

PROFILO SISMICO VERTICALE (VSP)

SEZIONE IDROCARBURI	
NAPOLI	
25 NOV. 1985	
Proi.	7505
Sez.	Posiz.

S. Donato Milanese, Febbraio 1984

Profilo sismico verticale (VSP)

* * * *

Il profilo sismico verticale (VSP) è un tipo di rilievo comparabile ad una misura di velocità in pozzo.

La sorgente, il ricevitore e talvolta la geometria di scoppio sono gli stessi; le differenze principali tra i due tipi di operazioni consistono in:

1 - Intervallo tra i vari livelli del geofono di pozzo, che nel VSP è molto inferiore a quello di una misura di velocità.

Nei VSP i livelli sono registrati ad un intervallo che varia da 10 a 40 m lungo il foro; i livelli di una misura di velocità sono distanziati mediamente fra loro di 200-300 m.

2 - Nella misura di velocità il tempo diretto tra sorgente e ricevitore in pozzo, corrispondente ai primi arrivi, è l'informazione più importante che si vuol ottenere.

In un VSP, oltre ai primi arrivi, vengono utilizzati gli eventi riflessi che vengono registrati dal geofono di pozzo. La durata della registrazione prosegue quindi per alcuni secondi dopo l'arrivo dell'onda diretta.

3 - L'attrezzatura è la stessa, con la differenza che il registratore deve essere del tipo digitale, con una dinamica simile a quella utilizzata per i normali rilievi sismici.

Come si può notare nella fig. 1 relativa all'assemblaggio di un VSP, la dromocrona permette di definire la curva $T = f(P)$ della misura di velocità classica con una continuità dei punti largamente migliorata in conseguenza degli intervalli ridotti utilizzati per la misura.

Dopo i primi arrivi, si vedono due tipi d'allineamenti:

- il primo, in cui l'allineamento è parallelo alla dromocrona, è relativo ad onde che arrivano al geofono dall'alto (down going);
- il secondo, in cui l'allineamento ha un gradiente uguale ma opposto rispetto agli arrivi diretti, è relativo ad eventi che arrivano al geofono dal basso (up going).

Vediamo da dove provengono questi arrivi. Quelli che arrivano dal basso, sono riflessioni da strati posti al disotto del geofono (fig. 2); essi sono dunque comparabili alle riflessioni che si osservano su un sismogramma convenzionale.

Si può notare che aggiungendo ai tempi di riflessione il tempo corrispondente all'arrivo diretto, si deve ritrovare il tempo doppio della stessa riflessione su un sismogramma convenzionale.

Come su un sismogramma normale, queste riflessioni possono corrispondere a delle multiple (caso 3 di fig. 2).

Per gli arrivi al geofono dall'alto, oltre all'arrivo diretto, si possono individuare onde di tubo (Stoneley waves, arrivi diretti di onde S, vibrazioni che si propagano lungo il cavo del geofono o il casing), ed eventi che sono stati riflessi due volte, con l'ultima da un livello al di sopra della posizione del geofono.

La prima riflessione può tuttavia essersi verificata sia sopra che sotto il geofono (caso 1 di fig. 3).

Generalmente il coefficiente di riflessione in corrispondenza della superficie è molto superiore ai coefficienti di riflessione dei livelli profondi, per cui, in prima approssimazione, si può ammettere che la maggior parte delle onde "down going" siano riflesse dalla superficie del terreno.

In questo caso, essendo l'ultima parte del percorso corrispondente a quello dell'onda diretta, se si toglie dal tempo d'arrivo della riflessione "down going" il tempo di transito corrispondente al primo arrivo, si otterrà un tempo doppio equivalente a quello che si avrebbe su un sismogramma normale.

Come su un sismogramma normale, del resto, le riflessioni possono corrispondere a dei tragitti multipli (caso 3 di fig. 3).

In tutti i casi, la presenza di riflessioni "down going" prova che il coefficiente di riflessione della superficie è di valore elevato e che è probabile la presenza di riflessioni multiple sui sismogrammi normali.

Su una registrazione relativa ad un VSP si ritrovano infatti due sismogrammi convenzionali sovrapposti.

Riprendiamo la fig. 1 ed esaminiamo i due arrivi A_1 e A_2 . A_1 corrisponde ad una riflessione "up going"; essa proviene da un riflettore situato in prossimità del fondo pozzo, poichè A_1 interferisce con l'onda diretta in un punto che si trova ad una profondità poco superiore a quella del fondo pozzo.

A_2 corrisponde ad una riflessione "down going" che proviene dallo stesso riflettore A_1 ; in effetti si può verificare che se si prolungano questi due eventi, essi si intersecano alla superficie.

La riflessione B_2 è visibile solo in "down going" e C_1 solo in "up going".

In questo modo di vede che i due sismogrammi sovrapposti sono complementari.

Le riflessioni "down going" permettono di studiare le riflessioni dai livelli superficiali, riflessioni che sono generalmente difficili da seguire su un sismogramma normale, e le "up going" di studiare le riflessioni profonde, principalmente quelle che provengono dai riflettori situati al di sotto del fondo pozzo.

L'elaborazione dei dati permette di separare questi due tipi di riflessioni. E' quello che è stato fatto nelle fig. 4 e 5.

