deberá de ser rectangular o cuadrado y podrá variar de 5/8" a 1" en espesor y de 5/8" a 13/16" en altura. La relación máxima de espesor con altura deberá ser de 1.2 a 1.0 y la mínima relación de espesor con altura podrá ser de 1.0 a 1.0

6.22.7.3 Ángulos

El transductor podrá producir un haz de sonido con un ángulo en el material de 2 grados más o menos que: 70,60 o 45 grados de acuerdo en lo descrito en el punto 6.29.2.2

USOS

Detección de defectos

La inspección por ultrasonido ha sido aplicada satisfactoriamente en la detección de defectos en fundiciones y partes de metal trabajado en soldadura, investigaciones en soldaduras ovaladas y desarrollo, producción y servicio. La inspección por contacto tiene una aplicación más extensa que la inspección de inmersión, no porque ello implica que el equipo es portátil (permitiendo la inspección de campo) sino también porque es versátil y aplicable a una amplia variedad de situaciones. La inspección en contacto, sin embargo, una sustancia como el aceite, grasa, o pasta es una extensión en la superficie de la parte que actúa como un cople; esta sustancia es algunas veces difícil de remover después de la inspección. Por contraste, el agua empleada como un complemento en la inspección por inmersión provee buenos acoplamientos acústicos (hasta superficies irregulares, rugosas, como podría ocurrir en las arenas de fundición atrapadas), pero no presenta problemas para remover. La inspección por inmersión es sobre todo especialmente adaptable al mecanizado, y aplicaciones de producción en línea.

Inspección de fundiciones

La inspección por inmersión y contacto son usadas en la detección de defectos en fundiciones, como poros, gotas, fracturas, contracciones, huecos e inclusiones, la figura siguiente muestra indicaciones típicas del ultrasonido de 4 tipos de defectos encontrados en fundiciones.

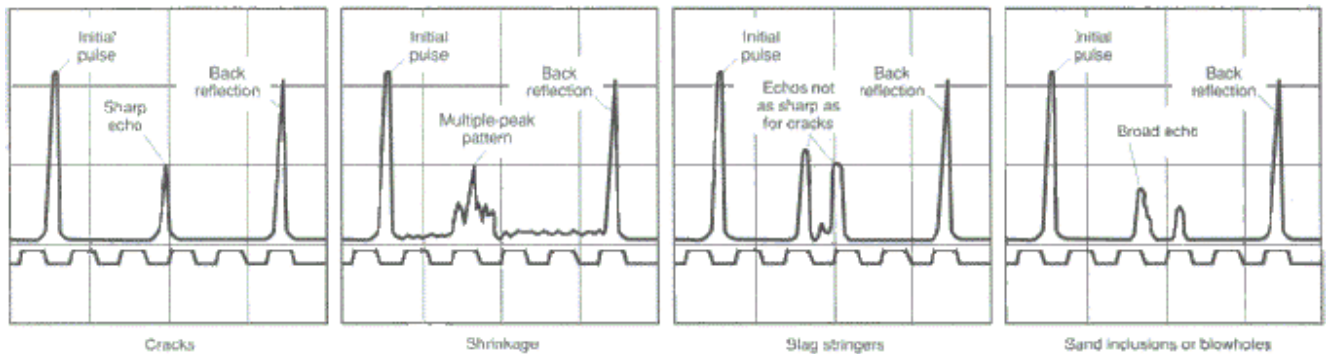


Figura 11. Tipos de defectos encontrados en fundición.

Aunque la inspección por inmersión es preferida para fundiciones teniendo superficies irregulares y ásperas. La selección de la técnica en una instancia específica dependería mayormente en el tamaño de la fundición y forma.

Porque algunas fundiciones tienen grano grueso, la baja frecuencia del ultrasonido quizás tenga que ser usada, fundiciones de algunos materiales con grano grueso, hacen la inspección por ultrasonido impracticable debido a la extensa dispersión del sonido. Algunos de estos materiales incluidos como, latones, aceros inoxidables, aleaciones de titanio y fundiciones de hierro.

Inspección de productos primarios - Mill

La inspección por ultrasonido es el método más confiable para la detección interna de defectos en forja, rolado o extrusión de lingotes, rolado de lingote o placa. Es capaz de encontrar defectos relativamente pequeños bajo la superficie de la pieza. Las corrientes de Eddy, partículas magnéticas, son menos sensitivas a detectar defectos internos, la radiografía es otro método aplicable para la inspección de los productos primarios mill, pero es lenta, muy costosa y generalmente menos confiable que la prueba por ultrasonido para estas especificaciones.

