

CONSTRUCCION DEL PERFIL DE REFRACCION

*Por el Ing. V. A. Olhovich ***

SUMARIO. La construcción de las capas refractoras se lleva a cabo basándose en el tiempo de intercepción y en las velocidades aparentes. Para la primera capa, estos valores se observan directamente; para las demás capas, los tiempos de intercepción y las velocidades aparentes se obtienen valiéndose de los principios básicos de la teoría de refracción.

Se ha desarrollado la fórmula general para la construcción de las capas refractoras que se aplica a cualquier número de capas, de cualesquiera echados y de cualquier ley de velocidades dentro de cada capa.

Cada punto de la capa refractora se obtiene mediante uno de los dos nomogramas universales: uno para velocidad constante de cada capa, y otro para velocidad variable según la ley lineal.

Se presenta al final un ejemplo numérico para la ilustración del método.

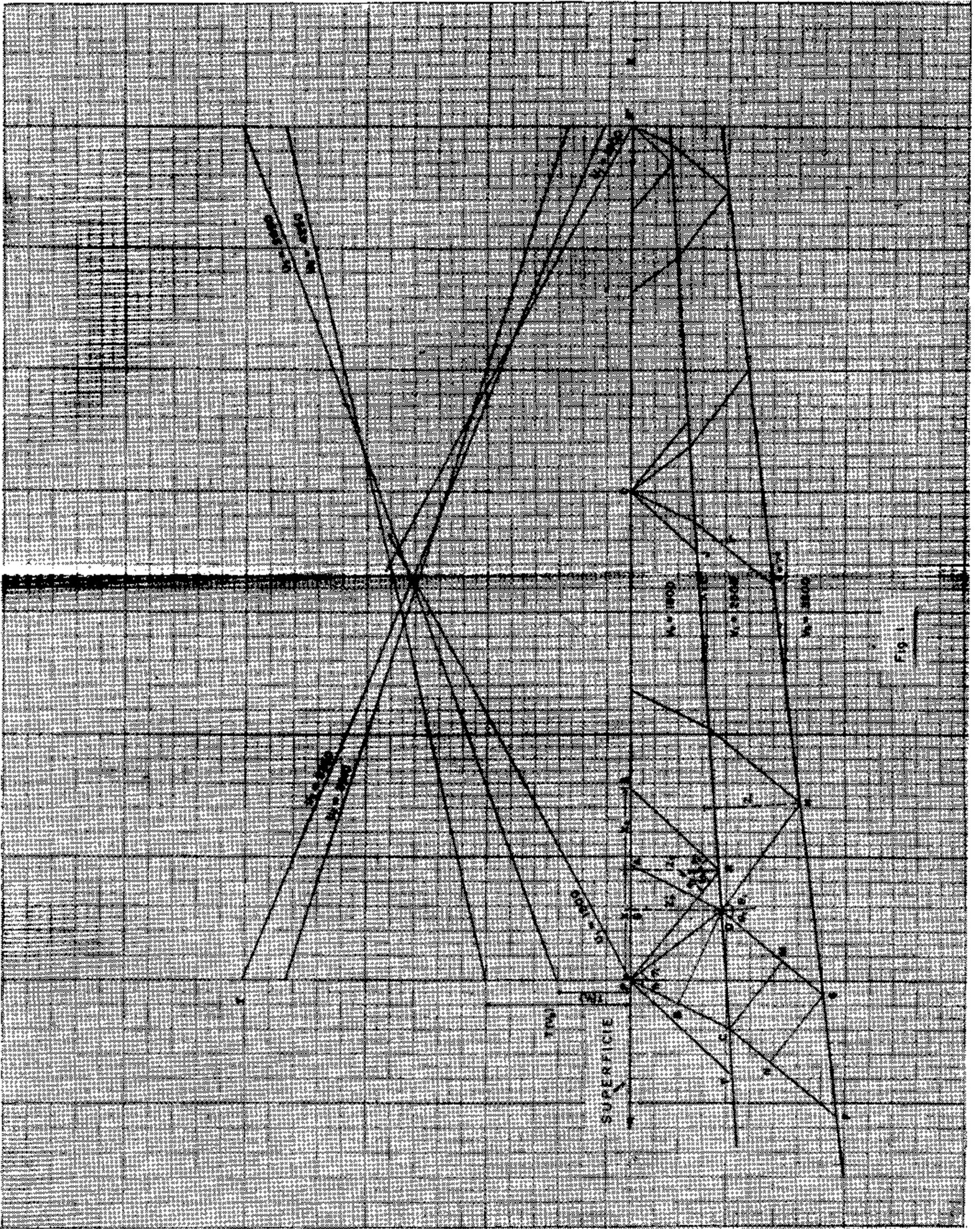
Cuando la gráfica tiempo-distancia observada ha sido analizada, es decir, determinadas las velocidades aparentes y asignadas a las capas correspondientes, la construcción del perfil que satisfaga los valores observados puede hacerse por varios métodos. El método que describe a continuación se basa sobre las propiedades del tiempo de intercepción, es decir, el tiempo que correspondería al punto de tiro. Aunque este tiempo no puede ser observado directamente, se le puede obtener indirectamente de varios modos. Antes de proseguir, cabe decir unas palabras sobre la preparación de la gráfica tiempo-distancia, esto es, el trazado de velocidades aparentes a través de los puntos de observación.