Per orizzontalizzare le riflessioni "up going", è stato aggiunto a ciascuna traccia il tempo di transito superficie-geofono, mentre per le "down going" è stato tolto lo stesso tempo; i primi arrivi in questo modo sono allineati al tempo zero.

L'accostamento di queste due figure dà una buona immagine delle riflessioni che si possono ottenere su un sismogramma normale nelle vicinanze del pozzo (fig. 6).

Nella zona di sovrapposizione, la differenza di carattere tra le due riflessioni "up" e "down going", è legata al fatto che la riflessione "down going" (A_2 a sinistra sulla figura 6) corrisponde ad un tragitto che attraversa due volte gli strati superficiali, in particolare l'aerato, con notevole attenuazione delle alte frequenze.

Se gli strati riflettenti sono orizzontali, l'allineamento degli eventi riflessi "down going" avrà lo stesso gradiente (oppure opposto se si tratta di "up going") dei primi arrivi. Se invece gli strati riflettenti sono pendenti, gli allineamenti avranno sempre un gradiente inferiore rispetto ai primi arrivi, indipendentemente dalla direzione della pendenza degli strati. Questa diminuzione del gradiente è più accentuata per le onde "up going" rispetto alle "down going".

Consideriamo la fig. 7, ed assumiamo che la velocità sia costante; sia inoltre R il riflettore e G la posizione del geofono. Se E_1 è il punto simmetrico ad E (testa pozzo) rispetto al riflettore R, e G_1 il punto simmetrico a G rispetto alla superficie del suolo, si vede che il tragitto dell'onda riflessa "up going" ER_1G è equivalente al tragitto rettilineo E_1R_1G e che il tragitto dell'onda riflessa "down going" ER_2RG è equivalente al tragitto rettilineo E_1R_2RG .

Si constata subito che la porzione esplorata sul riflettore per l'onda "up going" è OP, vicino al foro, e che la parte esplorata dall'onda "down going" è adiacente ad essa e più lontano dal foro.

Inoltre, si vede che si ha una continuità tra le "up going" quando G va da P in E e l'onda "down going" quando G va da E in P.

I tempi di tragitto s'iscrivono dunque su un'iperbole il cui vertice è ad una profondità $F = 2P \cos^2 \alpha$ e ad un tempo fittizio uguale al tempo di percorso EF_1 .

Partendo da questa constatazione si traccia facilmente il sismogramma sismico verticale (fig. 8), l'iperbole $F^i ABC'$ e si evidenzia sul sismogramma la porzione CB. Si noterà che gli arrivi teorici $AB_1 B_1 C_1$ corrispondenti ad un riflettore orizzontale sono a tempi superiori e sono più pendenti rispetto agli arrivi corrispondenti ad un riflettore pendente R.

Misurando questo scarto di gradiente, si può stimare la pendenza dello strato riflettente.

Nella realtà il calcolo esatto non è molto semplice, poichè la velocità è variabile in funzione della profondità. Si dimostra, in effetti, che nelle vicinanze di A la pendenza $\frac{dP}{dT}$ della riflessione "up going" è uguale a $V/\cos^2 \alpha$ dove α è la pendenza dello strato del riflettore, verticalmente sotto il pozzo.

L'equazione dell'iperbole FAB può essere scritta:

$$(E G)^2 = (E F)^2 + (FG)^2$$

$$E G = Vt$$

$$\begin{aligned} V^2 t^2 &= (2 P_o \cos \alpha \sin \alpha)^2 + (2 P_o \cos^2 \alpha - P)^2 \\ &= 4 P_o^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + 4 P_o^2 \cos^2 \alpha - 4 P_o \cos^2 \alpha P + P^2 \\ &= 4 P_o^2 \cos^2 \alpha (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha) - 4 P_o \cos^2 \alpha P + P^2 \\ &= 4 P_o^2 \cos^2 \alpha - 4 P_o P \cos^2 \alpha + P^2 \\ &= 4 P_o \cos^2 \alpha (P_o - P) + P^2 \end{aligned}$$

differenziando nel tempo

$$2V^2 t dt = (-4 P_o \cos^2 \alpha + 2 P_o) dP$$

$$\text{ma per } P = P_o \quad t = \frac{P_o}{V}$$

quindi

$$2V^2 \cdot \frac{P_o}{V} dt = (-4 P_o \cos^2 \alpha + 2P_o) dP$$

$$2V P_o dt = (-4 P_o \cos^2 \alpha + 2P_o) dP$$

$$\frac{dP}{dt} P_o = \frac{2 V P_o}{-4 P_o \cos^2 \alpha + 2P_o} = \frac{V}{-2 \cos^2 \alpha + 1} = \frac{V}{1 - 2 \cos^2 \alpha}$$

$$= \frac{V}{\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha - 2 \cos^2 \alpha} = \frac{V}{\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha} = - \frac{V}{\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = - \frac{V}{\cos^2 \alpha}$$

Nel caso di strati pendenti, può essere interessante effettuare più sismogrammi verticali a partire da punti di tiro situati a diverse distanze ed in differenti direzioni rispetto al pozzo.

