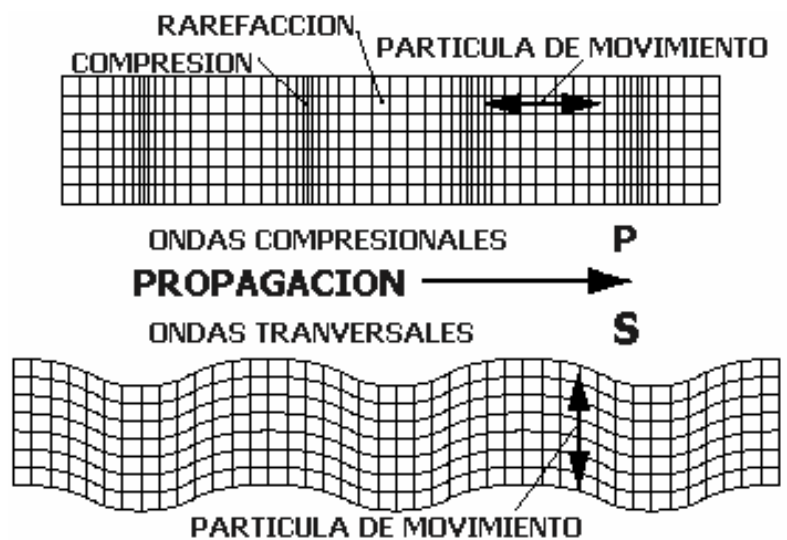
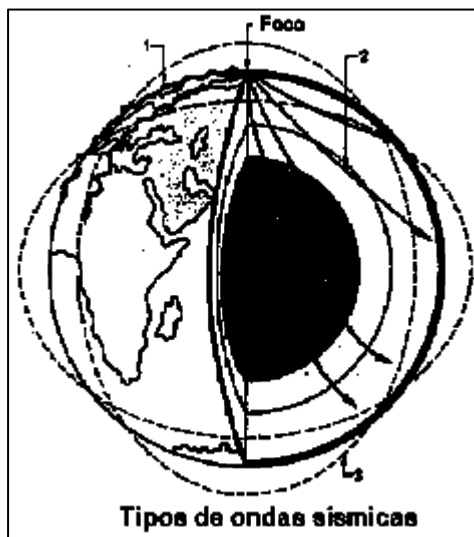


ONDAS SISMICAS

Si desplazamos un diapasón de su posición de equilibrio y lo soltamos repentinamente, percibimos su sonido característico. Lo mismo sucede en la Tierra, hemos visto que el fallamiento de la roca consiste precisamente en la liberación repentina de los esfuerzos impuestos al terreno. De esta manera, la tierra es puesta en vibración. Esta vibración es debida a la propagación de ondas como en el caso del diapasón.

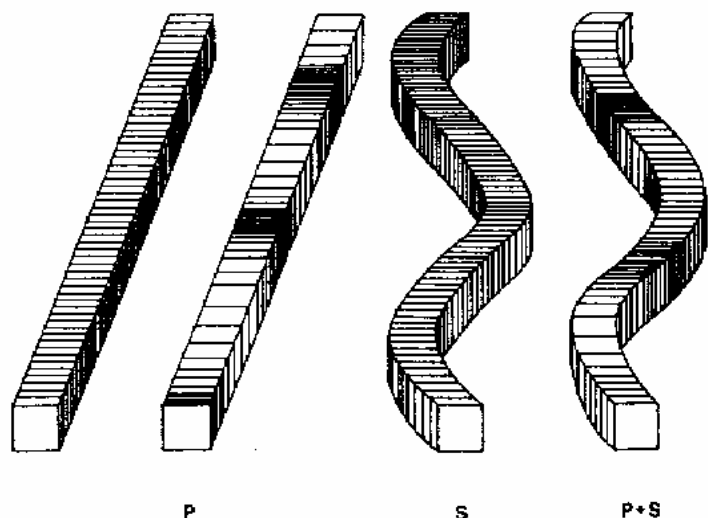
Ondas elásticas. Si tomamos una barra de algún material elástico (metal, madera, piedra, etc.) por un extremo y la golpeamos en el otro extremo, sentiremos que la energía del golpe se transmite a través de la barra y llega a nuestra mano. Esto sucede porque cada parte de la barra se deforma y luego vuelve a su forma original; al deformarse jala o empuja a las partes vecinas, las cuales, a su vez, mueven a sus propias partes vecinas, etc., lo que hace que la deformación *viaje* a lo largo de la barra. Nótese que es la deformación la que viaja y no las partículas o pedazos de la barra, los cuales sólo se *desplazan* un poco de su posición original y luego vuelven a ella.

