

1.1. NATURALEZA DE LOS ULTRASONIDOS

Los ultrasonidos son ondas del mismo tipo que los sonidos audibles, diferenciándose únicamente en la frecuencia de operación y forma de propagación. Los ultrasonidos operan con frecuencias por encima de la zona audible del espectro acústico.

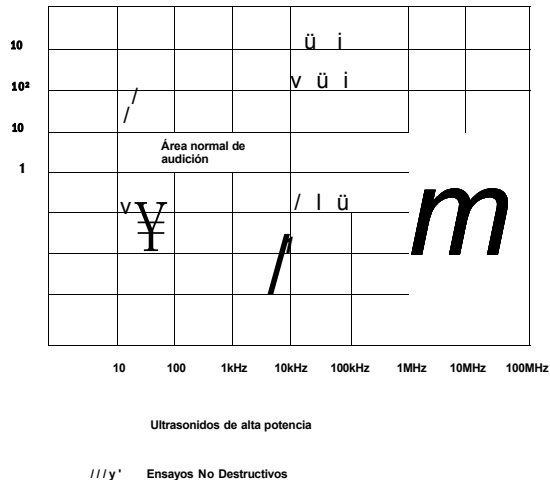


Figura 1.1

En la figura 1.1 se observan tres zonas perfectamente diferenciadas en el espectro acústico:

- **INFRASÓNICA** o sonidos no audibles por el oído humano. Corresponden a esta zona, las oscilaciones cuya frecuencia es menor de 16 Hz/seg.
- **SÓNICA** o sonidos audibles, comprendida en la gama de frecuencias de oscilación, de 16 a 20.000 Hz/seg.
- Una onda acústica dentro de esta gama de frecuencia pudiera no ser audible al no tener el mínimo de presión acústica necesaria para ser registrada por el oído, o por sobrepasar la presión máxima soportable por los mecanismos físicos del oído.
- Para conocer cuando una onda sonora se aproxima al máximo de frecuencia soportable por el oído (20 KHz), es el momento en que el sonido empieza a molestar en el oído: "Umbral del dolor".
- **ULTRASÓNICA**, es aquella donde la frecuencia de las oscilaciones es superior a 20 KHz.

Ultrasonidos

Las frecuencias más altas logradas hasta el momento son del orden de 1.000 MHz.

Las frecuencias utilizadas en los ensayos para el control de heterogeneidades en ensayos de materiales metálicos se realizan con frecuencias generalmente comprendidas entre 1 y 25 MHz.

1.2. PRODUCCIÓN Y TRANSMISIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Cuando un medio elástico es perturbado por una acción instantánea o continua, hace que esta perturbación se propague a través del referido medio, mediante lo que se llama movimiento ondulatorio u onda.

Esta propagación no supone traslación real de la materia, sino transmisión de energía. Así, cada partícula afectada por la perturbación (figura 1.2), se desplaza de su posición de equilibrio, tendiendo a volver a la posición de reposo, y sobrepasando la misma pendularmente en un movimiento vibratorio armónico.

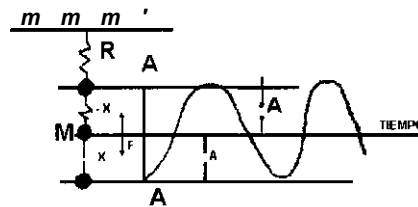


Figura 1.2

Como se ve en la figura tenemos una masa (M), sujeta a un punto fijo mediante un resorte R.

Si aplicamos a la masa una fuerza (F), haciendo que dicha masa se separe de su posición de equilibrio (punto 0), se producirá un desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza.

La relación entre el desplazamiento y la fuerza aplicada, viene expresada por la ley de Hooke:

$$F = - k X$$

donde:

F = fuerza deformadora.

K = constante elástica.

X = desplazamiento del punto de equilibrio.

Una vez conseguido el desplazamiento, y cesada la acción de (F), vemos que la masa (M) vuelve, y aún rebasa su posición de equilibrio hasta una distancia (-X), debido a la inercia de (M).

La misma fuerza del resorte comprimido, hace que (M) vuelva a su posición de equilibrio, y la rebase hasta (X), repitiéndose este proceso indefinidamente, aunque en la práctica,

y debido a la resistencia que opone el medio externo (rozamiento), cesa al cabo de un cierto tiempo.