Concludendo si può dire che i VSP permettono:

- 1) - di ottenere un legame tra il sismogramma sintetico e le sezioni sismiche;
- 2) - di valutare il coefficiente di riflessione della superficie o di altri forti riflettori ed individuare inoltre le rispettive riflessioni multiple, a volte non facilmente determinabili sulle sezioni sismiche;
- 3) - di misurare l'effetto del filtraggio introdotto dall'aerato;
- 4) - di posizionare esattamente, sulla sezione sismica, il fondo pozzo in rapporto alle riflessioni "up going";
- 5) - di controllare le pendenze degli orizzonti riflettenti nelle vicinanze del pozzo. E' evidente che la sezione sismica deve essere migrata prima della comparazione con l'eventuale VSP.

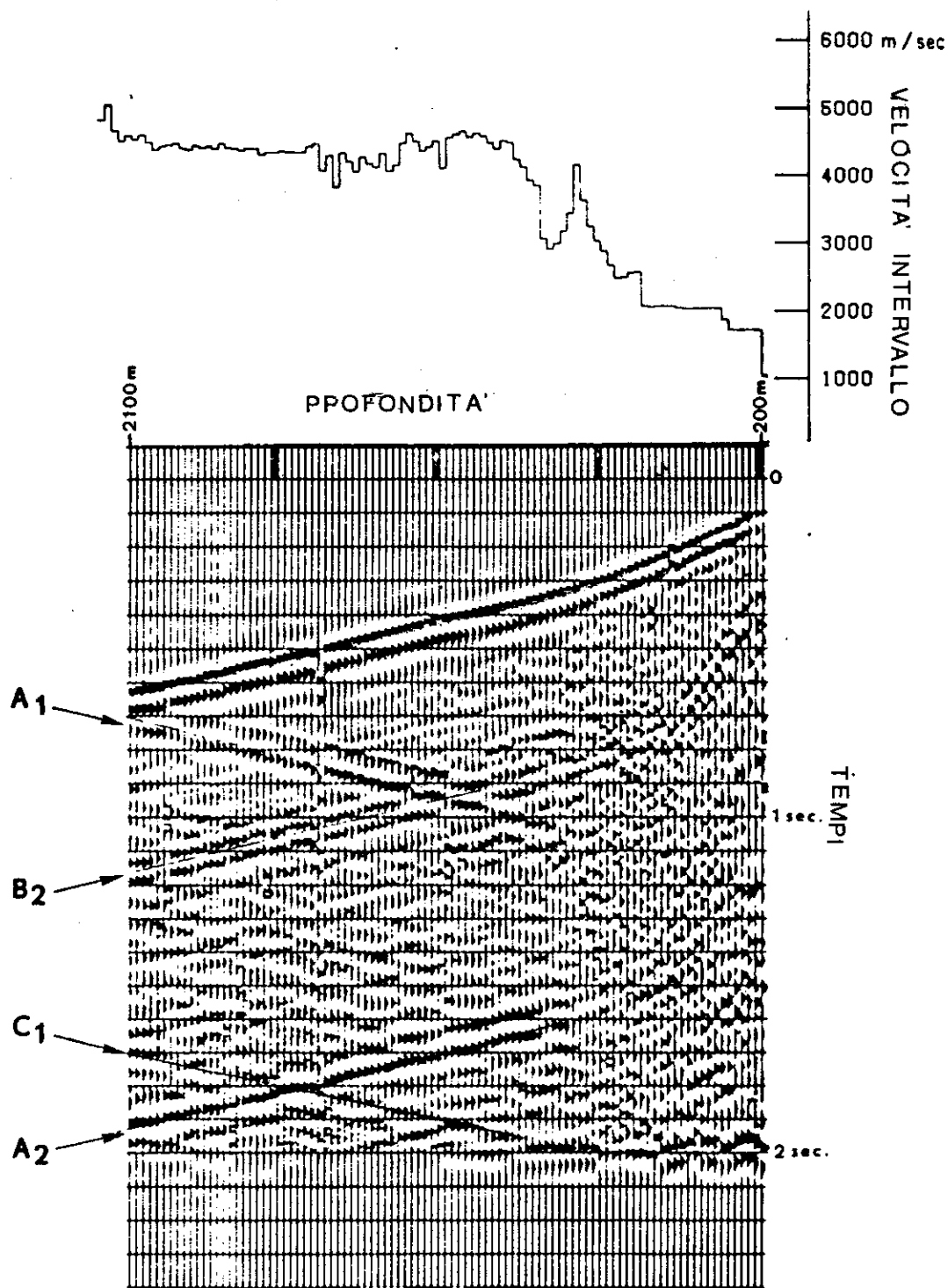


Fig. 1 - Esempio d'assemblaggio di un vertical seismic profile (VSP) registrato da 200 a 2000 m di profondità. I primi arrivi permettono di stabilire la curva $T = f(P)$. Si vedono nei secondi arrivi due serie d'avvenimenti, paralleli a primi arrivi o di gradienti opposti.

