

# **EXPLORACIÓN MEDIANTE REFRACCIÓN SÍSMICA PARA INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA**

Bruce B. Redpath

Laboratorio de investigación para la excavación mediante explosivos Livermore, California.

Mayo 1973

Traducción libre al español por: Carlo Rojas para Subsuelo3D S.A.S.

**DISTRIBUTED BY:**

# **NTIS**

**National Technical Information Service  
U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE  
5285 Port Royal Road, Springfield Va. 22151**

## MANTÉNGASE ACTUALIZADO

Entre el tiempo que ordenó este informe, que es sólo uno de los cientos de miles en la colección de información NTIS disponible para usted, y ahora que estás leyendo este mensaje, varios informes nuevos y relevantes para sus intereses probablemente han entrado en la colección.

Suscríbete a la serie Weekly Government Abstracts que te traerá resúmenes de nuevos informes tan pronto como sean recibidos por NTIS de los autores de la investigación. Los WGA son un servicio de boletín informativo semanal de NTIS que cubre los hallazgos de investigación más recientes en 25 áreas de interés industrial, tecnológico y sociológico: información inestimable para ejecutivos y profesionales que deben mantenerse al día.

El servicio de información ejecutiva y profesional proporcionado por NTIS en los boletines semanales de Extractos de Gobierno le brindará una cobertura completa y exhaustiva de las actividades de investigación patrocinadas o conducidas por el gobierno.

Y obtendrá esta información importante dentro de las dos semanas posteriores al momento en que la publican las agencias de origen.

Los boletines informativos de WGA son producidos por computadora y fotocompuestos electrónicamente para reducir la brecha de tiempo entre la publicación de un informe y su disponibilidad. Puede aprender acerca de las innovaciones técnicas de inmediato y utilizarlas de la manera más significativa y productiva posible para su organización. Solicite NTIS-PR-205 / PCW para más información.

La serie de boletines semanales lo mantendrán actualizado. Pero aprenda lo que se perdió en el pasado solicitando una búsqueda NTI de computadora de todos los informes de investigación en su área de interés, que data desde 1964, si lo desea. Por favor solicite NTIS-PR-186 / PCN para más información.

Autor: Managing E Editor  
5285 Port Royal Road  
Springfield, VA 22161

## MANTÉNGASE ACTUALIZADO CON SRIM

SRIM (Selected Research in Microfiche) le proporciona una distribución regular y automática de los textos completos de los informes de investigación NTIS solo en las áreas temáticas que seleccione. SRIM cubre casi todos los informes de investigación del gobierno por área temática y / o por la agencia gubernamental federal o local de origen. Puede suscribirse a cualquier categoría o subcategoría de nuestras WGA (Actos de resúmenes semanales del gobierno), Anuncios de gobierno e Categorías de índice, o a los informes emitidos por una agencia en particular, como el Departamento de Defensa, Administración Federal de Energía o la Agencia de Protección Ambiental. Otras opciones que le darán mayor selectividad están disponibles a pedido.

El costo del servicio SRIM es de solo 45 ¢, nacional (60 ¢ extranjero) por cada informe completo en

microfichas. Su servicio SRIM comienza tan pronto como se recibe y procesa su pedido y recibirá envíos quincenales a partir de entonces.

Si lo desea, su servicio se actualizará proporcionándole una microficha de los informes emitidos anteriormente.

Debido a los acuerdos contractuales con varios Grupos de tecnología especiales, no todos los informes NTIS se distribuyen en el programa SRIM. Recibirá un aviso en sus envíos, de microfichas identificando los informes con precios excepcionales, que no están disponible a través de SRIM.

Se requiere una cuenta de depósito con NTIS antes de que se pueda iniciar este servicio. Si tiene preguntas específicas sobre este servicio, llame al (703) 451-1558 o escriba a NTIS, Gerencia de Producto de SRIM

---

Esta información es distribuida por:

**NTIS**

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE  
National Technical Information Service  
5285 Port Royal Road  
Springfield, Virginia 22161

UNCLASSIFIED

AN 768 710

| DOCUMENT CONTROL DATA - R & D   |   |
|---|---|
| <i>(Security classification of title, body of abstract and indexing annotation must be entered when the overall report is classified)</i>   |   |
| 1. ORIGINATING ACTIVITY (Corporate author)<br>U. S. Army Engineer Waterways Experiment<br>Station Explosive Excavation Research Laboratory  | 2a. REPORT SECURITY CLASSIFICATION<br>UNCLASSIFIED  |
|   | 2b. GROUP   |
| 3. REPORT TITLE<br>Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations   |   |
| 4. DESCRIPTIVE NOTES (Type of report and inclusive dates)<br>Technical Report   |   |
| 5. AUTHOR(S) (First name, middle initial, last name)<br>Bruce B. Redpath  |   |
| 6. REPORT DATE<br>May 1973  |   |
| 6a. CONTRACT OR GRANT NO.   | 6b. ORIGINATOR'S REPORT NUMBER(S)<br>TR E-73-4  |
| 6c. PROJECT NO.   |   |
| 6d.   | 6b. OTHER REPORT NO(S) (Any other numbers that may be assigned<br>this report)              |
| 10. DISTRIBUTION STATEMENT<br>Approved for public release; distribution unlimited.  |   |
| 11. SUPPLEMENTARY NOTES   | 12. SPONSORING MILITARY ACTIVITY<br>Directorate of Military Construction,<br>OCE DAEN-MCE-D |
| 13. ABSTRACT<br><p>This report is a summary of the theory and practice of using the refraction seismograph for shallow, subsurface investigations. It is intended to be a guide to the application of the technique and not a comprehensive analysis of every aspect of the method. The report begins with the fundamentals and then progresses from time-intercept calculations to interpretations using delay times. The limitations of this exploration tool are discussed, and other applications of the equipment, such as uphole surveys, are described. The report also recommends field procedures for carrying out refraction surveys.</p> |   |

PRICES SUBJECT TO CHG

DD FORM 1473  
1 NOV 66

UNCLASSIFIED

Security Classification

Reproduced by  
NATIONAL TECHNICAL  
INFORMATION SERVICE  
U S Department of Commerce  
Springfield VA 22131

| 14. KEY WORDS   | LINK A |    | LINK B |    | LINK C |    |
|---|--------|----|--------|----|--------|----|
|   | ROLE   | WT | ROLE   | WT | ROLE   | WT |
| Seismic Refraction<br>Shallow Exploration<br>Site Investigation |        |    |        |    |        |    |

Destruir este reporte cuando ya no sea requerido.  
No lo devuelva al remitente.

Los hallazgos en este informe no deben interpretarse como una posición oficial del Departamento del Ejército, a menos que así sea designado por otros documentos autorizados.

Impreso en EEUU. Disponible en el Centro de Documentación de la Defensa,  
Cameron Station, Alexandria, Virginia 22314 o  
Servicio Nacional de Información Técnica,  
Departamento de Comercio de EE.UU.  
Springfield, Virginia 22151

**REPORTE TÉCNICO E-73-4**  
**EXPLORACIÓN MEDIANTE REFRACCIÓN SÍSMICA PARA**  
**INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA**

**BRUCE B. REDPATH**

ESTACIÓN DE EXPERIMENTAL DE VIAS DE NAVEGACIÓN EL EJÉRCITO DE LOS EEUU  
LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EXCAVACIÓN MEDIANTE EXPLOSIVOS  
Livermore, California

Fecha: Mayo 1973

## **Prefacio**

Este reporte fue preparado por la Estación Experimental de vías de navegación del Ejército de los EEUU (USAEWES por sus siglas en ingles), Laboratorio de Investigación para la Excavación mediante Explosivos (EERL por sus siglas en inglés), anteriormente la Oficina de investigación para excavación mediante explosivos (EERO por sus siglas en inglés) desde el 1 de agosto de 1971 hasta el 21 abril de 1972. Antes del 1 de agosto de 1971, la organización era conocida como el USAE Grupo de Cráteres Nucleares

El reporte fue patrocinado y financiado bajo RDT&E 21X2040 P562G por el Directorio de Construcción Militar, oficina del Jefe de Ingenieros (DAEN-MCE-D).

El director de la Estación Experimental de Vías Navegables durante la preparación de este reporte fue el Coronel Ernest D. Peixotto; los directores de EERL fueron los Teniente Coronel Robert L. LaFrenz and Robert R. Mills, Jr.

## **Abstract**

Este reporte es un resumen de la teoría y práctica de utilizar el método de refracción para investigaciones someras del subsuelo. Entendiendo que el objetivo es ser una guía para la aplicación de esta técnica y no un análisis exhaustivo de cada aspecto del método. El reporte inicia con los fundamentos y avanza desde los cálculos de tiempo de intercepto hasta las interpretaciones de tiempo de retardo. Se discuten las limitaciones de esta técnica de exploración y otras aplicaciones para la instrumentación, como estudios Uphole. El reporte además realiza recomendaciones sobre los procedimientos de campo en estudios de refracción sísmica.

## Agradecimientos

Señores Bruce Hall y Vincent Gottschalk quienes monitorearon el proyecto para el Directorio de Construcción Militar, Oficina del El Jefe de Ingenieros (DAEN-MCE-D), el autor está agradecido por sus útiles sugerencias y paciencia. El autor también desea agradecer a los Señores Paul Fisher and Wayne McIntosh de la Rama de Geología, División de Ingeniería, Oficina del Jefe de Ingenieros, y a los señores Sigmund Schwarz y Boyd Bush de Shannon & Wilsom, Inc., de Seattle, por todos sus valiosos comentarios y crítica constructiva sobre el reporte.

## Factores de conversión

Las unidades inglesas de mediciones en este reporte pueden ser convertidas a unidades métricas como se indica a continuación:

| <b>Multiplicar</b> | <b>Por</b> | <b>Para obtener</b> |
|--------------------|------------|---------------------|
| pies               | 0.3048     | metros              |
| libras             | 0.4535924  | kilogramos          |

## Contenido

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>PREFACIO</b> .....               | <b>7</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....               | <b>7</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....        | <b>8</b>  |
| <b>FACTORES DE CONVERSIÓN</b> ..... | <b>8</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....           | <b>10</b> |
| OBJETIVO .....                      | 10        |
| ANTECEDENTES.....                   | 10        |
| ALCANCE .....                       | 10        |
| <b>TEORÍA</b> .....                 | <b>11</b> |
| FUNDAMENTOS .....                   | 11        |

# EXPLORACIÓN MEDIANTE REFRACCIÓN SÍSMICA PARA INVESTIGACIONES EN INGENIERÍA

## Introducción

### OBJETIVO

Este informe está pensado como una guía para la aplicación de la técnica de refracción sísmica en la exploración superficial del subsuelo en ingeniería. Muchos ingenieros civiles y geólogos tienen algún conocimiento de esta herramienta geofísica básica, pero pocos la aplican con frecuencia. El objetivo principal del informe es proporcionar al lector un conocimiento práctico del método, una referencia conveniente y, además, una base para juzgar la aplicabilidad del método y los resultados a su problema de exploración particular.

### ANTECEDENTES

La exploración sísmica de refracción fue el primer método geofísico importante que se aplicó en la búsqueda de estructuras que contengan petróleo. Hoy en día, sin embargo, la exploración petrolera se basa casi exclusivamente sísmica de reflexión. Recientemente, el progreso en la exploración geofísica del petróleo se ha derivado del refinamiento de la instrumentación, del procesamiento asistido por computadora y la mejora de los datos. Los estudios de sísmica de refracción se siguen utilizando ocasionalmente en la exploración de petróleo, en particular donde pueden ayudar a resolver problemas complicados desde el punto de vista estructural.

Si bien su aplicación en la industria petrolera ha disminuido con el paso de los años, el método ha encontrado un uso cada vez mayor en las investigaciones para ingeniería civil. Es una herramienta de investigación valiosa y adecuada para estudios poco profundos, especialmente cuando se utiliza junto con exploración mediante perforaciones.

No se han producido avances significativos en la instrumentación de sismógrafos de refracción en la misma medida que se ha hecho en el desarrollo de sofisticados equipos de reflexión, utilizados para la exploración de hidrocarburos. La electrónica de estado sólido mejoró la portabilidad de los instrumentos de refracción sísmica para ingeniería, aunque estos funcionan fundamentalmente de la

misma manera que lo hicieron hace 40 años. El procedimiento básico de campo y los métodos de interpretación de los datos no han cambiado con el tiempo, aunque se han propuesto y desarrollado técnicas de interpretación especializadas para algunos casos de mayor complejidad.

La realización de estudios de refracción y la interpretación de los datos están bien establecidas y son razonablemente sencillas, aunque no son invariantes. El usuario puede cambiar el diseño de campo de su equipo y aplicar un juicio e imaginación en el manejo de los datos crudos. Al igual que otros métodos indirectos de exploración somera del subsuelo, no hay enfoques rígidos e inflexibles para dar sentido a los datos, ni hay manuales que indiquen de manera infalible al ingeniero, geólogo o geofísico la respuesta correcta. El caso general requerirá pensamiento y cuidado; Las ambigüedades e incertidumbres no son atípicas. Algunos conocimientos previos de las condiciones del sitio y una comprensión de lo que es geológicamente plausible siempre ayudará a resolver los datos en bruto y obtener información significativa.

### ALCANCE

Este informe aborda los elementos de la teoría de la refracción, los métodos básicos de interpretación, una variedad de aplicaciones y algunas de las limitaciones. Al discutir la teoría del método, la intención de este informe es avanzar de lo simple a lo más realista, derivando las fórmulas y los procedimientos de interpretación a medida que avanzamos. El tratamiento dista mucho de ser exhaustivo, pero se incluyen referencias adecuadas a la literatura para aquellos que desean seguir un aspecto específico del método.

# Teoría

## FUNDAMENTOS

En esta sección se hará revisión de los principios de la teoría de la refracción sísmica y se desarrollarán los métodos de interpretación que tienen mayor uso. Hay muchos libros de texto sobre geofísica que discuten los principios y aplicaciones de la sísmica de refracción; sin embargo, la mayoría de ellos están orientados a la exploración de petróleo y solo prestan atención a las investigaciones detalladas de poca profundidad. Numerosos artículos de revistas tratan la solución de problemas de interpretación específicos, pero solo algunos de estos artículos tienen una amplia aplicación. Gran parte del siguiente material será familiar para los ingenieros y geólogos que hayan tomado un primer curso de geofísica o que hayan adquirido experiencia de primera mano en estudios de refracción. La información aquí presentada va dirigida a aquellos que no han tenido una experiencia previa o que deseen una revisión del material de antecedentes.

Antes de entrar en detalles, es apropiado presentar una sinopsis de la exploración de refracción sísmica, para que los factores que se analizan más adelante se puedan ver con cierto sentido de perspectiva.

El método de refracción sísmica consiste en medir (en puntos conocidos a lo largo de la superficie del suelo) los tiempos de viaje de las ondas de compresión (Onda P) generadas por una fuente de energía impulsiva. La fuente de energía suele ser una pequeña carga explosiva (también impactos con martillo) y la energía es detectada, amplificada y registrada por un equipo especial diseñado para este propósito. El instante de la explosión, o "tiempo cero", se registra en el registro de los pulsos que llegan. Por lo tanto, los datos sin procesar consisten en tiempos y distancias de viaje, y esta información de tiempo-distancia se manipula para convertirla al formato de variaciones de velocidad con la profundidad. La interpretación de estos datos sin procesar se desarrollará a medida que se avance

El proceso se ilustra esquemáticamente en la Figura 1. Todas las mediciones se realizan en la superficie del suelo y la estructura del subsuelo se deduce de los métodos de interpretación basados en las leyes de propagación de la energía (ondas).

La propagación de la energía sísmica a través de las capas del subsuelo se describe esencialmente por las mismas reglas que gobiernan la propagación de los rayos de luz a través de medios transparentes. La refracción o desviación angular que sufre un rayo de luz o un impulso sísmico al pasar de un material a otro depende de la relación de las velocidades de propagación de los dos materiales. La ley fundamental que describe la refracción de los rayos de luz es la Ley de Snell, y esto, junto con el fenómeno de la "incidencia crítica", es la base física de los estudios de refracción sísmica.

La Ley de Snell y la incidencia crítica se ilustran en la Figura 2a, que muestra un medio con una velocidad  $V_1$ , subyacente por un medio con una velocidad más alta  $V_2$ . La Figura 2b es una gráfica de las amplitudes relativas de los pulsos transmitidos y reflejados desde el material de mayor velocidad. \* Hasta que se alcanza el ángulo crítico de incidencia, casi toda la energía de compresión se transmite (refracta) al medio de mayor velocidad. .

Cuando se excede el ángulo crítico, la energía se refleja casi totalmente y no se refracta la energía en la capa de alta velocidad.

Además, hay que tener cuenta que estamos tratando solo con ondas compresionales (Onda P) e ignorando la energía de ondas de corte (Onda S) y la transformación de una parte de la onda de compresional en una onda de corte que puede ocurrir en los límites.

---

\*En la Figura 2b puede parecer anómalo que la suma de las amplitudes de los impulsos reflejados y refractados sea mayor que la de la onda incidente (es decir, mayor que 1.0). Sin embargo, la energía de un pulso es proporcional al cuadrado de su amplitud, y la suma de las energías de las ondas reflejadas y refractadas es igual a la energía de la onda incidente.

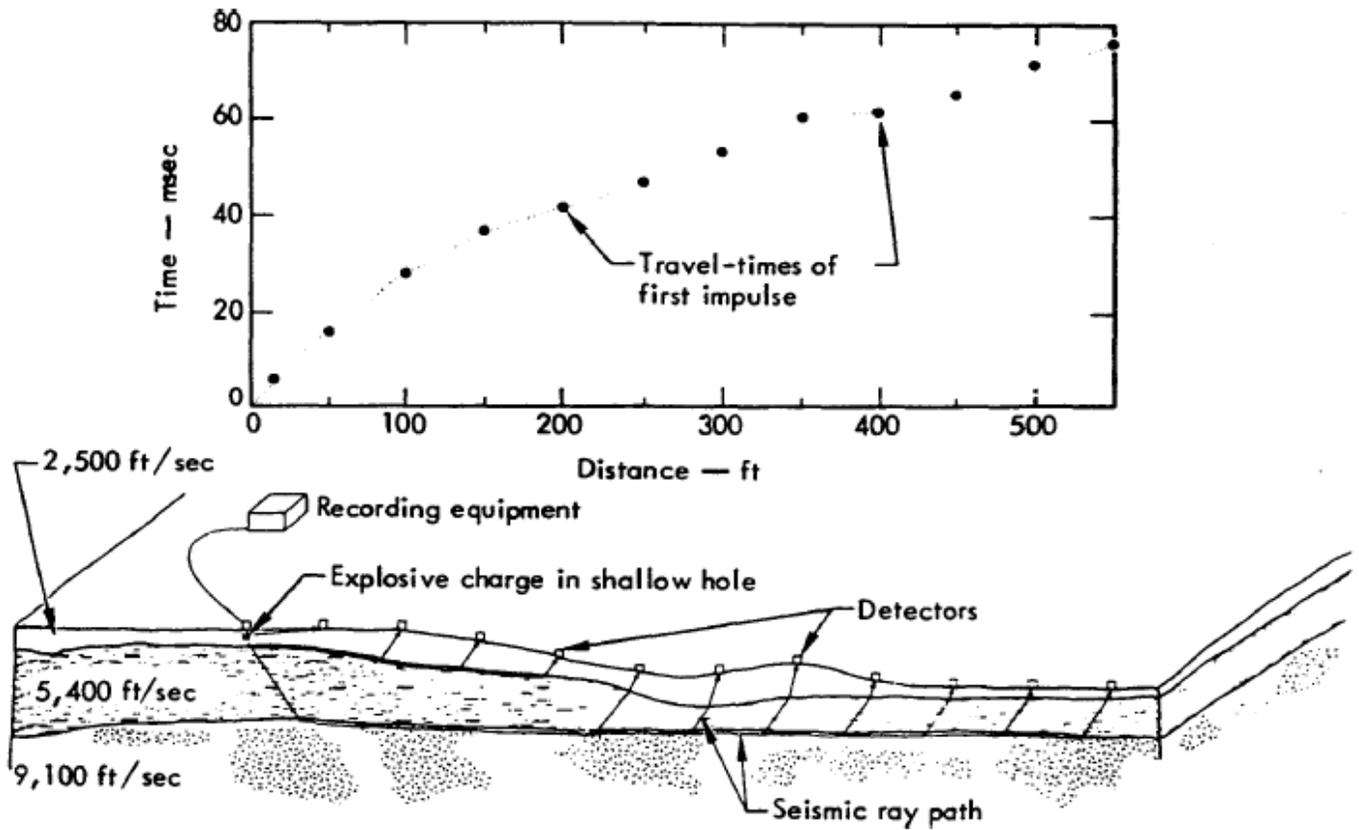


Figura 1. Modelo esquemático de un estudio de refracción sísmica.

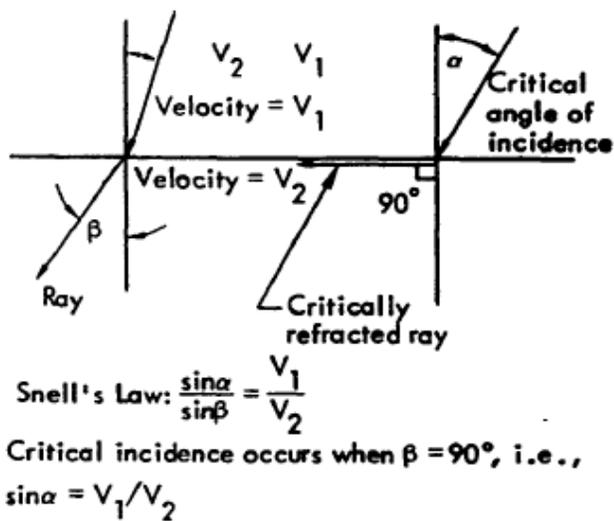


Figura 2a. Ley de Snell y la refracción del rayo se transmiten a través del límite entre dos medios con diferentes velocidades ( $V_2 = 2V_1$ ).

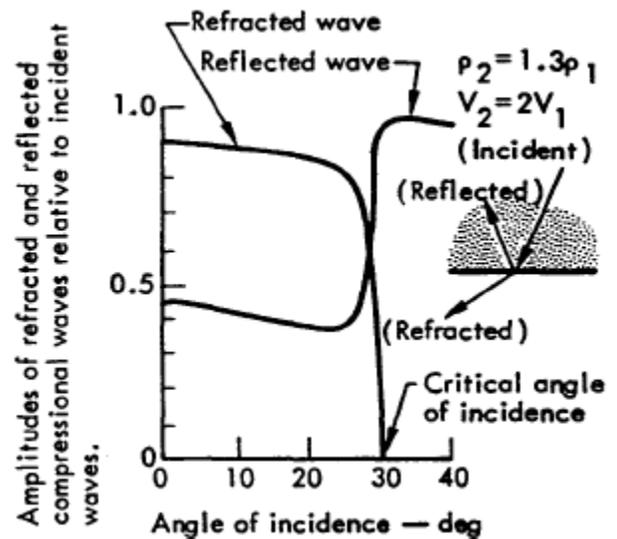


Figura 2b. Amplitudes de ondas de compresión reflejadas y refractadas en relación con las ondas incidentes en función del ángulo de incidencia.

