EXPLORACION SISMOLOGICA POR EL METODO DE REFRACCION (1)

Traducción por GUSTAVO BELLO ORTA (2)

El Método Sísmico:

La sismología clásica comprende el estudio de las vibraciones que se producen en la superficie de la tierra debido a los temblores, y la interpretación de estas vibraciones en relación con la constitución interna de la tierra, la profundidad a la que se inician estas perturbaciones y la cantidad de energía de tales perturbaciones. La sismología de los temblores proporciona al científico la reunión de datos que son una gran información acerca de la estructura de la tierra, en relación con su núcleo central.

La exploración de carácter sismológico es más limitada, aunque más detallada en el panorama que abarca; su finalidad principal estriba en el hecho de determinar la profundidad y posición de los estratos, así como estructuras geológicas, relativamente próximas a la superficie de la tierra.

No obstante, los principios fundamentales y la teoría general del trabajo de exploración sismológica son semejantes a la sismología de los temblores de tierra; existe, sin embargo, una gran diferencia en la longitud de onda de la perturbación en cada caso. La onda que se transmite en el medio elástico, originada por un temblor de tierra, en atención a la naturaleza de la perturbación así como a las grandes distancias a que se propaga, trae como consecuencia una atenuación considerable de las altas frecuencias. El período de una onda registrada por un sismógrafo en estas condiciones varía, desde algunos segundos, prolongándose hasta el minuto.

En la exploración sismológica, donde las distancias de estudio son muy cortas comparativamente, y las ondas se generan por medio de explosiones, el período de las mismas es del orden de un centésimo a un décimo de segundo; por esta razón, el equipo para exploración sismoló-

(1) Traducción del Artículo The Refraction Method of Seismic Prospecting (Boletín S-210), por el Ing. Gustavo Bello Orta. Publicado por cortesía de Electro-Technical Labs. Division of Mandrel Industries, Inc. Houston, Texas, U.S.A.

(2) Ingeniero Consultor en Geofísica.

APLICACIONES DE LA SISMOLOGIA DE REFRACCION

Figura 1

gica es muy diferente en construcción, que el diseñado para registrar temblores de origen terrestre, a pesar de la semejanza en principios.

Existen dos métodos de exploración sismológica:

A) Reflexión y B) Refracción.

El Método de Reflexión:

Este método se ha aplicado con gran éxito en exploraciones para la industria petrolera, localizando determinado tipo de estructuras geológicas con las que a menudo se encuentra asociado el petróleo.

El método de reflexión básicamente involucra lo siguiente: La detonación de un explosivo en un pozo somero o en la superficie del terreno, que se transforma en energía vibratoria la cual se transmite a través del medio elástico hacia la profundidad; después de un cierto intervalo, esta energía es reflejada por cualquier discontinuidad física o por estratos subyacentes a la superficie terrestre, retornando hacia ésta y provocando el movimiento de un transductor electro-mecánico (detector). La señal de este detector es amplificada, registrándose en estas condiciones en un oscilógrafo. En la figura 2 se muestra un registro o sismograma obtenido de la aplicación de este método, definiéndose con claridad el instante de explosión (T. B.), así como el arribo de los reflejos pertenecientes a estratos de mayor profundidad.

Después de aplicar ciertas correcciones a los tiempos de arribo leídos en los sismogramas es factible conocer la velocidad de transmisión de la onda u ondas reflejadas, estándose capacitado para estimar cuantitativamente la profundidad o profundidades de los horizontes reflectores y poder trazarse en un plano. Para los geólogos petroleros es de gran interés conocer las variaciones en profundidad de los estratos o lechos subyacentes a la superficie de la tierra, en lugar de su profundidad absoluta bajo el nivel del mar.

El Método de Refracción:

Al aplicarse este método se aprovecha el fenómeno de la refracción de las ondas a través de las discontinuidades de carácter físico de las formaciones, provocadas por la detonación de explosivos, en lugar de la reflexión de ondas como ya se describió.

Este método tiene una mayor aplicación, se adapta en forma más adecuada a aquellos problemas donde las discontinuidades o cambios de formación están más próximos a la superficie del terreno y más particularmente donde se desea determinar la profundidad de la roca basal o de alguna formación bien consolidada. No obstante lo anterior, este método tiene una particular aplicación en exploraciones petroleras de gran profundidad, donde la presencia de complejidades geológicas superficiales y

T. B.

Fig. 2 Sismograma de Reflexión

Fig. 3 Representación esquemática del Método de Refracción

consideraciones de otro carácter dificultan la recepción limpia y clara de las ondas reflejadas. (En esta breve discusión no debe tenerse en cuenta lo anterior, ya que involucra una serie de razonamientos que no se discuten aquí).