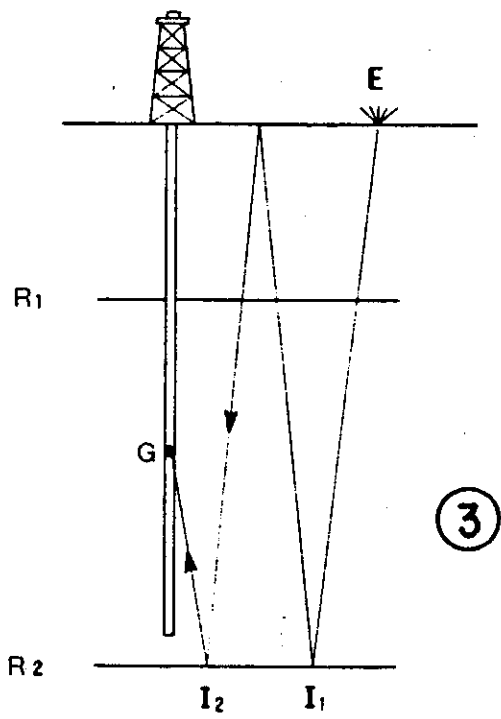
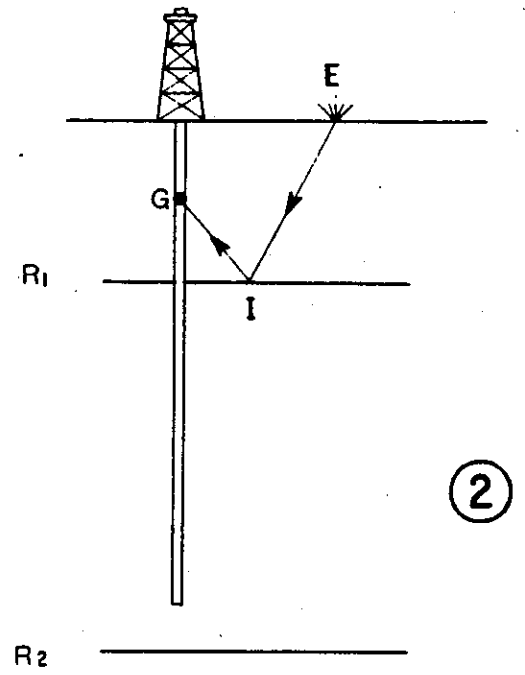
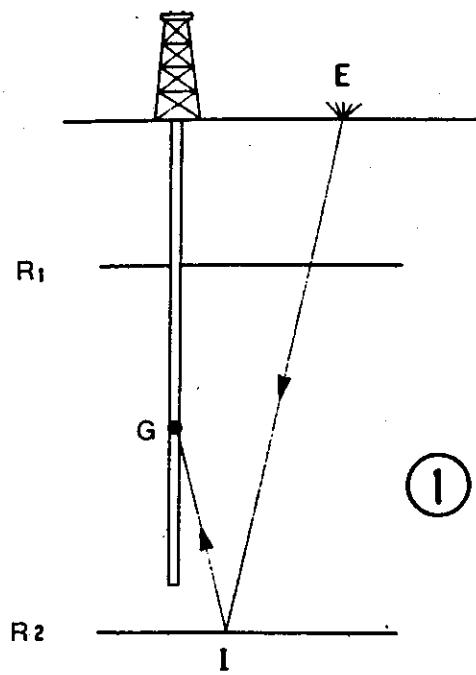


Fig. 2 - Riflessioni dal basso (up-going). Si constata che se si aggiunge a questi arrivi il tempo diretto EG, si ottiene un film identico a quello che si avrebbe con un geofono in superficie.