El caso particular del ángulo crítico de incidencia es fundamental para la derivación de las fórmulas para la exploración mediante sísmica refracción. Aunque la descripción matemática y física exacta de lo que ocurre cuando un rayo incide con el ángulo crítico es compleja, es totalmente adecuado suponer que el rayo refractado críticamente se desliza a lo largo del límite entre los dos medios a la mayor de las dos velocidades. Además, a medida que el rayo refractado críticamente se desliza a lo largo del límite, genera continuamente ondas sísmicas en la capa de velocidad más baja (superior) que se alejan del límite con mismo el ángulo de incidencia crítica. En la literatura, estas ondas se denominan frecuentemente ondas precursora o refractada crítica (Head Wave). Si las velocidades de las capas aumentan con la profundidad, una parte de la energía será refractada de nuevo a la superficie, donde se puede detectar.

Las siguientes derivaciones de las ecuaciones de refracción sísmica asumen que las capas del subsuelo poseen ciertas características: cada capa dentro de una secuencia estratigráfica es isotrópica con respecto a su velocidad de propagación, rayo y cada capa tiene una velocidad más alta que la que la suprayace. Estos son supuestos totalmente razonables y relativamente pocos casos reales se apartarán de estos supuestos. El caso especial de una inversión de velocidad (es decir, una capa que tiene una velocidad más baja que aquella que está suprayacente a esta) será discutido más adelante. La situación especial en la que la velocidad aumenta continuamente (con la profundidad) también se tratará brevemente más adelante en el informe.

Comenzamos con el más simple de todos los casos: dos capas con límites planos y paralelos, como se ilustra en la Figura 3. Una pequeña carga explosiva se detona en un agujero poco profundo en A y la energía es detectada por un conjunto de detectores dispuestos en una línea recta a lo largo de la superficie. Los tiempos de llegada de los impulsos se trazan en función de las distancias correspondientes del disparo al detector, como se muestra en la Figura 3. Los primeros tiempos de llegada son los de llegadas directas a través de la primera capa y la pendiente de la línea a través de estos puntos,  $\Delta T / \Delta X$ , es simplemente el inverso de la velocidad de esa capa; es decir,  $1 / V_1$ . A cierta distancia del disparo, una distancia llamada distancia crítica, la energía tarda menos tiempo en viajar hasta la parte superior de la segunda capa, refractarse a lo largo de la interfaz a la velocidad más alta  $V_2$  y viajar de regreso a la

superficie, en comparación a lo que tarda la energía que viaja directamente a través de la capa superior.

La energía que llega a los detectores más allá de la distancia crítica se trazará a lo largo de una línea con una pendiente de  $1 / V_2$ . La línea que atraviesa estas llegadas refractadas no pasará por el origen, sino que se proyectará de nuevo al eje del tiempo para interceptarlo en un momento denominado tiempo de intercepción. Debido a que tanto el tiempo de intercepción como la distancia crítica dependen directamente de las velocidades de los dos materiales y del grosor de la capa superior, se pueden usar para determinar la profundidad hasta la parte superior (tope) de la segunda capa.

### TIEMPOS DE INTERCEPCIÓN

Refiriéndonos a la Figura 3, calculemos el tiempo de llegada del impulso refractado en un detector. Considere la trayectoria de viaje ABCD

$$AB = CD = \frac{Z_1}{\cos \alpha}$$

and

$$BC = X - 2Z_1 \tan \alpha,$$

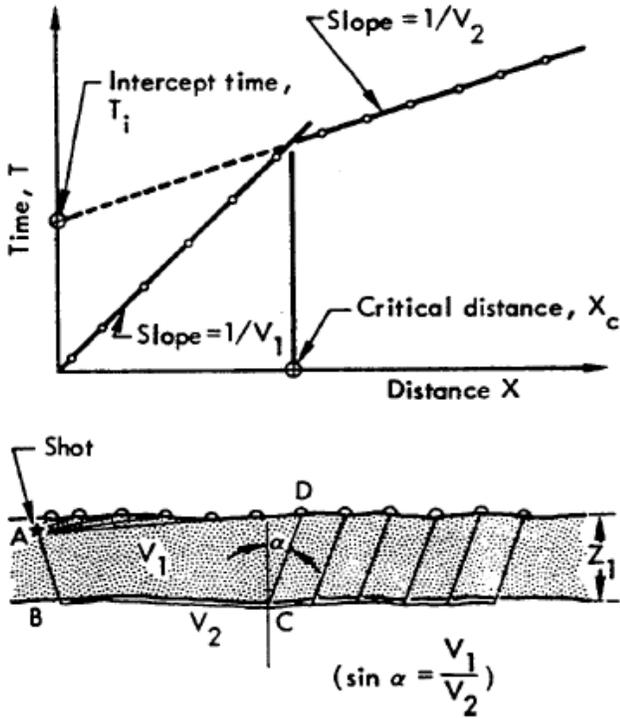


Figura 3. Caso simple de dos capas con límites planos y paralelos, y la correspondiente curva de tiempo-distancia

Donde  $Z_1$  es el grosor de la capa superior y  $\alpha$  es el ángulo crítico de incidencia. Por lo tanto, el tiempo de viaje viene dado por:

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{AB + CD}{V_1} + \frac{BC}{V_2} \\
 &= \frac{2Z_1}{V_1 \cos \alpha} + \frac{X - 2Z_1 \tan \alpha}{V_2} \\
 &= 2Z_1 \left( \frac{1}{V_1 \cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{V_2 \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2} \\
 &= 2Z_1 \left( \frac{V_2 - V_1 \sin \alpha}{V_1 V_2 \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2}.
 \end{aligned}$$

La ley de Snell define el ángulo crítico de incidencia,  $\alpha$ , como:

$$\sin \alpha = \frac{V_1}{V_2}, \quad (1)$$

Y sustituyendo selectivamente la ecuación (1) en la ecuación anterior:

$$\begin{aligned}
 T &= 2Z_1 V_1 \left( \frac{1}{V_1 V_2 \cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{V_1 V_2 \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2} \\
 &= 2Z_1 V_1 \left( \frac{1 - \sin^2 \alpha}{V_1 V_2 \sin \alpha \cos \alpha} \right) + \frac{X}{V_2} \\
 &= \frac{2Z_1 \cos^2 \alpha}{V_2 \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{X}{V_2},
 \end{aligned}$$

and substituting  $V_1$  for  $V_2 \sin \alpha$ ,

$$T = \frac{2Z_1 \cos \alpha}{V_1} + \frac{X}{V_2}$$

Si ahora dejamos  $X = 0$ , entonces  $T$  se convierte en el tiempo de intercepción,  $T_i$ , y podemos reescribir la última expresión como:

$$Z_1 = \frac{T_i V_1}{2 \cos \alpha},$$

i.e.,

$$Z_1 = \frac{T_i V_1}{2 \cos \left( \sin^{-1} V_1/V_2 \right)}. \quad (2)$$

\* Una versión alternativa de esta ecuación es:

$$Z_1 = \frac{T_i V_1 V_2}{2 (V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}.$$

Para la situación que hemos asumido en la Figura 3, todo en el lado derecho de la Ecuación. (2) se puede determinar a partir de la gráfica de tiempo-distancia; por lo tanto, la profundidad a la segunda capa se puede calcular. La profundidad del disparo ha sido ignorada en la derivación anterior, y la verdadera profundidad de la segunda capa se determina simplemente agregando la mitad de la profundidad del disparo al valor de Z1 calculado por la Ecuación (2).

Un punto muy importante para resaltar en este momento, es que todas las profundidades determinadas en los levantamientos de refracción se miden de manera normal al límite entre las capas y no son necesariamente profundidades verticales debajo de la superficie del suelo.

El análisis de tiempo de intercepción puede extenderse al caso de múltiples capas; sin embargo, solo las fórmulas resultantes se darán aquí porque sus derivaciones son redundantes y se pueden encontrar en varias referencias. La Figura 4 ilustra esquemáticamente el caso de múltiples capas y la

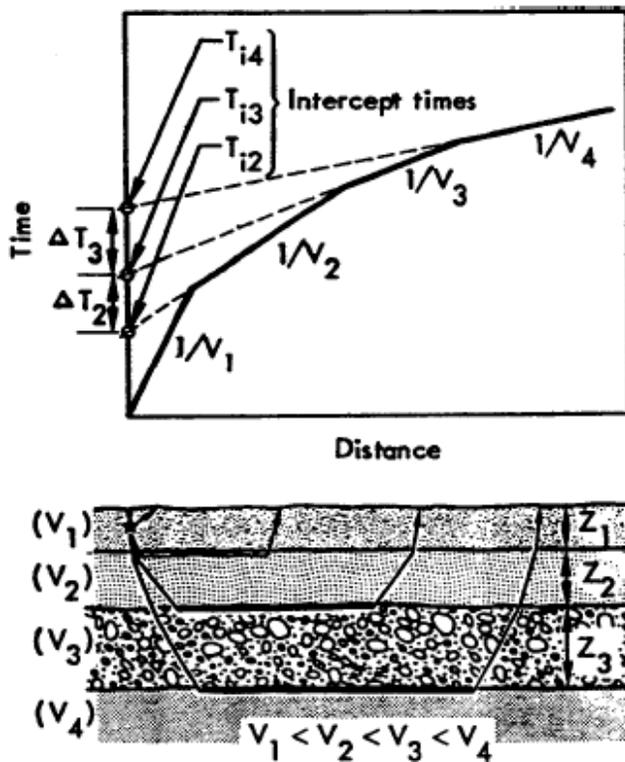


Figura 4. Modelo esquemático de un caso multi-capas y su respectiva curva tiempo-distancia

correspondiente grafica tiempo-distancia. Tenga en cuenta que los tiempos de intercepción y los espesores de cada capa se han identificado mediante un subíndice que corresponde al número de la capa:

$$Z_1 = \frac{(T_{i2}) v_1}{2 \cos \left( \sin^{-1} v_1/v_2 \right)} + \frac{1}{2} \text{shot depth} \quad (3)$$

$$Z_2 = \frac{\left[ T_{i3} - T_{i2} \frac{\cos \left( \sin^{-1} v_1/v_3 \right)}{\cos \left( \sin^{-1} v_1/v_2 \right)} \right] v_2}{2 \cos \left( \sin^{-1} v_2/v_3 \right)} \quad (4)$$

$$Z_3 = \frac{\left[ T_{i4} - T_{i2} \frac{\cos \left( \sin^{-1} v_1/v_4 \right)}{\cos \left( \sin^{-1} v_1/v_2 \right)} - \frac{2Z_2 \cos \left( \sin^{-1} v_2/v_4 \right)}{v_2} \right] v_3}{2 \cos \left( \sin^{-1} v_3/v_4 \right)}. \quad (5)$$

Si los contrastes de velocidad entre capas son lo suficientemente altos; digamos 2 a 1, y solo se requieren profundidades aproximadas, entonces se pueden usar las siguientes fórmulas:

$$Z_2 = \frac{(\Delta T_2) v_2}{2 \cos \left( \sin^{-1} v_2/v_3 \right)} \quad (6)$$

$$Z_3 = \frac{(\Delta T_3) v_3}{2 \cos \left( \sin^{-1} v_3/v_4 \right)} \quad (7)$$

Donde  $\Delta T_2$  y  $\Delta T_3$ ; son como se indica en la Figura 4. Las ecuaciones (6) y (7) darán espesores mayores que los reales, y se sugiere que los espesores se calculen inicialmente de ambas maneras para saber si el error es significativo en una situación particular.

### DISTANCIA CRÍTICA

El método de distancia crítica para determinar la profundidad solo recibirá una breve atención aquí porque es análogo al método de tiempo de intercepción, y no ofrece ventajas lo suficientemente significativas como para justificar mayores detalles. Su aplicación principal es calcular la profundidad de la primera capa y estimar la longitud de la línea sísmica requerida para una tarea de exploración en particular.

La distancia crítica es la distancia desde el punto de disparo hasta el punto en que la energía refractada llega al mismo tiempo que la energía que viaja directamente a través de la capa superior. La distancia crítica ( $X_c$ ) se ilustra en la Figura 3; es el punto de quiebre en la gráfica de tiempos de llegada. \*

Mediante un enfoque similar al utilizado para derivar las fórmulas de tiempo de intercepción, se puede demostrar que la profundidad de la primera capa viene dada por:

$$Z_1 = \frac{X_c}{2} \frac{(1 - V_1/V_2)}{\cos(\sin^{-1} V_1/V_2)} \quad (8)$$

Donde  $X_c$  es la distancia crítica.

\* Hay, por supuesto, una distancia crítica para las refracciones de cada capa en un caso de múltiples capas; Aquí solo nos preocupa el primer punto de ruptura.

La ecuación (8) se puede usar para construir un gráfico que muestre la longitud de una línea sísmica (relativa a la profundidad de la primera capa) requerida para detectar refracciones de la capa subyacente, en función de las relaciones de velocidad. La Figura 5 es una gráfica de la ecuación (8), que puede ser útil en la planificación de un levantamiento sísmico si se asumen relaciones de velocidad. El gráfico también ayuda a dar un sentido de perspectiva al efecto de los contrastes de velocidad. Por ejemplo, suponga que hay aproximadamente 15 pies de material con una velocidad de 2.500 pies / seg, y que está subyacente por una lutita con una velocidad de aproximadamente 5.500 pies / seg. ¿Cuán larga debe ser la línea sísmica para asegurar la cobertura adecuada para mapear el espesor de material? La relación de velocidad,  $V_2 / V_1$ , es 2.2, de modo que  $X_c / Z_1$  es aproximadamente 3.25, lo que significa que la distancia crítica será de aproximadamente 50 pies. La línea sísmica debe ser al menos tres veces esta distancia de largo; por lo tanto, una línea sísmica de 150 a 200 pies de largo sería satisfactoria.

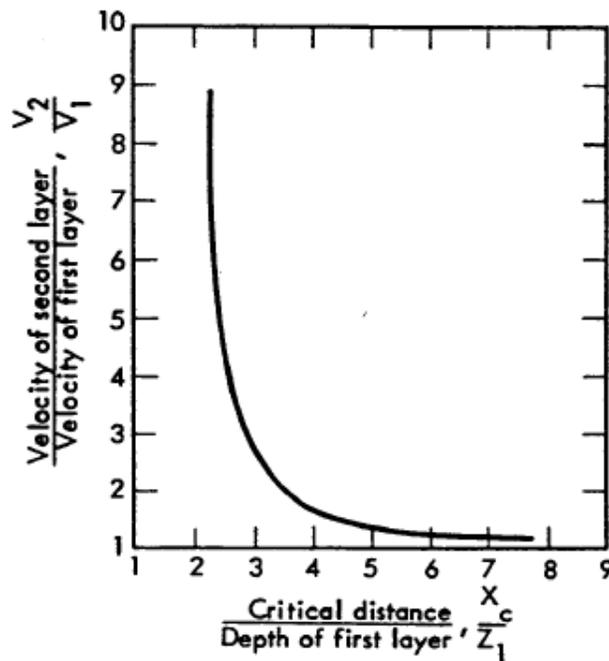


Figura 5. Gráfico de la relación de la distancia crítica sobre la profundidad de la primera capa en función del contraste de velocidades.

## CAPAS BUZANTES

Ahora consideraremos brevemente la existencia de una interfaz buzante, el concepto de velocidades aparentes y su efecto en los cálculos de profundidad.

Las ecuaciones derivadas anteriormente requieren el conocimiento de las velocidades "verdaderas" de las capas. Si los límites entre las interfaces no son paralelos (es decir, si hay interfaces buzando), una gráfica de los tiempos de llegada frente a la distancia solo dará velocidades aparentes para las capas refractadas, y el uso de estas velocidades aparentes dará como resultado profundidades erróneas; el caso de un límite o interfaz buzante y su efecto en las gráficas de tiempo de viaje se ilustra en la Figura 6.

La figura 6 también presenta la idea del "disparo inverso", que siempre se debe aplicar en levantamientos de refracción. El disparo inverso simplemente significa disparar a ambos extremos de la línea sísmica para que los tiempos de llegada en cada detector (geófono) se midan desde ambas direcciones.

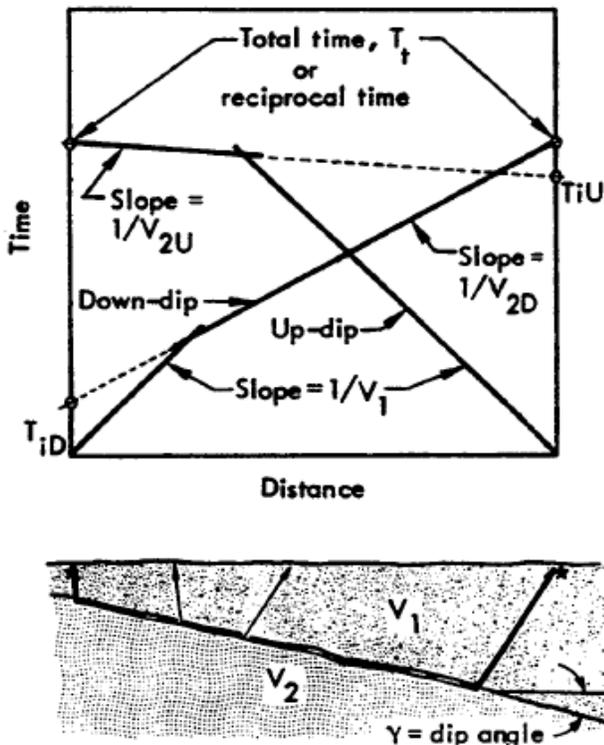


Figura 6. Ejemplo de interfaz buzante y conceptos de disparo inverso y "velocidad aparente".

Es evidente a partir de la Figura 6 que la velocidad aparente de la capa de refractada, según se determina a partir de la gráfica de tiempo-distancia, depende de si el disparo se dispara en el extremo hacia arriba o hacia abajo de la línea sísmica, y que una profundidad determinada sobre la base de un solo disparo será válida solo en un punto a lo largo de la línea. A menos que se conozca el ángulo de buzamiento, se requiere el disparo inverso para determinar el verdadero valor de  $V_2$ .

Si la velocidad aparente del refractor observada desde el disparo de buzamiento descendente es  $V_{2D}$ , entonces de la Ley de Snell:

$$V_{2D} = V_1 / \sin(\alpha + \gamma),$$

Donde  $\gamma$  es el ángulo de buzamiento de la interfaz en relación con la superficie y  $\alpha$  es el ángulo de incidencia crítico. De manera similar, la velocidad aparente,  $V_{2U}$ , observada para el disparo en la dirección de buzamiento ascendente está dada por:

$$V_{2U} = V_1 / \sin(\alpha - \gamma).$$

Podemos reorganizar las dos relaciones anteriores para obtener:

$$\alpha + \gamma = \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2D}} \right)$$

$$\alpha - \gamma = \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2U}} \right)$$

A partir de la cual se puede determinar el ángulo de buzamiento:

$$\gamma = \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2D}} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_{2U}} \right) \right]. \quad (9)$$

El verdadero valor de  $V_2$  no es el promedio aritmético de  $V_{2U}$  y  $V_{2D}$ , sino que es la media armónica multiplicada por el coseno del ángulo de buzamiento:

$$V_2 = \frac{2V_{2U}V_{2D}}{V_{2U} + V_{2D}} \cos \gamma. \quad (10)$$

Otros métodos para determinar las velocidades verdaderas se discutirán más adelante.

Como ejemplo del grado en que una interfaz buzante puede afectar a las velocidades observadas en un gráfico de tiempo-distancia, considere el caso de un material de 2.000 pies / seg que cubre un material de 5.000 pies / seg con su interfaz buzando 10 grados con respecto a superficie. Se observarían las siguientes velocidades del refractor:

Buzamiento ascendente ( $V_{2U}$ ): 8.515 ft / seg  
 Buzamiento descendente ( $V_{2D}$ ): 3.615 pies / seg.  
 Media aritmética: 6.065 pies / seg.  
 Media armónica: 5.075 pies / seg.  
 Significado armónico\*  $\cos \gamma$ : 5.000 pies / seg.  
 = velocidad verdadera

La media armónica es generalmente lo suficientemente precisa para los cálculos; es decir, normalmente no es necesario calcular el ángulo de inclinación a menos que sea de interés en sí mismo. Las profundidades siempre se calculan utilizando velocidades reales. El uso de velocidades aparentes puede resultar en errores significativos.

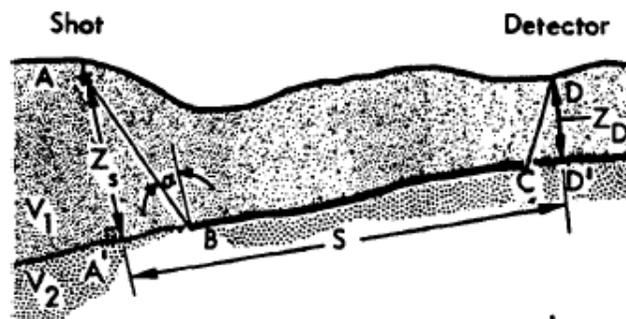
#### TIEMPOS DE RETARDO

Anteriormente, se señaló que las verdaderas velocidades de los refractores no se pueden determinar realizando un solo disparo en un extremo de una línea sísmica, pero que dichas velocidades si se pueden determinar si los tiempos de llegada se registran desde ambos extremos. Además, una profundidad calculada a partir de un tiempo de intercepción en realidad representa la profundidad de la superficie de refracción proyectada hacia el punto

de disparo. Sin embargo, el perfil invertido ofrece una ventaja significativa, ya que las velocidades reales y los espesores de las capas se pueden calcular de forma mucho más detallada por medio de tiempos de retardo. Bajo circunstancias ideales, se pueden determinar las profundidades debajo de cada geófono para permitir el mapeo de los límites irregulares y de buzamiento.

El significado del término "tiempo de retardo" se ilustra con referencia a la Figura 7, en la que el tiempo de retardo se define en el punto de disparo y en el detector. \* El tiempo de retardo es la diferencia entre el tiempo realmente gastado por el pulso que viaja su trayectoria ascendente o descendente a través de la capa superior, y el tiempo que habría pasado viajando, a la velocidad del refractor, a lo largo de la proyección normal de esta trayectoria en la interfaz. Si bien la definición del tiempo de retardo puede parecer incómoda al principio, su significado y aplicación se aclararán a medida que avancemos. Considere el pulso que viaja hasta el detector en la Figura 7 para el cual el tiempo de retardo se ha definido como:

$$\text{Delay time at detector} = \Delta T_D = \frac{CD}{V_1} - \frac{CD'}{V_2}$$



$$\text{Delay time at shot point} = \Delta T_S = \frac{AB}{V_1} - \frac{A'B'}{V_2}$$

$$\text{Delay time at detector} = \Delta T_D = \frac{CD}{V_1} - \frac{C'D'}{V_2}$$

Figura 7. Definición del Tiempo de Retardo.

\* Aunque la distinción no es importante en el contexto de este informe, el "tiempo de retardo" se conoce como la profundidad del tiempo, en algunas publicaciones. Estrictamente hablando, el término tiempo de retardo implica que la superficie del refractor es horizontal; en este informe, las profundidades se miden de manera normal a la superficie del refractor, independientemente de su disposición.

$$\Delta T_D = \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha} - \frac{Z_D \tan \alpha}{V_2}$$

$$= Z_D \left( \frac{1}{V_1 \cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{V_2 \cos \alpha} \right)$$

and because  $\sin \alpha = V_1/V_2$

$$\Delta T_D = Z_D \left( \frac{1}{V_1 \cos \alpha} - \frac{\sin^2 \alpha}{V_1 \cos \alpha} \right),$$

and because  $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ ,

$$\Delta T_D = \frac{Z_D \cos \alpha}{V_1}$$

$$= \frac{Z_D \cos (\sin^{-1} V_1/V_2)}{V_1}, \quad (11)$$

so that

$$Z_D = \frac{\Delta T_D V_1}{\cos (\sin^{-1} V_1/V_2)}. \quad (12)$$

La equivalencia entre un tiempo de retardo y un tiempo de intercepción es evidente cuando la ecuación. (12) se compara con la fórmula de tiempo de intercepción, ecuación (2). Se puede considerar que un tiempo de retardo es análogo al tiempo que tarda un pulso en viajar hacia arriba o hacia abajo a través de una capa de una interfaz a la siguiente. Es evidente que si se puede determinar el valor del tiempo de retardo,  $\Delta T_D$ , en un detector en particular, entonces se puede calcular la profundidad debajo del detector.