Una deformación que viaja a través de un medio elástico se llama *onda elástica*; y cuando el medio a través del cual se desplaza es la Tierra, se llama *onda sísmica*.



Ahora bien, en un sólido pueden transmitirse dos tipos de ondas. El primer tipo es conocido como onda de compresión, porque consiste en la transmisión de compresiones y rarefacciones como en el caso de la transmisión del sonido, en este caso las partículas del medio se mueven en el mismo sentido en que se propaga la onda. El segundo tipo es conocido como ondas transversales o de cizallamiento; las partículas se mueven ahora en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La figura muestra esquemáticamente la propagación de estas ondas en un bloque sólido.

Las ondas compresionales y transversales han sido llamadas P y S respectivamente por razones que se verán más adelante. Son también conocidas como ondas internas porque se propagan en el interior de un sólido elástico.



Propagación de las ondas másicas, ondas P, S y P+S

Ondas de cuerpo

La teoría de la elasticidad nos dice que son posibles dos tipos de ondas elásticas que viajan a través de la Tierra, y que son conocidas como ondas de cuerpo u ondas internas, las cuales pueden ser compresionales o de cizalla.

Ondas P. Las ondas *compresionales* son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Esto es fácil de visualizar si pensamos en un resorte. Si comprimimos un extremo del resorte y luego lo soltamos, el material comprimido se extiende en la dirección indicada por la flecha pequeña, comprimiendo al material que está junto a él. Esa compresión y la dilatación (extensión) correspondiente viajan en la dirección indicada por las flechas gruesas, que es la misma (aunque puede variar el sentido) del desplazamiento de las partículas.

Ésta es la más veloz de todas las ondas sísmicas (más de 5 km/s en las rocas graníticas cercanas a la superficie, y alcanza más de 11 km/s en el interior de la Tierra) y, por lo tanto, es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y en ser registrada en los sismogramas, por lo que se llamó onda *Primera* o *Primaria* y de allí el nombre de P (en inglés se asocia también con *push* que significa empujón o empujar).

Ondas S Las ondas de *corte* o de *cizalla*, llamadas *ondas S*, son aquellas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, por lo que están asociadas con deformaciones del terreno de tipo de cizalla. Podemos visualizarlas si pensamos en las ondas que viajan por una cuerda tensa y movemos uno de sus extremos perpendicularmente a ella. Cada partícula de la cuerda se mueve, hacia arriba o hacia abajo en la dirección indicada por las flechas pequeñas, jalando a sus vecinas; de manera que la onda viaja en la dirección de la cuerda (indicada por la flecha grande) perpendicularmente a la dirección del desplazamiento de cada pedazo de cuerda.

La onda S es más lenta que la onda P. En una amplia gama de rocas su velocidad, V_s , es aproximadamente igual a la velocidad de la onda P, V_p , dividida entre $\sqrt{3}$ (esto es conocido como *condición de Poisson*). Como la onda S es la segunda en llegar se le llamó *Secundaria*, y de allí su nombre (en inglés se asocia con *shake*, que significa sacudir).

Como los líquidos no pueden soportar esfuerzos cortantes, las ondas S no se propagan a través de ellos.