La inspección por ultrasonido es empleada para la detección y localización de poros, bolsas de contracciones, rupturas internas, escamas e inclusiones metálicas en lingotes, placas, acero en barras con tamaños arriba de 1.2 mts, el espesor en cada

metal como aluminio, magnesio, titanio, zirconio, aceros al carbón, aceros inoxidable, aleaciones de alta temperatura y uranio. Estos productos son usualmente inspeccionados con un haz directo tipo contacto que busca la unidad, el cual a menudo es portátil, la inspección por inmersión también es usada. Una técnica para inspeccionar la forma de estos productos es la transmisión de un haz de sonido a través de la longitud del producto; si el regreso de la reflexión obtenida es fuerte, indica la presencia de un defecto. La figura siguiente muestra un equipo típico de la inspección por ultrasonido.

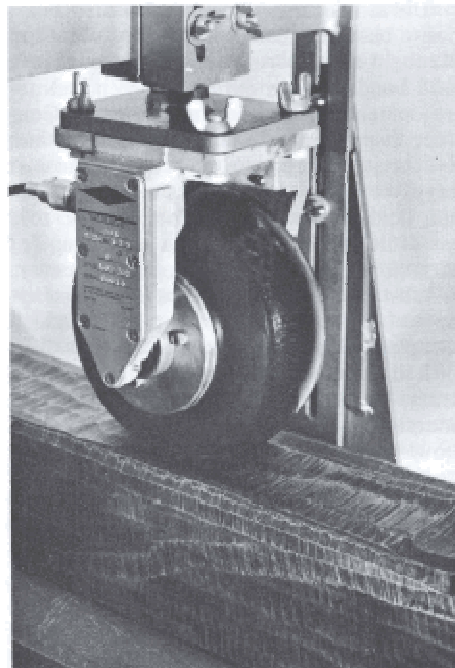


Figura 12. Prueba de ultrasonido mecanizada

Inspección de forjas

Las forjas pueden ser inspeccionadas por ultrasonido para defectos internos como bolsas de contracciones, rupturas internas, escamas e inclusiones no metálicas, la inspección usualmente es realizada con frecuencias de 1 a 5 MHz, con el haz normal a la superficie de la forja y la dirección al máximo trabajo, esta orientación es mejor para la detección de mas defectos en forjas, el ángulo de haz de inspección que emplea ondas de corte se utiliza a veces para los anillo o huecos en la forja.

La inspección de contacto es realizada en mas forjas que tienes dimensiones bastante uniformes. Debido a la dificultad en completar el contacto con la inspección de forma irregular en la forja, la inspección por inmersión puede ser preferible. Una alternativa, la inspección por contacto puede ser realizada en una etapa más fácil de producción antes de que inicien las formas irregulares; sin embargo una superficie rugosa maquinada es recomendada.

La inspección por contacto es también usada para inspeccionar forjas en servicio, por ejemplo, los rieles de los ferrocarriles, los cuales pueden ser analizados con el equipo portátil que se muestra en la figura el cual fue desarrollado para este propósito.

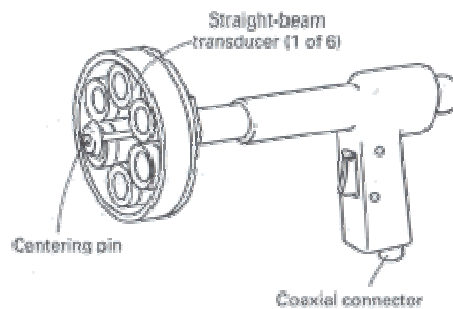


Figura 13. Equipo de ultrasonido portátil

Inspección de productos de rolado

Laminados en tiras, planchón y placas pueden ser inspeccionados ultrasónicamente mediante el uso haz directo o ángulo de haz, eco-pulsado, técnicas para inspección por inmersión; la inspección por contacto es más ampliamente usada. Con haz directo la inspección de tope de la superficie de una pieza de prueba, discontinuidades planares a las que los productos laminados son susceptibles son fácilmente detectados y sus límites y localizaciones son fácilmente y con precisión determinados.

Inspección superior de haz directo

Es empleado en la placa de rolado para detectar laminaciones, exceso de venillas o inclusiones no metálicas. Las laminaciones son particularmente perjudiciales cuando las piezas cortadas de la placa están siendo subsecuentemente soldadas a una forma

de ensamble estructural grande. Las laminaciones usualmente ocurren centradas en el espesor de la palca y son usualmente centradas en el ancho de rolado de la placa.

La laminación no se extiende a la superficie excepto en cizallas o bordes por corte de flama y tal vez sea difícil la detección visual a menos que la laminación sea gruesa. Por estas razones, la inspección ultrasónica es solamente confiable en el camino de inspección a placa por laminación.