Antes de analizar el método mediante el cual se determinan los tiempos de retardo, consideraremos la ruta del pulso refractado, desde el disparo hasta el detector, que se muestra en la Figura 7. El tiempo de retardo total es, por definición:

$$\Delta T_{SD} = T_t - \frac{S}{V_2},$$

Donde  $T_t$  es el tiempo total de viaje observado desde el disparo al detector. Se puede demostrar que el tiempo de retardo total es la suma de los tiempos de retardo en el disparo y en el detector; es decir.,

$$\Delta T_{SD} = \Delta T_S + \Delta T_D,$$

Y al combinar estas dos expresiones obtenemos la siguiente ecuación para el tiempo de retardo debajo del detector:

$$\Delta T_D = T_t - \frac{S}{V_2} - \Delta T_S.$$

En consecuencia, si se conociera el tiempo de retardo en el disparo ( $\Delta T_S$ ), se podría calcular  $\Delta T_D$  y la profundidad debajo del geófono. Si la profundidad del refractor debajo del disparo y las velocidades de las capas se conocen de antemano, entonces se puede calcular  $\Delta T_S$ , y el tiempo de llegada desde un solo extremo de la línea sería suficiente para determinar el tiempo de retardo y la profundidad debajo del geófono. Aunque la profundidad debajo del disparo y las velocidades generalmente no se conocen de antemano, el tiempo de retardo debajo del geófono se puede determinar disparando en ambos extremos de la línea.

La línea sísmica invertida que se muestra en la Figura 8 se utilizará para ilustrar el método de los tiempos de retardo. La Figura 8 muestra los tiempos de llegada a los geófonos desde disparos en ambos extremos de una línea sísmica. El tiempo total de viaje de un extremo a otro de la línea (a veces llamado el tiempo "recíproco")<sup>3</sup> se designó como  $T_t$  y debería ser el mismo para ambos disparos. \* Los tiempos de llegada a uno de los geófonos (seleccionados arbitrariamente) de Los dos disparos,  $SP_1$  y  $SP_2$ , se han designado como  $T_{D1}$  y  $T_{D2}$ , respectivamente. Recordando que el objetivo es encontrar el tiempo de retardo,  $\Delta T_D$ , en el geófono, considere lo siguiente. De la ecuación (13) podemos escribir cada tiempo de llegada en términos de componentes de tiempos de retardo:

\* Si las profundidades de los disparos son iguales.

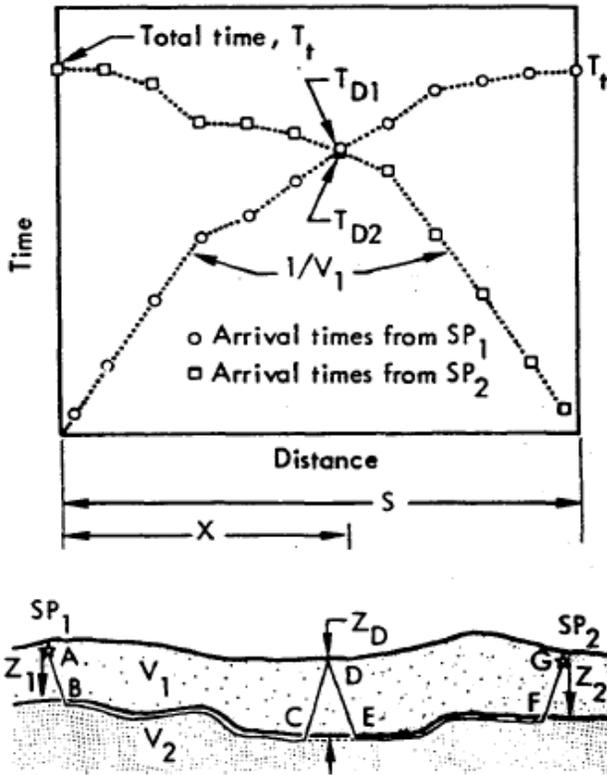


Figura 8. Esquema de la línea sísmica invertida y del método de tiempo de retardo para la determinación de la profundidad.

$$T_{D1} = \Delta T_{S1} + \Delta T_D + \frac{X}{V_2}$$

and

$$T_{D2} = \Delta T_{S2} + \Delta T_D + \frac{S-X}{V_2};$$

Por lo tanto,  $T_{D1} + T_{D2} = \Delta T_{S1} + \Delta T_{S2} + 2\Delta T_D + S/V_2$ , donde  $\Delta T_S$  es el tiempo de retardo en un punto de disparo. Del mismo modo, el tiempo total se puede expresar en términos de tiempos de retardo:

$$T_t = \Delta T_{S1} + \Delta T_{S2} + \frac{S}{V_2};$$

therefore,

$$T_{D1} + T_{D2} = 2\Delta T_D + T_t;$$

i.e.,

$$\Delta T_D = \frac{1}{2} (T_{D1} + T_{D2} - T_t). \quad (14)$$

Tenga en cuenta que el tiempo de demora debajo del geófono se determina restando el tiempo total de la suma de los dos tiempos de llegada y tomando la mitad del resultado. La profundidad debajo del geófono hasta la parte superior del refractor se calcula mediante la ecuación. (12):

$$Z_D = \frac{\Delta T_D V_1}{\cos(\sin^{-1} V_1/V_2)}.$$

Es importante tener en cuenta que el tiempo total que se resta de la suma de los dos tiempos de llegada en la ecuación. (14), debe ser el tiempo de llegada de un pulso refractado desde la misma capa desde la cual se refractaron las otras dos llegadas. El tiempo total no puede ser el tiempo de llegada de un pulso refractado desde una capa más profunda.

En el caso de que la derivación de la ecuación (14) por medio de algo llamado tiempo de retardo parezca tortuoso e indirecto, el siguiente análisis, también basado en la Figura 8, se presenta como una alternativa:

$$T_t = \frac{AB}{V_1} + \frac{BCEF}{V_2} + \frac{FG}{V_1}$$

$$= \frac{Z_1}{V_1 \cos \alpha} + \frac{S - Z_1 \tan \alpha - Z_2 \tan \alpha}{V_2}$$

$$+ \frac{Z_2}{V_1 \cos \alpha}$$

$$T_{D1} = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_1}$$

$$= \frac{Z_1}{V_1 \cos \alpha} + \frac{X - Z_1 \tan \alpha - Z_D \tan \alpha}{V_2}$$

$$+ \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha}$$

$$T_{D2} = \frac{FG}{V_1} + \frac{EF}{V_2} + \frac{DE}{V_1}$$

$$= \frac{Z_2}{V_1 \cos \alpha} +$$

$$+ \frac{(S - X) - Z_2 \tan \alpha - Z_D \tan \alpha}{V_2}$$

$$+ \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha}$$

Combining these:

$$T_{D1} + T_{D2} - T_t = \frac{2Z_D}{V_1 \cos \alpha} - \frac{2Z_D \tan \alpha}{V_2}$$

$$= 2Z_D \left( \frac{1}{V_1 \cos \alpha} - \frac{\sin \alpha}{V_2 \cos \alpha} \right),$$

and because  $V_2 = V_1 / \sin \alpha$ ,

$$T_{D1} + T_{D2} - T_t = \frac{2Z_D}{V_1} \left( \frac{1 - \sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right)$$

$$= \frac{2Z_D \cos \alpha}{V_1};$$

therefore,

$$Z_D = \frac{1}{2} \frac{(T_{D1} + T_{D2} - T_t) V_1}{\cos \alpha},$$

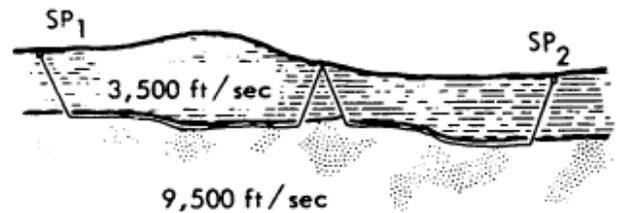
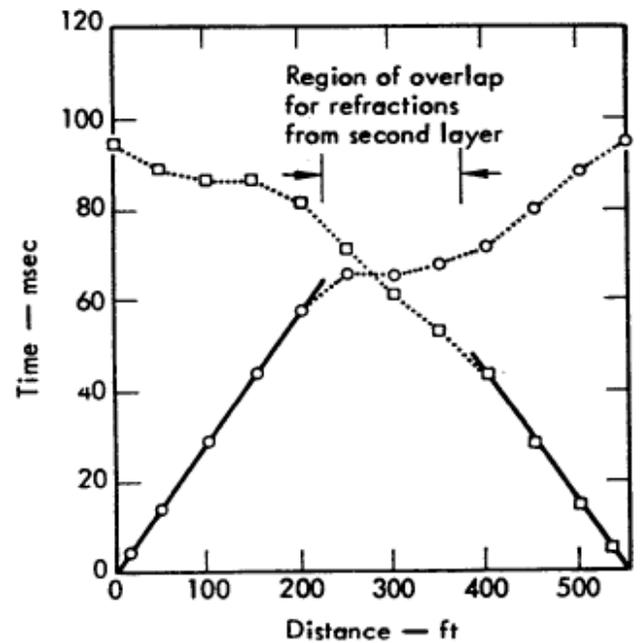


Figura 9a. Perfil sísmico invertido en el que las llegadas refractadas desde ambos extremos se registran en solo tres detectores.

or, as before,

$$z_D = \frac{\Delta T_D V_1}{\cos \left( \sin^{-1} V_1/V_2 \right)}$$

La primera derivación, que utiliza explícitamente un tiempo de retardo, es la que se encuentra comúnmente en la literatura.

Antes de extender el método de tiempo de retardo a un caso en el que hay más de dos capas, es importante tener en cuenta que el método se puede aplicar solo cuando hay una "superposición" entre las llegadas refractadas desde la misma capa. En otras palabras, la longitud real de la línea sísmica debería ser suficiente para asegurar la superposición de las llegadas refractadas. Este punto se ilustra en la Figura 9a, que muestra las curvas de tiempo-distancia invertidas sintetizadas para un caso de dos capas. Aunque no es inmediatamente obvio al observar las curvas de tiempo-distancias, solo tres de los detectores cerca del centro de la línea registraron refracciones desde ambas direcciones. En consecuencia, los tiempos de demora solo se pueden determinar para estos tres detectores. Si la línea sísmica hubiera sido más larga, más de las llegadas refractadas se habrían superpuesto, y se podrían determinar más tiempos de demora.

Si se nota la falta de superposición en el campo, se reducen y se trazan los datos inmediatamente después de los disparos. A menudo es posible remediar parcialmente la situación disparando disparos adicionales desde uno o ambos extremos de la línea (es decir, más allá del extremo del cable sísmico) en línea con el conjunto de detectores. Los tiempos de llegada desde un disparo más allá del final se utilizan para extrapolar el primer conjunto de llegadas refractadas hacia el punto de disparo. \* Esta técnica se conoce como "phantoming" y se ilustra en la Figura 9b, que muestra los mismos datos como en la Figura 9a, pero con la adición de un disparo más allá del final.

Si el gráfico de tiempos de llegada del disparo más allá del final coincide con los tiempos de llegada del disparo final, ambos representan refracciones de la misma capa. Este es el caso en la Figura 9b, en el que la diferencia en los tiempos de llegada entre las llegadas refractadas desde el final y los disparos más allá del final es una constante,  $\Delta T$ . La Figura 9b

muestra cómo las llegadas refractadas desde el disparo final se extrapolan hacia el punto de disparo al reducir los tiempos de llegada más allá del final en  $\Delta T$  para producir las llegadas fantasmas a distancias menores que la distancia crítica. Estas llegadas fantasmas se pueden usar para determinar los tiempos de demora en la región que se muestra en la Figura 9b. También se puede disparar un disparo adicional más allá del otro extremo de la línea para permitir que se determinen los tiempos de demora en toda la extensión, permitiendo que la profundidad del refractor se calcule debajo de cada detector. Si hay un disparo en el centro de una línea sísmica, los disparos colocados en los extremos del cable son, en efecto, disparos más allá del final para la mitad opuesta de la línea. Si los tiempos de llegada de un disparo más allá del final no son paralelos a los tiempos del disparo final, hay una tercera capa más profunda; esta situación se discute a continuación.

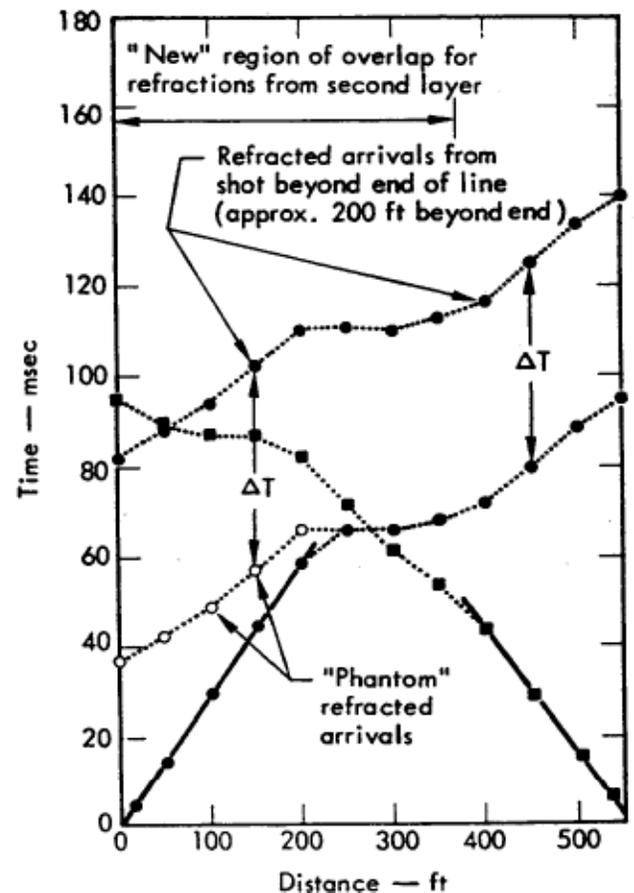


Figura 9b. Aumento de la superposición de llegadas refractadas para la situación en la Figura 9a al disparar un disparo más allá del final de la línea y trazar las llegadas fantasma.

\* Suponemos, por supuesto, que las llegadas desde el disparo más allá del final se han refractado desde la capa desde la que se refractó el primer conjunto de llegadas.

En general, se advierte al intérprete que intente asegurarse de que los dos tiempos de llegada que utiliza para calcular un tiempo de retardo representan refracciones de la misma capa; de lo contrario, será "Mezcla de manzanas y naranjas". No siempre es fácil verificar el origen estratigráfico de una llegada.

El método de tiempo de retardo no se limita al caso simple de dos capas. Lo ideal sería calcular un tiempo de retardo debajo de cada geófono para cada capa en una secuencia, pero esto casi nunca es posible. La Figura 10 ilustra una situación muy común en Investigaciones de refracción. Tenga en cuenta que hay tres capas y que las rutas de viaje de las primeras llegadas se muestran en el dibujo. Una revisión de la Figura 10 mostrará que solo dos de los detectores (en las Estaciones 250 y 300) registraron refracciones de la tercera capa de ambas tomas finales. Obviamente, no hay superposición de refracciones de la segunda capa. Los dos tiempos de retardo que se pueden determinar en las estaciones, 250 y 300 serán la suma de los tiempos de retardo para la primera y segunda capas. El tiempo de retardo en la primera capa (superior) se debe restar del tiempo de retardo total antes de que se pueda calcular el grosor de la segunda capa.

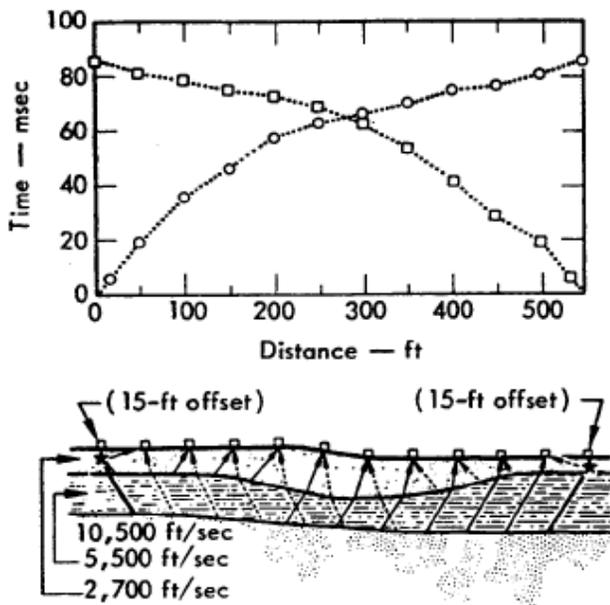


Figura 10. Caso de tres capas que muestra las trayectorias de viaje de las primeras llegadas y las correspondientes curvas de tiempo-distancia.

Sin embargo, solo con la información que se muestra en la Figura 10, no tenemos forma de determinar el tiempo de retardo real para la primera capa.

Si solo tuviéramos los tiempos de llegada de los dos disparos finales como se muestra en la Figura 10, nuestro único recurso sería calcular el grosor de la primera capa en cada extremo de la línea utilizando la fórmula de tiempo de intercepción, e interpolar linealmente Estos dos valores de profundidad a lo largo de la línea. Las profundidades interpoladas de la primera capa se podrían convertir a tiempos de retardo en las estaciones 250 y 300 mediante la ecuación. (11). y luego se resta del tiempo total de demora determinado en estos dos detectores. El resultado serían valores de tiempos de retardo para la segunda capa en estas dos estaciones, y el grosor de la segunda capa se interpretaría como:

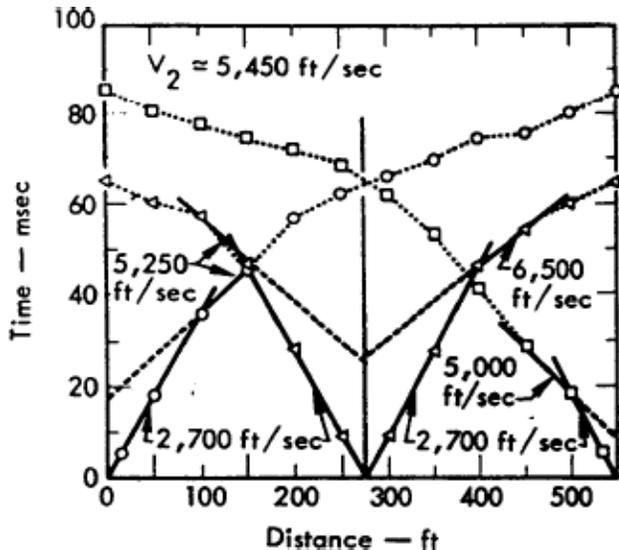
$$Z_2 = \frac{(\Delta T_{12} - \Delta T_1) V_2}{\cos(\sin^{-1} V_2/V_3)}, \quad (15)$$

Donde  $\Delta T_{12}$  es el tiempo de retardo combinado para la primera y la segunda capa, y  $\Delta T_1$  es el tiempo de retardo para la primera capa calculada a partir de los valores interpolados de profundidad y la ecuación. (11).

La inspección de la Figura 10 mostrará que el procedimiento anterior conducirá a algunas respuestas muy incorrectas. La primera capa se espesa de manera apreciable en medio de la propagación, pero no hay forma de saber esto si los disparos se realizan solo en los extremos de la propagación. El grosor de la segunda capa se sobreestimaría considerablemente porque se subestimó el grosor de la primera capa; es decir, se restaría una cantidad de tiempo insuficiente de los tiempos de retardo totales en las estaciones 250 y 300. La computación de las profundidades sobre la base de los tiempos de intercepción de las refracciones de la tercera capa daría lugar a los mismos errores.

La situación descrita anteriormente y representada en la Figura 10 se eligió para ilustrar el mérito de realizar disparos intermedios a lo largo de una línea sísmica. Los puntos de disparo intermedios darán como resultado un mejor control de las profundidades y velocidades de la primera capa; Se requieren menos suposiciones para interpretar los datos en bruto.

La Figura 11 es la misma que la Figura 10, excepto que se agregó un disparo en medio de la línea. Ahora se puede obtener un tiempo de intercepción tanto en el centro como en los extremos de la línea, y también tenemos una verificación de la velocidad de la primera capa en el centro.



**Figura 11.** Las mismas curvas de tiempo-distancia que se muestran en la Figura 10 pero con la adición de un disparo en el centro de la línea sísmica.

Sería evidente a partir de los tiempos de intercepción en la Figura 11 que la primera capa de 2.700 pies / s es más gruesa cerca del centro de la línea que en los extremos; en consecuencia, ahora se podría hacer una evaluación mucho más precisa del grosor de la segunda capa.

Los disparos intermedios adicionales ayudarían a resolver la primera capa con mayor detalle y, eventualmente, permitirían un mapeo más detallado de la segunda capa.

Las velocidades aparentes de la segunda capa mostrada en la Figura 11 parecen variar considerablemente. Las velocidades en la parte derecha son velocidades de buzamiento hacia arriba y hacia abajo con una media armónica de aproximadamente 5.650 pies / s. El promedio general para  $V_2$  es de aproximadamente 5.450 pies / seg, muy cerca del valor nominal de 5.500 pies / seg. La dispersión de los valores sobre el valor nominal es típica de la precisión que se puede esperar en los estudios de refracción.

En el caso hipotético considerado (Figura 11) podemos obtener suficientes detalles sobre la capa superior por medio de disparos intermedios. En este ejemplo particular, no hay suficiente superposición de refracciones desde la parte superior de la segunda capa para calcular los grosores de la primera capa por el método de tiempo de retardo. Este será generalmente el caso de situaciones de múltiples capas. Si se tratara de un estudio de ingeniería típica, nuestro interés probablemente se dirigiría a mapear la parte superior de la capa de alta velocidad (10.500 pies / seg). ¿Cómo obtenemos más información? Con los datos de la Figura 11 podríamos calcular la profundidad hasta la parte superior de la tercera capa en tres ubicaciones; es decir, en el centro y los extremos de la línea. Se requiere un disparo más allá del final para obtener más detalles.

Los tiempos de llegada de un disparo ubicado más allá del final de la línea se muestran en la Figura 12. Estos tiempos se utilizaron para generar llegadas refractadas fantasma mediante la técnica demostrada en la Figura 9, y los tiempos de retardo se calcularon a partir de la superposición de tiempos de llegada real y fantasma de la Estación 250 a la Estación 550. Estos tiempos de retardo son la suma de los tiempos de retardo en la primera y segunda capa. Ahora presentamos una nueva técnica para usar estos tiempos de retardo para extraer más información de los datos.