El movimiento vibratorio armónico, se define por los parámetros: Amplitud (A), y Frecuencia (f).

Asimismo, los parámetros que definen la propagación real a través de un medio son: Longitud de onda (X), y Velocidad acústica (C).

Todos estos parámetros tipifican el movimiento ondulatorio, y la transmisión sónica. Esta transmisión sónica, se realiza por la transmisión de energía de unas partículas a sus adyacentes, mediante sus enlaces elásticos; en la figura 1.3, vemos la imagen de un cuerpo elástico.

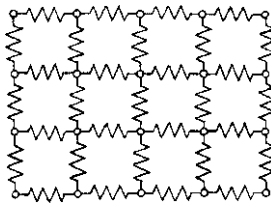


Figura 1.3

1.3. PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Como hemos visto en el punto anterior, la transmisión sónica se realiza de unas partículas a sus adyacentes mediante sus enlaces elásticos, por tanto, es necesario un soporte material, que puede ser sólido, líquido, o gaseoso; de lo cual se deduce que no existe transmisión sónica en el vacío.

Como caso sencillo de propagación de ondas, tenemos el ejemplo del diapasón (figura 1.4).

Cuando el mazo golpea el diapasón, éste vibra y genera una perturbación en el medio que le rodea, en este caso el aire (figura 1.4).



Figura 1.4

Ultrasonidos

La perturbación se propaga por el aire hasta el oído del que escucha. La membrana del tímpano lo receptiona y transmite al cerebro, el cual lo convierte en señal sensitiva.

Análogamente, en el ensayo ultrasónico, un corto impulso de corriente eléctrica golpea a un vibrador (cristal), el cual vibra como lo hacia el diapason (figura 1.5).

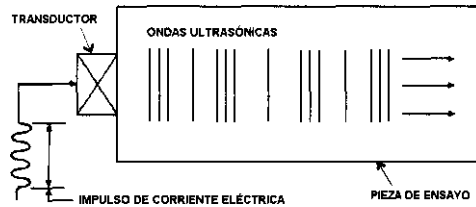


Figura 1.5

El haz sónico que sale del cristal, se transmite a través de un medio de acoplamiento (aceite, silicona, etc.), hasta la parte frontal de la pieza en ensayo.

En la figura, vemos las ondas ultrasónicas propagándose por la pieza.

En el punto y figura 1.2, estudiamos el comportamiento de una partícula material o cuerpo simple. Ahora analizaremos el comportamiento de un grupo de partículas, átomos o moléculas mostradas en la figura 1.6.

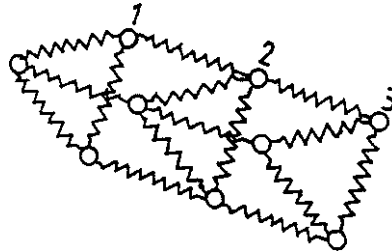


Figura 1.6

Tenemos tres partículas en cada uno de los planos 1, 2 y 3, unidas entre sí, y a su vez, con las del plano adyacente, mediante fuerzas elásticas.

A las partículas del primer plano, las sometemos a un esfuerzo de tracción o compresión por debajo de su límite elástico. Al estar unidas entre sí mediante fuerzas elásticas, cada una transmitirá a las del plano siguiente, el mismo esfuerzo de tracción o compresión.

Si la unión entre partículas fuera no elástica, comenzaría el movimiento al unísono, permaneciendo constantemente en el mismo estado de movimiento, o sea, en la misma fase.

Cuando se trata de un material elástico (en mayor o menor grado, todos los materiales son elásticos), el movimiento requiere un cierto tiempo para ser transmitido de un plano al siguiente, y de éste al siguiente; es decir, los planos sucesivos alcanzan el estado de movimiento con un retardo de fase.

En la figura 1.7 vemos la imagen instantánea de la sección en un modelo elástico, donde la onda se propaga de izquierda a derecha, y nos permite observar, como el cambio de fase en los distintos planos, crea zonas en donde las partículas están muy próximas unas a otras (zonas de compresión), y otras zonas donde las partículas están más separadas (zonas de dilatación).