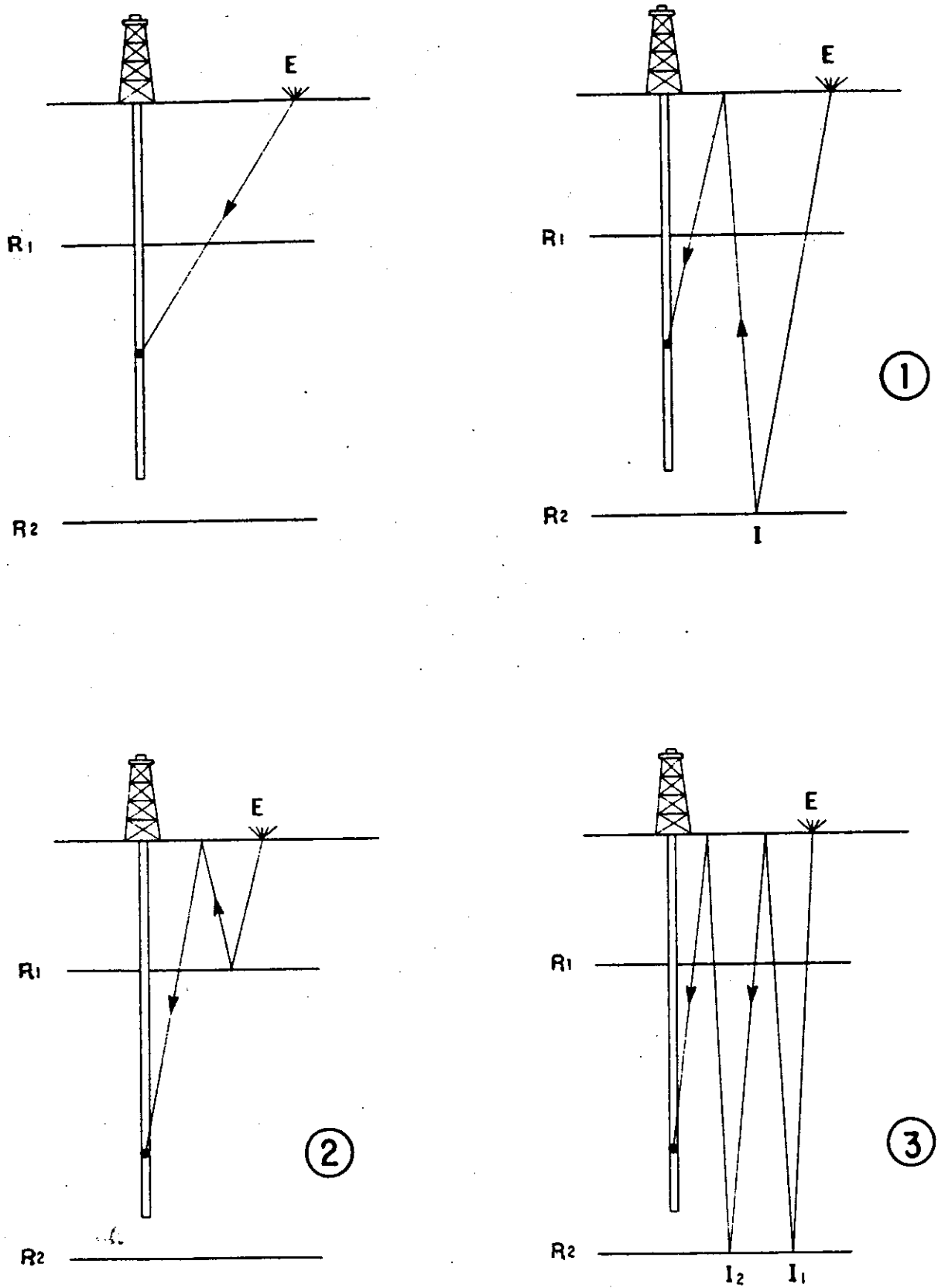


Fig. 3 - Riflessioni dall'alto (down-going). Nella misura dove la riflessione finale è generata dalla superficie, se si toglie il tempo diretto EG, si ottiene un film identico a quello che si avrebbe con un geofono in superficie.

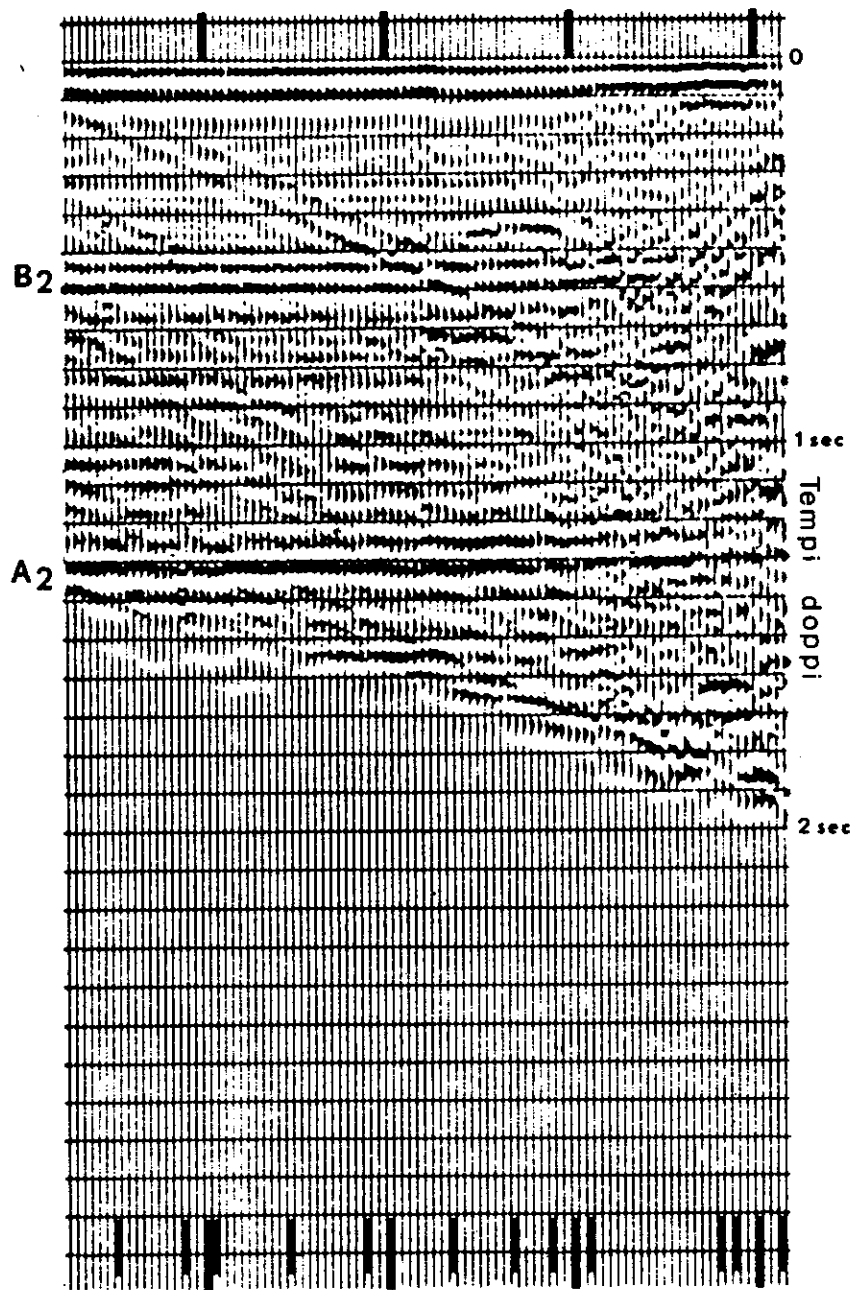


Fig. 4 - Allineando i primi arrivi sulla linea 0 (togliendo a ciascuna traccia il tempo d'arrivo diretto) si mettono orizzontali le riflessioni down-going. Un trattamento speciale permette di rinforzare queste ed attenuare le "up-going".