Si los tiempos de retardo en la Figura 12 se restan de los tiempos de llegada correspondientes y las diferencias trazadas, tenemos, en efecto, una nueva curva de tiempo-distancia que es equivalente a colocar el disparo y los detectores en la parte superior de la tercera capa. Los tiempos de llegada reducidos deben trazarse con una pendiente recíproca igual a la velocidad real del horizonte de refracción; es decir, la tercera capa. Esta operación se realizó para los detectores en las estaciones 250 a 550 en la Figura 12, y vemos que la pendiente recíproca es de 10.000 pies / seg, razonablemente coherente con la velocidad nominal de 10,500 pies / seg que se muestra en la sección transversal en la Figura 10. Este es un método muy útil para determinar las verdaderas velocidades del refractor. Además, podemos trazar una línea con esta misma pendiente a través de los dos tiempos de llegada reducidos (en las estaciones 250 y 300) para el tiro inverso. Los tiempos de retardo para los detectores en las estaciones 0 a 200 se leen directamente como la diferencia entre los tiempos de llegada y la línea extrapolada que tiene una pendiente recíproca de 10.000 pies / seg. Esta operación también se ilustra en la Figura 12.

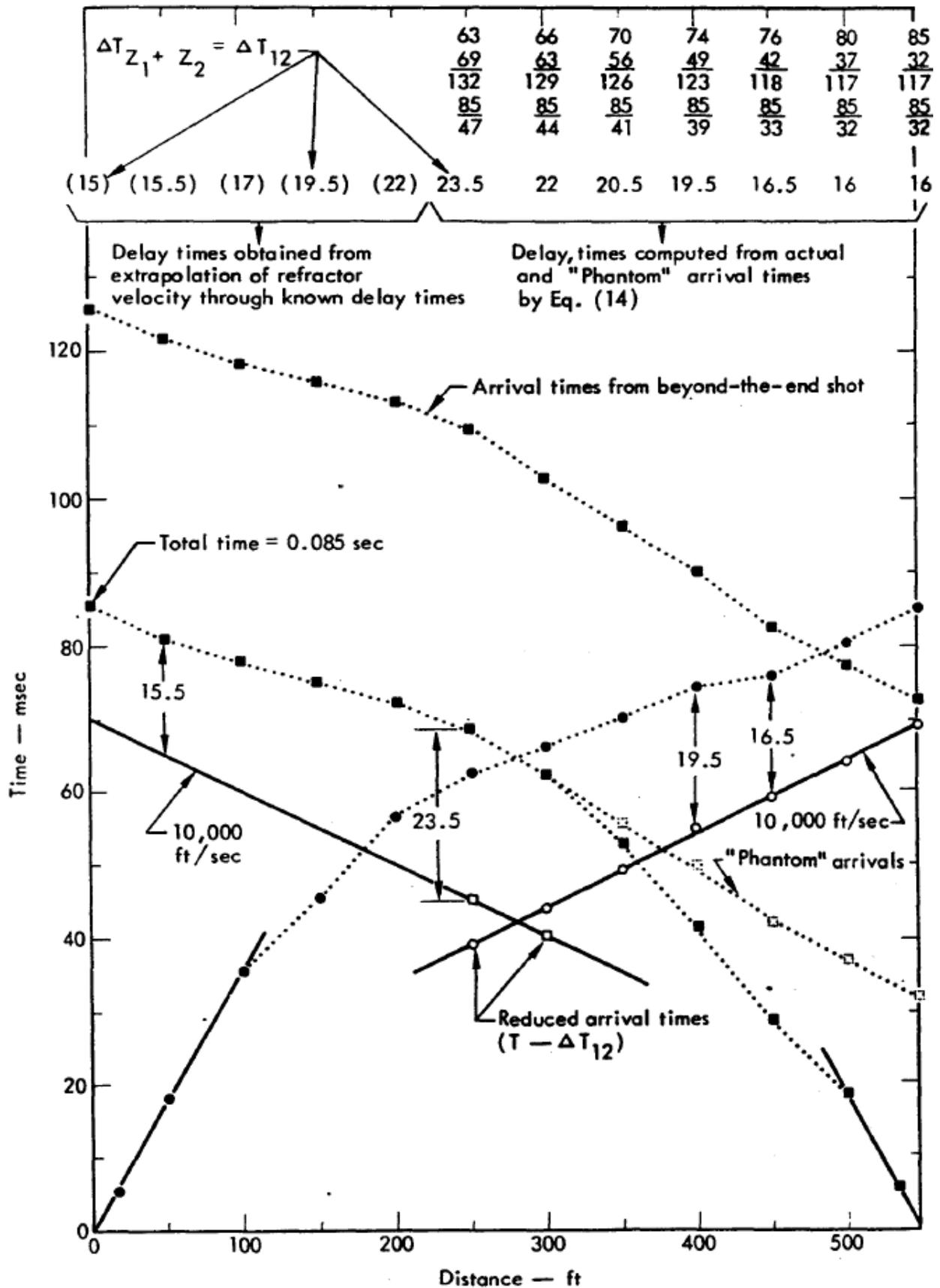


Figura 12. Las mismas curvas de tiempo-distancia que se muestran en la Figura 10 pero con la adición de un disparo más allá del final (el disparo del centro se ha omitido por motivos de claridad).

En este punto, tenemos tiempos de retraso totales para la primera y segunda capa en cada detector en la línea. Podemos determinar el grosor de la primera capa mediante disparos intermedios y el método de tiempo de intercepción, interpolar estas profundidades sobre la extensión completa para obtener los tiempos de retardo de la primera capa correspondientes en cada detector, \* y restar estos tiempos de la primera capa del total para obtener tiempos de retraso de la segunda capa en cada detector.

Como consecuencia de realizar algunos disparos intermedios a lo largo de la línea y un disparo más allá del final, hemos podido llegar a una interpretación razonablemente detallada de la estructura del subsuelo. Esto contrasta con la imagen muy errónea del subsuelo que resultaría de una interpretación basada solo en los disparos en los extremos de la línea sísmica. Además, tenemos un valor razonable para la velocidad real del refractor.

Las técnicas descritas anteriormente se extienden a más de tres capas, pero las dificultades aumentan y hay una pérdida de precisión y resolución a medida que aumenta el número de capas discretas.

El ejemplo anterior demostró que las velocidades reales podrían determinarse restando los tiempos de retraso de los tiempos de llegada y trazando los tiempos de llegada reducidos. Hay otro método para determinar las velocidades verdaderas que con frecuencia es de gran valor, particularmente para determinar si existen variaciones laterales de velocidad a lo largo de un horizonte de refracción. Este método se discutirá a continuación.

En la derivación alternativa de la fórmula del tiempo de retraso dada anteriormente, el tiempo de llegada de una refracción en un detector dado de un disparo al final de la línea fue:

$$T_{D1} = \frac{Z_1}{V_1 \cos \alpha} + \frac{X - Z_1 \tan \alpha - Z_D \tan \alpha}{V_2} + \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha},$$

Y el tiempo de llegada al mismo geófono de un disparo en el extremo opuesto de la línea sísmica fue:

$$T_{D2} = \frac{Z_2}{V_1 \cos \alpha} + \frac{(S - X) - Z_2 \tan \alpha - Z_D \tan \alpha}{V_2} + \frac{Z_D}{V_1 \cos \alpha},$$

Donde  $Z_1$  y  $Z_2$  son profundidades hasta el horizonte de refracción debajo de los puntos de disparo y  $Z_D$  es la profundidad debajo del detector. La diferencia en los tiempos de llegada será:

$$(T_{D1} - T_{D2}) = \frac{Z_1 - Z_2}{V_1 \cos \alpha} + \frac{2X}{V_2} - \frac{S}{V_2} + \frac{Z_2 \tan \alpha - Z_1 \tan \alpha}{V_2}.$$

Para una línea sísmica dada, el único término variable en el lado derecho de la ecuación anterior es el segundo; por lo tanto:

$$(T_{D1} - T_{D2}) = \text{constant} + \frac{2X}{V_2}. \quad (16)$$

---

\* Si las profundidades de disparo son relativamente poco profundas, digamos unos pocos pies, los tiempos de media intercepción serán casi iguales a los tiempos de demora, y pueden interpolarse directamente.

De ello se deduce que las diferencias en los tiempos de llegada trazados contra la distancia,  $X$ , formarán una línea cuya pendiente recíproca es la mitad de la velocidad del refractor. El método se ilustra en la Figura 13, donde las diferencias de tiempo de llegada para un caso de tres capas se han trazado arriba y abajo de una línea de referencia arbitraria. Los horarios de llegada diferenciados deben representar

llegadas del mismo refractor. El método es frecuentemente útil para determinar si las llegadas han sido refractadas desde la misma capa. Una desviación de los puntos de una línea recta puede indicar que existe una variación lateral de la velocidad del refractor, o que los tiempos diferenciados representan llegadas refractadas de dos capas diferentes. Este último es el caso de la Figura 13.

## Problemas, limitaciones, y aplicaciones adicionales

### LA ZONA CIEGA E INVERSIONES DE VELOCIDAD

El siguiente material se referirá a los problemas que constituyen limitaciones importantes para el método, particularmente desde el punto de vista de la geología para ingeniería. Las dos principales áreas problemáticas potenciales en los estudios de refracción son el fenómeno de una "zona ciega" y el efecto de una inversión de velocidad.

El término zona ciega se refiere a la posible existencia de una capa oculta, es decir, la incapacidad de la sísmica de refracción para discernir la existencia de ciertas capas o estratos debido a un espesor o contraste de velocidad insuficiente. Esta incapacidad no puede remediarse mediante ningún cambio en el diseño de los geófonos, y es probablemente el mayor inconveniente del método de refracción sísmica. En la mayoría de los casos, la zona ciega se ubicará entre la superficie y una capa de alta velocidad.

Un ejemplo de este tipo de problema se toma directamente de Soske<sup>4</sup> La Figura 14 de Soske<sup>4</sup> muestra un ejemplo de un caso de tres capas con las capas con buenos contrastes de velocidad. Sin embargo, la Figura 14 muestra el grosor mínimo de la capa intermedia de 8.500 pies / seg que tendría que existir antes de que las primeras llegadas pudieran detectar su presencia, independientemente del diseño del geófono. Se notará que no hay indicación de la capa de 8.500 pies / seg en la curva de tiempo-distancia en la Figura 14.

Sería necesario que la capa intermedia de 8.500 pies / seg en la Figura 14 tenga al menos 70 pies de espesor para que las refracciones de ella se registren como primeras llegadas. Puede parecer extraño que la capa de 8.500 pies / seg deba ser tan gruesa como

70 pies antes de que se puedan detectar arribos refractados desde su superficie superior. Los contrastes de velocidad entre capas sucesivas en la Figura 14 son altos y, a primera vista, este ejemplo podría parecer un caso ideal para el mapeo de refracción. La referencia 4 utiliza un análisis de frente de onda para mostrar cómo se produce esta anomalía aparente.

Soske indica que el problema puede superarse disparando un tiro en un hoyo profundo de modo que las llegadas desde la capa intermedia se registren en la superficie. Por supuesto, sería necesario conocer de antemano la existencia de la capa intermedia debido a alguna otra fuente de información, como una perforación, antes de que esto se intente normalmente. Si una curva de tiempo-distancia muestra un contraste de velocidad muy grande entre la primera y la segunda capa, se puede sospechar la existencia de una zona ciega. El error que resulta de no saber la existencia de una zona ciega es que la profundidad calculada para la capa de refracción es demasiado superficial. Sin embargo, incluso en el peor de los casos, es dudoso que el error se acerque al 50%.

Si se sospecha la presencia de una zona ciega, se puede usar el siguiente procedimiento para determinar el grosor máximo de dicha capa ( $Z_2$ ) que podría existir y aún no manifestarse por las primeras llegadas en la curva de tiempo-distancia.

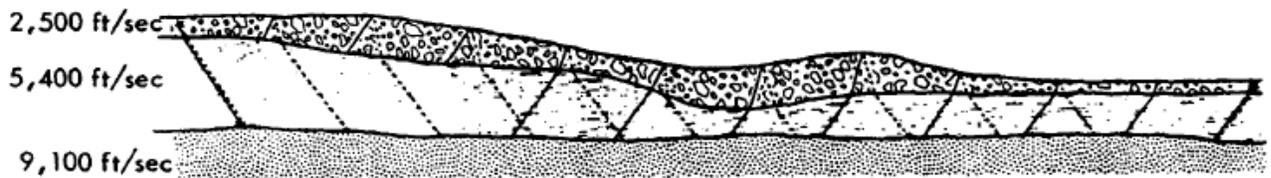
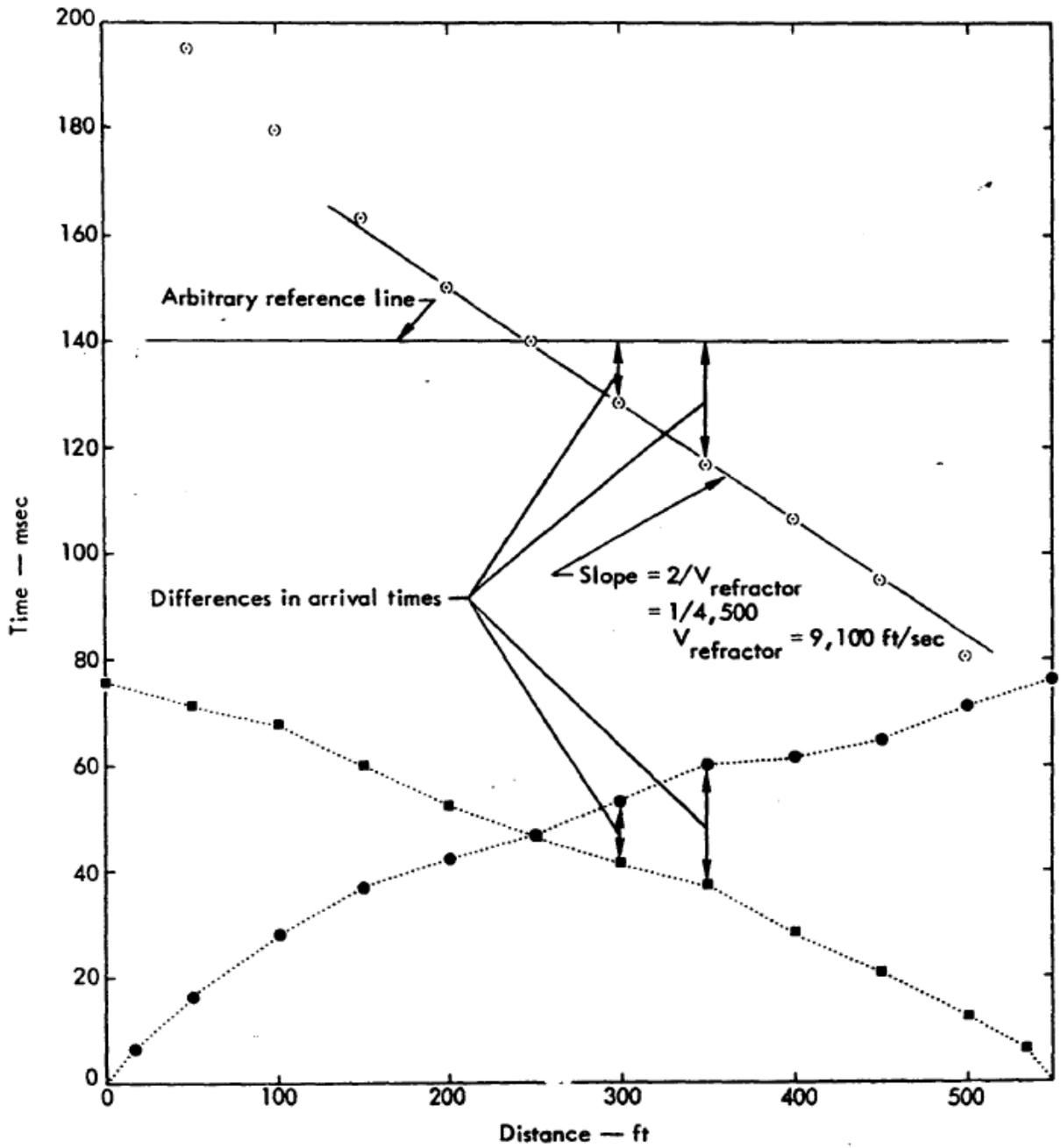


Figura 13. Método para determinar la velocidad real del refractor al trazar las diferencias de los tiempos de llegada.

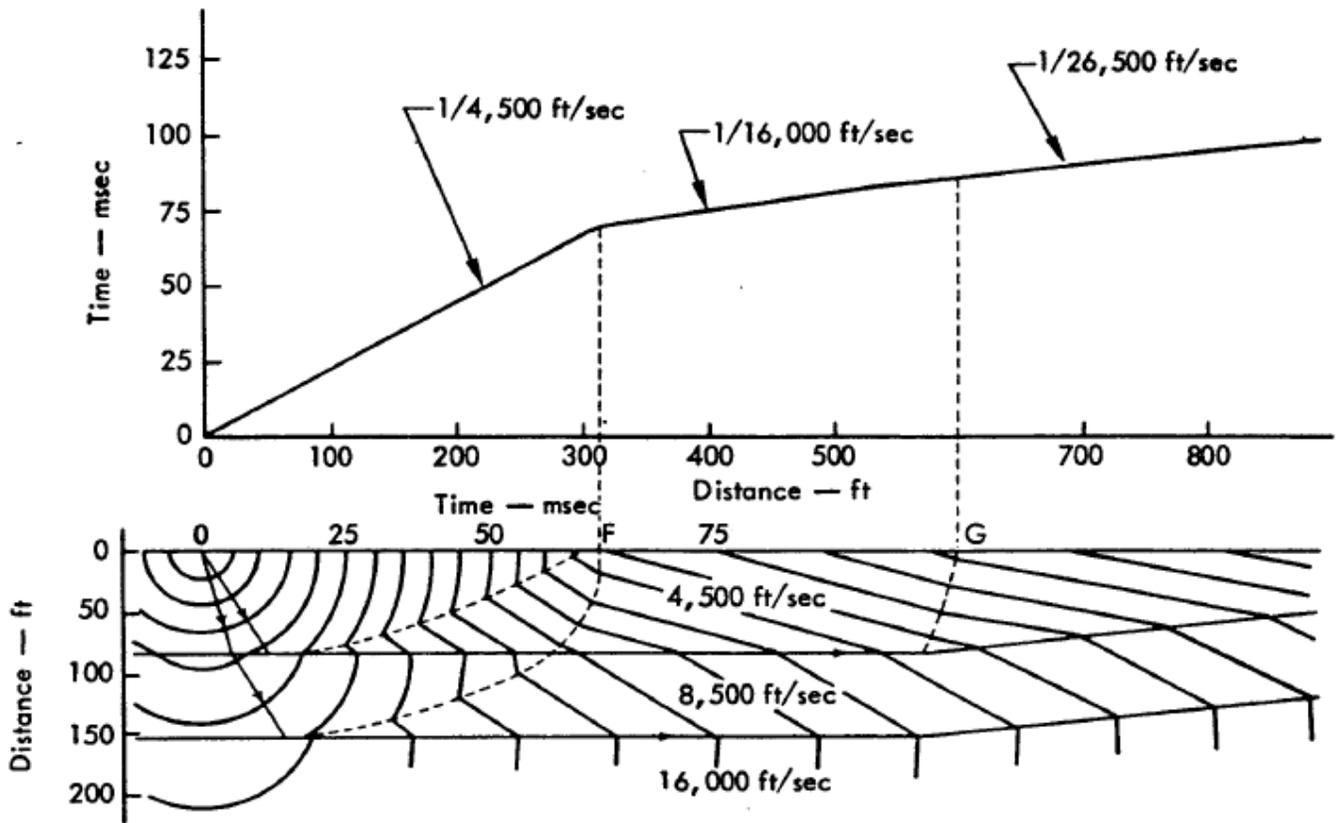


Figura 14. Diagrama de frente de onda y espesor máximo "indetectable" de "zona ciega" (tomado de la Figura 4, p. 326 de Soske<sup>4</sup> - utilizado con permiso).

Supongamos que una interpretación directa de una curva de tiempo-distancia da como resultado algún valor para  $Z_1$ . Este es el valor máximo de  $Z_1$ , y se obtiene ignorando la posibilidad de que exista una capa intermedia. Sin embargo, si hay una zona ciega, habrá un número infinito de combinaciones de  $Z_1$  y  $Z_2$ , con  $Z_2$  hasta su espesor máximo indetectable, cuyo valor  $Z_1$  será mínimo. El grosor combinado de las dos primeras capas ( $Z_{12}$ ) puede encontrarse entre los límites:

$$Z_{12}(\min) = Z_1(\max) + 0,$$

Y

$$Z_{12}(\max) = Z_1(\min) + Z_2(\max),$$

Donde  $Z_2(\max)$  es el espesor máximo e indetectable de la segunda capa y  $Z_1(\max)$  es el valor de  $Z_1$  obtenido de la curva de tiempo-distancia. Basado en el material en las Referencias. 5 y 6, se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

$$Z_2(\max) = \frac{RS}{R+S} Z_1(\max), \quad (17)$$

$$Z_1(\min) = Z_2(\max)/R, \quad (18)$$

where:

$$R = \frac{Z_2}{Z_1},$$

Y se obtiene de la tabla en la Figura 15, y

$$S = \frac{\tan \alpha_{23}}{\tan \alpha_{13}},$$

Donde:

$$\alpha_{23} = \sin^{-1} V_2 / V_3,$$

$$\alpha_{13} = \sin^{-1} V_1 / V_3.$$

Como ilustración del procedimiento para determinar  $Z_2$  (máx.), Considere el siguiente ejemplo: un diagrama de tiempo-distancia muestra dos velocidades, 2.300 y 14.000 pies / seg, y se sospecha que hay una capa oculta entre la velocidad baja (2.300 pies / seg) y el refractor de 14.000 pies / seg. Se obtiene un valor para  $Z_1$  de 37 pies a partir de la curva de tiempo-distancia. Si suponemos que una velocidad probable para la zona ciega sospechada es de 7.500 pies / seg, ¿qué tan gruesa podría ser y aún no ser detectada por los primeros en llegar? A partir de la información disponible y el valor supuesto de  $V_2$ , podemos escribir:

$Z_1$  (máx.) = 37 pies (determinado a partir de la curva de tiempo-distancia por un tiempo de intercepción)

$$\alpha_{12} = \sin^{-1} \frac{2,300}{7,500} = 17.9 \text{ deg}$$

$$\alpha_{23} = \sin^{-1} \frac{7,500}{14,000} = 32.5 \text{ deg}$$

$$\alpha_{13} = \sin^{-1} \frac{2,300}{14,000} = 9.5 \text{ deg.}$$

En la Figura 15, determinamos el valor de R localizando la intersección de  $\alpha_{12} = 17.9$  grados y  $\alpha_{23} = 32.5$  grados, e interpolando entre las líneas R; Se ve que R es aproximadamente 0,62. Para encontrar el valor de S:

$$S = \frac{\tan \alpha_{23}}{\tan \alpha_{13}} = \frac{\tan 32.5 \text{ deg}}{\tan 9.5 \text{ deg}}$$

$$= \frac{0.64}{0.167} = 3.8;$$

Para que de la Ec. (17):

$$Z_2(\text{max}) = \frac{0.62 \times 3.8}{0.62 + 3.8} 37$$

$$\approx 20 \text{ ft,}$$

and from Eq. (18):

$$Z_1(\text{min}) = \frac{20}{0.62}$$

$$\approx 32 \text{ ft.}$$

Por lo tanto, el grosor máximo indetectable de la capa oculta es de 20 pies, y el grosor combinado de las dos primeras capas puede variar desde un mínimo de 37 pies (sin capa intermedia) hasta un máximo de 52 pies; es decir,  $Z_1$  (min) +  $Z_2$  (max).