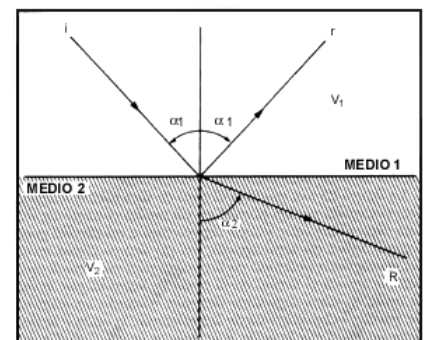
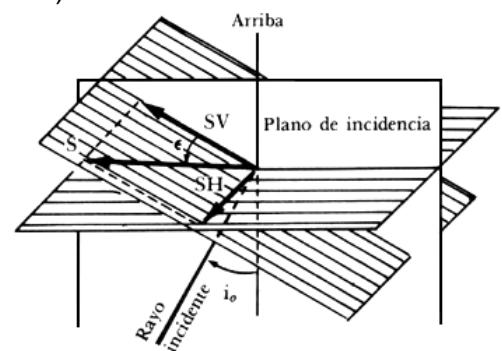
El desplazamiento de las partículas en el terreno durante el paso de la onda puede ser en cualquier dirección perpendicular a la de propagación; pero, a veces, pueden desplazarse en una sola dirección, en cuyo caso se dice que las ondas están *polarizadas*. La componente vertical de la onda S se denota a menudo por SV, mientras que la componente horizontal se denota por SH (Figura).

Usualmente la onda S tiene mayor amplitud que la onda P, y se siente más fuerte que ésta.

Ondas convertidas. Cuando una onda de cuerpo que viaja a través de un medio incide sobre una interfase (una superficie) que lo separa de otro medio con distintas propiedades elásticas, como se indica en la figura 22, en general parte de la energía es transmitida al segundo medio y parte es reflejada.

Si pensamos en una línea perpendicular a la interfase (la *normal*), y medimos los ángulos α_1 y α_2 que forman los distintos rayos con ella, podemos ver que están relacionados según la siguiente fórmula, conocida como *ley de Snell*:

$\text{sen } \alpha_1 / \text{sen } \alpha_2 = V_1 / V_2$ donde V_1 es la velocidad (P o S) del rayo en el primer medio y V_2 su velocidad en el segundo medio. La aplicación de la ley de Snell nos permite saber cómo se



comportan los rayos sísmicos cuando encuentran alguna de las discontinuidades que presenta la Tierra y que serán vistas someramente más adelante; veremos los nombres que se aplican a las ondas de cuerpo según la trayectoria que hayan recorrido.

La ley de Snell nos dice que si un rayo pasa de un medio de menor velocidad a otro de mayor velocidad se aleja de la normal, mientras que si pasa de un medio de mayor a otro de menor velocidad se acercará a ella. En particular, cuando $\sin \alpha_2 = 1$ el ángulo de refracción es de 90° , y el rayo, llamado *críticamente refractado* viaja por el medio inferior, paralelamente a la interfase.

La figura nos muestra el caso de una fuente sísmica (representada por un punto) en un medio consistente de una capa plana (que puede representar a un estrato geológico) sobre un semiespacio. En (a) vemos cómo sería un sismograma obtenido en un punto muy cercano al epicentro: vemos el arribo de la onda P_g , seguido por el de la onda S_g unos segundos después (cuando su ángulo de partida es hacia arriba de la horizontal, la onda P se denota por P_g o P, y la onda S se denota por S_g o S. La diferencia de tiempo entre estos arribos es llamado a veces *prefase*, se indica generalmente por t_{sp} y está relacionado con la distancia D a la fuente como:

$$D = t_{sp} V_p V_s / (V_p - V_s)$$

Por lo tanto, para una gran cantidad de lugares en la Tierra (donde se cumple la condición de Poisson y V_p es aproximadamente igual a 6 km/s), si contamos el número de segundos entre las llegadas de P y S, y los multiplicamos por 8.2, obtendremos la distancia a la fuente en kilómetros.

