

## Capitolo 10

### **Propagazione del suono in mare**

#### **10.1) Le forme normali di propagazione.**

Iniziamo questo capitolo accennando alle forme “normali” di propagazione del suono in mare, esse sono i fenomeni mediante i quali il sonar può localizzare i bersagli nello spazio subacqueo.

Una sorgente sonora immersa nell'acqua genera delle onde acustiche che si propagano secondo successive superfici sferiche: questo tipo di spostamento dell'energia acustica è detto appunto “propagazione sferica”.

Il percorso dei raggi sonori può avvenire, oltre che per onde sferiche, anche per onde cilindriche, quando, in acque poco profonde, esso subisce l'effetto riflettente del fondo e della superficie del mare. Se il suono, che lascia la sorgente con onde sferiche, colpendo il fondo e la superficie, viene riflesso, si formano onde che contribuiscono a rinforzare quelle che proseguono il cammino orizzontalmente e che sviluppano onde cilindriche.

In acque medio-profonde si ha una combinazione dei due modi di propagazione; nel primo tratto del percorso dalla sorgente, per circa 1000 metri, si verifica lo spostamento dell'energia acustica secondo onde sferiche, dopo si stabilisce, per effetto delle riflessioni dal fondo e dalla superficie, il modo cilindrico. A causa di questi tipi di propagazione dell'energia sonora i rumori irradiati dai bersagli o gli echi di questi, giungono al sonar attenuati diversamente, secondo i casi; maggiore attenuazione si ha con la propagazione sferica, minore con la propagazione sferico-cilindrica.

Una caratteristica fondamentale relativa allo spostamento dell'energia acustica in mare è costituita dalla sua velocità, mediamente compresa tra 1430 m/sec e 1530 m/sec.

In precedenza abbiamo visto che la conoscenza della velocità del suono in acqua consente particolari rilievi operativi; vedremo in questo capitolo quale ruolo determinante ha questo parametro nelle forme di propagazione dei raggi sonori e quali conseguenze produce sul sonar.

#### **10.2) Le cause dell'attenuazione per propagazione.**

Se l'acqua del mare fosse idealmente elastica ed omogenea le onde sonore emesse da una sorgente acustica immersa subirebbero, durante la loro pro-

pagazione, un'attenuazione della pressione di una metà per ogni raddoppiamento della distanza dalla sorgente.

Questo tipo di attenuazione è dovuto alla divergenza sferica dei raggi sonori che si allontanano dalla sorgente, così come divergono i raggi luminosi emessi da una comune lampada ad incandescenza per cui la luce percepita dall'occhio diminuisce con la distanza. Purtroppo l'acqua del mare non è nè perfettamente elastica, nè perfettamente omogenea e all'attenuazione dovuta alla divergenza dei raggi se ne aggiungono altre notevoli dovute a cause diverse. Una delle cause di attenuazione che più facilmente può essere prevista e quindi il suo effetto calcolato è dovuta al parziale assorbimento dell'energia acustica da parte dell'acqua che, secondo diversi processi, la converte in calore.

Mentre la riduzione della pressione per divergenza non dipende dalla frequenza dell'onda acustica, quella dovuta all'assorbimento è dipendente da essa; questa dipendenza è valutata da alcune espressioni matematiche che si diversificano in base al campo delle frequenze operative del sonar.

La diminuzione del livello acustico dovuta all'assorbimento aumenta con l'aumentare della distanza con una legge diversa da quella che governa il fenomeno della divergenza.

Per dare un'idea dell'entità delle attenuazioni che subiscono i segnali dei bersagli attivi durante la loro propagazione nell'acqua, a causa dell'azione contemporanea dei fenomeni di divergenza sferica e di assorbimento, sono riportate in Fig. 10.1 le curve dell'attenuazione in funzione della distanza dal bersaglio, che funge da sorgente acustica.