El problema de la capa oculta puede ser un serio inconveniente para los estudios superficiales con el sismógrafo de refracción. La posibilidad de la existencia de una capa de este tipo enfatiza la conveniencia de realizar una perforación exploratoria junto con estudios sísmicos, siempre que sea posible.

Otro problema funcional que puede ocurrir en los estudios de refracción es la existencia de una inversión de velocidad que dará como resultado cálculos erróneos de profundidades a los lechos subyacentes. Puede existir una inversión de velocidad debido a una capa de baja velocidad o debido a una capa de alta velocidad. En cualquier caso, las velocidades no aumentan progresivamente con la profundidad, y en algún punto de la estratigrafía hay una transición descendente a una velocidad relativamente más baja. Esto tiene el efecto de refractar el rayo sísmico hacia abajo hacia la vertical como se muestra en la Figura 16. Las refracciones de una capa de tan baja velocidad no se pueden detectar en la superficie, y la existencia de esta capa no se puede determinar a partir de la curva de tiempo-distancia. De hecho, el rayo no volverá a la superficie hasta que encuentre una capa con una velocidad más alta que cualquier capa encontrada previamente en su recorrido hacia abajo.

En ciertas circunstancias inusuales, en las que aumenta la velocidad del lecho que recubre inmediatamente la capa de baja velocidad con la profundidad, una "zona de sombra" puede resultar en la superficie donde no se detectan los primeros arribos, y en similares circunstancias, la curva de tiempo-distancia puede mostrar un salto repentino en el tiempo a una distancia específica.<sup>5,7</sup>

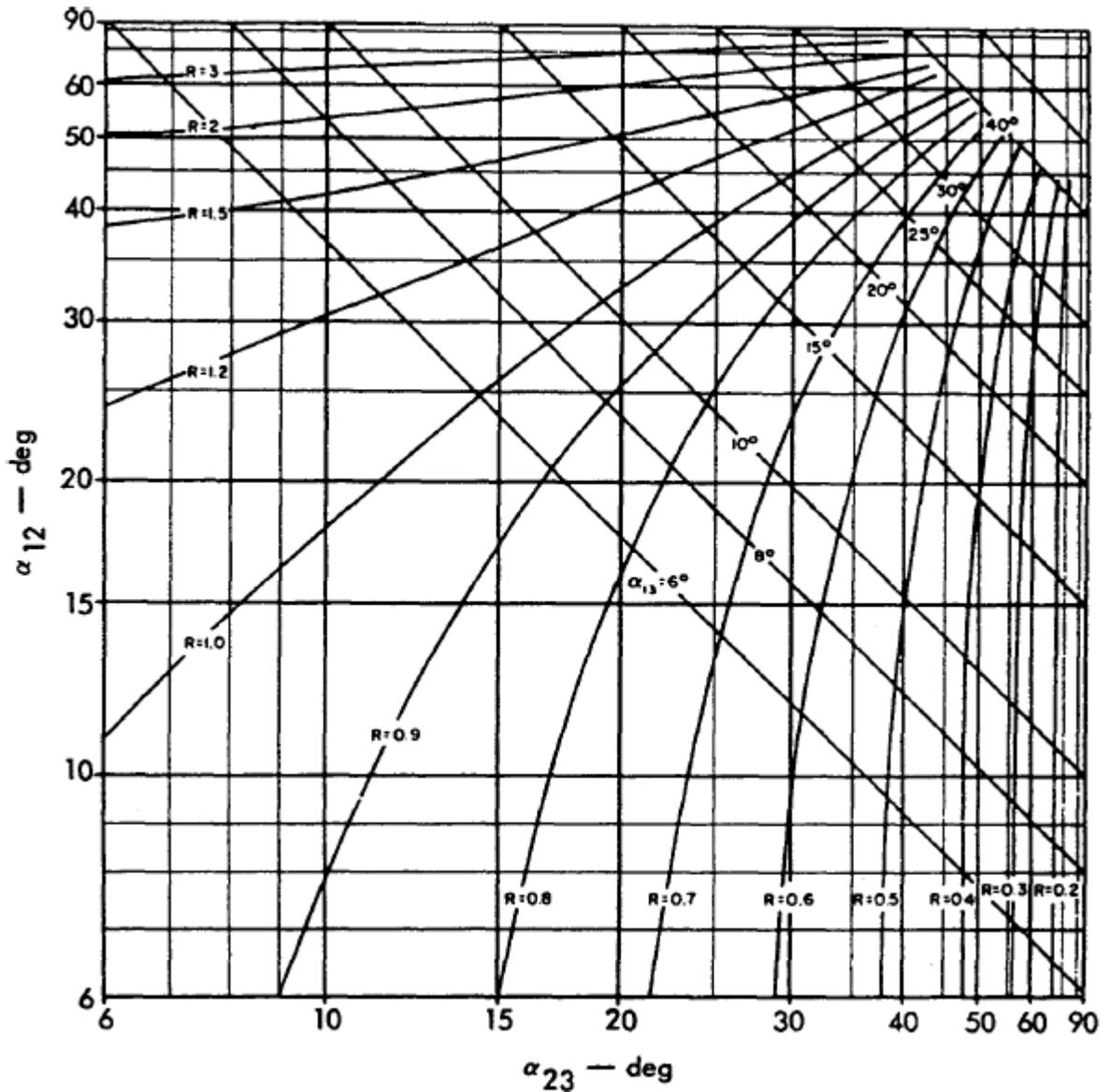


Figura 15. Nomografía que se utilizará para determinar el grosor máximo de la posible capa oculta (tomada de la Fig. 90 (b), p. 148, de Leet5, basada en Maillet y Bazerque, "La Prospección seismique du sons-sol" Annales des Mines, XX, Serie Douzieme, p. 314, 1931).

El efecto de una capa de baja velocidad hace que las profundidades calculadas sean más grandes que las profundidades reales. Si se conoce la presencia y la velocidad de una capa de baja velocidad, la capa se puede compensar en los cálculos, pero su existencia debe determinarse mediante un método más directo, como un estudio de sísmica de pozo "up-hole". Afortunadamente, las inversiones de velocidad rara vez se encuentran en estudios superficiales.

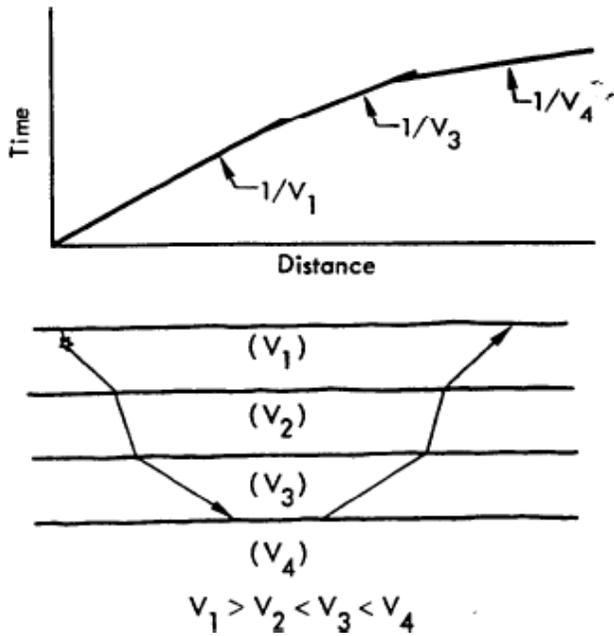


Figura 16. Inversión de velocidad y curva de tiempo-distancia correspondiente.

Hay un tercer tipo de situación de velocidad-profundidad, un aumento continuo de la velocidad con profundidad que rara vez ocurre pero que amerita una breve discusión. Este tipo de situación puede existir debido a una geología finamente estratificada o debido a una disminución progresiva de la intemperie con la profundidad. Un aumento continuo de la velocidad con la profundidad se manifestará en una curva de tiempo-distancia similar a la que se muestra en la Figura 17.

Este tipo de curva se puede transformar en una curva de velocidad - profundidad mediante la siguiente ecuación: <sup>8</sup>

$$Z_S = \frac{1}{\pi} \int_0^S \cosh^{-1} \frac{V_S}{V_X} dX, \quad (19)^*$$

Donde:

$Z_S$  = Profundidad a velocidad  $V_S$

$V_S$  = Velocidad (de la curva tiempo-distancia) correspondiente a una distancia  $S$  desde el punto de disparo.

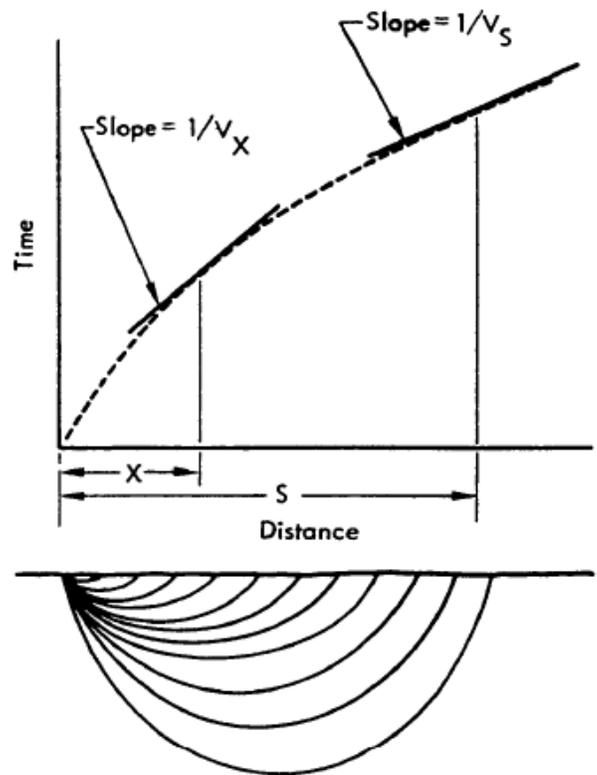


Figura 17. Esquema de las trayectorias de los rayos y la curva de tiempo-distancia, para un aumento continuo de la velocidad con la profundidad.

La integral se evalúa gráficamente eligiendo una distancia particular  $S$  y la velocidad  $V_S$  correspondiente, obtenida de la tangente a la curva de tiempo-distancia en  $S$ , y trazando los valores de  $\cosh^{-1}(V_S / V_X)$  contra  $X$ , donde  $X$  es cualquier distancia menor que  $S$ . El área bajo la curva resultante (obtenida con un planímetro) se multiplica por  $1 / \pi$  para determinar la profundidad,  $Z_S$ , a la cual la velocidad es  $V_S$ . La integración se repite para valores decrecientes de  $S$ , y el gráfico se puede construir a partir de la variación de la velocidad con la profundidad. El método es tedioso y solo debe usarse cuando hay un aumento suave y continuo de la velocidad con la profundidad. A menudo, los incrementos graduales de velocidad se pueden interpretar suponiendo que la gráfica curva de tiempo-distancia se compone de unos pocos segmentos en línea recta.

\* Esta es la ecuación "Herglotz-Weichert-Bateman"

## OTROS PROBLEMAS Y LIMITACIONES

Esta sección del informe describe algunos de los inconvenientes y dificultades que pueden afectar las investigaciones de refracción sísmica. La siguiente discusión no pretende dejar al lector con una impresión desfavorable del método de refracción, sino simplemente alertarlo sobre algunos posibles problemas que pueden influir en los resultados de un estudio de refracción sísmica. El sismógrafo de refracción es una herramienta de exploración muy poderosa, y su valor será mejorado por un operador realista y experto. La referencia 9 es un excelente resumen de los problemas de las investigaciones sísmicas a poca profundidad y será de interés para los ingenieros o geólogos que utilizan habitualmente la sísmica de refracción; Gran parte del siguiente material se basa en esta referencia.

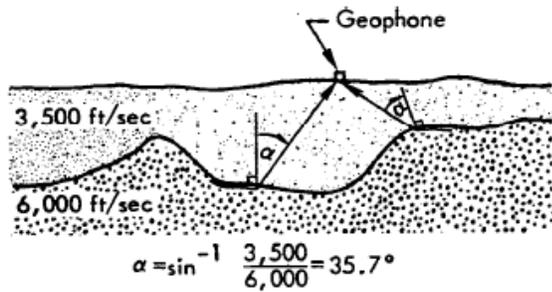
En general, a medida que la profundidad de investigación se vuelve menos profunda, se abordan los límites del método y aumentan los problemas inherentes al mismo. Una gran proporción de los estudios de refracción sísmica con fines de ingeniería están relacionadas con profundidades del orden de 50 a 75 pies y tiempos totales de 50 a 100 ms. Es evidente entonces que un milisegundo es una gran unidad de tiempo, y los tiempos de llegada deben seleccionarse con una precisión de un milisegundo o menos. Esto significa que el peso de la carga, su medio circundante y el acoplamiento, las ganancias del amplificador y la ubicación de los geófonos son factores importantes para obtener los cambios bruscos necesarios para un cronometraje preciso de las primeras llegadas. Un error de 1 mseg corresponde a solo 1 pie de profundidad con una velocidad de primera capa de 2.000 pies / seg, pero el error sería de 5 pies para un material de primera capa con una velocidad de 10.000 pies / seg.

Es necesario mantener un control estricto de las velocidades y profundidades de la capa meteorizada, particularmente para distinguir el tiempo de viaje en la capa meteorizada del tiempo en capas subyacentes de mayor velocidad. Esto es particularmente cierto cuando hay más de dos capas. Los depósitos de capas meteorizadas no consolidados con frecuencia muestran cambios laterales en la velocidad en distancias relativamente cortas, y casi siempre es deseable disparar al menos un disparo intermedio entre los extremos de la línea.

En general, cuando se trabaja con líneas cortas, digamos 500 pies o menos, no será un problema obtener cambios bruscos, a menos que haya dificultades para enterrar suficiente explosivo con la profundidad suficiente. Debido a la atenuación del impulso explosivo con el aumento de la distancia, y particularmente debido a la atenuación relativamente mayor de los componentes de alta frecuencia, las llegadas tienden a ser menos distintas y más redondeadas al aumentar la distancia desde el disparo. El objetivo es determinar los tiempos de llegada dentro de 1 ms o menos, y elegir lo que parece ser el inicio del pulso. La presencia de ruido de fondo, como el generado por el tráfico de vehículos, o las llegadas débiles causadas por un acoplamiento de carga deficiente, pueden dificultar las determinaciones precisas.

Las irregularidades en la superficie de un lecho roca poco profunda tienen un efecto más pronunciado sobre la precisión que las irregularidades en un horizonte más profundo. Una superficie de refractor altamente irregular tenderá a hacer que los métodos de tiempo de retraso sean algo imprecisos porque los tiempos que se comparan representan diferentes profundidades, dependiendo de la dirección del disparo. Esta situación se representa en la Figura 18. El efecto del uso de tiempos de retraso para calcular las profundidades será "suavizar" una superficie altamente irregular. La situación se agrava si los contrastes de velocidad no son grandes; es decir, si los desplazamientos horizontales entre el geófono y el punto en el que el rayo emerge del refractor ( $\cong Z \tan \alpha$ ) son grandes.

Surgen complicaciones adicionales si la superficie de la roca no solo está erosionada e irregular, sino que también está meteorizada. En este caso, la superficie de la roca no será un límite bien definido, sino más bien una zona de transición. En el caso de una roca estratificada, algunas de las capas pueden ser mejores medios para la transmisión de energía sísmica y las refracciones pueden no ser necesariamente desde la parte superior de la roca. Además, a medida que aumenta la distancia desde el disparo, la energía de frecuencia más alta (es decir, longitud de onda más corta) se absorbe progresivamente y debido a la longitud de onda creciente de la señal, la energía puede refractar desde lechos progresivamente más gruesos. Es necesario tener en cuenta que la longitud de onda se convierte en un factor significativo cuando el refractor tiene un espesor limitado. Las señales sísmicas de onda larga no "ven" lechos delgados.



**Figura 18. Esquema de una superficie refractora irregular y poco profunda que produce diferentes tiempos de viaje en la primera capa en el mismo geófono a partir de disparos a ambos lados.**

Algunos materiales pueden ser anisotrópicos, i. e., puede haber diferencias entre velocidades horizontales y verticales, o incluso entre velocidades horizontales en diferentes direcciones. Estas diferencias pueden ser tan grandes como 40% en algunos materiales. Las rocas con estructura de lecho fino, como areniscas y lutitas, generalmente exhiben cierto grado de anisotropía.

No hay una guía infalible y rápida para una secuencia de pasos a seguir al interpretar o reducir las curvas de tiempo de viaje. Los gráficos simples de dos o tres capas con segmentos de línea recta bien definidos que representan cada capa probablemente serán la excepción y no la regla. Las velocidades de la capa meteorizada pueden cambiar a lo largo de la línea, puede haber relieve en los horizontes de refracción, las capas pueden acuñarse y los puntos de ruptura (es decir, distancias críticas) en las gráficos pueden no ser fácilmente aparentes.

El primer paso es intentar identificar las capas presentes de acuerdo con sus velocidades, y luego determinar qué tiempos de llegada corresponden a las diversas capas. Cuando las llegadas no se alinean en líneas rectas, se puede intentar la identificación trazando diferencias en los tiempos de llegada superpuestos para aquellos que se cree que provienen del mismo refractor. Además, los tiempos de retraso se pueden calcular y trazar por debajo de los tiempos de llegada, y las alineaciones, o la falta de ellas, de los tiempos reducidos ayudarán a asignar velocidades a las diversas capas y a clasificar los tiempos de llegada.

En el mismo contexto en el que no existe una secuencia estándar de pasos interpretativos, el intérprete no debería sentirse limitado por un formato rígido, sino que debería intentar varios métodos de acuerdo con su criterio. Algunos conocimientos de geología son útiles para conciliar la interpretación con lo que es razonable desde el punto de vista de la geología estructural.

Algunos datos de refracción obtenidos en geología compleja serán muy desconcertantes para el intérprete. Siempre hay una razón por la cual los tiempos de llegada son como son, aunque no siempre es evidente. Algunos casos simplemente no son susceptibles de interpretación directa utilizando los métodos ya descritos. Existen otras técnicas, que generalmente involucran la construcción de diagramas de frente de onda,<sup>10,11</sup> que están disponibles para analizar casos complejos; sin embargo, requieren mucho tiempo y son tediosos de aplicar, y están más allá del alcance de este informe.

Domalski<sup>9</sup> afirma: "La dificultad básica en la interpretación de un estudio sísmico de refracción superficial consiste no tanto en la elección de un método adecuado, en el cual basar la interpretación, sino en la decisión correcta con respecto a los diversos aspectos de los resultados. En otras palabras, la información que normalmente se obtiene del análisis de las curvas de tiempo-distancia no puede aceptarse por completo en su valor nominal". Concluye su artículo con una nota más positiva diciendo: "Los resultados obtenidos de investigaciones superficiales de refracción sísmica son útiles porque proporcionan rápidamente una imagen de la configuración de la roca competente y guían un programa de perforación posterior".

Como se indicó al comienzo de esta sección, esta discusión sobre problemas potenciales tenía la intención de alertar al lector sobre posibles dificultades y no desalentar la aplicación de la técnica. De hecho, se cree que el método no se usa suficientemente en los programas de exploración. Cuando el sismógrafo de refracción se usa sabiamente, y particularmente cuando se integra con la exploración directa (perforación), invariablemente acelerará la recuperación de la información del subsuelo y reducirá los costos de investigación del sitio.

## TÉCNICAS ADICIONALES

El sismógrafo de refracción es fundamentalmente un dispositivo de sincronización preciso y puede utilizarse en situaciones de exploración distintas de los estudios de refracción de rutina a lo largo del suelo. El método se puede modificar para usarlo sobre el agua, y el equipo se puede usar para medir velocidades en perforaciones. Esta sección discutirá algunas de estas técnicas.

El primer problema a considerar es el de realizar un estudio de refracción a través de un río. El procedimiento normal requeriría que se coloque una línea de detectores (geófonos) en el fondo del río o que flote sobre la superficie del agua. Ambos procedimientos requieren cables y detectores especiales y, por lo tanto, a menudo no son prácticos. Sin embargo, debido a que el disparo y el detector son teóricamente intercambiables en la sismica de refracción, la disposición normal de tener detectores a lo largo de una línea a través del río con disparos en las orillas se puede revertir para que los detectores estén en las orillas y los disparos en el río. Esta disposición se ilustra en la Figura 19

Una serie de pequeñas cargas son detonadas en el fondo del río a lo largo de una línea a través del río. Se requiere que el detector en el banco lejano del sismógrafo esté conectado al instrumento de grabación por medio de un cable que cruza el río. Se requiere, además, que la distancia del disparo desde los detectores sea inspeccionada y conocida, y que el disparo instantáneo se transmita al sismógrafo. Esto último puede hacerse por cable duro o, si el equipo está disponible, por transmisión de radio. La práctica habitual es realizar los disparos desde un bote pequeño y ubicar su posición mediante triangulación de tránsito. No es necesario que los disparos se realicen a incrementos uniformes de distancia a través del río. En algunos casos, la distancia del disparo al detector se ha determinado registrando la llegada directa del impulso explosivo a través del agua. Si los detectores se colocan muy cerca del borde del agua, la llegada del choque a través del agua a menudo se puede ver en el registro como una señal de alta frecuencia. Con la velocidad del agua conocida ( $\pm 4.800$  pies / seg), la distancia al disparo se determina fácilmente. Los tiempos y distancias de llegada se trazan e interpretan de la manera normal. Este método es una técnica conveniente para la exploración del sitio de la presa cuando se necesita conocer el espesor de los depósitos del fondo del río.

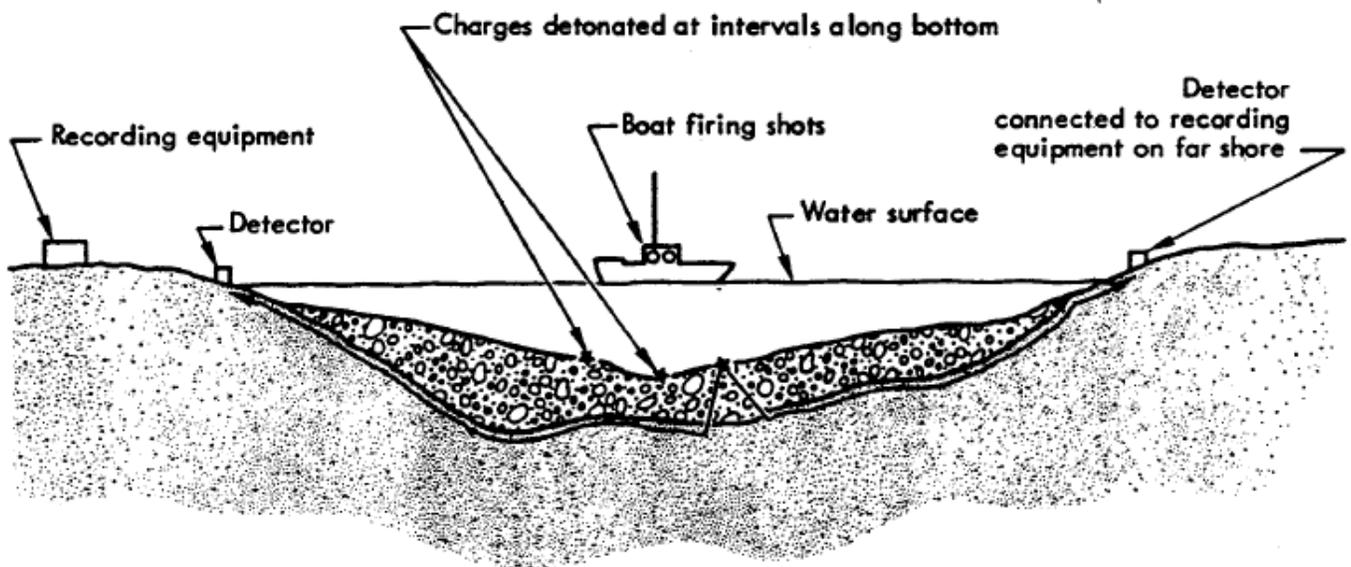


Figura 19. Esquema de estudio sísmico de refracción en un cuerpo de agua.