Frecuencia 2.25 MHz en unidades de búsqueda de 20 a 30 mm (3/4 a 11/8 in) en diámetros.

Altas y bajas frecuencias pueden ser necesarias para tamaño de grano, microestructura o espesor del material a inspeccionar. La superficie de la placa debe ser limpiada y libre de escalas que podrían afectar la transmisión acústica. Complementos empleados para la inspección por contacto incluyen, aceite, glicerina o agua conteniendo un agente húmedo y un inhibidor de herrumbre. Estos son usualmente aplicados en una delgada lámina con brocha.

Inspección de borde de haz directo

Se emplea para analizar cantidades larga de placas de acero con anchos de 1.2 a 2.1 m y espesores de 20 a 30 mm.

La inspección por borde es rápida, un haz ultrasónico es dirigido de un borde solamente a través de la placa perpendicular a la dirección de rolado. A medida que se incrementa la longitud de la placa el haz de sonido tiende a perderse como se muestra en la figura siguiente.

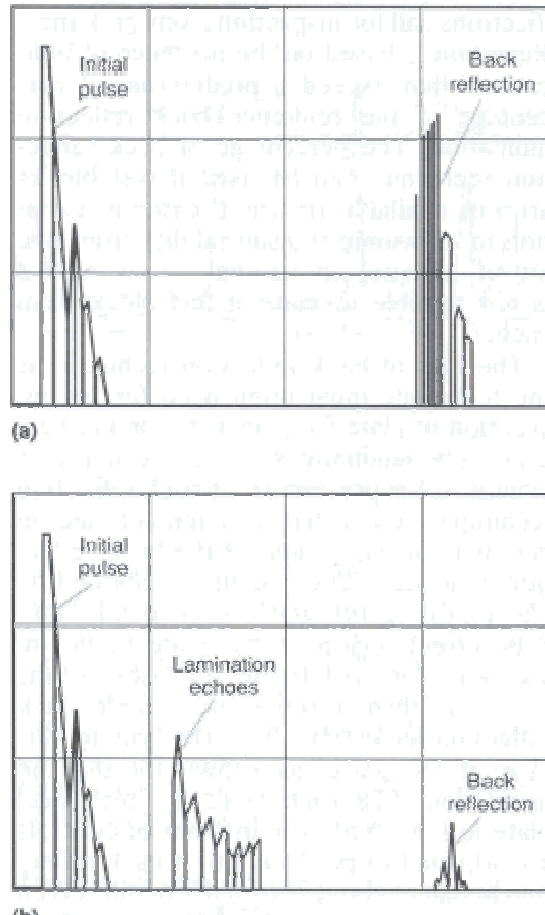


Figura 14. a) 1.5 m y b) 2.4 m

Inspección por ángulo de haz

Puede ser usada para la inspección de placas de rolado. Con la inspección de Angulo de haz, es posible inspeccionar el ancho de la placa simplemente moviendo la unidad de búsqueda a lo largo del borde de la placa. Sin embargo, algunas especificaciones requieren que para un cubrimiento total de la placa la unida de búsqueda sea localizada en la parte superior de la superficie, direccionada hacia un borde, y alejada del mismo hasta que el borde contrario sea alcanzado.

La unidad de búsqueda empleada por el ángulo de haz para la inspección de placa es por lo general de 45 a 60° ondas en el material a ser inspeccionado.