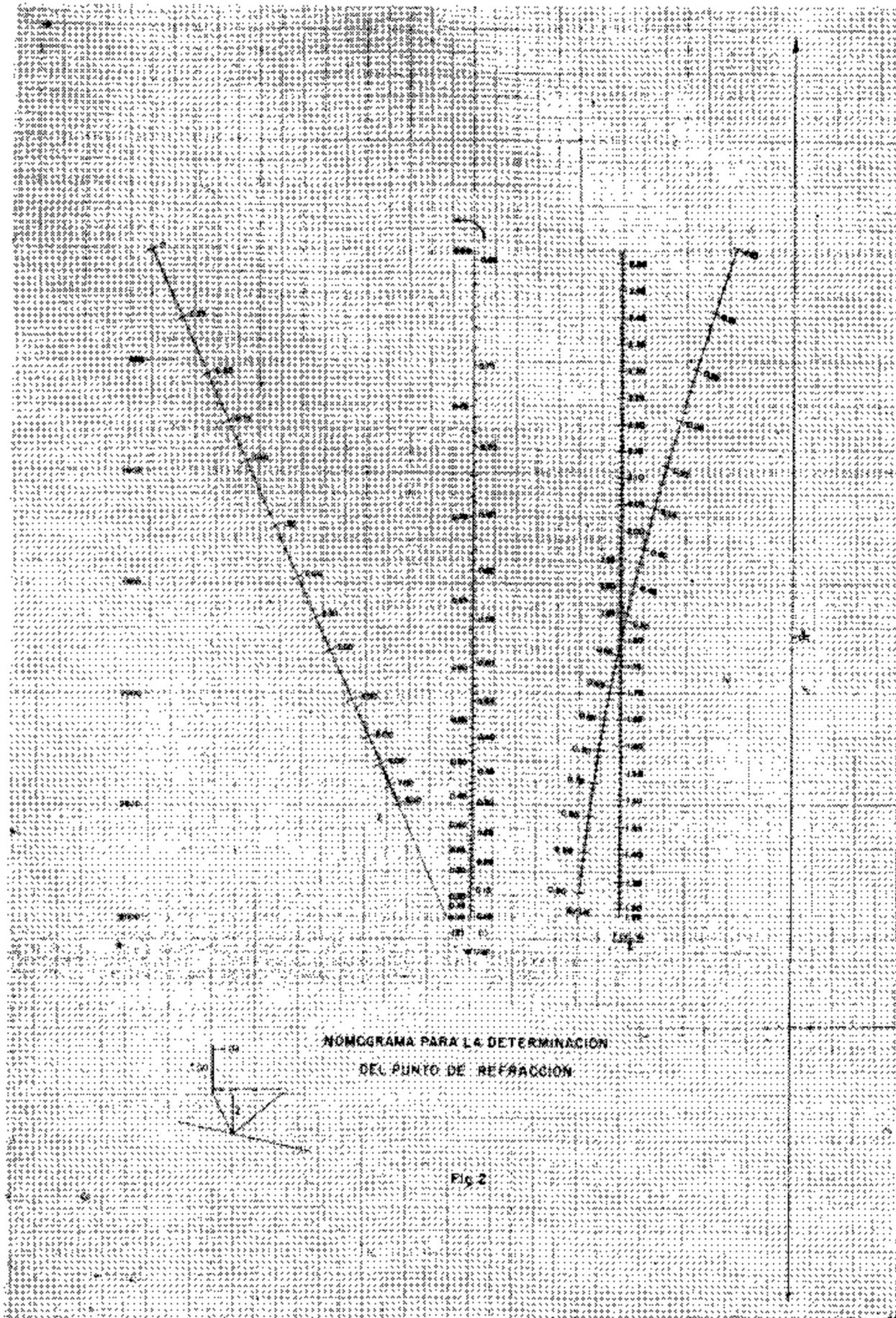
Es imposible dar reglas definitivas para la identificación de las velocidades aparentes, y mucho depende de la experiencia y pericia del sismólogo; sin embargo, se pueden mencionar tres condiciones que deben ser satisfechas para que el trazado de velocidades sea correcto, hecho que al mismo tiempo limite el número de soluciones posibles, a saber:

a) Debe observarse el principio de reciprocidad de los tiempos, es decir, que el tiempo empleado por la onda en su recorrido entre dos puntos en un sentido, debe ser igual al tiempo empleado en recorrer entre los mismos puntos en el sentido contrario;

* Manuscrito recibido el 4 de junio de 1954.