En algunos casos de prospecciones sobre el agua, puede que no sea posible colocar detectores en el suelo simplemente porque el cuerpo de agua es demasiado grande, como en el caso de una bahía o un lago. En estos casos, será necesario emplear un cable flotante o sumergido con hidrófonos en lugar de geófonos. El cable flotante tiene la ventaja de que puede ser remolcado a lo largo de la línea de exploración. De cualquier manera se requerirán dos barcos, uno que contenga los instrumentos de grabación y de remolque del cable y el otro que se use como un barco de disparo. Un descanso de tiempo transmitido por radio es una necesidad para este tipo de trabajo. Para este caso, el tiempo de corte (Trigger de registro) requiere ser transmitido vía radio.

Es posible que los sedimentos del fondo sueltos y no consolidados en bahías y estuarios tengan una velocidad menor que la del sonido en el agua y, en tal caso, la llegada directa a través del agua oscurecerá la llegada de energía a través de los sedimentos. En ese caso, se requiere un filtro especial de paso bajo para bloquear la llegada de alta frecuencia a través del agua.

El sismógrafo de refracción se puede utilizar para medir velocidades verticales en pozos. Tales estudios Up-hole son un complemento valioso para la exploración de refracción convencional porque proporcionan un perfil de velocidad vertical e indicarán la presencia de una capa de baja velocidad, si existe. El término Up-hole se refiere a colocar disparos en un pozo de perforación y registrar los tiempos de llegada a la superficie. El reverso de este procedimiento se llama Down-hole y se realiza disparando a la superficie y registrando las llegadas al fondo del pozo, generalmente por medio de un cable multi-detector. Los estudios Down-hole requieren que el orificio esté lleno de fluido o que esté disponible un geófono capaz de acoplarse a la pared del orificio. Los principios son los mismos en ambos casos, pero un estudio Up-hole, que tiene la ventaja de no requerir equipo especial, generalmente destruye el pozo.

En la práctica, se pre-ensamblan una serie de pequeñas cargas explosivas para que las cargas se distribuyan en los intervalos deseados. Cada carga tiene una línea de disparo separada y todo el conjunto se suspende en el hoyo y se descarga completamente para evitar que los explosivos salgan del hoyo. El intervalo entre cargas dependerá de la profundidad del agujero y la cantidad de detalles deseados. Los espacios de carga de 5 a 10 pies son típicos para

agujeros de 50 a 100 pies de profundidad, y es evidente que las cargas deben detonarse una por una en una secuencia que comienza en la parte inferior; de lo contrario, se cortarían las líneas de disparo. Los pesos de carga del orden de 1/4 lb o menos son típicos. Se colocan varios geófonos cerca del collar del agujero, digamos de 5 a 10 pies de distancia, y se usa el tiempo promedio de llegada. La disposición para un levantamiento de pozo se muestra en la Figura 20 junto con la gráfica de los tiempos de llegada medidos en la superficie. La distancia inclinada desde el disparo hasta los geófonos debe usarse para los disparos cerca de la parte superior del hoyo.

Se notará que las velocidades derivadas de los tiempos de llegada en la Figura 20 no siempre corresponden exactamente a las velocidades nominales de las diversas capas. Las diferencias entre las velocidades reales y las basadas en los tiempos de llegada que se muestran en la Figura 20 son representativas de la precisión que se espera en el levantamiento de pozo típico. Además, no es raro que exista una discrepancia entre las velocidades obtenidas de un estudio de velocidad de pozo y las observadas en los estudios de refracción. Hay varias razones para tal discrepancia. Como se indicó anteriormente, algunos materiales muestran anisotropía en sus velocidades sísmicas, particularmente sedimentos finamente depositados. Además, una capa de baja velocidad no será evidente en una curva de tiempo-distancia de refracción, pero se detectará en un sondeo de pozo. Si existe una discrepancia, generalmente no es grande y, a menos que se deba a una capa de baja velocidad, generalmente no es necesario corregir los estudios de refracción sobre la base de los datos de velocidad del pozo.

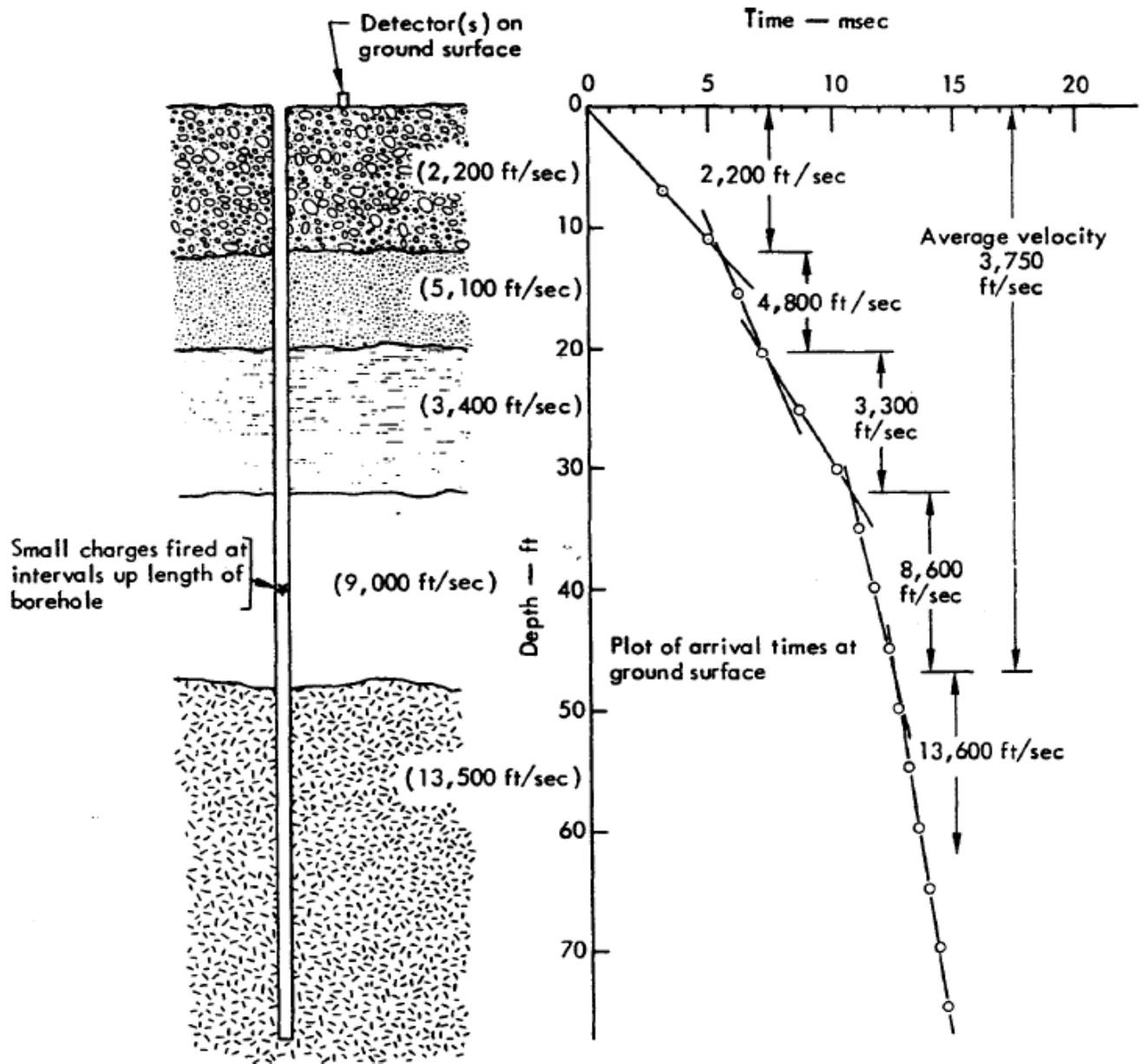


Figura 20. Ejemplo de un ensayo Up-hole y correspondientes tiempos de llegada.

Meissner<sup>13</sup> desarrolló una variación interesante del ensayo Up-hole, en el que una línea sísmica convencional se coloca radialmente lejos del collar del agujero para que los tiempos de llegada de cada disparo de fondo se registren a lo largo de todo el tendido sísmico. Los frentes de onda de la energía sísmica se construyen conectando puntos de tiempos de viaje iguales. Se supone que el tiempo de viaje desde un disparo a profundidad Z hasta un geófono en la superficie a una distancia X del hoyo es el mismo que desde un disparo (ficticio) en la parte superior del hoyo hasta un geófono (ficticio) a una distancia X y

una profundidad Z. A menos que las capas sean razonablemente planas y el terreno esté nivelado, esta suposición conducirá a errores.

Se genera una curva de tiempo de viaje por cada disparo del ensayo Up-hole. Los frentes de onda se construyen trazando los tiempos de llegada en cada geófono a una profundidad debajo de la ubicación de ese geófono igual a la profundidad del disparo en el hoyo. Los puntos de tiempos de viaje iguales se contornean para dar un diagrama de frente de onda.

En la Figura 21 se muestran dos ejemplos de los resultados de esta técnica. El método proporciona una imagen cualitativa de las condiciones del subsuelo como un complemento de la información estándar de fondo de pozo. Meissner presenta ejemplos de diagramas de frente de onda para otras condiciones geológicas en su artículo.<sup>13</sup>

Las principales fuentes de error en esta técnica son las pequeñas heterogeneidades locales dentro de la capa cercana a la superficie y la presencia de capas buzantes de alta velocidad. Además, un cambio de elevación a lo largo de la línea sísmica impone un retraso o un avance en todos los tiempos de frente de onda debajo de la línea; por lo tanto, este tipo de ensayo debería llevarse a cabo en terreno plano si es posible

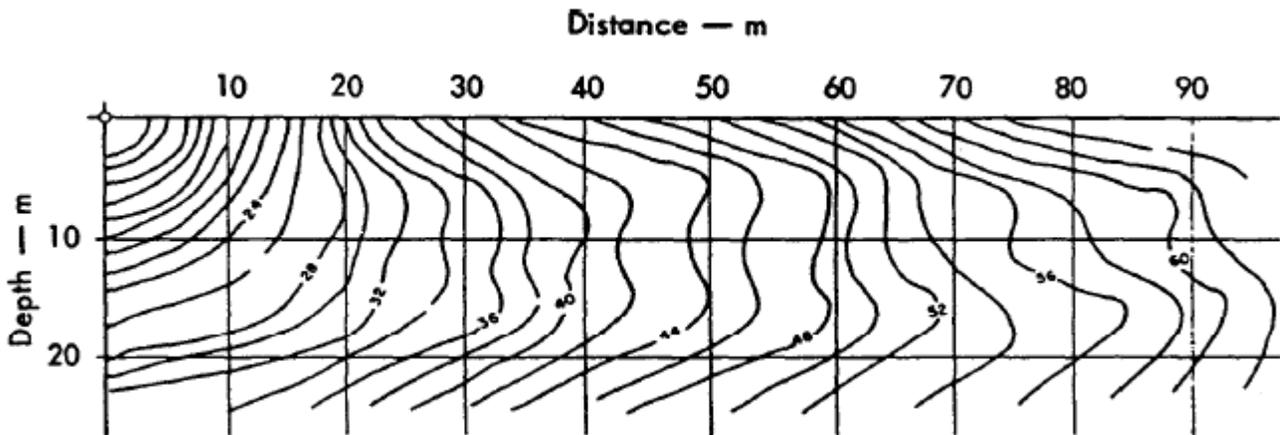


Figura 21a. Diagrama de frente de onda de Meissner mostrando cada de alta velocidad a una profundidad de 5 a 16 metros (Tomado de Figura 5, p. 536, de Meissner<sup>13</sup>- Utilizado con permiso del autor)

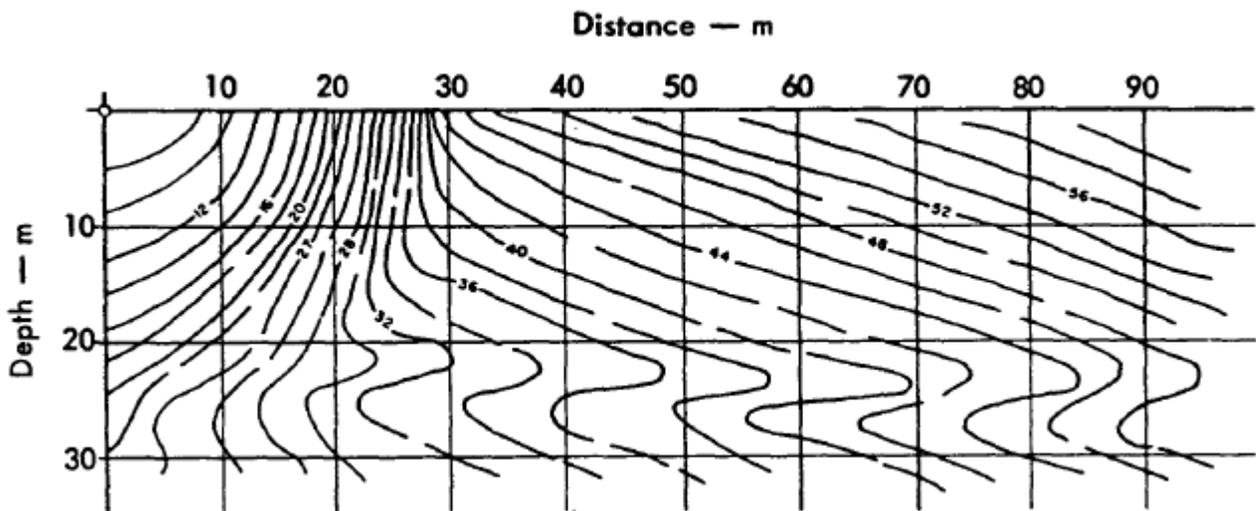


Figura 21b. Diagrama de frente de onda de Meissner mostrando cada capas delgadas de alta y baja velocidad (Tomado de Figura 6, p. 537, de Meissner<sup>13</sup>- Utilizado con permiso del autor)

## Procedimientos de campo

Esta sección recomienda procedimientos generales de campo para realizar estudios sísmicos de refracción. La primera consideración en un estudio de refracción es el intervalo entre los geófonos. El espacio dependerá de la profundidad de exploración y del detalle del subsuelo deseado. Como regla general, la longitud total de la extensión debe ser de tres a cinco veces la profundidad máxima prevista. Se pueden hacer cambios en el espacio entre geófonos en respuesta a los datos observados en el campo; es decir, seleccionando y trazando registros a medida que se obtienen. La longitud total de extensión obviamente determinará el intervalo de geófono en cierta medida; sin embargo, no es necesario tener un espaciado constante a lo largo de la línea. A veces es conveniente acortar el espacio entre geófonos en cada extremo de la línea, al menos para las primeras líneas que se ejecutan en una nueva área. Esta práctica proporcionará datos más completos sobre las velocidades de la capa meteorizada.

Los cables sísmicos se fabrican con separaciones fijas; es decir, el conector de "extracción" o polarizado para cada detector está moldeado en el cable. Es deseable tener varios cables disponibles con diferentes espacios, como 25, 50 y 100 pies. El espacio de 25 pies es más aplicable a la mayoría de los estudios de ingeniería, que rara vez se dirigen a exploraciones de más de 50 o 100 pies.

El cable se extiende a lo largo del suelo en línea recta. Si el terreno a lo largo de la línea tiene algún relieve, se requerirán levantamientos topográficos para que los espesores de las capas se puedan trazar más tarde en verdadera elevación.

Los disparos en los extremos del cable deben estar desplazados en ángulo recto con respecto al cable y no más allá del extremo en línea con el cable. Esta disposición se ilustra en la Figura 22. El propósito del desplazamiento en ángulo recto es permitir la determinación de los tiempos totales; es decir, el tiempo de viaje desde cada toma hasta el geófono lejano. El tiempo de viaje desde un disparo más allá del extremo del cable, en línea con él, será mayor que el tiempo total. La distancia de desplazamiento, generalmente de 5 a 15 pies, normalmente proporciona una llegada directa a través de la capa superficial y permite determinar su velocidad. Las distancias inclinadas desde el disparo hasta el

geófono se deben calcular para trazar los tiempos de llegada en los primeros dos o tres geófonos.

Como se discutió en la sección sobre interpretación, siempre es aconsejable realizar disparos suplementarios a lo largo de la línea para proporcionar tanta información como sea posible sobre la profundidad de la capa meteorizada y las posibles variaciones de su velocidad. La necesidad de estos disparos se puede determinar a medida que avanza el estudio; sin embargo, debería ser un procedimiento estándar disparar al menos un disparo en el centro del cable sísmico, incluso para líneas cortas con un espacio de 25 pies.

No existe una regla fija para la distancia que debe estar un disparo más allá del final desde el extremo del cable. En la mayoría de los casos, ni siquiera es necesario medir la distancia porque generalmente estamos interesados solo en los tiempos relativos obtenidos de tal disparo. El objetivo de un disparo más allá del final es registrar las llegadas refractadas desde la capa que estamos tratando de mapear, y registrar esas refracciones en tantos geófonos como sea posible. Una distancia entre la mitad de la longitud del cable y la longitud total del cable suele ser adecuada. Si se van a inspeccionar varias líneas de refracción de extremo a extremo, es aconsejable ubicar los disparos más allá del extremo exactamente a la mitad de la longitud del cable o una longitud de cable completa desde el extremo; es decir, para que coincidan con el disparo medio o final del conjunto de geófonos adyacente.

Los puntos de datos deben trazarse en una escala conveniente; generalmente es mejor si las escalas de tiempo y distancia son aproximadamente de la misma longitud. Es útil si se utilizan diferentes símbolos para designar los tiempos de llegada de cada disparo; Esto ayuda particularmente a evitar confusiones cuando las curvas de tiempo-distancia se cruzan entre sí. Se sugiere que se usen líneas tenues y discontinuas para conectar todos los tiempos de llegada de cada disparo. Las partes en línea recta de las gráficas, si las hay, pueden unirse mediante líneas más gruesas, proyectadas hacia atrás para intercepciones de tiempo y etiquetadas con sus velocidades correspondientes.

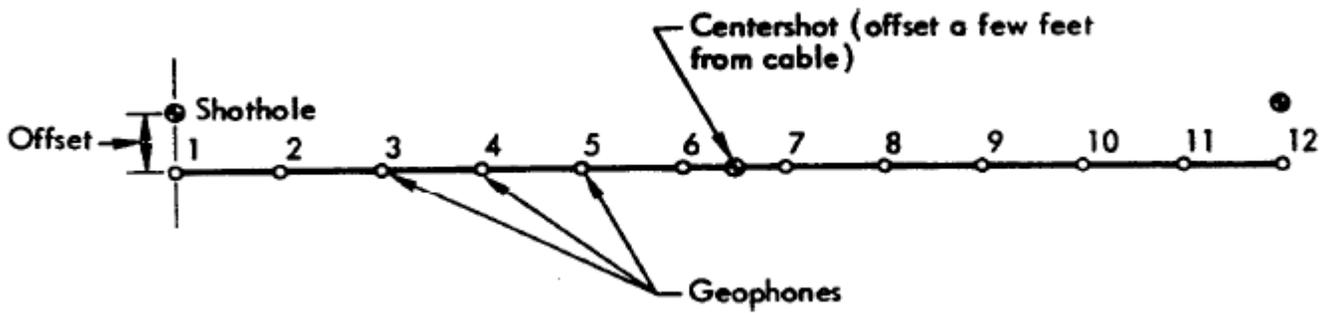


Figura 22. Patrón de disparos recomendado para líneas sísmicas de refracción.

Los pesos de carga explosiva adecuados para producir primeros arribos bien definidos variarán con la geología, la longitud de la línea y la cantidad de ruido de fondo. Los pesos pueden variar desde solo una capsula fulminante para una línea de 100 pies hasta varias libras para líneas largas en condiciones adversas. Generalmente, unas pocas onzas en un hoyo poco profundo de 1 o 2 pies serán adecuadas para una línea de 275 pies. El acoplamiento de la energía explosiva se puede mejorar enterrando las

cargas más profundamente y saturando el pozo con agua. Un orificio de emplazamiento a menudo se puede formar con una barra de acero pesada clavada en el suelo. La Figura 23 muestra un registro sísmico de una línea de 275 pies en el que se obtuvieron primeros arribos adecuados en cada geófono. Nótese el redondeo de los primeros arribos al aumentar la distancia desde el disparo.

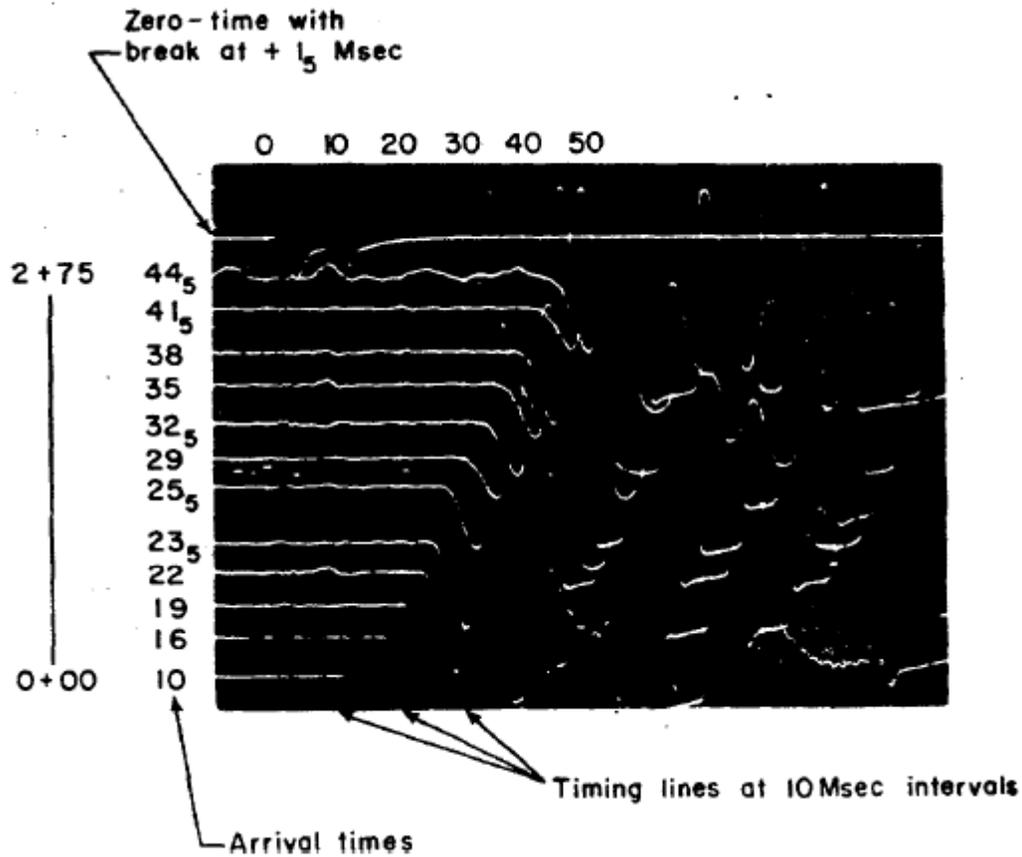


Figura 23. Ejemplo de registro sísmico en película Polaroid obtenido con sismógrafo portátil para ingeniería.