Además de P_g y S_g , llegarán rayos reflejados en la interfase. Éstos son rayos P reflejados como P o como S y rayos S reflejados como S o como P. Siempre llegarán después de P_g , pues tienen que recorrer un camino mayor, y parte de ese camino puede ser recorrido, en calidad de S.

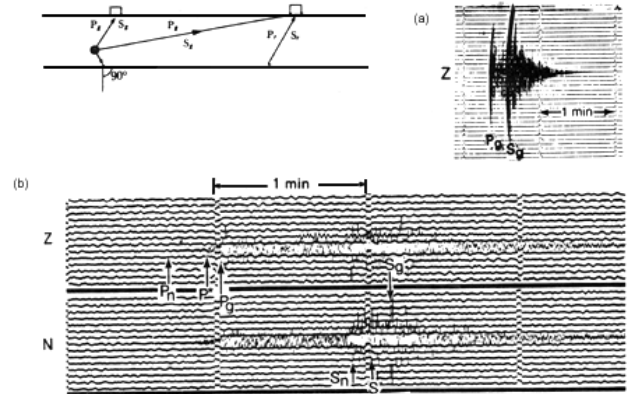
En la figura 23 (b) vemos el sismograma correspondiente a un punto más lejano del epicentro, donde se ve que la onda P críticamente refractada en alguna interfase, llamada a veces P_r , llega antes que P_g . Esto sucede porque el camino de P_r es más largo pero más rápido. A partir de este punto, el *primer arribo*, llamado a veces *FA*, será el correspondiente a P_r . Si existe otro medio aún más rápido bajo la capa en que viaja esta P_r , puede dar lugar a otra P_r que, para distancias más lejanas llegue aún más temprano. Como las ondas críticamente refractadas llegan a menudo a la cabeza del sismograma, son llamadas a veces *ondas de cabeza*.

Las ondas de cabeza asociadas con la discontinuidad de Conrad se denotan por P^* y S^* ; la velocidad de P es del orden de 6.5 a 6.8 km/s. Las ondas de cabeza refractadas por la discontinuidad de Mohorovicic se denotan por P_n y S_n ; la velocidad de P_n va de 7.8 a 8.3 km/s.

Coda. Después de la llegada de las ondas P y S, vemos que la señal en el sismograma decae poco a poco como lo indican las líneas punteadas en la figura anterior. Esta parte de la "cola" de la señal se llama *coda*, y se debe a energía sísmica "dispersa" que llega hasta el sensor después de haber sido reflejada por las heterogeneidades propias del terreno. La forma como decae la coda nos sirve para estimar qué tan grande es la atenuación del terreno. También, como veremos más adelante, es útil para la determinación de la magnitud de los sismos, sobre todo de los locales.

¿Cuál es la velocidad de estas ondas?

Se puede demostrar teóricamente y se observa experimentalmente que la velocidad de las ondas es tal que $V_{R,L} < V_s < V_p$ donde V_p , V_s y $V_{R,L}$ son las velocidades de las ondas P, S y de Rayleigh y Love respectivamente. Entre estas dos últimas no puede establecerse un orden de velocidades porque esta depende de muchos factores y no siempre viajan con la misma velocidad.