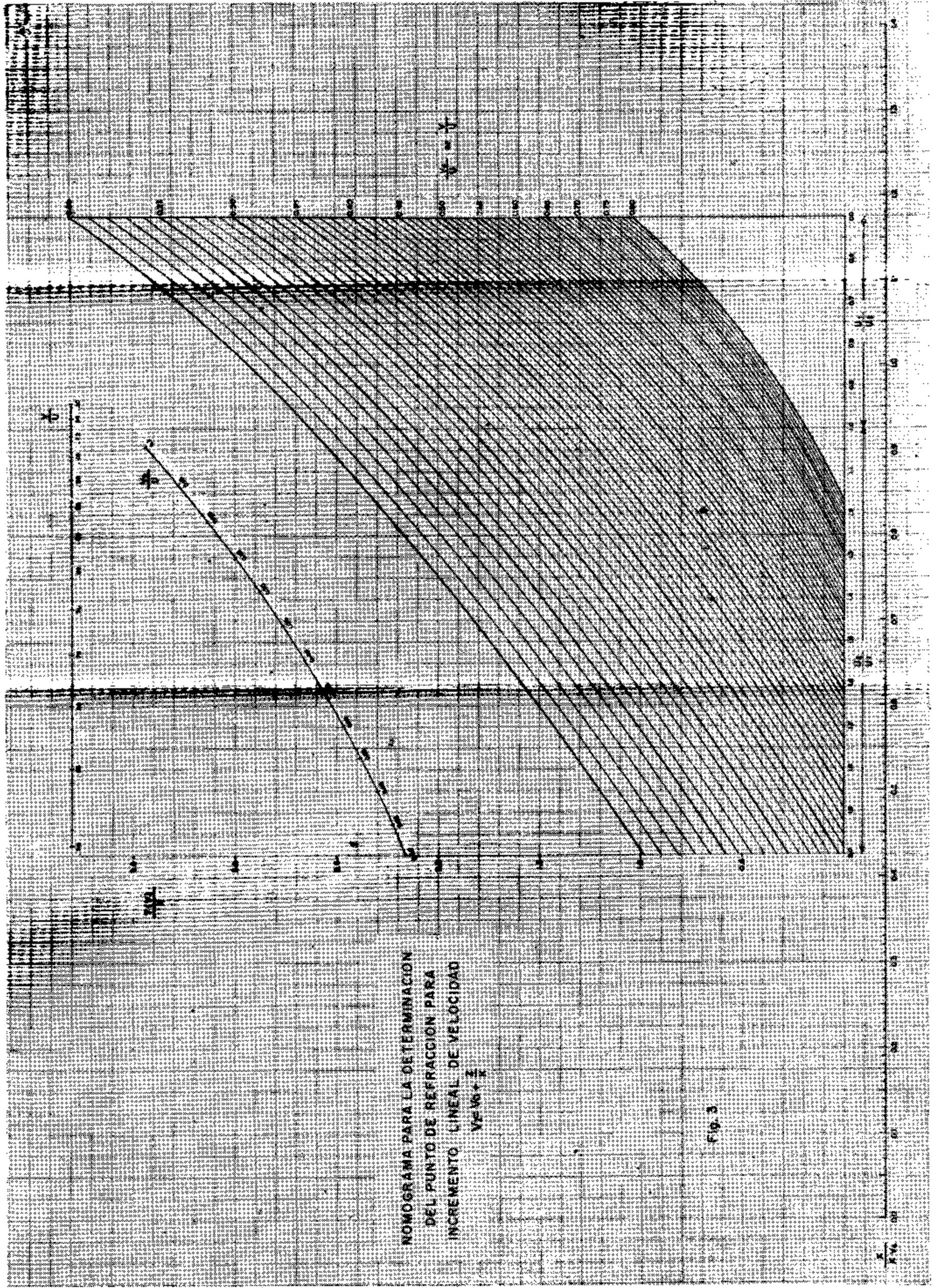
** Geofísico de la Gerencia de Exploración de Petróleos Mexicanos.