Il diagramma ha in ascisse le distanze dal bersaglio, in ordinate le ampiezze relative della pressione del segnale. Il valore massimo che compare indica un ipotetico livello relativo di pressione nelle immediate vicinanze della sorgente, a mano a mano che la distanza da essa cresce i valori relativi di pressione decrescono secondo l'andamento indicato dalle curve. Queste sono tracciate per 4 valori di frequenza diversi (1-5-10-20) KHz per mostrare con più evidenza quale ruolo gioca il fenomeno dell'assorbimento. Si osserva infatti che alla frequenza più bassa (1 KHz) l'attenuazione, a 10 Km di distanza, è molto inferiore a quella che si riscontra alla frequenza più alta (20KHz), perché il fenomeno dell'assorbimento è molto più marcato alle alte frequenze. Le curve mostrano che le attenuazioni dei segnali, a qualche chilometro di distanza dal bersaglio, sono già molto elevate e ciò spiega le difficoltà che incontra il sonar a localizzare i bersagli lontani. Alla distanza di 5000 m, ad esempio, la pressione sonora

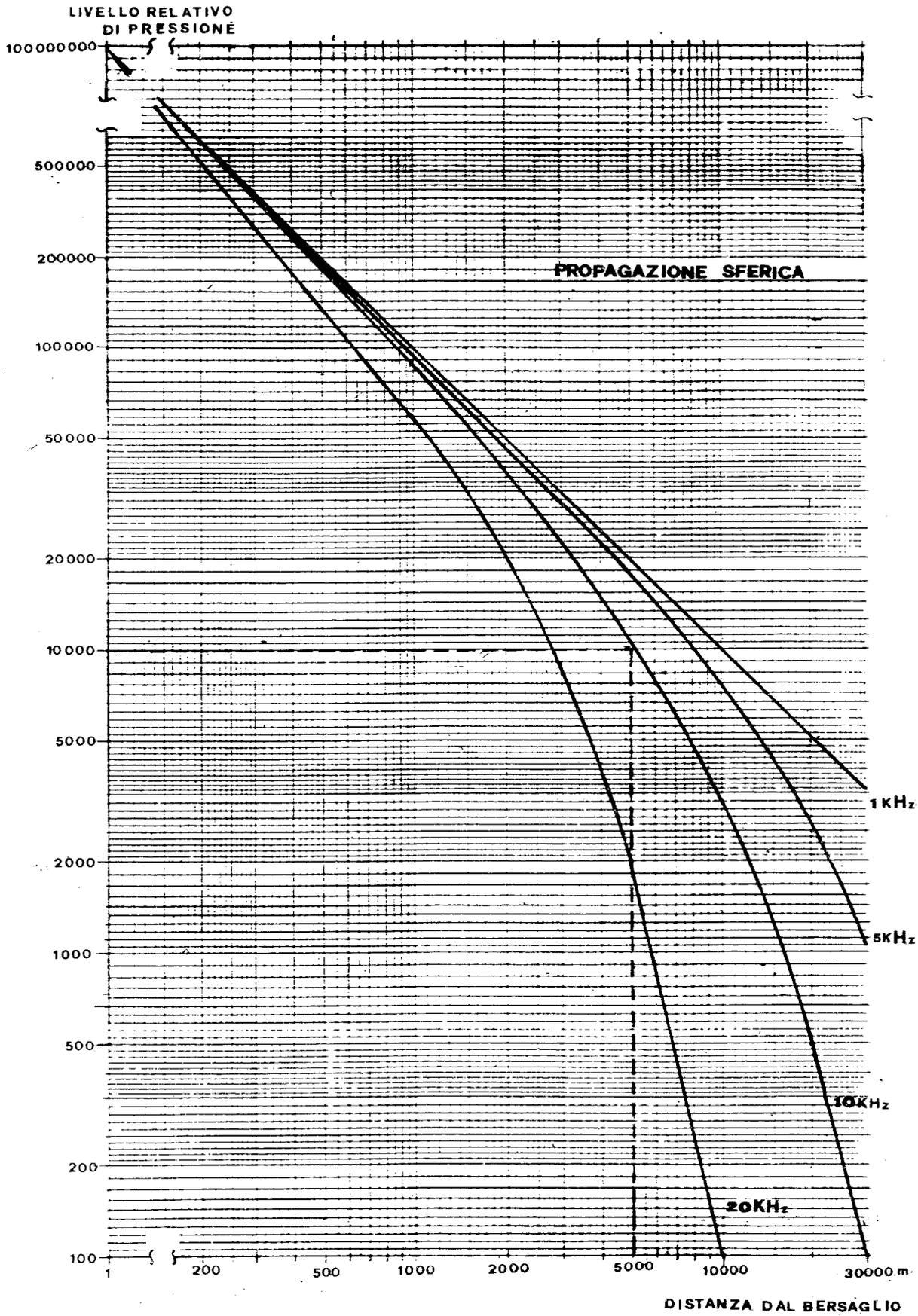


fig. 10.1 Diagramma di attenuazione dei rumori emessi dai bersagli nel caso di propagazione sferica.

emessa alla frequenza di 10 KHz risulta attenuata di ben 10000 volte. In figura 10.1 si vede infatti che alla distanza di 1 metro dal bersaglio il livello relativo della pressione è 100.000.000 mentre a 5000 m esso scende a 10000 attenuandosi di quanto detto.