Figura 1.7

La figura nos muestra, las zonas de compresión consecutivas, al igual que las de dilatación, las cuales conservan una misma distancia (longitud de onda).

1.4. PARÁMETROS DE LAS ONDAS SONORAS

- > Amplitud (A): es el desplazamiento máximo de la partícula de su posición de equilibrio.
- > Frecuencia (f): es el número de oscilaciones completas que la partícula realiza por segundo. Se mide en ciclos/seg.

1 c/s = 1 Hertzio (Hz/s). En ultrasonidos, las frecuencias utilizadas son mucho más altas, por lo que se hace necesario utilizar los múltiplos del Hertzio:

$$\begin{aligned}\text{Kilohertzio (KHz)} &= 1.000 \text{ Hz} \\ \text{Megahertzio (MHz)} &= 1.000.000 \text{ Hz}\end{aligned}$$

- > Longitud de onda (X): es la distancia entre dos planos de partículas que se encuentran en el mismo estado de movimiento (figura 1.7). La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia: $X = C / f$.

Ultrasonidos

- > Velocidad acústica (C): es la velocidad de propagación de la onda acústica a través del medio. Es constante y característica de cada material, sea cual sea la frecuencia. En los metales sobre todo, podemos afirmar que es constante, ya que las mínimas variaciones debidas a temperatura y presión, son despreciables. No ocurre lo mismo en líquidos y gases, ya que en estos medios, la velocidad variará en función de la presión, y sobre todo de la temperatura.
- > La velocidad acústica es igual al producto de la frecuencia por la longitud de onda ($C = f \cdot \lambda$).
- > Velocidad máxima de vibración (V): es la velocidad propia de la partícula en su movimiento oscilatorio.
- > Presión acústica (p): en los puntos de gran densidad de partículas, la presión es mayor que la normal, mientras que en las zonas dilatadas es menor. El símbolo de la presión instantánea es (p), mientras que al valor máximo de la presión se le designa por (P).
- > Fase: es la condición instantánea dentro de una oscilación. Este concepto se comprende fácilmente cuando se comparan dos oscilaciones distintas, (figura 1.8), en la que aparece una diferencia de fase.

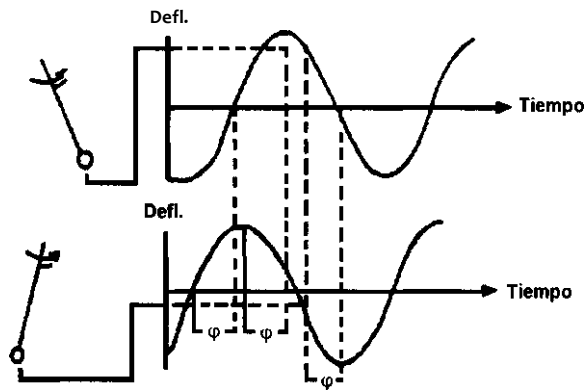


Figura 1.8

- > Atenuación: es la disminución de la amplitud de una oscilación, en función del tiempo. La atenuación es debida a la suma de la Dispersión y la Absorción. En la figura 1.9 se aprecia la diferencia en una misma onda sin atenuar; débilmente atenuada; y fuertemente atenuada.

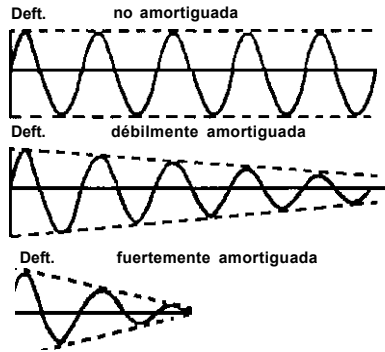


Figura 1.9

1.5. EMISIÓN SÓNICA

La emisión sónica se puede realizar continuamente o por impulsos.

La onda continua es aquella que se emite de una forma continuada, donde la partícula en cada instante tiene unas características de movimiento que varían de forma periódica con el tiempo (figura 1.10.a). Este tipo de onda se utiliza con las técnicas de Resonancia y Transparencia.