NOMOGRAMA PARA LA DETERMINACION
DEL PUNTO DE REFRACCION

Fig. 2



NOMOGRAMA PARA LA DETERMINACION
 DEL PUNTO DE REFRACCION PARA
 INCREMENTO LINEAL DE VELOCIDAD

$$V = V_0 + \frac{Z}{K}$$

FIG. 3

Del nomograma como antes,

$$F\left(\frac{V_2}{W_{3d}}, \frac{V_2}{W_{3u}}\right) = 1\ 507\ \text{seg.}$$

y finalmente,

$$Z_2 = 472\ \text{ms.}$$

$$X_2 = 515\ \text{ms.}$$

los mismos valores obtenidos por el primer método.

b) Las velocidades aparentes correspondientes a la misma capa y observadas en el mismo tramo de la superficie desde puntos de tiro a diferentes distancias deben ser paralelas; a menos que las capas refractoras presenten en este tramo echados exagerados o fallas. Inversamente, si se carece de información desde algún punto de tiro, ésta puede suplirse trazando velocidades aparentes paralelamente a las observadas desde otro punto de tiro para la misma capa;

c) Velocidades aparentes correspondientes a la misma capa trazadas desde direcciones opuestas, según la condición de paralelismo, deben intersectarse en el punto de tiro, siendo este punto de intersección el tiempo que se hubiera observado en el punto de tiro, llamado tiempo de intercepción.

II. En refracción continua, después de que todas las velocidades aparentes han sido trazadas y referidas a las correspondientes capas refractoras, podemos trasladarlas, por la condición de paralelismo y la ley de reciprocidad, a los dos puntos extremos de la línea, llevando así todas las curvas de velocidades entre estos extremos. Se procederá así para todas las capas, inclusive para la capa superficial, si la velocidad de ésta varía a lo largo de la línea. Una vez que la información de todos los tiros haya sido trasladada a los puntos extremos y trazadas las únicas curvas de velocidades desde ambos extremos de la línea, éstas serán las que se toman para la interpretación.

El resultado de tal procedimiento está mostrado en la figura 1, en la cual, sin embargo, las velocidades aparentes, para mayor simplicidad, permanecen constantes en toda la extensión de la línea. En la práctica, empero, salvo casos excepcionales, no sería lógico esperar que las velocidades permanezcan constantes, sino que varían debido a cambios de echados o velocidades de la capa refractora en el sentido lateral.

Desde luego, cualesquiera dos puntos de la línea pueden escogerse para traspasar en ellos todos los datos de observación entre estos puntos. A veces es ventajoso dividir así la sección en varias partes. De este modo, toda la información obtenida de la gráfica de refracción se concentra en dos puntos únicamente a ambos extremos de la línea, o en una parte de ella.

El mismo resultado se obtendría si fuera posible observar la energía refractada procedente de todas las diferentes capas, desde los dos puntos de tiro situados en los extremos de la línea. Esta energía hubiera aparecido en el sismograma no solamente como primera llegada, sino también como segunda, tercera, etc., según el número de capas refractoras.

III. Ahora se demostrará cómo la construcción de la capa refractora puede efectuarse basándose en el conocimiento del tiem-

po de intercepción y las velocidades aparentes. Se considerará primero el caso de un solo contacto.

El tiempo de intercepción se define como el tiempo necesario para que la onda refractada viaje desde el punto de tiro P (Fig. 1) hasta R y desde T a P con la velocidad V_0 menos el tiempo necesario para recorrer la distancia desde R hasta T con la velocidad V_1 .

El tiempo de intercepción también puede ser expresado por la ecuación de la línea recta,

$$T(V) = T - \frac{X}{U} \quad (1)$$

donde T y X son valores desconocidos, siendo T el tiempo observado en el punto S, y X la distancia entre P y S; U es la velocidad aparente de la gráfica tiempo-distancia observada directamente sobre el punto S.

Observando la llegada de la onda en dirección pendiente-arriba (Fig. 1) y anotando

$$\begin{aligned} \text{sen}(i_0 + \alpha) &= V_0/U_d \\ \text{sen}(i_0 - \alpha) &= V_0/U_u \end{aligned}$$

donde U_d y U_u significan velocidades aparentes en direcciones pendiente-abajo y pendiente-arriba respectivamente, tenemos

$$\begin{aligned} T &= \frac{PR+RS}{V_0} = \frac{z}{V_0} \left(\frac{1}{\sqrt{1-(V_0/U_d)^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{1-(V_0/U_u)^2}} \right) \\ X &= PA+AS = z \left(\frac{V_0/U_d}{\sqrt{1-(V_0/U_d)^2}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{V_0/U_u}{\sqrt{1-(V_0/U_u)^2}} \right) \end{aligned}$$

y, por consiguiente, de (1)

$$\begin{aligned} \frac{T(V) \cdot V_0}{z} &= \sqrt{1-(V_0/U_u)^2} + \frac{1-(V_0/U_d) \cdot (V_0/U_u)}{\sqrt{1-(V_0/U_d)^2}} = \\ &= F\left(\frac{V_0}{U_d}, \frac{V_0}{U_u}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