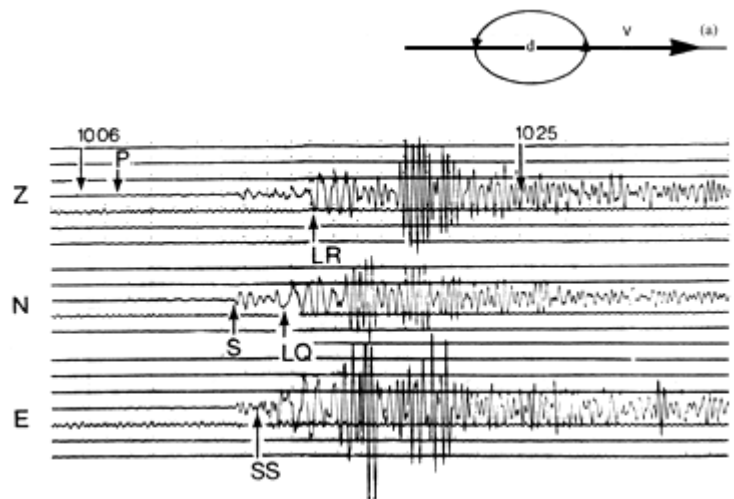
Las velocidades de las diferentes ondas dependen de las características del medio; por ejemplo, en rocas ígneas la velocidad de las ondas P es del orden de 6 Km/seg, mientras que en rocas poco consolidadas es de aproximadamente 2 Km/seg ó menor. Así, las ondas P de un terremoto originado en la costa de Acapulco serían percibidas en la Ciudad de México, en alrededor de 1 minuto.

Ondas Superficiales

Además de estas dos clases de ondas existen otros dos tipos de gran importancia llamadas ondas superficiales por los motivos que veremos a continuación: cuando un sólido posee una superficie libre, como la superficie de la tierra, pueden generarse ondas que viajan a lo largo de la superficie.

Ondas de Rayleigh. Éstas, denotadas usualmente por *R*, o *LR* cuando son de periodo muy largo (Figura), se deben a la interacción entre las ondas P y las SV, y el movimiento de cada partícula de la superficie del terreno al paso de la onda se da en forma de elipse retrógrada, según se muestra en la figura (a).

Estas ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad, y son conocidas como ondas de Rayleigh en honor al científico que predijo su existencia. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrógrada y ocurre en el plano de propagación de la onda. Una analogía de estas ondas lo constituyen las ondas que se producen en la superficie de un cuerpo de agua.



Ondas de Love (en inglés *Love waves*, lo que se presta a infinidad de chistes) son las denotadas usualmente por *L*, o *G* o *LQ* si son de periodo muy largo. Se comportan de manera muy parecida a la descrita para las ondas de Rayleigh, pero se deben a interferencia constructiva de ondas SH solamente, por lo que no pueden existir en un semiespacio, sino que requieren al menos una capa sobre un semiespacio, donde pueda quedar atrapada parte de la energía sísmica.

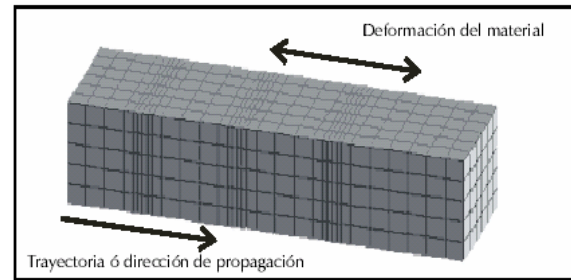
Este tipo de ondas superficiales son ondas de Love llamadas así en honor del científico que las estudió. Estas se generan solo cuando el medio elástico se encuentra estratificado, situación que se cumple en nuestro planeta pues como veremos se encuentra formada por capas de diferentes características físicas y químicas. Las ondas de Love se propagan con un movimiento de las partículas, perpendicular a la dirección de propagación, como las ondas S, sólo que polarizadas en el plano de la superficie de la Tierra, es decir solo poseen la componente horizontal a superficie. Las ondas de Love pueden considerarse como ondas S "atrapadas" en el medio superior. Como para las ondas de Love, la amplitud de las mismas decrece rápidamente con la profundidad. Las ondas de Love son observadas sistemáticamente sobre la superficie de la tierra pues nuestro planeta posee un estrato superficial de baja velocidad, la corteza, sobre un medio mas profundo, el manto.