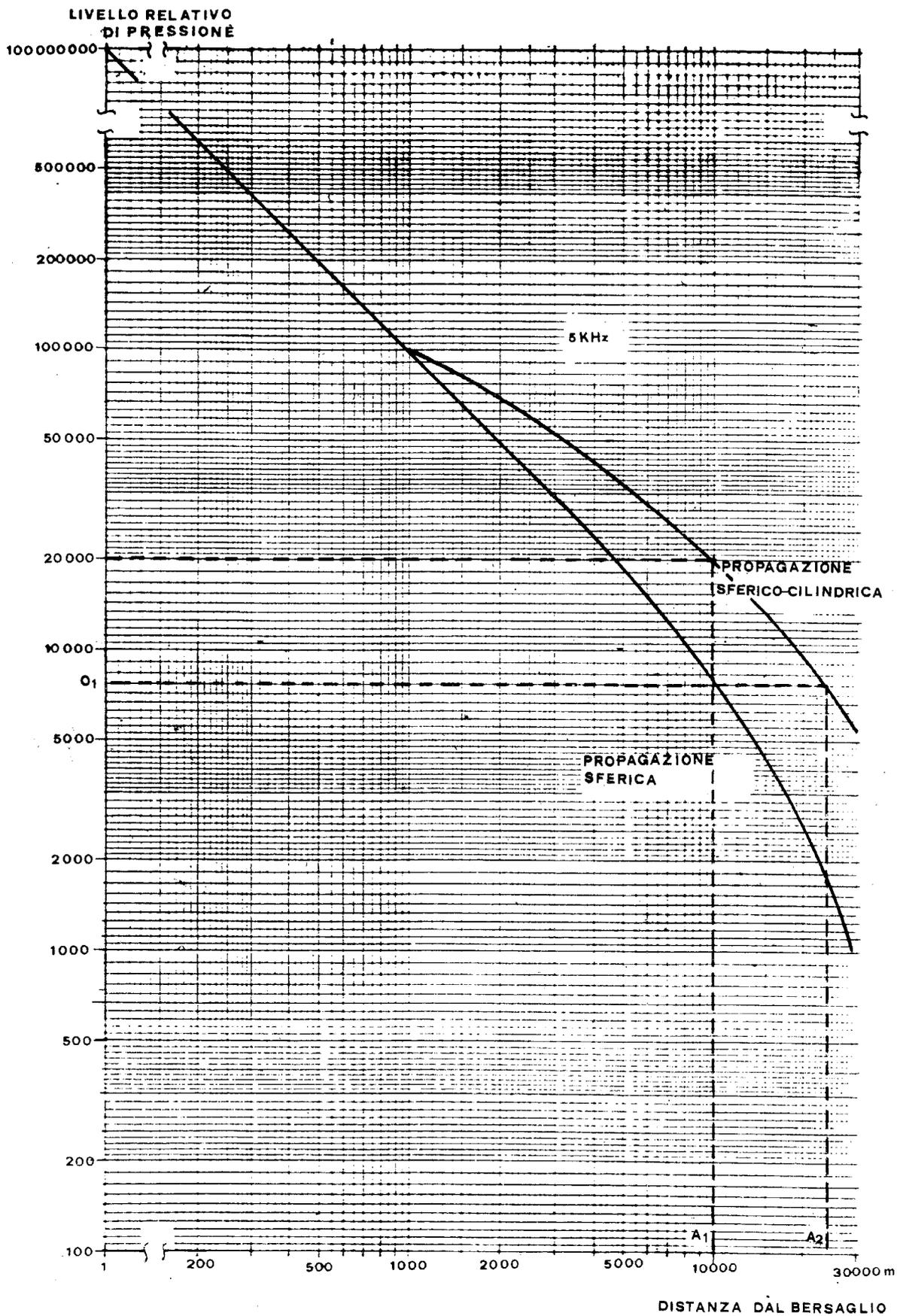
Una situazione migliore si verifica quando la propagazione è sferico-cilindrica, in questo caso l'attenuazione per divergenza sferica incide pesantemente sul segnale per i primi mille metri, dopo di che la divergenza diventa cilindrica e l'attenuazione è meno rilevante.