donde la única desconocida es la profundidad z . La distancia x desde el punto de tiro hasta la proyección en la superficie del punto de refracción de la onda (para el cual se determinó la profundidad z), se obtiene de la expresión

$$x = \frac{z \cdot (V_0/U)}{\sqrt{1-(V_0/U)^2}} \quad (3)$$

IV. Ambos valores se obtienen del nomograma de la figura 2, de la siguiente manera:

Se pasa el índice por el valor V_0/U_u de la escala derecha (1) de la línea (de escala doble) y V_0/U_d , y se marca el punto de intersección del índice con la recta sin escala a la derecha; permaneciendo en este punto se mueve el índice para pasar por V_0/U_u de la escala izquierda (2) y se lee $\frac{T(V) \cdot V_0}{z}$ sobre la escala

correspondiente, determinándose z . Para hallar x , se conecta con el índice el valor de V_0/U_u de (1) y z , y se lee x .

Esta operación es válida para observaciones en dirección de la pendiente-abajo; para observaciones pendiente-arriba se reemplazan en el nomograma, U_d por U_u , y U por U_d y se procede como antes.

V. La velocidad verdadera de la capa refractora y su échado en las inmediaciones del punto de refracción, se obtienen de las siguientes fórmulas, por medio de cálculo o por la construcción bien conocida

$$V_i = \frac{U_u \cdot \text{sen } \varphi'_0}{\text{sen } i_0} = \frac{U_d \cdot \text{sen } \varphi_0}{\text{sen } i_0} = \frac{V_0}{\text{sen } i_0}$$

$$\alpha = (1/2) [\text{sen}^{-1}(V_0/U_d) - \text{sen}^{-1}(V_0/U_u)] \quad (4)$$

$$i_0 = (1/2) [\text{sen}^{-1}(V_0/U_d) + \text{sen}^{-1}(V_0/U_u)]$$

En la práctica se notará que la velocidad verdadera de la capa refractora así determinada, va a ser ligeramente diferente en cada punto. Si la variación es accidental y dentro de los límites del error probable de observación, se puede tomar el promedio de las velocidades de los puntos; o se determina la velocidad media en un tramo largo, por ejemplo, entre los puntos P y O (Fig. 1), dividiendo la distancia RJ por el tiempo que requiere la onda para recorrer esta distancia, el cual será, evidentemente, el tiempo observado en el punto O menos el tiempo $(PR + OJ)/V_0$

que puede calcularse porque se conocen las trayectorias PR y OJ.

VI. Si la velocidad de la capa varía en función de profundidad según la expresión

$$V_z = V_0 \div z/k \quad (5)$$

se obtiene en lugar de (2):

$$\begin{aligned} \frac{T(V)}{k} = & \left[\cosh^{-1}(U_u/V_0) + \cosh^{-1}(U_d/V_0) - \cosh^{-1}(U_u/V_1) - \right. \\ & - \cosh^{-1}(U_d/V_1) - \sqrt{1 - (V_0/U_u)^2} - (U_d/U_u)\sqrt{1 - (V_0/U_d)^2} + \\ & \left. + (U_d/U_u)\sqrt{1 - (V_1/U_d)^2} + \sqrt{1 - (V_1/U_u)^2} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

para pendiente-abajo, y

$$\begin{aligned} \frac{T(V)}{k} = & \left[\cosh^{-1}(U_u/V_0) + \cosh^{-1}(U_d/V_0) - \cosh^{-1}(U_u/V_1) - \right. \\ & - \cosh^{-1}(U_d/V_1) - \sqrt{1 - (V_0/U_d)^2} - (U_u/U_d)\sqrt{1 - (V_0/U_u)^2} + \\ & \left. + (U_u/U_d)\sqrt{1 - (V_1/U_u)^2} + \sqrt{1 - (V_1/U_d)^2} \right] \quad (6') \end{aligned}$$

para pendiente-arriba.

En lugar de (3) ahora tenemos:

$$x = kU \left[\sqrt{1 - (V_0/U)^2} - \sqrt{1 - (V_1/U)^2} \right] \quad (7)$$

VII. — Las ecuaciones (6) y (7) se resuelven por medio del nomograma de la figura 3: las relaciones de U_u/U_d y V_0/U_u para observaciones pendiente-abajo, o U_d/U_u y V_0/U_d para observaciones pendiente-arriba, determinan la cantidad $T(V)/k$ la cual se resta del valor observado $T(V)/k$; entrando otra vez al nomograma con esta diferencia y U_u/U_d (o U_d/U_u) se obtiene V_1/U_u (o V_1/U_d), determinándose así el valor de V_1 . Luego la profundidad se obtiene de la expresión (5).