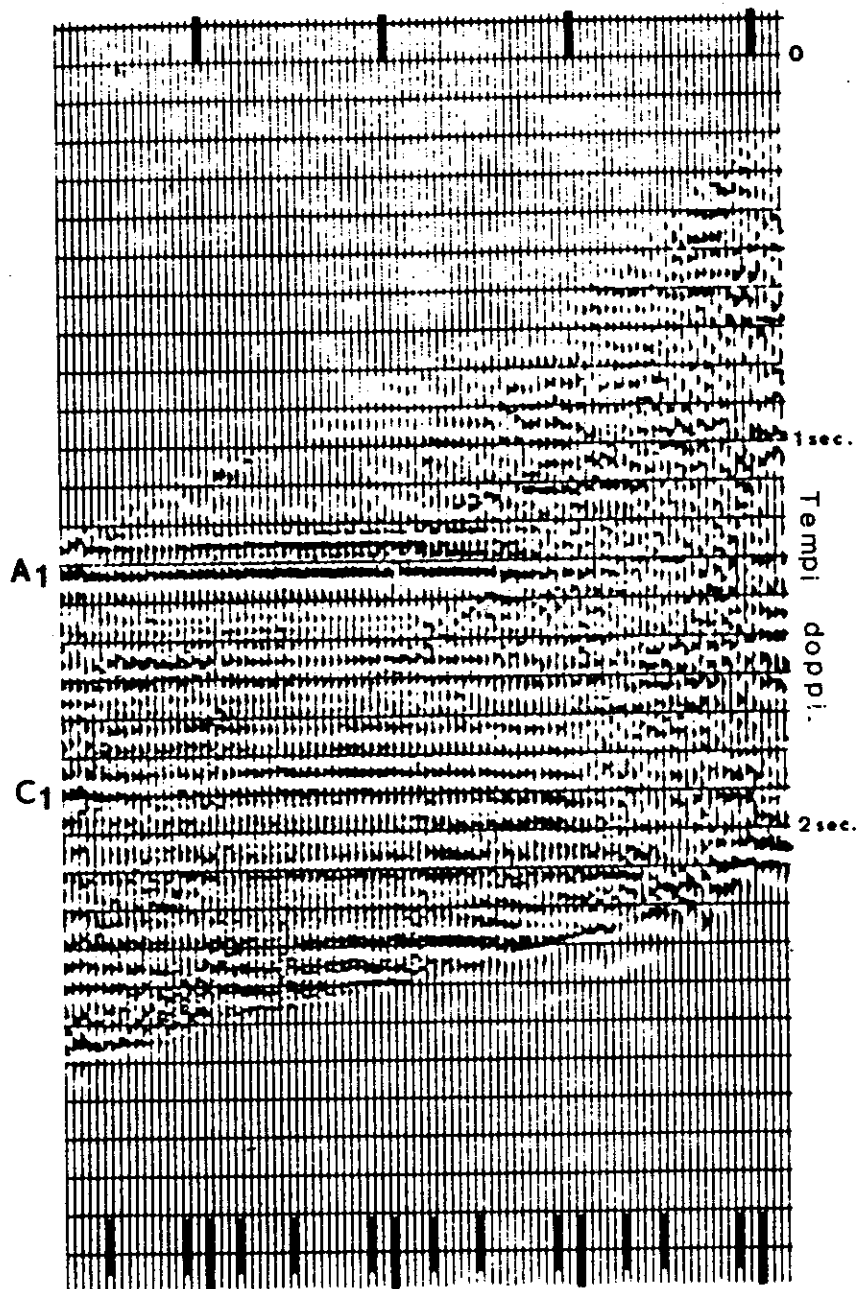


Fig. 5 - Aggiungendo a ciascuna traccia un tempo uguale al tempo diretto, si rendono orizzontali le riflessioni "up-going". Le "down-going" ed i primi arrivi sono stati filtrati.