Nella Fig. 10.2 sono riportate, per un confronto diretto, le curve di attenuazione di un segnale a 5KHz, che si propaga nell'acqua secondo i due modi che abbiamo preso in esame; nelle curve è sempre compreso l'effetto dovuto al fenomeno dell'assorbimento. Alla distanza di 10000 m dal bersaglio, ad esempio, le attenuazioni del suono risultano: propagazione sferico-cil. 5000 volte propagazione sferica 12000 volte.

Per avere un'idea delle limitazioni dipendenti dal modo di propagazione, che si hanno durante la scoperta passiva, basta osservare con attenzione la figura 10.2, facendo le seguenti considerazioni: supponiamo che il segnale di un bersaglio attivo giunga al sonar tramite propagazione sferica con l'attenuazione indicata nel punto di ordinata 01, corrispondente ad una distanza di 10000 m. (ascissa A1), supponiamo altresì che il rapporto tra il segnale ricevuto e il disturbo ambiente sia il minimo indispensabile affinché il sonar possa effettuare la scoperta, dalla figura vediamo che se la propagazione fosse sferico - cilindrica si avrebbe la stessa attenuazione del segnale (ordinata 01) con il bersaglio posto alla distanza di 24000 m (ascissa A2). In queste condizioni il rapporto tra il segnale e il disturbo resterebbe invariato e la scoperta risulterebbe sempre possibile, ma con un incremento di portata di ben 14000 m.

Le stesse leggi sulla propagazione interessano anche l'emissione degli impulsi per la localizzazione attiva e la conseguente ricezione dell'eco dai bersagli. In questo modo operativo del sonar l'attenuazione dovuta alla propagazione incide tanto nella fase di emissione dell'impulso, quanto nella fase di ritorno dell'eco. Per questa ragione i suoi effetti sono talmente sentiti che impongono al sonar l'emissione di notevoli quantità di energia per ricevere un livello di pressione dell'eco appena sufficiente a localizzare i bersagli a qualche decina di chilometri.

Nella Fig. 10.3 sono riportate le curve che mostrano l'attenuazione che subisce la pressione di un impulso emesso dal sonar, nel percorso di andata e ritorno, in funzione della distanza del bersaglio passivo.



**fig. 10.2** Diagrammi di attenuazione dei rumori emessi dai bersagli nel caso di propagazione sfericocilindrica e sferica.