Las capsulas fulminantes especiales están hechas para trabajos sísmicos; por ejemplo, Dupont SSS o Atlas Staticmaster. Debe evitarse el uso de capsulas estándar "instantáneas" porque pueden tener un retraso de hasta 15 ms entre la aplicación de la corriente y la detonación, y además, este retraso no es constante. Casi todos los sismógrafos indican tiempo cero cuando se aplica la corriente a la capsula. Los casquillos especiales del sismógrafo detonarán en menos de 1 mseg después de la aplicación de corriente. Los geófonos deben estar firmemente acoplados al suelo. Hay una variedad de bases de geófonos, como una espiga o un trípode, para adaptarse al tipo de superficie del suelo. La base tipo espiga es probablemente la más común; la espiga se empuja hacia el suelo para proporcionar un acoplamiento rígido con la superficie del suelo.

Se recomienda mínimo un sismógrafo de 12 canales que produzca un registro visual de las formas de onda que llegan a cada geófono sobre los sismógrafos de un solo canal que están disponibles para investigaciones superficiales. Estos pequeños instrumentos de un solo canal indican los tiempos de llegada por diferentes métodos, como lámparas de neón, tubos luminosos, guiones en papel o pantallas de osciloscopio. Aunque son ligeros y compactos, son adecuados solo para trabajos muy superficiales y tienen la desventaja de no mostrar simultáneamente el conjunto completo de llegadas en todos los

geófonos. A menudo se requiere un cierto juicio al seleccionar los primeros arribos de un registro sísmico de refracción, particularmente si hay ruido presente, y una máquina que registra el conjunto completo de formas de onda permite el ejercicio de este juicio.

Existen varios instrumentos de 12 canales disponibles comercialmente, generalmente como un paquete completo que incluye cable y geófonos. Todos emplean galvanómetros de haz de luz y registran las señales en una película Polaroid o en un rollo continuo de papel fotosensible. Estos instrumentos son muy adecuados para uso en ingeniería.

Un accesorio valioso en la realización de estudios de refracción es una máquina de voladura para transmisión del tiempo cero al sismógrafo vía radio. Esta capacidad permite una flexibilidad mucho mayor en las operaciones de campo y significa que se pueden realizar disparos más allá del final sin la necesidad de manipular grandes cantidades de cable. Tal dispositivo es particularmente deseable para estudios sobre el agua. Es una tarea bastante sencilla construir una máquina de voladura de este tipo y utilizar radios comunes de banda CB para transmitir y recibir el tiempo cero. Un enfoque es transmitir un tono y hacer que la detonación de la tapa interrumpa el tono.

## Conclusiones

Este informe ha cubierto los fundamentos de la teoría e interpretación de la refracción sísmica. Se reconoce que puede ser difícil llegar a una comprensión de la sísmica de refracción solo leyendo sobre ella. Sin embargo, se espera que este documento, cuando se combine con la experiencia de campo real, ayude al lector a adquirir una familiaridad funcional con la técnica. Para aquellos que han estado utilizando el sismógrafo de refracción, y que pueden haber aprendido algo nuevo de este informe, se sugiere que consideren reevaluar algunas de sus estudios anteriores.

Los métodos de interpretación descritos en este informe no son los únicos métodos disponibles, pero se cree que son los más aplicables para la mayoría de los estudios de ingeniería, y también son los más simples. En aquellos casos en que los estratos están razonablemente planos, las profundidades calculadas

por intercepciones de tiempo generalmente serán adecuadas. Siempre que las gráficas de tiempo-distancia revelen, por sus ondulaciones o irregularidades, la existencia de algo más complejo, se debe intentar el método de tiempo de retraso.

Se han hecho recomendaciones sobre la conveniencia de utilizar sísmica de refracción junto con un programa de perforación. Este punto no puede enfatizarse demasiado. La perforación exploratoria casi siempre se realiza en una investigación de sitio; su valor, en términos de la calidad de la información recopilada, aumentará si primero se realizan ensayos de refracción y los resultados se utilizan para guiar las operaciones de perforación. Incluso si algunos de los datos de refracción parecen complejos, ambiguos o simplemente peculiares, esto en sí mismo es información, y esos estudios de refracción tendrán áreas designadas en las que la perforación

proporcionará información más útil. Por el contrario, la estratigrafía obtenida de una perforación es muy útil para interpretar un perfil de refracción. Debido a que la velocidad del material geológico es en sí misma un índice útil, los estudios de pozos (p.e. Up-hole) merecen una seria consideración como investigación

de seguimiento para áreas seleccionadas, particularmente si se sospecha una capa oculta.

El sismógrafo de refracción ofrece un método rápido, económico y preciso de exploración del subsuelo. Su aplicación a las investigaciones de sitio debe ser la rutina y no la excepción.

## Referencias

1. M. B. Dobrin, Introduction to Geophysical Prospecting (McGraw-Hill, New York, 1960).
2. J. J. Jakosky, Exploration Geophysics (Trija Publishing Co., Newport Beach, Calif., 1957).
3. L. V. Hawkins, "The Reciprocal Method of Routine Shallow Seismic Refraction Investigations," Geophysics 26, 806-819 (1961).
4. J. L. Soske, "The Blind Zone Problem in Engineering Geophysics", Geophysics 24, 359-365 (1959).
5. D. L. Leet, Practical Seismology and Seismic Prospecting (D. Appleton-Century Co., New York, 1938).
6. R. Green, "The Hidden Layer Problem". Geophys. Prospect. 10, 166-177 (1962).
7. L. B. Slichter, "The Theory of the Interpretation of Seismic Travel-Time Curves in Horizontal Structures," Phys. 3, 273-295 (1932).
8. B. B. Redpath, "Seismic Investigations of Glaciers on Axel Heiberg Island;" in Axel Heiberg Island Research Reports, Geophysics No. 1, McGill University, Montreal, Quebec, 1965.
9. W. Domalski, "Some Problems of Shallow Refraction Investigations;" Geophys. Prospect. 4, 140-166 (1956).
10. H. R. Thornburgh, "Wave-front Diagrams in Seismic Interpretation;" Bull. Am. Assoc: Petroleum Geologists 14, No. 2 (1930).
11. J. G. Hagedoorn, "The Plus-Minus Method of Interpreting Seismic Refraction Sections," Geophys. Prospect. 7, 158-182 (1959).
12. C. B. Officer, "A Deep-Sea Seismic Reflection Profile;" Geophysics 20, 270-282 (1955).
13. R. Meissner, "Wave-front Diagrams from Uphole Shooting," Geophys. Prospect. \_9, 533-543 (1961).
14. Subsurface Investigation-Geophysical Explorations, U. S. Army Corps of Engineers, Washington, D. C., Engineering Manual EM-1110-2-1802 (1948).

## Bibliografía

- Black, R. A., F. C. Frisheknecht, R. M. Hazlewood, and W. H. Jackson, Geophysical Methods of Exploring for Buried Channels in the Monument Valley Area, Arizona and Utah, U. S. Geological Survey, Bulletin 1083-F, 1962.
- Burke, K. B. S., "A Review of Some Problems of Seismic Prospecting for Groundwater in Surficial Deposits," in Mining and Groundwater Geophysics, 1967, Geological Survey of Canada, Economic Report No. 26, Ottawa, Canada, 1970.
- Bush, B. O., and S. D. Schwarz, Seismic Refraction and Electrical Resistivity Measurements over Frozen Ground, National Research Council of Canada. Associate Committee on Soil and Snow Mechanics, Technical Memorandum No. 86, Ottawa, Ontario, 1965.
- Grant, F. S., and G. F. West, Interpretation Theory in Applied Geophysics (McGraw-Hill, New York, 1965).
- Griffiths, D.H., and R. F. King, Applied Geophysics for Engineers and Geologists (Pergamon Press, Inc., New York, 1965).
- Hales, F. W.; "An Accurate Graphical Method for Interpreting Seismic Refraction Lines," Geophys. Prospect. 6, 285-294, 1958.
- Hawkins, L. V., and D. Maggs, "Nomograms for Determining Maximum Errors and Limiting Conditions in Seismic Refraction Surveys with a Blind Zone Problem, Geophys. Prospect. 6, 526-532, 1961.
- Heiland, C: A., Geophysical Exploration Hafner Publishing Co.. New York, 1963).
- Hobson, G. D., "Seismic Methods in Mining and Groundwater Exploration," in Mining and Groundwater Geophysics, 1967, Geological Survey of Canada, Economic Report No. 26, Ottawa, Canada, 1970.
- Linehan, D., and V. J. Murphy, "Engineering Seismology Applications in Metropolitan Areas," Geophysics 27, 213-220, 1962.
- Musgrave, A. W., Ed., Seismic Refraction Prospecting, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Okla., 1967.
- Schwarz, S. D., Site Evaluation-Geophysical Exploration, Fifth Chicago Soil Mechanics Lecture Series, 1970.
- Scott, J. H., B. L. Tibbetts, and R. G. Burdick. Computer Analysis of Seismic Refraction Data, U. S. Dept. of Interior, Bureau of Mines, Washington, D. C., RI 7595, 197 2.
- Slotnick, M. M., Lessons in Seismic Computing, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, 1959.
- Tarrant, L. H., "A Rapid Method of Determining the Form of a Seismic Refractor from Line Profile Results," Geophys. Prospect. 4, 131-139, 1956.
- Wyrobeck, S. M., "Application of Delay and Intercept-Times in the Interpretation of Multilayer Refraction Time Distance Curves," Geophys. Prospect. 4, 112-130, 1956.
- Zirbel, N. N., "Comparison of Break-Point and Time-Intercept Methods in Refraction

## **Apéndice A**

### **Velocidades de los materiales**

Las tablas A1, A2 y A3, que enumeran las velocidades de onda longitudinales de varios materiales, se han seleccionado de varias publicaciones<sup>1, 2, 14</sup>. Se presentan aquí como una serie de tablas separadas, y

no se ha intentado construir un tabla de velocidades "universal". Las tablas se incluyen para dar una idea de lo que significan las velocidades en términos de medios geológicos.

Tabla A1. Velocidad de propagación de ondas sísmicas en materiales del subsuelo.<sup>14</sup>

| MATERIALS  | FEET PER SECOND  | MATERIALS   | FEET PER SECOND  |
|--|------------------|---|------------------|
| <b>TOP SOILS:</b>  |                  | <b>GRANITE:</b>   |                  |
| LIGHT AND DRY  | 600 TO 900       | SIERRA NEVADA RANGE, CALIFORNIA (IN ROAD CUTS)  |                  |
| MOIST, LOAMY OR SILTY CLAYEY                             | 1,000 TO 1,300   | FRIABLE AND HIGHLY DECOMPOSED   | 1.540            |
| RED CLAY IN COLORADO (A)                                 | 1,300 TO 2,000   | BADLY FRACTURED AND PARTLY DECOMPOSED   | 2.200            |
| SEMI-CONSOLIDATED SANDY CLAY (B)                         | 1,250 TO 2,150   | SOFTENED AND PARTLY DECOMPOSED BUT SLIGHTLY SEAMED  | 10.530           |
| WET LOAM (B)   | 2,500            | SOLID AND MONOLITHIC 70 FEET DEEP   | 18.500           |
| CLAY, DENSE AND WET - DEPENDING ON DEPTH                 | 3,000 TO 5,800   | NEW HAMPSHIRE (C) (COMPARISON OF VELOCITIES WITH DRILLING LOGS)   |                  |
| RUBBLE, OR GRAVEL (B)                                    | 1,970 TO 2,800   | BADLY BROKEN AND WEATHERED; FREQUENTLY ONLY CHIPS AND FRAGMENTS RECOVERED. SEGMENTS OF CORE LONGER, BUT WEATHERING HAD PENETRATED ABOUT 1/4 INCH ON EACH SIDE OF THE JOINT PLANES ON WHICH A FILM OF RESIDUAL CLAY HAD FORMED | 3,000 TO 8,000   |
| CEMENTED SAND (B)  | 2,800 TO 3,200   | JOINT PLANES SHOW BUT LITTLE SIGN OF WEATHERING, EVEN THOUGH THEY ARE OPEN  | 10,000 TO 13,000 |
| SAND CLAY (B)  | 3,200 TO 3,800   | ENTIRELY UNWEATHERED AND UNSEAMED   | 16,000 TO 20,000 |
| CEMENTED SAND CLAY (B)                                   | 3,800 TO 4,200   | GRANODIORITE (B)  | 15,000           |
| WATER SATURATED SAND (B)                                 | 4,600            | BASALT-CANAL ZONE-WEATHERED AND FRACTURED   | 9,000 TO 14,000  |
| SAND (B)   | 4,600 TO 8,400   | LIMESTONE, DOLOMITE, METAMORPHIC ROCKS, MASSIVE ROCKS (B)   | 16,400 TO 20,200 |
| CLAY, CLAYEY SANDSTONE (B)                               | 5,900            | DIABASE, IN BED OF BROAD RIVER, SOUTH CAROLINA  | 19,700           |
| GLACIAL TILL UPPER SUSQUEHANNA (C)                       | 5,600 TO 7,400   | GREENSTONE, TIGHT SEAMED-CALIFORNIA (A)   | 16,100           |
| GLACIAL MORaine DEPOSIT, DRY-CALIFORNIA (A)              | 2,500 TO 5,000   | GREENSTONE, SLIGHTLY SEAMED-CALIFORNIA  | 13,300           |
| GLACIAL MORaine DEPOSIT, SATURATED-CALIFORNIA            | 5,000 TO 7,000   |   |                  |
| CEMENTED LAVA AGGLOMERATE, CALIFORNIA (A)                | 5,000 TO 6,000   |   |                  |
| LOOSE ROCK-TALUS   | 1,250 TO 2,500   |   |                  |
| WEATHERED AND FRACTURED ROCK SHALE:                      | 1,500 TO 10,000  |   |                  |
| OLENTANGY RIVER, OHIO                                    | 9,000 TO 11,000  |   |                  |
| UPPER SUSQUEHANNA (C)                                    | 10,200 TO 12,800 |   |                  |
| PANAMA CANAL ZONE  | 7,000 TO 8,000   |   |                  |
| MANCOS, COLORADO (A)                                     | 2,600 TO 2,900   |   |                  |
| ROMNEY SHALE-SHENNANDOAH RIVER - WEATHERED               | 4,000 TO 6,500   |   |                  |
| ROMNEY SHALE-SHENNANDOAH RIVER - GOOD                    | 12,000           |   |                  |
| JOHN MARSHALL DAM SITE                                   | 2,900 TO 4,250   |   |                  |
| PHYLITE-YORK, PA. (D)                                    | 10,000 TO 11,000 |   |                  |
| SANDSTONE: (B)   | 7,200 TO 7,900   |   |                  |
| DEVONIAN-UPPER SUSQUEHANNA (C)                           | 14,000           |   |                  |
| CANAL ZONE, PACIFIC END                                  | 7,000 TO 9,000   |   |                  |
| COLORADO, DENSE, HARD, AND CONTINUOUS WITH FEW SEAMS (A) | 7,250            |   |                  |
| COLORADO, CONTAINING WEATHERED SEAMS AND SOFT AREAS. (A) | 4,725            |   |                  |
| SMOKY HILL RIVER, KANSAS                                 | 6,000 TO 7,500   |   |                  |
| SANDSTONE CONGLOMERATE (B)                               | 8,000            |   |                  |
| <b>CHALK:</b>  |                  |   |                  |
| FORT RANDALL DAMSITE - ABOVE WATER TABLE                 | 6,300 TO 7,000   |   |                  |
| FORT RANDALL DAMSITE - BELOW WATER TABLE                 | 8,000            |   |                  |
|  |                  | <b>NOTE:</b>  |                  |
|  |                  | (A) Reported by G. h. Williams, U. S. Bureau of Public Roads  |                  |
|  |                  | (B) From Report of Imperial Geophysical Experimental Survey in Australia  |                  |
|  |                  | (C) Reported by A. E. Wood, Corps of Engineers  |                  |
|  |                  | (D) Reported by L. T. Abele, Corps of Engineers   |                  |

Tabla A2. Rango aproximado de velocidades de ondas longitudinales para materiales representativos encontrados en la corteza terrestre. <sup>a</sup>

| <i>A. Classification According to Material</i>          |                  |                |  |
|---|------------------|----------------|--|
| <i>Material</i>   | <i>Velocity*</i> |                |  |
|   | <i>Ft./Sec.</i>  | <i>M./Sec.</i> |  |
| Weathered surface material .....                        | 1,000— 2,000     | 305— 610       |  |
| Gravel, rubble, or sand (dry) .....                     | 1,500— 3,000     | 468— 915       |  |
| Sand (wet) .....  | 2,000— 6,000     | 610— 1,830     |  |
| Clay .....  | 3,000— 9,000     | 915— 2,750     |  |
| Water (depending on temperature and salt content) ..... | 4,700— 5,500     | 1,430— 1,680   |  |
| Sea water .....   | 4,800— 5,000     | 1,460— 1,530   |  |
| Sandstone .....   | 6,000—13,000     | 1,830— 3,970   |  |
| Shale .....   | 9,000—14,000     | 2,750— 4,270   |  |
| Chalk .....   | 6,000—13,000     | 1,830— 3,970   |  |
| Limestone .....   | 7,000—20,000     | 2,140— 6,100   |  |
| Salt .....  | 14,000—17,000    | 4,270— 5,190   |  |
| Granite .....   | 15,000—19,000    | 4,580— 5,800   |  |
| Metamorphic rocks .....                                 | 10,000—23,000    | 3,050— 7,020   |  |
| Ice .....   | 12,050           |                |  |

| <i>B. Classification According to Geologic Age</i> |  |                 |                |
|--|--|-----------------|----------------|
| <i>Age</i>   | <i>Type of Rock</i>                                | <i>Velocity</i> |                |
|  |  | <i>Ft./Sec.</i> | <i>M./Sec.</i> |
| Quaternary   | Sediments (various degrees of consolidation) ..... | 1,000— 7,500    | 305— 2,290     |
| Tertiary   | Consolidated Sediments ..                          | 5,000—14,000    | 1,530— 4,270   |
| Mesozoic   | Consolidated Sediments ..                          | 6,000—19,500    | 1,830— 5,950   |
| Paleozoic  | Consolidated Sediments ..                          | 6,500—19,500    | 1,980— 5,950   |
| Archeozoic   | Various .....                                      | 12,500—23,000   | 3,810— 7,020   |

| <i>C. Classification According to Depth †</i> |                          |                               |                                |
|---|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|   | 0—2000 ft.<br>(0—600 M.) | 2000—3000 ft.<br>(600—900 M.) | 3000—4000 ft.<br>(900—1200 M.) |
|   | <i>Ft./Sec.</i>          | <i>Ft./Sec.</i>               | <i>Ft./Sec.</i>                |
| Devonian .....                                | 13,300                   | 13,400                        | 13,500                         |
| Pennsylvanian .....                           | 9,500                    | 11,200                        | 11,700                         |
| Permian .....                                 | 8,500                    | 10,000                        | .....                          |
| Cretaceous .....                              | 7,400                    | 9,300                         | 10,700                         |
| Eocene .....                                  | 7,100                    | 9,000                         | 10,100                         |
| Pleistocene-to-Oligocene                      | 6,500                    | 7,200                         | 8,100                          |

\* The higher values in a given range are usually obtained at depth.

† Data from B. B. Weatherby and L. Y. Faust, *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologists*, 10 (1936) 1.

<sup>a</sup> Reprinted from pg. 660 of Jakosky<sup>2</sup>.

Tabla A3. Velocidades de ondas sísmicas en rocas. <sup>a</sup>

| Material                          | Depth, ft   | Longitudinal wave velocity, $V_L$ , ft/sec                |
|-----------------------------------|-------------|---|
| Granite.....                      | 0           | 13,100-18,700   |
| Norite, Sudbury.....              | 0           | 20,400  |
| Basalt, Germany.....              | 0           | 18,300  |
| Gabbro, Mellen.....               | 140,000†    | 22,900  |
| Diabase, Vinal Haven.....         | 140,000     | 22,800  |
| Dunite, Balsam Gap.....           | 140,000     | 26,400  |
| Cap rock (anhydrite, gypsum)..... | 0           | 11,500-18,100   |
| Dolomite.....                     | 0           | 16,200-20,200   |
| Dolomitic limestone.....          | 0           | 19,600  |
| Salt, carnallite, sylvite.....    | 0           | 14,400-21,400   |
| Alluvium.....                     | 0           | 1,640- 6,600  |
| Alluvium.....                     | 6,500       | 9,800-11,500  |
| Clay.....                         | 0           | 3,300- 9,200  |
| <b>Limestone</b>                  |             |   |
| Arbuckle (Cambro-Ordovician)..... | 0           | 17,400  |
| Viola (Ordovician).....           | 0           | 16,700  |
| Viola (Ordovician).....           | 4,000       | 20,000  |
| Hunton (Devonian).....            | 0           | 13,800  |
| Hunton (Devonian).....            | 4,600       | 17,500  |
| Edwards (Cretaceous).....         | 0           | 11,000  |
| Edwards (Cretaceous).....         | 3,300       | 13,500  |
| Slate and shale.....              | 0           | 7,500-15,400  |
| Sandstone.....                    | 0           | 4,600-14,100  |
| <b>Shale and sandstone</b>        |             |   |
| Devonian.....                     | 2,000-3,000 | 13,400  |
| Pennsylvanian.....                | 2,000-3,000 | 11,200  |
| Permian.....                      | 2,000-3,000 | 10,000  |
| Cretaceous.....                   | 2,000-3,000 | 9,300   |
| Eocene.....                       | 2,000-3,000 | 9,000   |
| Pleistocene-Oligocene.....        | 2,000-3,000 | 7,200   |
|                                   |             | <b>Transverse wave velocity, <math>V_T</math>, ft/sec</b> |
| Granite.....                      | 0           | 6,900-10,800  |
| Norite, Sudbury.....              | 0           | 11,400  |
| Dolomitic limestone.....          | 0           | 10,700  |
| Gabbro, Mellen.....               | 10          | 11,100  |
| Gabbro, Mellen.....               | 15,000      | 12,000  |
| Gabbro, Mellen.....               | 140,000     | 12,200  |
| Diabase, Vinal Haven.....         | 10          | 10,400  |
| Diabase, Vinal Haven.....         | 15,000      | 12,600  |
| Diabase, Vinal Haven.....         | 140,000     | 12,800  |
| Sandstone, quartzitic.....        | 10          | 11,100  |
| Sandstone, quartzitic.....        | 15,000      | 12,700  |
| Sandstone, quartzitic.....        | 140,000     | 13,400  |
| Slate, Everett, Mass.....         | 10          | 9,500   |
| Slate, Everett, Mass.....         | 140,000     | 10,500  |

<sup>a</sup> From Birch's "Handbook of Physical Constants," 1942.

† The depths preceded by L (laboratory) were artificially reproduced in high-pressure apparatus in which the velocities were obtained by dynamical methods.

<sup>a</sup> Reprinted from pg. 22 of Dobrin<sup>1</sup>.

## **Apéndice B**

### **Ejemplo de problema**

Este apéndice contiene un conjunto hipotético de curvas de tiempo-distancia que tienen la intención de ilustrar algunos de los puntos en este informe. Los tiempos de viaje se sintetizaron a partir de un perfil geológico conocido y, por lo tanto, la interpretación de las curvas de tiempo-distancia se puede comparar con el perfil original.