Como podemos ver el término superficial se debe a que las ondas se generan por la presencia de superficies de discontinuidad ya que en un medio elástico infinito no podrían generarse. En general su existencia se puede explicar considerando que la vibración del medio en lugares en los que existen menores tracciones, y esto sucede por la presencia del vacío o un medio de menor rigidez, tiende a compensar la energía generando este tipo especial de vibraciones.

Onda sísmica tipo “P”:

Cuando ocurre un terremoto primero se siente, en un sitio a cierta distancia del epicentro, la onda “P” con un efecto de retumbo que hace vibrar paredes y ventanas.

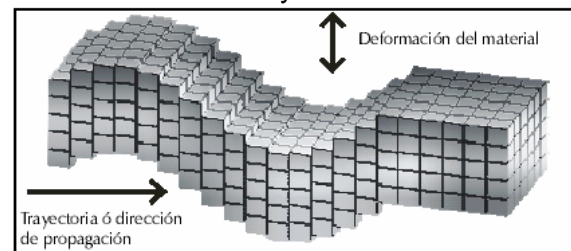
- ✓ Primaria, Velocidad: 1100 y 8000 m/s
- ✓ Ondas de Cuerpo, Compresibles
- ✓ Alternadamente comprime y expande la roca en la misma dirección de la trayectoria
- ✓ Personas y animales la perciben como un sonido grave y profundo



Onda sísmica tipo “S”:

Unos segundos después llega la onda “S” con movimiento vertical de arriba hacia abajo, viceversa y de lado a lado que sacude la superficie del terreno vertical y horizontalmente.

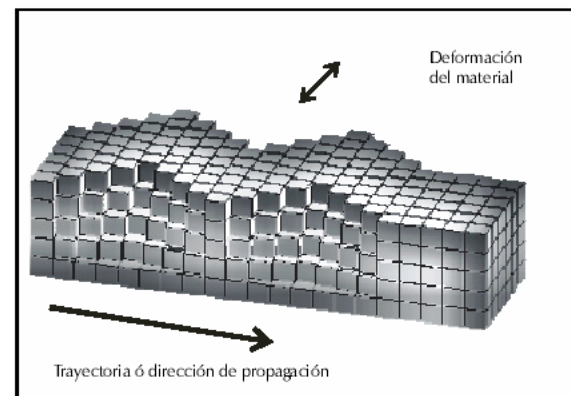
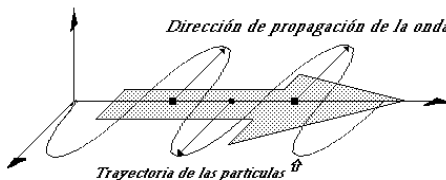
- ✓ Secundaria, Velocidad: 500 y 4400 m/s
- ✓ Ondas de Cuerpo, transversales
- ✓ Deforma el material lateralmente
- ✓ No se transmite en fluidos
- ✓ Responsable del daño en las construcciones en las zonas cercanas al epicentro e incluso a distancias considerables



Onda sísmica tipo “L”

Ondas Love en honor a su descubridor.

- ✓ De superficie
- ✓ Deforma la roca similarmente a la onda “S” solo en la dirección horizontal
- ✓ No se propagan en el agua
- ✓ Más lentas que las ondas de cuerpo



Onda sísmica tipo “R”

Ondas Rayleigh en honor a su descubridor Lord Rayleigh. Producen movimiento vertical similar al de las ondas marinas.

- ✓ De superficie
- ✓ Más lenta que la onda “L”
- ✓ Afecta a los cuerpos de agua, por ejemplo lagos

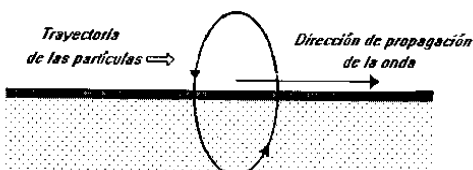


Fig. 10