Inspección de extrusiones y formas de rolado

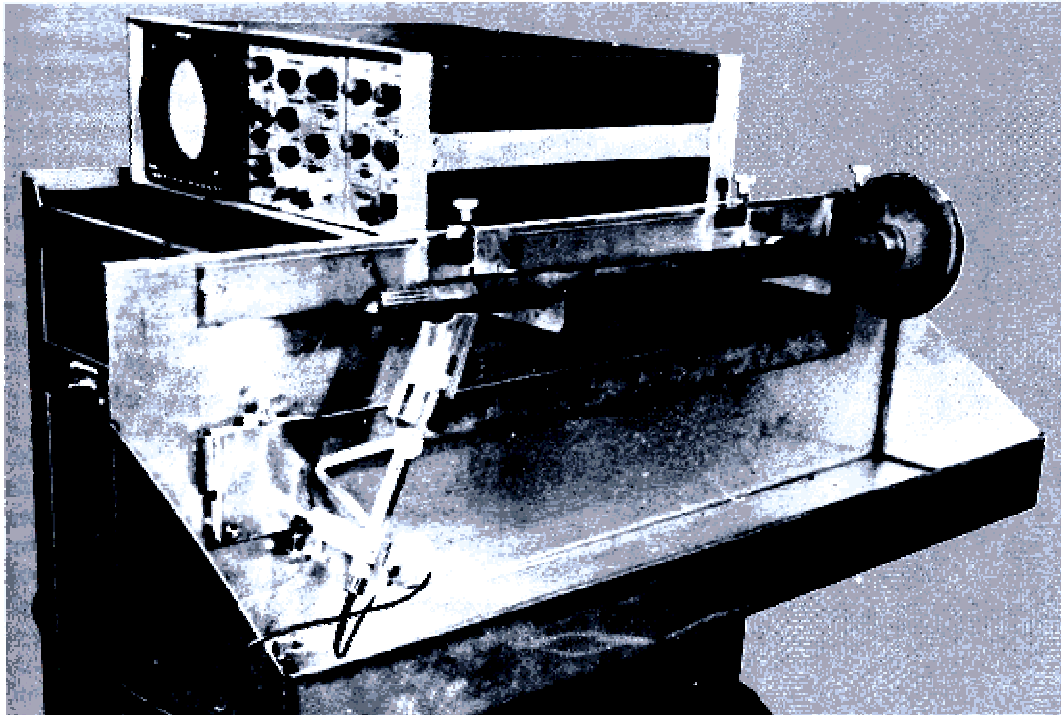
Defectos en extrusiones y en formas de rolado están usualmente orientadas longitudinalmente, que es, paralela a la dirección de trabajo. Ambos contactos y la inspección por inmersión son usados para estos defectos. Usualmente emplean un haz longitudinal o la técnica de ángulo de haz. En algunos casos, las ondas superficiales son empleadas para detectar fracturas superficiales o defectos similares.

Extrusión en frío para partes de acero

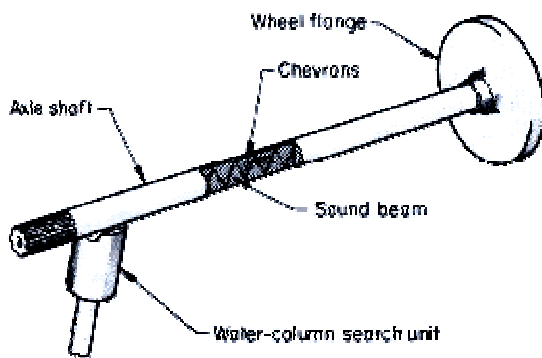
Este tipo de material está sujeto a estallidos internos llamados chevrons, este tipo de defecto es fácilmente detectable también por inspección directa de haz (onda longitudinal) con la unidad de contacto al final de la extrusión o por inspección de haz de ángulo (onda esquilar) con la unidad de búsqueda en contacto con el lado de la extrusión.

En un procedimiento empleando la inspección en frío realizada al eje del árbol de un automóvil por galones, un ángulo variable columna de agua fueron empleadas por la unidad de búsqueda. El eje del árbol que era inspeccionado fue sostenido horizontalmente por un accesorio portátil de la unidad de inspección mostrado en la Fig. 15a) siguiente.

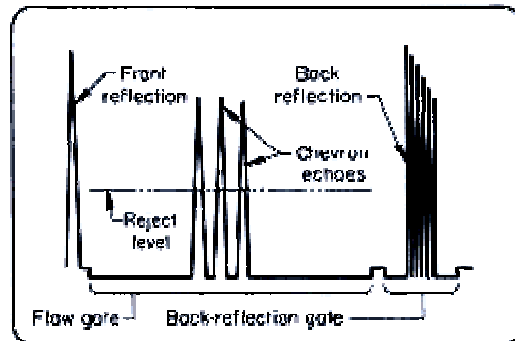
El ángulo variable la columna de agua de la unidad de búsqueda fueron empleados para producir un haz de sonido en 1.6 a 2.25MHZ y fue ajustado hasta que el haz entrara en el eje a 45° del eje del árbol. Esto permitió que el haz viajara la longitud del eje Fig. b) se reflejara en el borde de la rueda. Un instrumento dual-gated fue empleado para permitir un sistema a prueba de averías y asegurar la inspección apropiada de cada eje.