Para hallar el valor de x se pasa el índice por los valores V_1/U y V_0/U de las dos escalas superiores (una recta y otra curva) y se lee x/kV_0 en la escala abajo.

VIII. — En la práctica, en muchos casos, es suficiente asumir una capa de velocidad variable sobrepuesta encima de la capa refractora de alta velocidad, la cual puede ser trazada punto

por punto según el método descrito, determinándose sus profundidades por medio del nomograma.

La velocidad verdadera y el echado de la capa de alta velocidad se pueden obtener, como antes, de las fórmulas (4), porque la velocidad Vz' de la capa superior, a la profundidad inmediatamente sobre la capa de alta velocidad se obtiene para cada punto para el cual se determina la profundidad; o mejor aún, se determina la velocidad media para un tramo más largo, como se ha explicado.

IX. — Las fórmulas (2) y (3) pueden aplicarse a cualquier número de capas, como se va a demostrar enseguida.

Supongamos que existe el problema de tres capas (Fig. 1).

De la velocidad aparente (pendiente-abajo) observada sobre el punto P se obtiene el ángulo φ_1 de la trayectoria PD:

$$\text{sen } \varphi_1 = V_0 / U_{2d}$$

La onda penetra a la segunda capa en el punto D, el cual se considera ahora, según el principio de Huyghens, un nuevo foco de energía. La profundidad de la tercera capa se determinará con referencia a este punto mediante las fórmulas (2) y (3). *

El tiempo de intercepción en el punto D para la tercera capa será, por definición,

$$T(V)_D = \frac{DH}{V_1} + \frac{GD}{V_1} - \frac{HG}{V_2}$$

El tiempo de intercepción para la misma capa en el punto P de la superficie es

$$T(V)P_2 = \frac{PD}{V_0} + \frac{DH}{V_1} - \frac{FH}{V_2} + \frac{FC}{V_1} + \frac{CP}{V_0}$$

por consiguiente

$$T(V)P_2 - T(V)_D = \frac{PD}{V_0} - \frac{FG}{V_2} + \frac{FC - GD}{V_1} + \frac{CP}{V_0}$$

Como

$$FC - GD = FN - DM$$

tenemos:

$$T(V)P_2 - T(V)_D = \frac{PD}{V_0} - \frac{FG}{V_2} + \frac{FN}{V_1} - \frac{DM}{V_1} + \frac{CP}{V_0}$$

$$= \frac{PD}{V_0} + \frac{CP}{V_0} - \frac{DM}{V_1} = \frac{PD}{V_0} + \frac{BP}{V_0}$$

puesto que, de acuerdo con el principio de Fermat,

$$\frac{FN}{V_1} = \frac{FG}{V_2} \text{ y } \frac{DM}{V_1} = \frac{CB}{V_0}$$

siendo DB perpendicular a CP, de manera que

$$\frac{CP}{V_0} - \frac{DM}{V_1} = \frac{CP}{V_0} - \frac{CB}{V_0} = \frac{BP}{V_0}$$

Se notará también que

$$BP = PD \cdot \cos(\varphi_1 + \varphi_2)$$

donde φ_1 y φ_2 se definen en (8)

Se obtiene de esta manera el tiempo de intercepción en el punto D.

Los ángulos θ_1 y θ_2 se determinan por la ley de Snellius, y luego las relaciones

$$\frac{V_1}{W_{2d}} = \text{sen } \theta_1 \text{ y } \frac{V_1}{W_{2u}} = \text{sen } \theta_2 \quad (10)$$

se usan otra vez en el nomograma con el nuevo valor del tiempo de intercepción para obtener Z_1 y X_{11} del punto sobre la tercera capa. Este punto se localiza midiendo la distancia X_{11} desde el punto D por la superficie del contacto de la segunda y tercera capas, y llevando la profundidad Z_1 perpendicularmente a la línea del contacto.

En caso general, en lugar de (10) tendremos:

$$\frac{V_n}{W_{(n+1)d}} = \text{sen } \theta_{n1} \text{ y } \frac{V_n}{W_{(n+1)u}} = \text{sen } \theta_{n2} \quad (10)'$$

X. — Si se presentan más capas refractoras, el procedimiento es exactamente el mismo que se acaba de escribir. Así, por

ejemplo, para cuatro capas (Fig. 4), el tiempo de intercepción en el punto C será

$$T(V)_C = T(V)_{P3} - \left(\frac{AB}{V_0} + \frac{BC}{V_1} + \frac{AM}{V_0} + \frac{BK}{V_1} \right) \quad (11)$$

Las trayectorias AB, BC, AM, y BK son fácilmente calculadas o medidas sobre el perfil; los nuevos ángulos se determinan según la expresión (10)' por la ley de Snellius, y las fórmulas (2) y (3) se aplican nuevamente para encontrar la profundidad de la capa como antes.