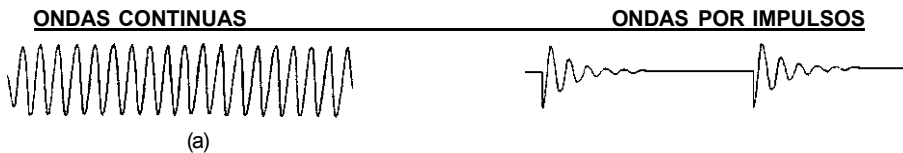


Figura 1.10

La onda por impulsos (figura 1.10.b), es la que se emite a intervalos variables de tiempo. Estos impulsos cortos tienen una duración del orden de microsegundos, y el tiempo que transcurre entre impulsos consecutivos es del orden de milisegundos.

De esto se deduce que el sistema de ensayo está listo para recibir señales la mayor parte del tiempo, ya que son unas mil veces más, el tiempo recibiendo, que emitiendo.

La onda por impulso se utiliza en las inspecciones por la técnica de impulso-eco. En la figura 1.11, están representadas las diferentes formas de la onda por impulsos.

Ultrasonidos

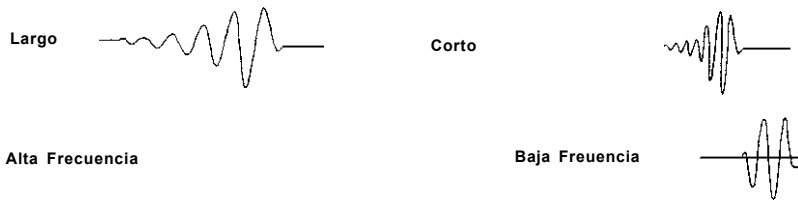


Figura 1.11

Si en un material introducimos por una cara una onda de emisión continua, y midiendo la cantidad de energía que llega a la cara paralela de dicho material después de ser atravesado por la onda, podremos determinar si dentro del material se encuentra algún tipo de discontinuidad, pero no se podrá determinar a la profundidad que se encuentra.

Si por el contrario introducimos una onda por impulsos, sí se podrá determinar el tiempo que tarda en ir y volver, lo cual nos permite no sólo detectar la existencia de cualquier discontinuidad dentro del material, sino medir la distancia a la que se encuentra desde la superficie de entrada.

2

**MODOS DE VIBRACIÓN O TIPOS DE
ONDAS**

Existe una gran variedad de tipos de onda que se van a mencionar, aunque sólo profundizaremos en el estudio de las más comúnmente utilizadas en los ensayos de materiales.

- > Ondas de borde: se producen por difracción, cuando el haz ultrasónico incide sobre el borde de una discontinuidad. Se propagan en todas direcciones.
- > Ondas de Creep (Creeping wave): se propagan por la superficie, proceden de la conversión de modos de una onda longitudinal, o de una transversal.
- > Ondas de Love: cuando la onda de chapa transversal, se propaga por una chapa adherida a un sólido diferente, como puede ser un plaquero, se denomina onda de Love.
- > Onda de barra: en una barra con sección circular o cuadrada, es posible la propagación de ondas de dilatación, que se conocen como ondas de barra.

Las ondas más conocidas por su utilización en los ensayos de materiales, son:

2.1. ONDA LONGITUDINAL O DE COMPRESIÓN

Como vemos en la figura 2.1, en este tipo de onda, las partículas oscilan en la misma dirección que el sentido de propagación de la onda.



Figura 2.1

Vimos en la figura 1.7 que la fluctuación de las partículas respecto de su posición de equilibrio, hace que existan zonas de compresión (partículas muy juntas), y zonas de depresión (partículas muy separadas); es por esto, que también se conocen como ondas de presión u ondas de densidad.

El modo de vibración longitudinal se produce tanto en sólidos, como en líquidos y gases.

Estas zonas de compresión y depresión se desplazan a través del medio a una velocidad constante, y propia de este medio (C). Cada material, tiene una velocidad de propagación fija y conocida, variando dicha velocidad de unos materiales a otros. Para el cálculo de esta velocidad, se utiliza la fórmula:

$$Cl = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Donde: E = módulo de elasticidad
^ = coeficiente de Poisson
p = densidad

Ultrasonidos

Los parámetros que intervienen en la anterior expresión, y que son intrínsecos del material, determinan el valor de su velocidad de propagación, la cual es totalmente independiente de la frecuencia, tenga ésta el valor que tenga.