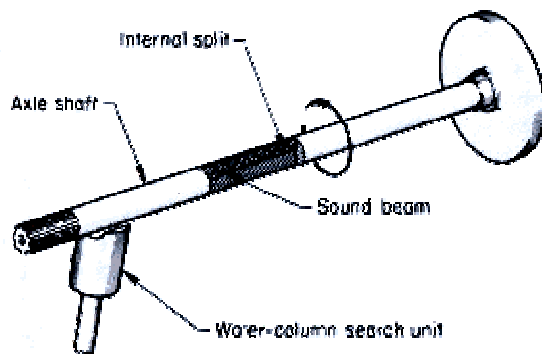
(a) Portable inspection unit



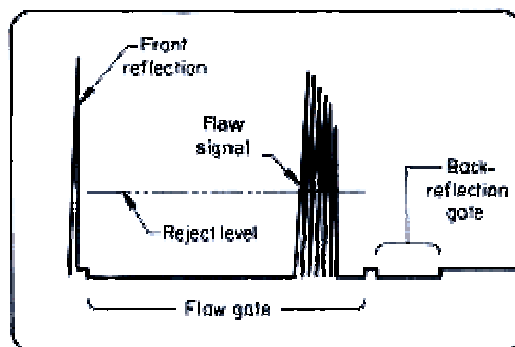
(b) Detection of chevrons in axle shaft



(c) A-scan display from axle shaft containing chevrons



(d) Detection of internal split in axle shaft



(e) A-scan display from axle shaft containing internal split

Figura 15.

También por este método se realizan inspecciones a:

- Extrusiones de aluminio.
- Barras de acero y tubos.
- Rieles de ferrocarril
- Tubería sin costura y tubos. Para este proceso la inspección se realiza por medio del siguiente equipo que se muestra en la siguiente figura.

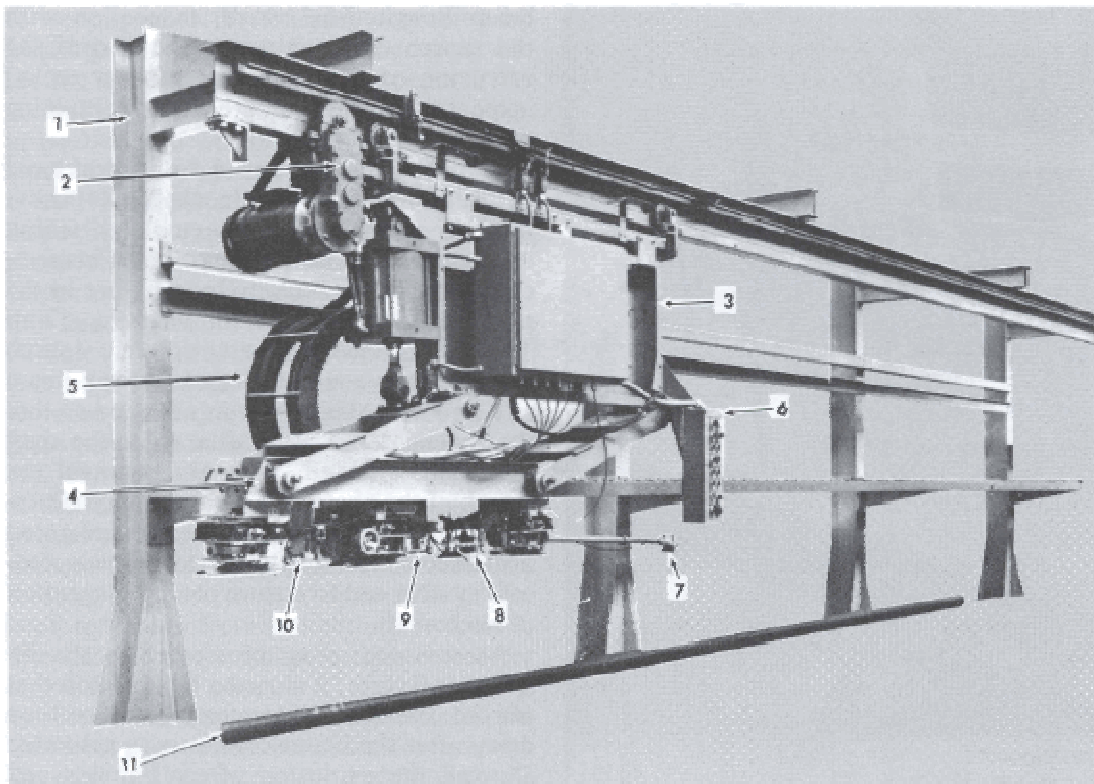


Figura 16. Equipo mecanizado para inspección simultánea de ultrasonido y corrientes de Eddy para una barra o tubería.

Inspección de uniones de soldadura

Las uniones soldadas pueden ser inspeccionadas ultrasónicamente empleando el haz direccionado o la técnica de ángulo de haz. La técnica de ángulo de haz es empleada muy a menudo, una razón es que el transductor no tiene que ir en el lugar de superficie de la soldadura, pero es colocado típicamente en la superficie lisa a lado de la soldadura. Con la inspección de ángulo de haz, el ángulo es por lo general

seleccionado para producir la esquila de ondas en la parte a inspeccionar en un grado óptimo para encontrar los defectos.