XI. — Otro método para la determinación de las profundidades a diversas capas consiste en aplicar la fórmula general de refracción.

La fórmula (2) para una capa horizontal se reduce a

$$\frac{z}{V_0} = \frac{T(V)}{2\sqrt{1-(V_0/V_1)^2}}$$

Por analogía, empleando las mismas consideraciones geométricas para las capas inclinadas que para las capas horizontales, obtenemos

$$\frac{z_i}{V_i} = \left[T(V)_2 - \frac{z_0'}{V_0} \cdot F\left(\frac{V_0}{U_{2d}}, \frac{V_0}{U_{2u}}\right) \right] \frac{1}{F\left(\frac{V_1}{W_{2d}}, \frac{V_1}{W_{2u}}\right)} \quad (12)$$

donde $Z_0' = SD$ (figura 1) cuyo valor puede calcularse o medirse, y

$$F\left(\frac{V_0}{U_d}, \frac{V_0}{U_u}\right)$$

se define en (2).

Del nomograma, usando las relaciones

$$\frac{V_0}{U_{2d}} \text{ y } \frac{V_0}{U_{2u}}$$

y Z_0' encontramos $T(V)'$ que se resta del valor observado $T(V)_2$; haciendo otra vez el uso del nomograma con el valor de la diferencia

$$T(V)_2 - T(V)'$$

y las relaciones

$$\frac{V_1}{W_{2d}} = \text{sen}\theta_1 \text{ y } \frac{V_1}{W_{2u}} = \text{sen}\theta_2$$

se obtiene la profundidad Z_1 .

En general, para n capas refractoras, la expresi3n (12) se convierte en

$$\frac{z_n}{V_n} = \left[T(V)_{n+1} - \frac{z_d^{(n)}}{V_0} \cdot F\left(\frac{V_0}{U_{(n+1)d}}, \frac{V_0}{U_{(n+1)u}}\right) - \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{z_i^{(n)}}{V_i} \cdot F\left(\frac{V_i}{W_{(i+1)d}}, \frac{V_i}{W_{(i+1)u}}\right) \right] \cdot \frac{1}{F\left(\frac{V_n}{W_{(n+1)d}}, \frac{V_n}{W_{(n+1)u}}\right)}$$

en donde, como antes,

$$\frac{V_n}{W_{(n+1)d}} = \text{sen}\theta_{n1}$$

$$\frac{V_n}{W_{(n+1)u}} = \text{sen}\theta_{n2}$$

Por V_0/U se entiende siempre la relaci3n obtenida directamente de la gr3fica tiempo-distancia, y por V/W la relaci3n obtenida por la aplicaci3n de la ley de Snellius para el correspondiente contacto de las capas.

El conocimiento de la velocidad W no es necesario.

La expresi3n (13) es la expresi3n m3s general de la refracci3n.

De esta manera se queda demostrado que el mismo nomograma puede usarse para cualquier n3mero de capas.

El primer m3todo es un poco m3s r3pido, en general, que el segundo.

XII. — Para cualquiera combinaci3n de capas de velocidades constantes y variables se aplican convenientemente las f3rmulas (2), (13), y (16) en la misma forma como se ha demostrado.

Es muy frecuente en la pr3ctica el caso de una capa de velocidad constante situada debajo de la capa de velocidad variable. Este caso se resuelve tambi3n por el m3todo descrito mediante los nomogramas.

Cuando PD y PC (Fig. 1) son trayectorias curvas para cualquier distribuci3n de velocidades, el tiempo de P a B en la f3rmula (9) se obtiene sustrayendo el tiempo DM del tiempo

total conocido PC.

XIII. — Si la ley de variación de velocidad en función de la profundidad no es lineal, se puede desarrollar una fórmula similar a la (6), siempre que la función sea integrable.

En vista de que la velocidad también puede variar en el sentido lateral a lo largo de la línea de refracción, es conveniente usar una expresión que represente una relación simple entre tiempo y distancia, por ejemplo

$$X = BT + AT^2$$

donde las constantes B y A son obtenidas fácilmente por el método de mínimos cuadrados. En este caso la relación entre la velocidad y la profundidad sería, después de la integración

$$z = \frac{V_n^2}{4A\pi} \left[\sqrt{1 - (V_0/V_n)^2} - \frac{V_0^2}{V_n^2} \cdot \cosh^{-1}(V_n/V_0) \right] \quad (15)$$

Tan pronto como se construyese un nomograma similar al de la figura 3 para cualquier ley de la distribución de velocidades, la determinación de profundidades se efectúa de la misma manera exactamente como fué descrito, no importa si la fórmula similar a (6) para la expresión del tiempo de intercepción resulte más complicada, puesto que una vez construido el nomograma, su resolución es tan simple como antes.