Teoría de la Refracción:

En general, cuando una onda elástica AB (figura 4) golpea o toca una discontinuidad en el subsuelo, correspondiendo ésta a un cambio notable en las propiedades elásticas de cada medio, la onda es refractada, curvándose según la dirección BC. La magnitud de la desviación sigue la muy conocida ley de Snell, la cual es consecuencia del principio de la mínima acción de Fermat, aun cuando tiene la particularidad de haber sido experimentada primero. La ley de Snell nos dice que: Una onda al atravesar un contacto, cuyos medios tengan velocidades de propagación diferentes, V_1 y V_2 , es refractada de tal manera que se verifica la relación siguiente:

$$\frac{\text{Sen } i}{\text{Sen } r} = \frac{V_1}{V_2}$$

Fig. N° 4

en la que:

i = Angulo de incidencia (respecto a la normal) de la onda incidente sobre el contacto.

r = Angulo de refracción (respecto a la normal) de la onda emergente del contacto.

V_1 = Velocidad de transmisión de la onda elástica en el medio o estrato superior.

48 EXPLORACIÓN SISMOLÓGICA POR EL MÉTODO DE REFRACCIÓN

V_2 = Velocidad de transmisión de la onda elástica en el medio o estrato inferior.

En el caso en que $r = 90^\circ$ se puede ver que:

$$\text{Sen } r = \text{Sen } 90^\circ = 1$$

entonces:

$$\text{Sen } i = \frac{V_1}{V_2}$$

Cuando tal cosa ocurre se debe a que la onda o rayo incidente golpeó o tocó el contacto a un ángulo crítico, y como consecuencia la onda o rayo refractado sigue una trayectoria paralela y muy próxima bajo el contacto. Esto es de gran importancia en el método de refracción de la exploración sísmica.

Tecnología de la Refracción Sísmica:

La figura 5 nos muestra esquemáticamente la teoría de la Refracción Sismológica. Se coloca una carga explosiva en un pequeño pozo A, denominándosele punto de tiro; los sismómetros o detectores sísmicos, en número que varía de 6 a 12, se colocan sobre la superficie del terreno en línea recta partiendo de A, equidistantes y a intervalos que pueden variar desde unos 10 pies hasta centenas de pies, de acuerdo con la finalidad que se persiga, la profundidad a la que se desee estudiar y todo el detalle que se desee.

De acuerdo con la figura 5, digamos que la velocidad de propagación del material inmediato adyacente a la superficie del suelo es V_0 , y la del medio inmediato inferior es V_1 , siendo V_1 mayor que V_0 . Cuando el disparo se efectúa en el punto A, la energía que se desprende de la explosión se propaga hacia el subsuelo en todas direcciones, alcanzando a los detectores sísmicos D sucesivamente, a través de varios pasos; sin embargo, únicamente se considera que dos pasos o trayectorias emitidos por la energía de la explosión son los que llegan primero a los detectores, siendo esta energía transmitida en lo que estamos interesados, para cuantificar la profundidad de la refracción. Uno de estos pasos o trayectorias es el directo, como se indica en la figura 5 por la flecha de A hacia D_1 , y el siguiente es aquél que transmitiéndose por el estrato o medio inferior a mayor velocidad aparentemente se acelera, arribando nuevamente a través del medio superior a los detectores D_{2-12} , como se muestra en la misma figura. En apariencia, cuando el detector está próximo al punto de tiro, el paso directo u onda hace un tiempo más corto que el paso refrac-

tado a través del medio de mayor velocidad de propagación, pero como la separación de detectores desde el punto de tiro va aumentando, la aparente desventaja de transmitirse hacia abajo y retornar a la superficie a través del medio de baja velocidad, se compensa por el hecho de transmitirse con mayor rapidez a través del material de alta velocidad V_2 ; por esta razón, a una cierta distancia del punto de tiro, la energía refractada es la que llega en primer lugar a los detectores más alejados. Lo anterior queda mostrado en la gráfica "Tiempo-Distancia", en la parte superior de la figura 5. Esta gráfica corresponde a: tiempo tomado por la ener-

Fig. 5 Representación esquemática de la energía sísmica a través de un contacto horizontal y la gráfica "Tiempo-Distancia" que de ella se obtiene.