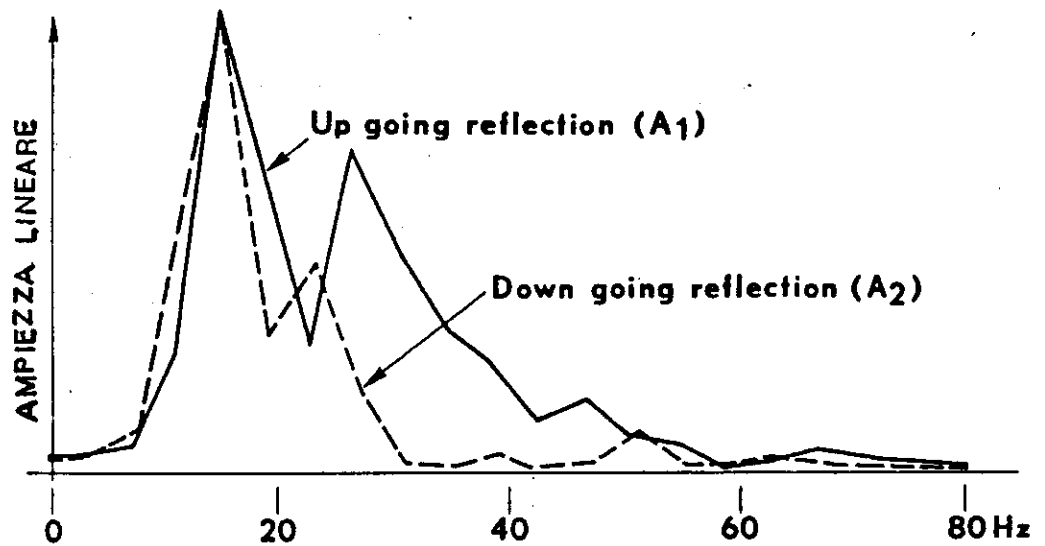
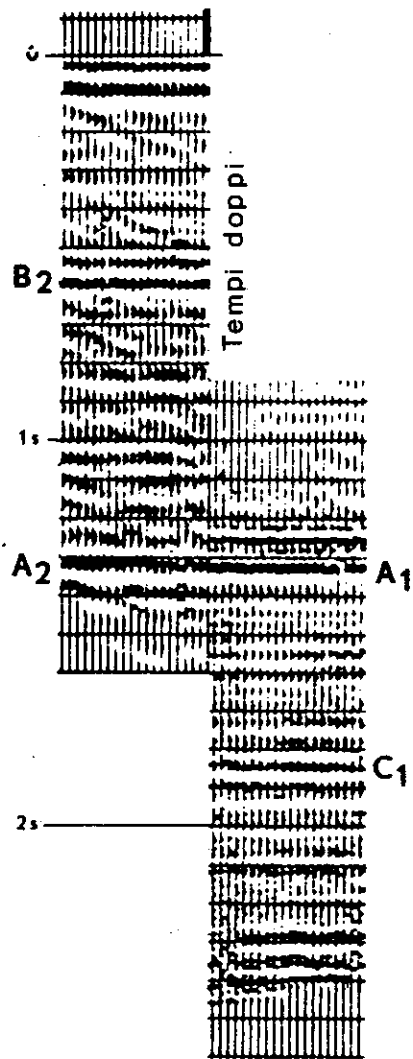


Fig. 6 - Questa figura è ottenuta assemblando le parti più significative delle figure 4 e 5. La riflessione A, appare registrata direttamente in A₁ (a destra) e dopo un doppio attraversamento dello strato areato in A₂ (a sinistra). Si può valutare l'assorbimento delle alte frequenze in questo attraversamento.