XIV. — El tiempo de intercepción puede determinarse para cualquier punto de la línea, no limitándose exclusivamente a los puntos de tiro. Después de que la gráfica tiempo-distancia ha sido arreglada de tal manera que todas las velocidades aparentes han sido trasladadas a los puntos de tiro situados en ambos extremos de la línea, los tiempos de intercepción de la correspondiente capa refractora, para cualquier punto de la superficie, se obtienen sumando los tiempos observados en este punto pertenecientes a las velocidades aparentes opuestas y restando de esta suma el tiempo total empleado por la onda en su recorrido entre los puntos de tiro extremos; este tiempo total es constante para cada capa refractora.

Así, por ejemplo, el tiempo de intercepción en el punto O (Fig. 1) sería

$$T(V) = T_{PO} + T_{P'O} - T_{PP'}$$

para cualquier capa.

De esta manera, se pueden determinar las profundidades para todos los puntos de la línea que se quieran, y delinear el perfil de las capas refractoras con cualquier aproximación deseada.

Para los relieves suaves, unos cuantos puntos pueden ser su-

ficientes, mientras que para variaciones de pendientes fuertes, será necesario tomar puntos más próximos uno a otro para detallar con mayor precisión el relieve de cada capa.

XV. — Los nomogramas, por medio de los cuales se resuelven las fórmulas (2), (3), (6) y (7) son de tipo simple y requieren poco tiempo para su construcción. Son, además, enteramente universales y se construyen una sola vez para uso permanente. Las copias de los nomogramas descritos se enviarán a los interesados.

XVI. — Consideremos un ejemplo numérico: Se trata de encontrar un punto sobre la cuarta capa (tercer contacto) (Figura número 4).

Los datos de observación para la capa son:

$$T(V)_3 = 1.137 \text{ seg. para la velocidad aparente de pendiente-arriba.}$$

$$U_{3d} = 3940 \text{ m/s}$$

$$U_{3u} = 7530 \text{ m/s}$$

Las cantidades determinadas anteriormente para capas superiores son:

$$V_0 = 1800 \text{ m/s}$$

$$V_1 = 2500 \text{ m/s}$$

$$V_2 = 3500 \text{ m/s}$$

$$\alpha = 40$$

$$\beta = 70$$

1. Primer Método:

$$\frac{V_0}{U_{3d}} = 0.457 \frac{V_0}{U_{3u}} = 0.239$$

Por la ley de la refracción se construyen las trayectorias AB, BC, AG y GF y se trazan las perpendiculares BM y CK. Entonces, el tiempo de intercepción en el punto C, según la fórmula (11), será

$$\begin{aligned} T(v)_C &= 1.137 - (0.318 + 0.251 + 0.241 + 0.125) - \\ &= 0.202 \text{ seg.} \end{aligned}$$

Según (10)'

$$\frac{V_2}{W_{3d}} = 0.736 \frac{V_2}{W_{3u}} = 0.662$$

Del nomograma

$$F\left(\frac{V_2}{W_{3d}}, \frac{V_2}{W_u}\right) = 1.507$$

Por consiguiente

$$Z_2 = 472 \text{ ms}, \quad X_2 = 515 \text{ ms}.$$

y, según (4)

$$\begin{aligned} v_3 &= 5000 \text{ m/s} \\ \gamma &= 10^\circ \end{aligned}$$

2. Segundo Método:

$$\begin{aligned} n &= 2 \\ T(v)_3 &= 1.137 \text{ seg.} \end{aligned}$$

$$\frac{V_0}{U_d} = 0.457 \quad \frac{V_0}{U_u} = 0.239$$

Por la ley de Snellius

$$\frac{V_1}{W_{2d}} = 0.570 \quad \frac{V_1}{W_{2u}} = 0.426$$

$$\frac{V_2}{W_{3d}} = 0.738 \quad \frac{V_2}{W_{3u}} = 0.672$$

Se miden

$$z_0'' = 510 \text{ ms}, \quad z_1' = 515 \text{ ms}.$$

Del nomograma

$$F\left(\frac{V_0}{U_{3d}}, \frac{V_0}{U_{3u}}\right) = 1.971 \text{ y } T(v)' = 0.558 \text{ seg.}$$

$$F\left(\frac{V_1}{W_{2d}}, \frac{V_1}{W_{2u}}\right) = 1.827 \text{ y } T(v)'' = 0.377 \text{ seg.}$$

Aplicando la fórmula general (13) obtenemos

$$T(v)_3 - T(v)' - T(v)'' = 0.202 \text{ seg.}$$