50 EXPLORACIÓN SISMOLÓGICA POR EL MÉTODO DE REFRACCIÓN

gía que da los primeros impulsos que llegan al detector, como ordenadas, y como abscisas, la distancia de cada detector desde el punto de tiro. Para el detector D_1 el paso directo a través del medio superior es el más corto, correspondiendo la pendiente de la línea recta trazada para este detector, desde el origen de coordenadas, a la velocidad V_0 en la gráfica. Para los detectores D_2, D_{12} la onda o paso refractado es el más corto y la pendiente de la línea trazada representa la velocidad V_1 .

Análisis de la gráfica (T-D) para determinar la profundidad del medio refractor:

Volviendo a la figura 5, digamos que:

V_0 = Velocidad de transmisión en el medio superior.

V_1 = Velocidad de transmisión en el medio inferior.

x = Distancia desde el punto de tiro a cualquier detector.

t = Tiempo tomado por la energía de la explosión para transmitirse desde el punto de tiro hasta el detector.

Z = Espesor del medio superior o profundidad del contacto refractor.

i = Angulo de incidencia de la trayectoria u onda sobre el contacto entre el medio superior e inferior, considerando que la onda o trayectoria sea refractada a un ángulo crítico y nos quede:

$$\text{Sen } i = \frac{V_0}{V_1} \quad (\text{Ley de Snell})$$

Entonces:

$$t = \frac{2Z}{V_0 \cos i} + \frac{x - 2Z \tan i}{V_1} \quad \text{ec. 1}$$

$$= \frac{x}{V_1} + \frac{2Z}{\cos i} \left[\frac{1}{V_0} - \frac{\sin i}{V_1} \right]$$

$$= \frac{x}{V_1} + \frac{2Z}{V_0} \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}} \quad \text{ec. 3}$$

si en esta última hacemos $x = 0$, nos queda:

$$t_i = \frac{2Z}{V_0} \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}$$

donde t_i es el tiempo de intersección, sobre el eje de los tiempos.

Por lo tanto, despejando el valor de Z , tendremos la ecuación que nos da la profundidad del contacto refractor.

$$Z = \frac{V_0 t_i}{2 \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} \quad \text{ec. 5}$$

Existe una alternativa semejante, en la que se considera la distancia x_c sobre la gráfica (fig. 5), correspondiendo esta abscisa al punto donde se intersectan las dos líneas representativas de la velocidad; por lo consiguiente x_c representa la distancia a la que los dos pasos o trayectorias, directa y refractada, toman el mismo tiempo de arribo al detector.

Por lo tanto:

$$\frac{x_c}{V_1} + \frac{2Z}{V_0} \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}} = \frac{x_c}{V_0} \quad \text{ec. 6}$$

$$Z = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}{1 + \frac{V_0^2}{V_1^2}}} \quad \text{ec. 7}$$

Cualesquiera de las dos ecuaciones 5 ó 7 puede utilizarse para calcular la profundidad Z , en una discontinuidad de un solo horizonte refractor. Una ampliación de este análisis permite al sismólogo estimar con precisión la profundidad de un contacto inclinado y trazar sus correspondientes variaciones e irregularidades. Ampliando aún más este análisis, el sismólogo está capacitado para determinar otros contactos a diferentes profundidades bajo la superficie del terreno. Para lograr lo anterior es necesario incrementar las distancias de los detectores al punto de tiro, permitiendo que las ondas de energía tengan mayor penetración y sean refractadas por contactos que se encuentren a mayores profundidades, para retornar a la superficie y sean captadas como primeros impulsos.

Procedimiento de Campo:

El equipo de refracción sísmica normalmente está compuesto por 6 ó 12 detectores (transductores mecánico-eléctricos) que captan la energía vibratoria proveniente de la explosión. Estos detectores están conectados por medio de cables al aparato registrador, el cual incluye un amplificador de baja frecuencia para cada detector y un oscilógrafo en el que se registran las señales de salida provenientes de los amplificadores, sobre un papel fotográfico. Como complemento al registro simultáneo de las señales de los amplificadores, el oscilógrafo marca claramente sobre el papel el instante en que se produce la explosión, así como una serie de líneas de tiempo, mediante las cuales es posible determinar el intervalo de tiempo entre el instante de la explosión y los primeros arribos de energía a los detectores sísmicos. Estas líneas de tiempo quedan marcadas en el papel a intervalos de $1/100$ de segundo, sin que provoquen ningún error en la exactitud del registro. Generalmente, en problemas de refracción de corta extensión ($x_{\max} = 1000$ a 2000 pies), el sismólogo trata de obtener lecturas de tiempo de los impulsos iniciales, captados y registrados en el sismograma, hasta el milésimo de segundo. La exactitud anterior decrece cuando se incrementa la distancia de los detectores al punto de tiro. El papel fotográfico de registro, denominado sismograma, se desplaza en el oscilógrafo a una velocidad de 10 a 16 pulg/seg. y raras veces excede a un segundo de duración la longitud del papel en trabajos de corta extensión.