Los tipos de defectos usualmente encontrados son poros, escoria atrapada, penetración incompleta, fusión incompleta y fracturas, serios defectos, como las fracturas y fisión incompleta, usualmente se extienden longitudinalmente a lo largo de la soldadura y dan señal de limpieza especial cuando el haz de sonido golpea sus ángulos. Una porosidad esférica produciría una pequeña amplitud de eco, siempre y cuando el haz de sonido golpe en el ángulo de la unión. Inclusiones de escoria pueden producir pasos de indicaciones, que son el ángulo máximo derecho a la orientación de la escoria. Una inclusión grande puede producir señales múltiples.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La principal ventaja de la inspección por ultrasonido es la comparación con otros métodos para inspección no destructiva en las partes del metal.

- Poder superior de penetración, el cual permite la detección de defectos bajo la superficie del material. La inspección por ultrasonido es realizada en alrededores de espesores de unos pocos metros en muchos tipos de partes y espesores cerca de 6m en inspección axial de partes como en la longitud de un eje de acero o rotores forjados.
- Alta sensibilidad, permitiendo la detección de defectos extremadamente pequeños.
- Mayor exactitud que otros métodos no destructivos en la determinación de la posición de defectos internos, el cálculo de su tamaño, y caracterizar su orientación, forma, y naturaleza.
- Solamente necesita una superficie para acceder.
- La operación es electrónica, que proporciona indicaciones casi instantáneas de defectos. Esto hace el método conveniente para la interpretación inmediata, la automatización, la exploración rápida, la supervisión en línea de la producción, y el control de proceso. Con la mayoría de los sistemas, permanente los resultados de la inspección se puede anotar para la referencia futura.

- Capacidad volumétrica de la exploración, permitiendo la inspección de un volumen de metal que extiende de superficie delantera a la superficie trasera de una pieza.
- Portabilidad.
- Proporciona una salida que se pueda procesar digital por una computadora para caracterizar defectos y para determinar características materiales.

Las desventajas por la prueba de ultrasonido son las siguientes:

- La operación manual requiere la atención cuidadosa de técnicos experimentados
- El conocimiento técnico extenso se requiere para el desarrollo de los procedimientos de la inspección.
- Las piezas que son ásperas, irregulares en forma, muy pequeña o fina, o no homogéneos son difíciles de examinar.
- Las discontinuidades que están presentes en una capa baja inmediatamente debajo de la superficie pueden no ser perceptibles.
- Acoplantes es necesario proporcionar una transferencia eficaz de la energía de onda ultrasónica entre los transductores y las piezas que son examinados.
- Los estándares de referencia son necesarios, para calibrar el equipo y para caracterizar defectos.