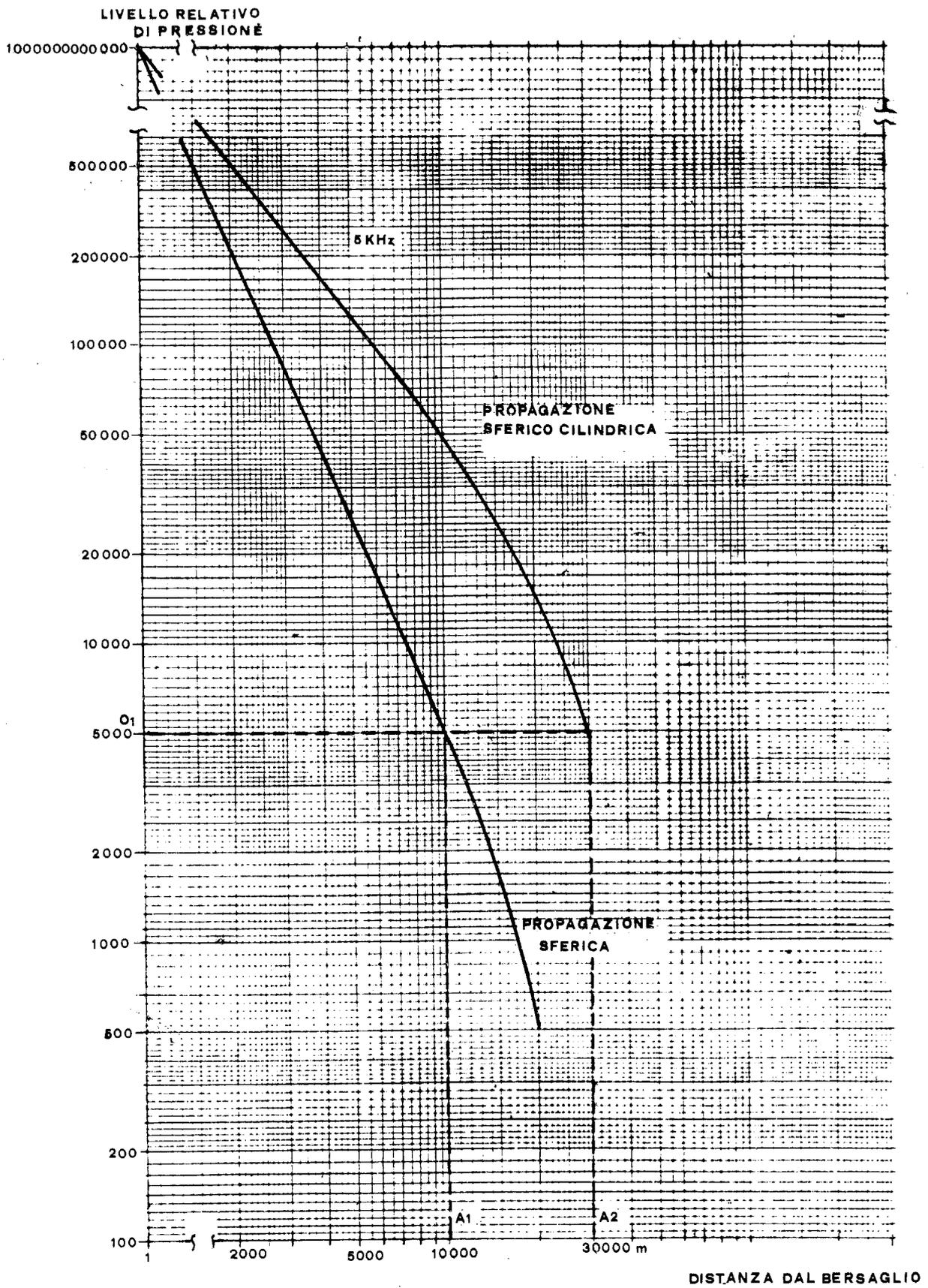


fig. 10.3 Diagrammi di attenuazione dell'impulso sonar nel percorso di andata e ritorno (eco).

Le curve sono relative ai due modi di propagazione del suono per un sonar che emette impulsi alla frequenza di 5000 Hz. Alla distanza di 10000 m dal bersaglio, nel caso di propagazione sferica l'impulso emesso dal sonar viene attenuato di 200.000.000 di volte! Dall'esame delle curve si vede che nella localizzazione attiva la differenza tra i due modi di propagazione è ancora più evidente che nella ricerca passiva a causa del doppio percorso che deve esser superato dall'impulso.

Dai grafici possiamo valutare le differenze nelle distanze di scoperta attiva che dipendono dai modi di propagazione. Consideriamo il caso dell'eco di un bersaglio che giunge al sonar tramite propagazione sferica con l'attenuazione indicata nel punto di ordinata 01 corrispondente ad una distanza di 10000 m (ascissa A1). Ipotizziamo che il rapporto tra il livello dell'eco e il disturbo ambiente sia il minimo sufficiente per la scoperta del bersaglio. Dal grafico di figura 10.3 si vede che allo stesso livello di pressione dell'eco corrisponde, nell'altro modo di propagazione, una distanza di scoperta molto più elevata. Si hanno infatti 30.000 m (ascissa A2) contro 10.000 m (ascissa A1) per la propagazione sferica.

### **10.3) Propagazione anomala del suono.**

I modi di propagazione del suono che abbiamo esaminato nel precedente paragrafo sono detti normali, essi si verificano quando l'ambiente subacqueo presenta caratteristiche di uniformità nella velocità di spostamento del suono a tutte le profondità.

Se questo parametro non è uniforme provoca notevoli modificazioni delle traiettorie dei raggi sonori a causa del fenomeno di "rifrazione". Il fenomeno si verifica quando un raggio sonoro passa da uno strato d'acqua S1, che gli consente la velocità V1, ad uno strato S2, che gli consente la velocità V2. Se V1 è maggiore di V2 il raggio subisce un'inclinazione verso lo strato S2, se V1 è minore di V2 il raggio si inclina verso S1.

Quando, a seguito di certe cause, si verificano variazioni della velocità del suono, la propagazione non segue più i modi normali e diventa "anomala". Questo tipo di propagazione è molto frequente e crea, salvo in alcuni casi speciali, gravissimi problemi alla localizzazione subacquea. Esso si manifesta prevalentemente nel piano verticale, cioè al variare della quota.