Suponga las siguientes circunstancias: Estamos explorando las condiciones de los cimientos para un dique grande, y nuestro interés principal es la profundidad de la roca, aunque los espesores y las

velocidades de cualquier capa intermedia también son de interés. Un trabajo exploratorio similar en un área cercana indica que podemos esperar arenisca cubierta por un glaciar hasta una capa meteorizada arenosa. Se ha realizado una línea de refracción con espacio entre geófonos de 50 pies, con disparos en los extremos (desplazamiento de 15 pies), en el medio y en un punto intermedio. Las profundidades de disparo fueron de aproximadamente 2 pies y pueden considerarse insignificantes. No hay información de perforación en ninguna parte de la línea. Los tiempos de viaje que observamos se tabulan en la Tabla B1 y se representan en la Figura B1.

Tabla B1. Tiempos de viaje observados.

| Geophone station (ft) | Arrival times (msec) |                  |                  |                  |
|-----------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
|                       | Shot at Sta. 0       | Shot at Sta. 125 | Shot at Sta. 275 | Shot at Sta. 550 |
| 0                     | 6                    | 33               | 50               | 76               |
| 50                    | 16                   | 25               | 45.5             | 71               |
| 100                   | 28                   | 10               | 42               | 67.5             |
| 150                   | 37                   | 10               | 35               | 60.5             |
| 200                   | 42                   | 24.5             | 24.5             | 50               |
| 250                   | 47                   | 34               | 10               | 46.5             |
| 300                   | 53.5                 | —                | 10               | 41.5             |
| 350                   | 60.5                 | —                | 27.5             | 37               |
| 400                   | 61.5                 | —                | 29.5             | 28               |
| 450                   | 65.5                 | —                | 33.5             | 20.5             |
| 500                   | 71.5                 | —                | 38.5             | 12               |
| 550                   | 76                   | —                | 44.5             | 6                |

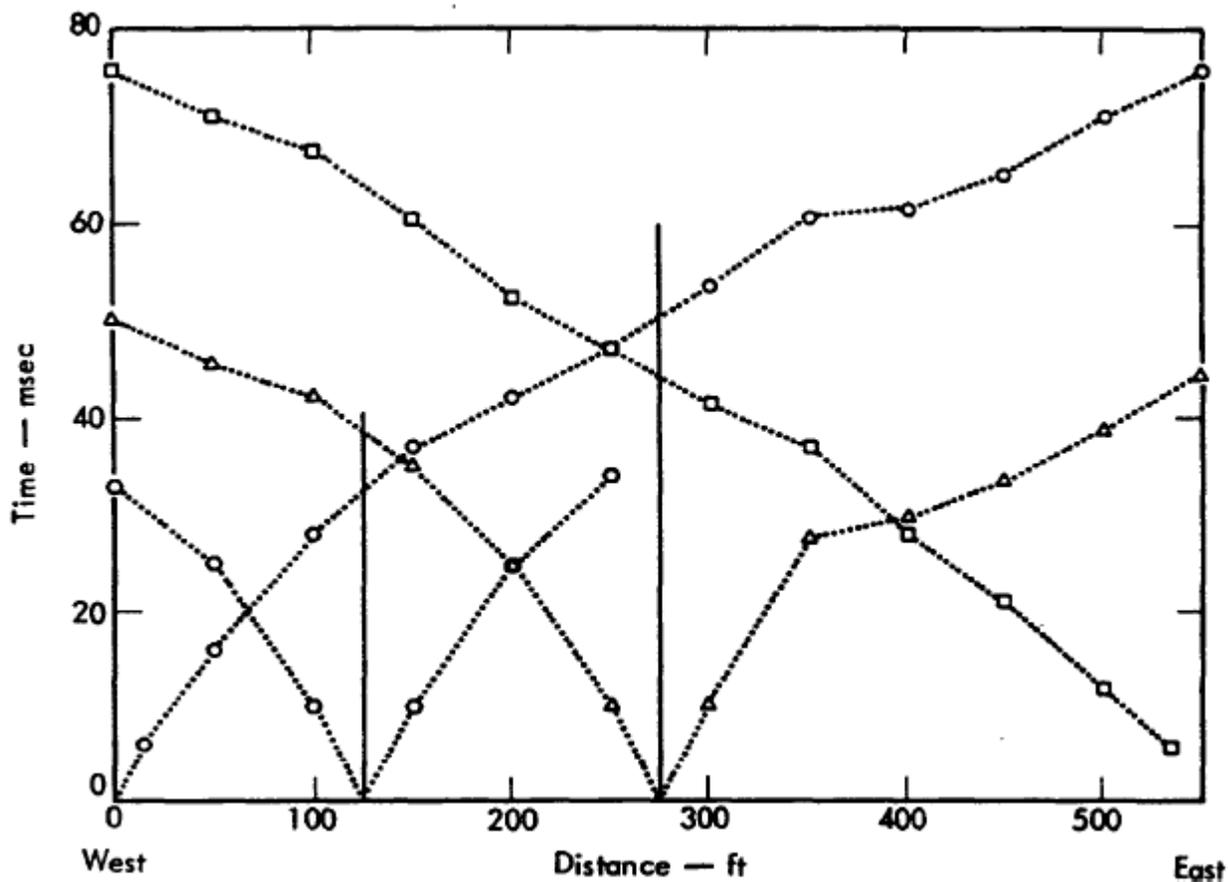


Figura B1. Tiempos de viaje observados en programa de exploración hipotético.

El primer paso es tratar de identificar las diversas capas de acuerdo con sus velocidades. En la Figura B2, se han dibujado líneas rectas a través de los tiempos de llegada que inicialmente se consideran refracciones de la misma capa. Las velocidades aparentes que resultan de este procedimiento indicarían que tenemos una situación de tres capas: a; primera capa con una velocidad de 2.500 a 2.700 pies / seg, una capa intermedia con velocidades aparentes de 4.100 a 6.400 pies / seg, y una capa inferior (roca) con una velocidad que se encuentra entre 8.900 y 10.000 pies / seg.

Aunque una capa intermedia está claramente indicada en la mitad occidental de la línea, la situación no es tan directa hacia el este; el disparo final en la estación 550 muestra una alineación de puntos de 6.000 pies / seg, pero el disparo central no indica la presencia de una capa intermedia hacia el este. Un disparo intermedio en la estación 425 habría ayudado a resolver esto, pero, por el bien de nuestra ilustración, estamos asumiendo que no disparamos uno. Por el momento, podemos pasar por encima de este punto y continuar refinando nuestros valores de velocidad.

Las velocidades de la primera capa muestran poca variación a lo largo de la línea y un promedio simple será adecuado; es decir,  $V_1 \cong 2.558$ , digamos 2.550 pies / seg. En la mitad occidental de la línea podemos calcular dos valores de  $V_2$  tomando medios armónicos; es decir.,

$$V_2 \cong \frac{2 \times 4,100 \times 6,400}{4,100 + 6,400} = 4,998,$$

**say 5,000 ft/sec**

$$V_2 \cong \frac{2 \times 4,900 \times 5,600}{4,900 + 5,600} = 5,227,$$

**say 5,225 ft/sec**

Y promediando estos valores con los 6.000 pies / seg en la mitad oriental, obtenemos:  $V_2 \cong 5.408$ , digamos 5.400 pies / seg.

El valor de  $V_3$  se determinará en el siguiente diagrama, pero primero procedemos a calcular los tiempos de retraso o la mitad de los tiempos de intercepción para la primera capa siempre que podamos. (Recuerde que la mitad de los tiempos de intercepción y los tiempos de retraso son equivalentes si las profundidades de disparo son insignificantes). La mitad de los tiempos de intercepción están disponibles en las estaciones 0, 125, 275 y 550. Podemos calcular los tiempos de retraso en las estaciones 50, 200 y, para presente, en la Estación 400. Todos estos tiempos se muestran en la Figura B2. Para las estaciones intermedias tendremos que interpolar entre los valores anteriores.

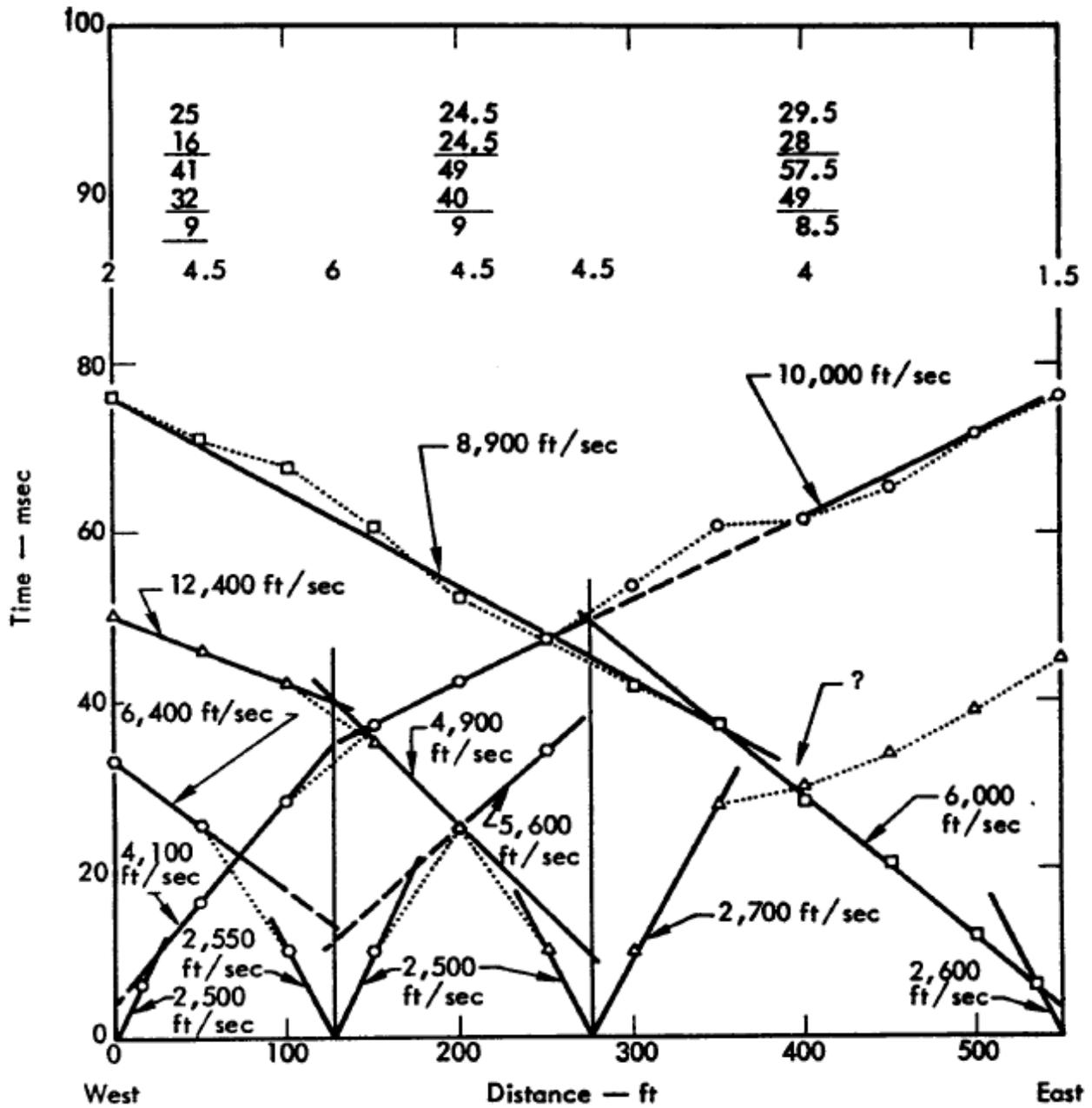


Figura B2. Identificación de capas por velocidad y determinación de tiempos medios de intersección y tiempos de retraso para la primera capa.

Nuestro siguiente paso es trazar las diferencias en los tiempos de llegada de los dos disparos finales. Este procedimiento debería decirnos qué tiempos representan refracciones de la roca y cuál es la velocidad de la roca.

La gráfica de diferencias en la Figura B3 da como resultado un valor para  $V_3$  de 9.000 pies / segundo y sugiere que las Estaciones 200 a 450 registraron refracciones de la roca de ambos disparos finales. Los puntos que no caen en la línea significan que son diferencias de tiempos de llegada de diferentes capas (suponiendo que no haya variaciones de velocidad lateral en la roca).

Sintiéndonos razonablemente seguros de que las llegadas desde ambas direcciones en las Estaciones 200 a 450 son refracciones desde la cima de la roca, podemos proceder a calcular los tiempos de demora en estas estaciones. Los cálculos se muestran en la Figura B3. Recuerde que estos tiempos son los tiempos de retraso combinados para la primera y segunda capa (es decir,  $\Delta T_{12}$ ).

Como se hizo en la Figura 12, reducimos los tiempos de llegada en los tiempos de retraso correspondientes, obteniendo tiempos de llegada reducidos que ahora se alinean a la velocidad real del refractor. La extensión de estas líneas nos permite leer los tiempos de retraso para los geófonos restantes. El hecho de que la línea a través de un conjunto de llegadas reducidas tenga una pendiente recíproca de 9.200 pies / seg y otra 9.000 pies / seg se deba a la dispersión normal, usaremos 9.000 pies / seg para  $V_3$  que se obtuvo de los gráficos de diferencia.

Estamos listos para calcular el grosor de la capa, pero primero consulte la Figura B2, donde calculamos el tiempo de retraso de la primera capa en la Estación 400. Acabamos de demostrar que la llegada a la Estación 400 del disparo en la Estación 550 es realmente una refracción del tope de la roca; por lo tanto; este tiempo de retraso de la primera capa no es válido y tendremos que interpolar entre los tiempos de media intersección en las estaciones 275 y 550. Además, los 6.000 pies / seg que atribuimos a la segunda capa en el extremo este de la línea son realmente un velocidad aparente para la roca; sin embargo, la llegada a la estación 500 desde el disparo final en la estación 550 es una refracción legítima de la segunda capa y los 6.000 pies / seg todavía son válidos.

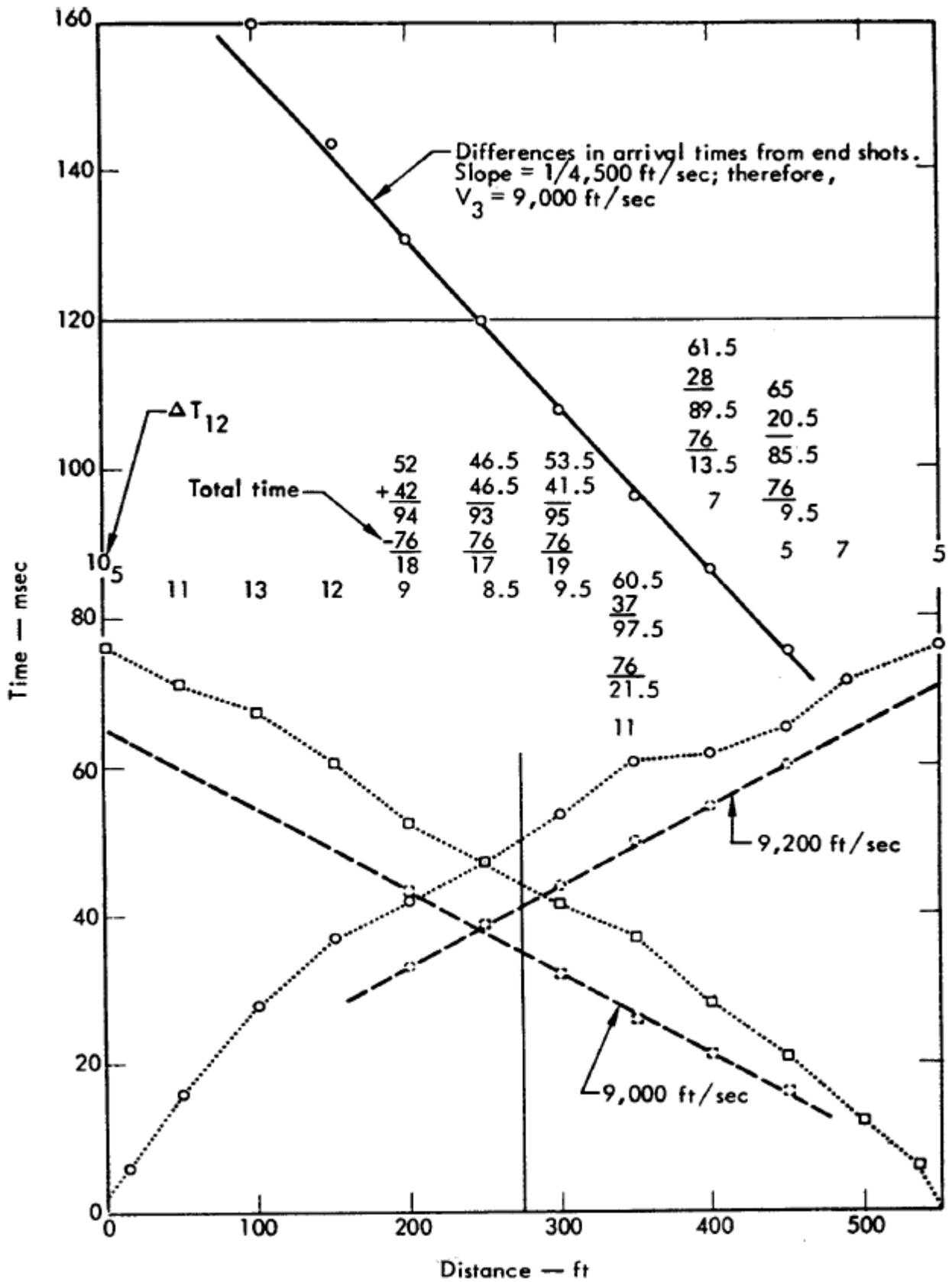


Figura B3. Determinación del valor verdadero de  $V_3$  y tiempos de retraso  $\Delta T_{12}$  (disparos intermedios no mostrados por razones de claridad).

Ahora reunamos toda nuestra información en la Tabla B2.

La Figura B4 es una comparación de la interpretación anterior con el modelo original del cual se derivaron los tiempos de viaje. Una serie de puntos significativos son evidentes. Los valores de velocidad de  $V_1 = 2.500$ ,  $V_2 = 5.400$ ,  $V_3 = 9.000$  pies / seg determinados en la interpretación están en buena coherencia con los valores reales utilizados en la síntesis. La concordancia entre las profundidades reales y las calculadas en la interpretación es muy buena en la mitad occidental de la línea, pero no es tan buena en la mitad oriental. La razón para disparar tiros intermedios ahora debería ser evidente; solo por los

disparos en las estaciones 125 y 275 pudimos seguir las variaciones en la profundidad de la capa meteorizada a lo largo de la mitad occidental. Los tiempos de retraso en la capa meteorizada son una proporción significativa del tiempo de retraso total, y cualquier error en estos tiempos se agrava cuando la diferencia  $\Delta T_{12} - \Delta T_1$  se multiplica por la mayor velocidad de la capa subyacente. Sin un disparo intermedio entre las estaciones 275 y 500, no teníamos más remedio que interpolar linealmente los tiempos de media intersección entre estos puntos y, en consecuencia, no había forma de saber que el espesor de la capa meteorizada se había incrementado considerablemente cerca de las estaciones 300 y 350.

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = 2,550 \text{ ft/sec} \\ V_2 = 5,400 \text{ ft/sec} \\ V_3 = 9,000 \text{ ft/sec} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \alpha = \sin^{-1} V_1/V_2 \approx 28 \text{ deg, } \cos \alpha = 0.88 \\ \beta = \sin^{-1} V_2/V_3 \approx 37 \text{ deg, } \cos \beta = 0.80 \end{array}$$

| Times, T (msec)<br>or<br>thicknesses, Z (ft) | Geophone station (ft) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | 0                     | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 |
| $\Delta T_1$ (or $1/2 T_{12}$ )              | 2                     | 4.5 | 6   | 6   | 4.5 | 4.5 | 4.5 | —   | —   | —   | —   | 1.5 |
| Interpolated $\Delta T_1$ 's                 | —                     | —   | —   | —   | —   | —   | —   | 4   | 3.5 | 3   | 2   | —   |
| $\Delta T_{12}$                              | 10.5                  | 11  | 13  | 12  | 9   | 8.5 | 9.5 | 11  | 7   | 5   | 7   | 5   |
| $\Delta T_2 = \Delta T_{12} - \Delta T_1^a$  | 8.5                   | 6.5 | 7   | 6   | 4.5 | 4   | 5   | 7   | 3.5 | 2   | 5   | 3.5 |
| $Z_1 = \Delta T_1 V_1 / \cos \alpha$         | 6                     | 13  | 17  | 17  | 13  | 13  | 13  | 12  | 10  | 9   | 6   | 4   |
| $Z_2 = \Delta T_2 V_2 / \cos \beta$          | 57                    | 44  | 47  | 41  | 30  | 27  | 34  | 47  | 24  | 14  | 34  | 24  |
| $Z_1 + Z_2$                                  | 63                    | 57  | 64  | 58  | 43  | 40  | 47  | 59  | 34  | 23  | 40  | 28  |

<sup>a</sup>The existence of a positive value for  $\Delta T_2$  (i.e.,  $\Delta T_{12} - \Delta T_1$ ) for every geophone indicates that the intermediate (5,400-ft/sec) layer is present along the entire profile.

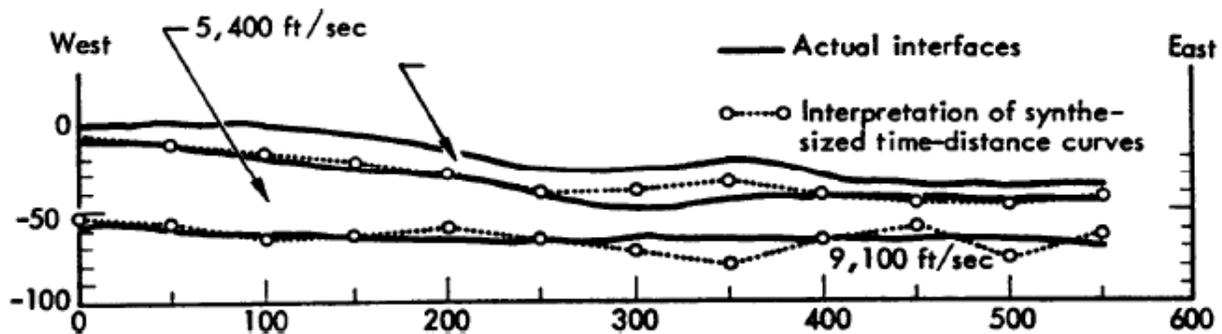


Figura B4. Perfil original comparado con el derivado de la interpretación de datos de distancia de tiempo sintetizados.

Impreso en los Estados Unidos de América  
Disponible de  
Servicio Nacional de Información Técnica  
Departamento de Comercio de EE. UU.  
5285 Port Royal Road  
Springfield, Virginia 22151

**AVISO**

**Este informe fue preparado como una cuenta de trabajo patrocinado por el gobierno de los Estados Unidos. Ni los Estados Unidos ni la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, ni ninguno de sus empleados, ni ninguno de sus contratistas, subcontratistas o sus empleados, ofrecen ninguna garantía, expresa o implícita, ni asumen ninguna obligación legal o responsabilidad por la precisión, integridad o la utilidad de cualquier aparato de información, producto o proceso divulgado o representado que su uso no infringiría derechos de propiedad privada."**