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN AWS D1.1

**Table 6.1
Visual Inspection Acceptance Criteria (see 6.9)**

Discontinuity Category and Inspection Criteria	Statically Loaded Nontubular Connections	Cyclically Loaded Nontubular Connections	Tubular Connections (All Loads)								
(1) Crack Prohibition Any crack shall be unacceptable, regardless of size or location.	X	X	X								
(2) Weld/Base-Metal Fusion Through fusion shall exist between adjacent layers of weld metal and between weld metal and base metal.	X	X	X								
(3) Crater Cross Section All craters shall be filled to provide the specified weld size, except for the ends of intermittent fillet welds outside of their effective length.	X	X	X								
(4) Weld Profiles Weld profiles shall be in conformance with 5.24.	X	X	X								
(5) Time of Inspection Visual inspection of welds in all steels may begin immediately after the completed welds have cooled to ambient temperature. Acceptance criteria for ASTM A 514, A 517, and A 709 Grade 100 and 100 W steels shall be based on visual inspection performed not less than 48 hours after completion of the weld.	X	X	X								
(6) Undersized Welds The size of a fillet weld in any continuous weld may be less than the specified nominal size (L) without correction by the following amounts (U): <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">L, specified nominal weld size, in. [mm]</td> <td style="text-align: center;">U, allowable decrease from L, in. [mm]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\leq 3/16$ [5]</td> <td style="text-align: center;">$\leq 1/16$ [2]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$1/4$ [6]</td> <td style="text-align: center;">$\leq 3/32$ [2.3]</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 5/16$ [8]</td> <td style="text-align: center;">$\leq 1/8$ [3]</td> </tr> </table> In all cases, the undersize portion of the weld shall not exceed 10% of the weld length. On web-to-flange welds on girders, underrun shall be prohibited at the ends for a length equal to twice the width of the flange.	L, specified nominal weld size, in. [mm]	U, allowable decrease from L, in. [mm]	$\leq 3/16$ [5]	$\leq 1/16$ [2]	$1/4$ [6]	$\leq 3/32$ [2.3]	$\geq 5/16$ [8]	$\leq 1/8$ [3]	X	X	X
L, specified nominal weld size, in. [mm]	U, allowable decrease from L, in. [mm]										
$\leq 3/16$ [5]	$\leq 1/16$ [2]										
$1/4$ [6]	$\leq 3/32$ [2.3]										
$\geq 5/16$ [8]	$\leq 1/8$ [3]										
(7) Undercut (A) For material less than 1 in. [25 mm] thick, undercut shall not exceed 1/32 in. [1 mm], with the following exception: undercut shall not exceed 1/10 in. [2 mm] for any accumulated length up to 2 in. [50 mm] in any 12 in. [300 mm]. For material equal to or greater than 1 in. thick, undercut shall not exceed 1/16 in. [2 mm] for any length of weld. (B) In primary members, undercut shall be no more than 0.01 in. [0.25 mm] deep when the weld is transverse to tensile stress under any design loading condition. Undercut shall be no more than 1/32 in. [1 mm] deep for all other cases.	X										
(8) Porosity (A) CJP groove welds in butt joints transverse to the direction of computed tensile stress shall have no visible piping porosity. For all other groove welds and for fillet welds, the sum of the visible piping porosity 1/32 in. [1 mm] or greater in diameter shall not exceed 3/8 in. [10 mm] in any linear inch of weld and shall not exceed 3/4 in. [20 mm] in any 12 in. [300 mm] length of weld. (B) The frequency of piping porosity in fillet welds shall not exceed one in each 4 in. [100 mm] of weld length and the maximum diameter shall not exceed 3/32 in. [2.5 mm]. Exception: for fillet welds connecting stiffeners to web, the sum of the diameters of piping porosity shall not exceed 3/8 in. [10 mm] in any linear inch of weld and shall not exceed 3/4 in. [20 mm] in any 12 in. [300 mm] length of weld. (C) CJP groove welds in butt joints transverse to the direction of computed tensile stress shall have no piping porosity. For all other groove welds, the frequency of piping porosity shall not exceed one in 4 in. [100 mm] of length and the maximum diameter shall not exceed 3/32 in. [2.5 mm].	X										
		X	X								
		X	X								

General Note: An "X" indicates applicability for the connection type; a shaded area indicates non-applicability.

Criterios de Aceptación Visual

Table 6.2
UT Acceptance-Rejection Criteria (Statically Loaded Nontubular Connections) (see 6.13.1)

Discontinuity Severity Class	Weld Thickness ¹ in in. [mm] and Search Unit Angle										
	5/16 through 3/4 [8–20]	> 3/4 through 1-1/2 [20–38]	> 1-1/2 through 2-1/2 [38–65]			> 2-1/2 through 4 [65–100]			> 4 through 8 [100–200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Class A	+5 & lower	+2 & lower	–2 & lower	+1 & lower	+3 & lower	–5 & lower	–2 & lower	0 & lower	–7 & lower	–4 & lower	–1 & lower
Class B	+6	+3	–1 0	+2 +3	+4 +5	–4 –3	–1 0	+1 +2	–6 –5	–3 –2	0 +1
Class C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	–2 to +2	+1 +2	+3 +4	–4 to +2	–1 to +2	+2 +3
Class D	+8 & up	+5 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up	+3 & up	+3 & up	+5 & up	+3 & up	+3 & up	+4 & up

General Notes:

- Class B and C discontinuities shall be separated by at least 2L, L being the length of the longer discontinuity, except that when two or more such discontinuities are not separated by at least 2L, but the combined length of discontinuities and their separation distance is equal to or less than the maximum allowable length under the provisions of Class B or C, the discontinuity shall be considered a single acceptable discontinuity.
- Class B and C discontinuities shall not begin at a distance less than 2L from weld ends carrying primary tensile stress, L being the discontinuity length.
- Discontinuities detected at "scanning level" in the root face area of CJP double groove weld joints shall be evaluated using an indicating rating 4 dB more sensitive than described in 6.20.6.5 when such welds are designated as "tension welds" on the drawing (subtract 4 dB from the indication rating "d"). This shall not apply if the weld joint is backgouged to sound metal to remove the root face and MT used to verify that the root face has been removed.
- CSW or BGWs: discontinuities detected at "scanning level" which exceed 2 in. [50 mm] in length shall be suspected as being piping porosity and shall be further evaluated with radiography.
- For indications that remain on the display as the search unit is moved, refer to 6.13.1.