Para determinar la profundidad a la que una discontinuidad o contacto refractor puede medirse, se puede aplicar la ecuación 7. Supongamos que: $V_0 = 2000$ pies/seg., $V_1 = 8000$ pies/seg. y $Z = 450$ pies.

La ecuación 6 nos determina que la distancia crítica x_c es de aproximadamente 1160 pies; por lo consiguiente, para poder hacer una determinación precisa de la profundidad Z (desconocido con anterioridad este valor), será necesario tener una línea de exploración de 1500 pies de longitud, para:

- 1o.—Identificar el punto de intersección de las dos líneas representativas de la velocidad.
- 2o.—Trazar puntos suficientes de la curva V_1 y estar capacitado para determinar exactamente esta velocidad.
- 3o.—Tener datos suficientes para extrapolar esta velocidad hasta el eje de los tiempos y poder hacer una comprobación utilizando la ecuación 5.

En problemas de ingeniería civil o minería, normalmente las profundidades de estudio son relativamente someras, lo que trae como consecuencia explorar líneas cortas así como emplear cargas explosivas pequeñas.

Personal necesario para un exploración sismológica de refracción, de corta extensión:

- 1) Jefe de Grupo —Calculista.—Es el responsable de hacer el cálculo e interpretación de los registros o sismogramas obtenidos con el equipo de campo, así como dibujar los mapas sismológicos que muestren la profundidad de los contactos o lechos buscados.
- 2) Observador.—Es el responsable de la operación del equipo en el campo, así como de conservarlo en buenas condiciones de operación. Debe vigilar el tendido de los detectores sobre la línea de exploración.
- 3) Tirador.—Auxilia al observador y dispara las cargas explosivas.
- 4) Topógrafo.—Localiza los pozos de tiro y traza y nivela los puntos donde se sitúen o coloquen los detectores.
- 5) Caminero.—Asiste al topógrafo.
- 6) Perforador.—Perfora los pozos de tiro en los cuales se disparan las cargas explosivas.

Aplicación del método Sismológico de Refracción a Problemas Generales de Ingeniería Civil.

Quizá el método de refracción es el más extensamente empleado en investigaciones del subsuelo, para los grandes proyectos de ingeniería civil, en los que las pesadas estructuras necesitan cimentarse, en la roca o en formaciones geológicas de gran rigidez y consolidación para soportar los esfuerzos que les serán transmitidos; como por ejemplo, en sitios para presas, en lo que a cimentación de cortinas, diques, etc. se refiere, determinando la profundidad de la roca basal o de formaciones de suficiente resistencia mecánica que satisfagan tal requerimiento. Determinación volumétrica de grandes bancos de grava, arena y zonas de préstamo. Localización de fallas relativamente superficiales.

En investigaciones de bahías, explorando lugares propicios para dragarse económicamente, determinando el espesor del material depositado poco compacto, bajo la superficie del agua, factible de removerse.

En estudios para cimentación de puentes para carreteras o ferrocarriles, determinando la profundidad de formaciones compactas o el contacto de la roca basal, etc.

Un ejemplo clásico de la aplicación de este método fue la exploración efectuada para detectar las catacumbas o cuevas artificiales que se encuentran bajo la Catedral de San Pedro, en Roma. La finalidad de

54 EXPLORACIÓN SISMOLÓGICA POR EL MÉTODO DE REFRACCIÓN

esta exploración fue la de localizar la posible existencia de un sistema de cuevas desconocido, bajo la cimentación, que pudiera poner en peligro la estructura completa en una fecha futura.

Puede tener también aplicación este método en la localización de valles y canales sepultados en los que sea posible, desde el punto de vista geohidrológico, la acumulación de aguas subterráneas, para provocar su alumbramiento y utilizarse en fines agrícolas, industriales o de abastecimiento de grandes o pequeños centros de población.

El contraste de las propiedades físicas elásticas de una zona seca y saturada, para la misma formación geológica, es una característica que hace el empleo de este método exploratorio muy útil para tal fin; como por ejemplo algunas investigaciones llevadas a cabo en lugares muy áridos de Sur Africa.

Con la aplicación de este método no sólo se obtiene la profundidad de la roca consolidada en la vertical de un punto considerado en la superficie, como se obtiene con una perforación directa, sino que proporciona el perfil continuo de la roca basal o de formaciones compactas con las pendientes o irregularidades que contenga, en toda la longitud de una línea que superficialmente se esté explorando.