2.2. ONDA TRANSVERSAL O DE CORTE

En este tipo de onda, la vibración de las partículas es perpendicular al sentido de propagación (figura 2.2), se produce esta vibración al aplicar una fuerza cortante y periódica en el borde de un material sólido.

Esta fuerza cortante se transmite a las partículas de los planos adyacentes, dando lugar a oscilaciones transversales retardadas, según su distancia al plano de excitación.



Figura 2.2

A una cierta distancia (figura 2.3) se encontrará un plano donde las partículas se encuentran en el mismo estado de vibración, que las partículas de otro plano. La distancia entre los dos planos nos marca la longitud de onda (λ).



Figura 2.3

Este tipo de onda recibe también el nombre de onda de cizalladura.

La presión acústica de la onda transversal se define como: *la fuerza cortante por unidad de superficie, normal a la misma.*

Lo mismo para la onda longitudinal, que para la transversal, la máxima presión acústica se alcanza cuando las partículas están más próximas, y la mínima cuando están más alejadas, por lo que la presión y el movimiento de las partículas, están desfasadas $1/4 T$ (período).

Los gases y los líquidos por su condición de fluidos, no pueden transmitir este tipo de onda, ya que carecen de enlaces elásticos transversales.

Para el cálculo de la velocidad de la onda transversal, se utiliza la siguiente fórmula:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}$$

La velocidad de la onda longitudinal y transversal para un mismo material, y de acuerdo con las fórmulas dadas, están relacionadas según:

$$c_t = c_l \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2}}$$

El coeficiente de Poisson (ν), oscila entre 0 y 0,5 para todos los materiales sólidos, por lo que el valor de la anterior ecuación, se mantiene por debajo de 1, pudiéndose por tanto asegurar, que la velocidad de la onda transversal, es inferior a la longitudinal para un mismo material.

La relación de velocidad entre la onda longitudinal y transversal es: $c_t / c_l \ll 0,5$

- > para acero = 0,55
- > para aluminio = 0,49

2.3. ONDA DE SUPERFICIE O DE RAYLEIGH

Son un caso particular de onda transversal. Se propagan por la superficie plana o curva de un sólido siguiendo su contorno (figura 2.4), salvo que llegue a una arista viva, o una zona curva con un radio inferior a una longitud de onda, en cuyo caso la onda se refleja, dando una señal en pantalla.

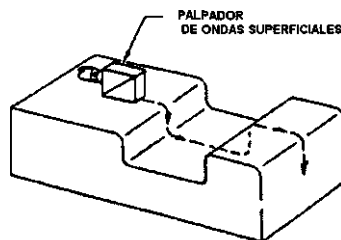


Figura 2.4

Lo mismo ocurre si en el recorrido encuentra una gota de aceite o suciedad, que hacen que la onda se interrumpa, dando lugar a señales que se podrían interpretar como defectos.

Ultrasonidos

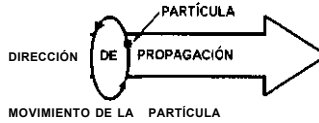


Figura 2.5

La vibración de las partículas es en forma de elipse, como se ve en la figura 2.5, con una rotación en sentido contrario a las agujas del reloj.

Debajo de la superficie, las partículas vuelven a estar de nuevo en su posición de descanso, esto nos dice que la onda de superficie tiene algo de penetración; esta profundidad de penetración es del orden de una longitud de onda.

La velocidad de propagación es independiente de la frecuencia y ligeramente menor que la velocidad de la onda transversal (0,9):

- > para acero: del orden de 0,92
- > para aluminio: del orden de 0,93

El estado tensional, modifica su velocidad; la tracción hace aumentar la velocidad, mientras que la compresión, la disminuye.

2.4. ONDAS DE CHAPA U ONDAS DE LAMB

Si el espesor del sólido en el que inducimos ondas de superficie, se reduce en espesor, obtenemos una chapa, donde la onda de superficie, ya no puede existir como tal. Cuando este espesor es del mismo orden que la longitud de onda, se producen las ondas de chapa (figura 2.6).

Se conocen dos modos básicos: onda simétrica o de dilatación y onda asimétrica o de flexión.