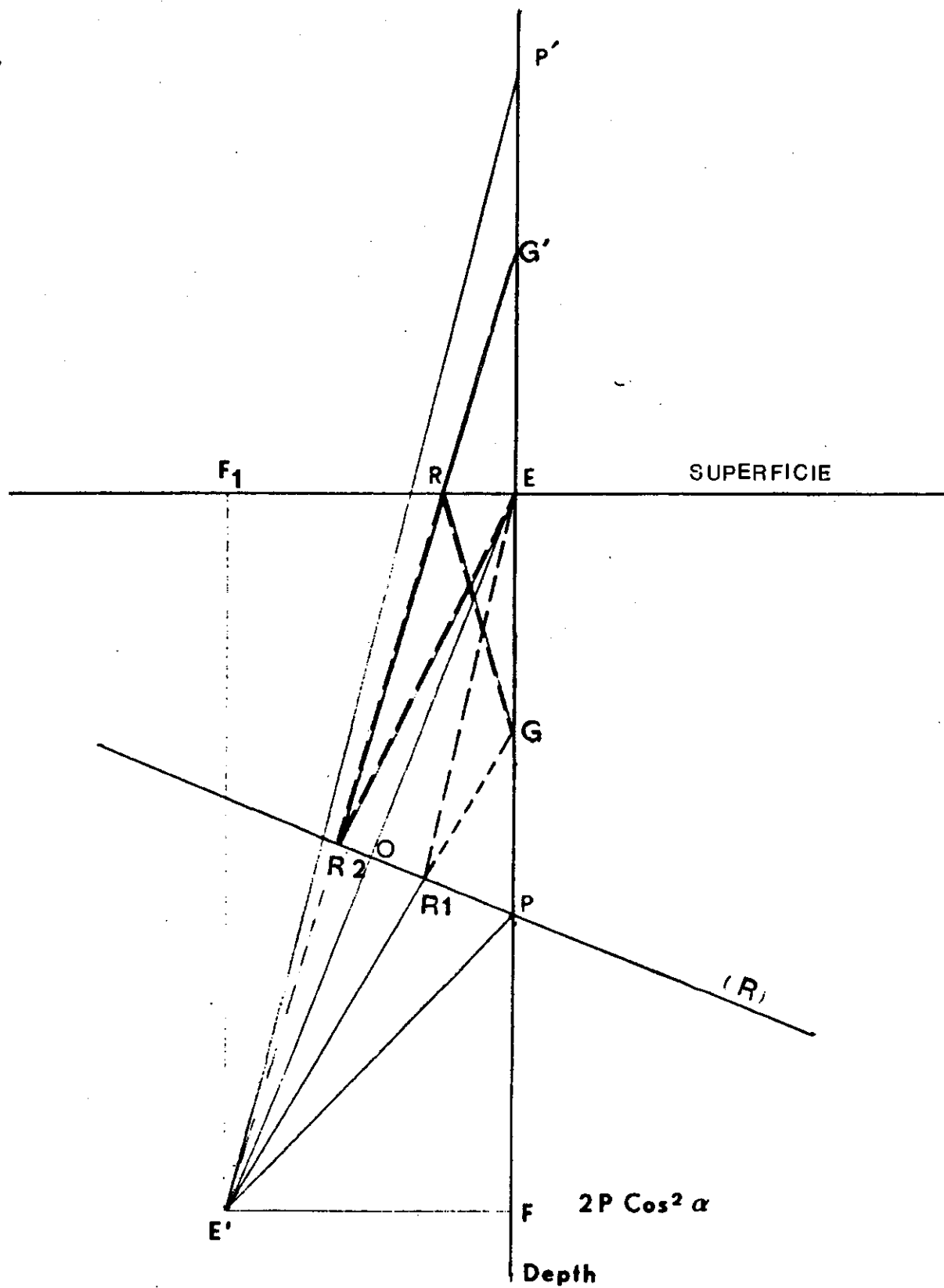


Fig. 7 - Costruzione dei tragitti nel caso di un riflettore pendente.

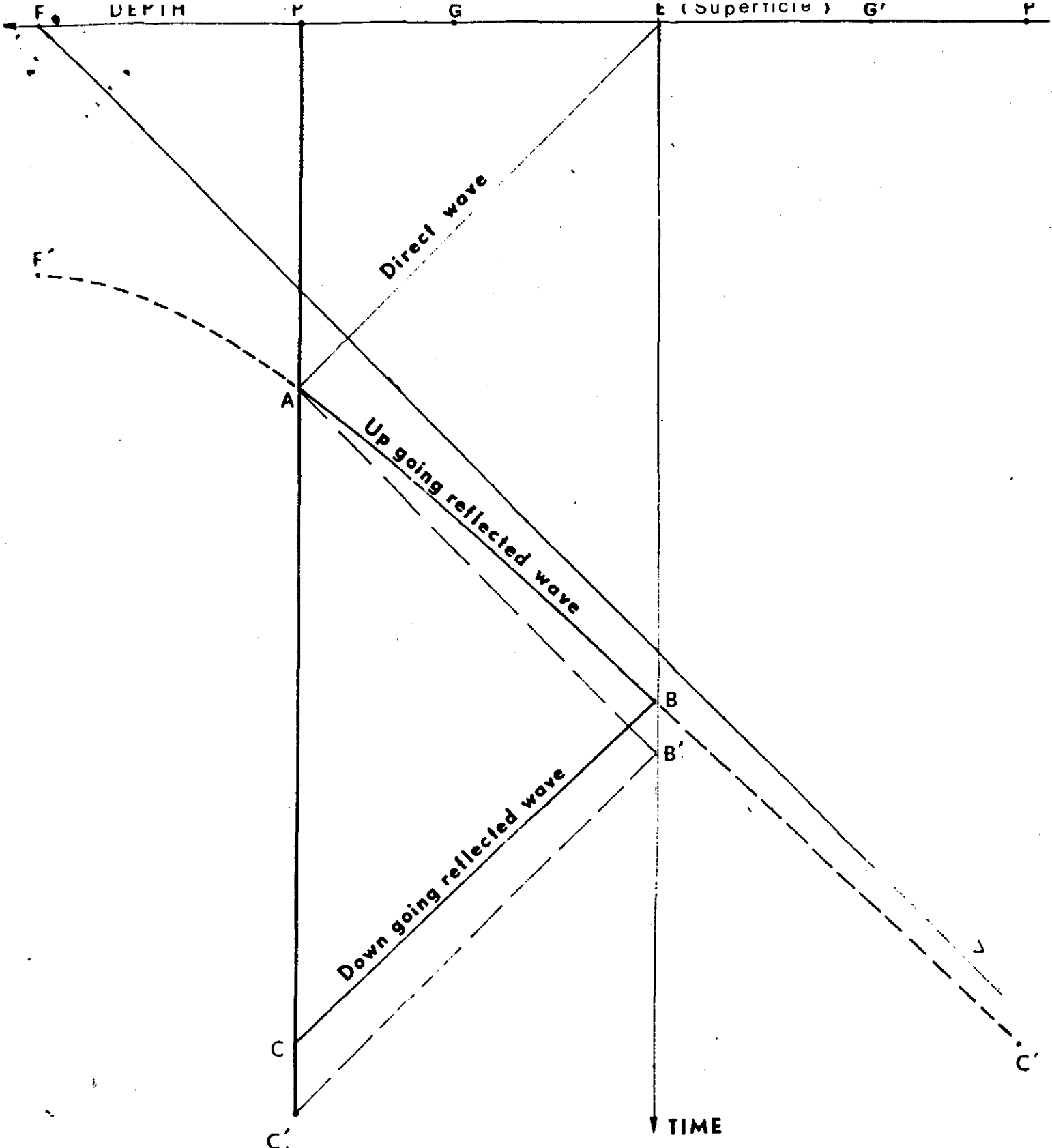


Fig. 8 - Partendo dalla figura precedente, si può costruire il diagramma tempi-profondità relativi al riflettore pendente (R). La parte reale del diagramma è compresa tra la superficie (E) e la profondità (P) dove il pozzo incontra il riflettore (R)