Otra aplicación muy importante es en la industria de la minería: detectando formaciones carboníferas relativamente superficiales; localizando depósitos denominados "placeres", o canales labrados en lechos consolidados, en los que se hayan depositado minerales pesados cuyo contenido potencial sea valioso, cubiertos por material no consolidado.

Exploración con equipo de Refracción del Tipo PRA-2-12.

Consideremos la típica rutina de campo en la que se aplica el método de refracción para determinar la profundidad y espesor de un lecho consolidado, próximo a la superficie del terreno.

Un topógrafo localiza los puntos de tiro y fija las estaciones en las que se colocarán los detectores, los cuales deben quedar en línea recta con el punto de tiro espaciados 25 pies entre sí. El detector más próximo al punto de tiro se encuentra también a 25 pies. En el punto de tiro se perfora un pozo somero de 4 pies de profundidad y mientras tanto el observador y su ayudante tienden el cable de los detectores; los detectores son conectados al cable y éste al amplificador sísmico. El tirador prepara una carga explosiva de $\frac{1}{4}$ de libra conectando su fulminante correspondiente, introduciéndola al pozo del punto de tiro. Las conexiones eléctricas a la caja de tiro se hacen por el tirador, aprovechando el observador este lapso para tener listo su amplificador y registrador oscilográfico.

Figura 6

Ilustración compuesta de sismograma, gráfica "tiempo-distancia" y perfil.

56 EXPLORACIÓN SISMOLÓGICA POR EL MÉTODO DE REFRACCIÓN

El tirador, atendiendo a las órdenes del observador, dispara la carga explosiva, obteniéndose instantes después el sismograma, como el que se muestra en la figura 6. El instante de la explosión se marca en la traza No. 13 del sismograma y el lapso de tiempo entre este instante de explosión y los arribos de la energía sísmica a los detectores se mide directamente en el sismograma. Los tiempos leídos son los que sirven para trazar la gráfica denominada "tiempo-distancia". Las velocidades se determinan por la pendiente de cada segmento recto de la gráfica, encontrándose que: $V_0 = 1780$ pies/seg., $V_1 = 6250$ pies/seg. y $V_2 = 8300$ pies/seg.; $h = 4$ pies (profundidad del disparo).

El tiempo de recorrido (superior a 0.700 seg.).

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{Z-h}{V_0 \cos i} + \frac{x - [(Z-h) \tan i + Z \tan i]}{V_1} + \frac{Z}{V_0 \cos i} \\
 &= \frac{x}{V_1} - \frac{(2Z-h) \tan i}{V_1} + \frac{2Z-h}{V_0 \cos i} \\
 &= \frac{x}{V_1} + \frac{2Z-h}{\cos i} \left[\frac{1}{V_0} - \frac{\sin i}{V_1} \right] \\
 &= \frac{x}{V_1} + \frac{2Z-h}{V_0 \cos i} \left[1 - \frac{V_0}{V_1} \sin i \right] \\
 &= \frac{x}{V_1} + \frac{2Z-h}{V_0 \cos i} [\cos^2 i] \\
 &= \frac{x}{V_1} + \frac{2Z-h}{V_0} \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}
 \end{aligned}$$

si $x=0$

$$t_{i1} = \frac{2Z-h}{V_0} \sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}$$

donde t_{i1} es la intersección sobre el eje de los tiempos del segmento representativo de la velocidad de 6250 pies/seg. Extrapolando la porción de la gráfica, entre los 85 y 225 pies, obtenemos para t_{i1} un valor de 0.034 seg. Despejando a Z , de la ecuación anterior:

$$Z = \frac{\frac{V_0 t_{11}}{\sqrt{1 - \frac{V_0^2}{V_1^2}}} + h}{2}$$

Substituyendo por Z_0 ,

$$Z_0 = \frac{\frac{(1780)(.034)}{\sqrt{1 - \frac{1780^2}{6250^2}}} + 4}{2}$$

= 34 pies (profundidad del lecho consolidado)

Como una extensión más amplia de la teoría anterior y haciendo substituciones para Z_1 (t_{12} es el tiempo de intersección en el eje de los tiempos, del estrato cuya velocidad es de 8300 pies/seg.).

$$Z_1 = \left[t_{12} - \frac{2Z_0 \sqrt{V_2^2 - V_0^2}}{V_0 V_2} \right] \left[\frac{V_1 V_2}{2 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \right]$$

$$= \left[.044 - \frac{68 \sqrt{(8300)^2 - (1780)^2}}{(1780)(8300)} \right] \left[\frac{(6250)(8300)}{2 \sqrt{(8300)^2 - (6250)^2}} \right]$$

= 33 pies (espesor del segundo estrato).