Figura 2.6

En el caso de la onda simétrica, las partículas de la zona media o fibra neutra vibran con oscilaciones longitudinales, mientras que en la onda asimétrica con oscilaciones transversales; el resto de partículas oscilan en ambos tipos de onda elípticamente.

La velocidad de este tipo de onda no se considera como constante del material, ya que depende del espesor del material, del modo de onda y de la frecuencia.

Aunque en los anexos 1, 2 y 3 se incluyen tablas con valores de densidades, impedancias y velocidades de materiales metálicos, no metálicos, líquidos y aire, a continuación se da un cuadro resumen con las velocidades longitudinales y transversales en los materiales de más corriente uso.

Material	velocidad m/s Cl	velocidad m/s Ct
Acero	5920	3240
Aluminio	6320	3130
Perpex	2730	1430
Agua	1480	

2.5. IMPEDANCIA ACÚSTICA

Se representa por la letra Z y se define como: *la relación entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración de los elementos de masa (partículas)*. También suele definirse como: *la resistencia que se opone a la vibración de los elementos de masa*.

Dependiendo del mayor o menor valor de la impedancia del medio se dividen: en acústicamente duros, cuando sus elementos de masa varían muy poco su velocidad de vibración a pesar de una gran diferencia de presión; y acústicamente blandos, cuando con una pequeña diferencia de presión sus partículas vibran a gran velocidad.

Debido a las anteriores definiciones puede parecer que la propagación de las ondas será peor en un material acústicamente duro, que en uno blando, no siendo así, ya que: *la impedancia acústica se opone a la vibración de los elementos de masa, pero no a la propagación de la onda*.

La fórmula para el cálculo del valor de la impedancia se apoya en la teoría de la propagación de las ondas acústicas que dice: *La impedancia es una constante del material, siendo proporcional a la densidad del medio y a la velocidad acústica de la onda en dicho medio*.

$$Z = \rho C$$

2.6. INTENSIDAD ACÚSTICA

Se define como: *la cantidad de energía que pasa por unidad de área, en la unidad de tiempo*. Se obtiene mediante el producto de la "Energía específica" (energía presente en la unidad de volumen, que avanza con la velocidad acústica), por la velocidad de propagación de la onda acústica.

Ultrasonidos

Se debe tener muy en cuenta la relación entre la energía específica o intensidad acústica, con la presión acústica, pues la altura de la indicación de un eco en la pantalla del osciloscopio en el método de impulso-eco, es proporcional a la presión acústica.

$$\text{De la fórmula de la Intensidad: } I = \frac{P^2}{2 Z}$$

fórmula que nos indica la proporcionalidad existente entre el cuadrado de la presión acústica y la intensidad acústica:

La unidad de intensidad acústica es el Belio; Belio = $\frac{I}{I_0}$; donde I_0 es una intensidad de referencia, por tanto el número de belios, nos da el nivel de intensidad acústica.

Esta unidad Belio, aún con la relación logarítmica es demasiado amplia, por lo que en ultrasonidos, se ha adoptado la unidad "Decibelio" (dB), que es más apropiada para pequeñas variaciones de intensidad sónica.

$$\text{dB} = 10 \log. \frac{I}{I_0}$$

2.7. PRESIÓN ACÚSTICA

En la inspección ultrasónica por el método de impulso-eco, la altura de los ecos es proporcional a la presión acústica.

Para las ondas longitudinales, la presión acústica como fuerza por unidad de superficie, es normal a la superficie de la onda.

Para las ondas transversales, la presión acústica es una fuerza cortante por unidad de superficie, paralela a la superficie de la onda.

En la fórmula $\text{dB} = 10 \log. \frac{I}{I_0}$, sustituimos los valores de I, por los obtenidos en:

$$I = \frac{P^2}{2 Z} \text{ y tenemos que } \text{dB} = 10 \log \frac{P^2}{2 Z} \text{ por lo que } \text{dB} = 10 \log. \frac{P^2}{2 Z} \text{ (PO)}$$

$$\text{de donde: } \text{dB} = 20 \log. \frac{P}{P_0}$$

Si la altura de los ecos (H), es proporcional a la presión acústica, tenemos que:

$$\text{dB} = 20 \log \frac{H}{H_0}$$