Note:

1. Weld thickness shall be defined as the nominal thickness of the thinner of the two parts being joined.

Class A (large discontinuities)
Any indication in this category shall be rejected (regardless of length).
Class B (medium discontinuities)
Any indication in this category having a length greater than 3/4 in. [20 mm] shall be rejected.
Class C (small discontinuities)
Any indication in this category having a length greater than 2 in. [50 mm] shall be rejected.
Class D (minor discontinuities)
Any indication in this category shall be accepted regardless of length or location in the weld.

Scanning Levels	
Sound path ² in in. [mm]	Above Zero Reference, dB
through 2-1/2 [65 mm]	14
> 2-1/2 through 5 [65–125 mm]	19
> 5 through 10 [125–250 mm]	29
> 10 through 15 [250–380 mm]	39

Note:

2. This column refers to sound path distance; NOT material thickness.

Criteria de Aceptación y Rechazo para UT (Conexiones Estáticamente Cargadas No tubulares).

**Table 6.3
UT Acceptance-Rejection Criteria (Cyclically Loaded Nontubular Connections) (see 6.13.2)**

Discontinuity Severity Class	Weld Thickness ¹ in in. [mm] and Search Unit Angle												
	5/16 through 3/4 [8–20]		> 3/4 through 1-1/2 [20–38]		> 1-1/2 through 2-1/2 [38–65]			> 2-1/2 through 4 [65–100]			> 4 through 8 [100–200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°		
Class A	+10 & lower	+8 & lower	+4 & lower	+7 & lower	+9 & lower	+1 & lower	+4 & lower	+6 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower		
Class B	+11	+9	+5 +6	+8 +9	+10 +11	+2 +3	+5 +6	+7 +8	-1 0	+2 +3	+4 +5		
Class C	+12	+10	+7 +8	+10 +11	+12 +13	+4 +5	+7 +8	+9 +10	+1 +2	+4 +5	+6 +7		
Class D	+13 & up	+11 & up	+9 & up	+12 & up	+14 & up	+6 & up	+9 & up	+11 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up		

General Notes:

- Class B and C discontinuities shall be separated by at least 2L, L being the length of the longer discontinuity, except that when two or more such discontinuities are not separated by at least 2L, but the combined length of discontinuities and their separation distance is equal to or less than the maximum allowable length under the provisions of Class B or C, the discontinuity shall be considered a single acceptable discontinuity.
- Class B and C discontinuities shall not begin at a distance less than 2L from weld ends carrying primary tensile stress, L being the discontinuity length.
- Discontinuities detected at "scanning level" in the root face area of CJP double groove weld joints shall be evaluated using an indicating rating 4 dB more sensitive than described in 6.20.0.5 when such welds are designated as "tension welds" on the drawing (subtract 4 dB from the indication rating "d"). This shall not apply if the weld joint is backgouged to sound metal to remove the root face and MT used to verify that the root face has been removed.
- For indications that remain on the display as the search unit is moved, refer to 6.13.2.1.

Note:

1. Weld thickness shall be defined as the nominal thickness of the thinner of the two parts being joined.

Class A (large discontinuities) Any indication in this category shall be rejected (regardless of length).
Class B (medium discontinuities) Any indication in this category having a length greater than 3/4 in. [20 mm] shall be rejected.
Class C (small discontinuities) Any indication in this category having a length greater than 2 in. [50 mm] in the middle half or 3/4 in. [20 mm] length in the top or bottom quarter of weld thickness shall be rejected.
Class D (minor discontinuities) Any indication in this category shall be accepted regardless of length or location in the weld.

Scanning Levels	
Sound path ² in in. [mm]	Above Zero Reference, dB
through 2-1/2 [65 mm]	20
> 2-1/2 through 5 [65–125 mm]	25
> 5 through 10 [125–250 mm]	35
> 10 through 15 [250–380 mm]	45

Note:

2. This column refers to sound path distance; NOT material thickness.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASM Handbook Volumen 17.- Nondestructive Evaluation and Quality Control
2. AWS D1.1/D1.1M:2002 .- Structural Welding Code Steel.
3. http://www.llogsa.com/nueva_web/Centro_de_descarga/ultratips_html/ultratips-edicion-76-inspeccion-aws-d11-utilizando-usmgo-y-ultralink3-pag2.php#video
4. [http://www.gestiopolis.com/Pruebas no destructivas – ultrasonido GestioPolis.htm](http://www.gestiopolis.com/Pruebas_no_destructivas_-_ultrasonido_GestioPolis.htm)
5. Non destructive Evaluation. Theory, Techniques, and Applications
Peter J. Shull (Editor). Ed. Marcel Dekker. E.U.A. 2002