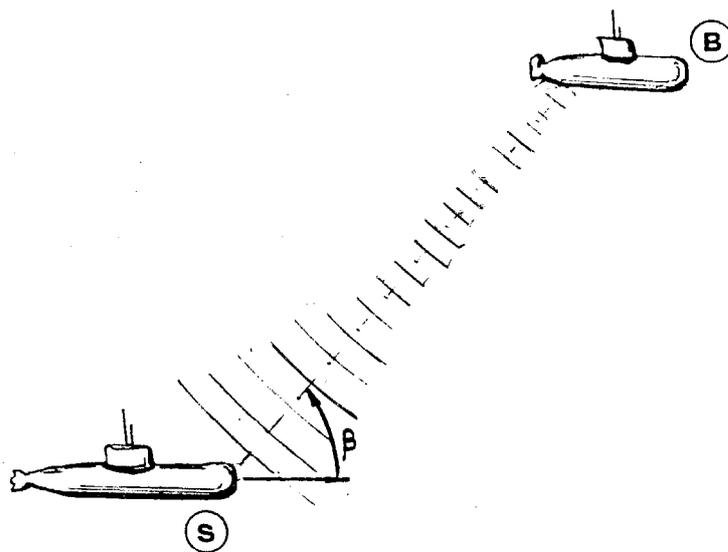
Il fenomeno si verifica con molta facilità in quanto la velocità di propagazione del suono è subordinata a diversi fattori molto variabili: la temperatura dell'acqua, la sua salinità e la profondità alla quale avviene lo spostamento dell'energia.

Si comprende come, tra i diversi fattori, la temperatura in particolare possa essere un elemento estremamente variabile in dipendenza dalle stagioni, dalle zone e dall'alternarsi del giorno e della notte che creano diverse condizioni termiche alle varie profondità del mare. La velocità del suono aumenta se aumenta la temperatura dell'acqua, diminuisce se la temperatura diminuisce.

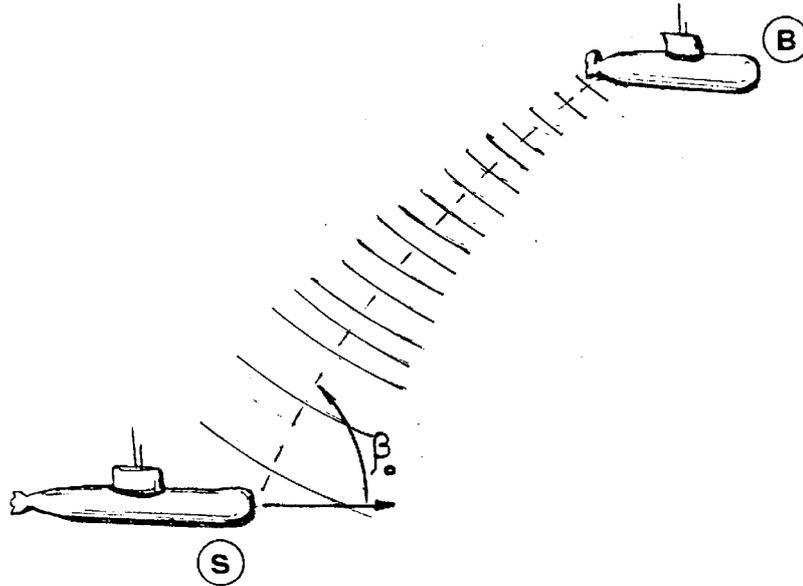
Accurati studi sono stati fatti durante la seconda guerra mondiale, per indagare su questo importante aspetto della fisica subacquea; essi hanno portato allo sviluppo di una teoria che consente di calcolare e tracciare le traiettorie dei raggi sonori che subiscono l'effetto della propagazione anomala.

Per fare un esempio di uno dei molteplici effetti provocati da questa propagazione vediamo i due tracciati riportati nelle Fig. 10.4/a e 10.4/b.

Nel tracciato a) si vede il sommergibile S che, in condizioni di propagazione normale, riceve le onde acustiche emesse dal bersaglio attivo B disposto ad una quota superiore; il sommergibile localizza il bersaglio nel piano verticale secondo l'angolo di sito  $\beta$ . Nel tracciato b) si vede che il percorso delle onde acustiche, a seguito della propagazione anomala, non segue più una traiettoria rettilinea, ma una linea curva. In questo caso il sommergibile determina l'angolo di sito  $\beta_0$  della direzione di arrivo dei



**fig. 10.4/a** Propagazione ideale del suono



**fig. 10.4/b** Propagazione anomala del suono

raggi sonori, che non corrisponde a quello reale. L'inconveniente ora mostrato è uno dei più modesti che il sonar subisce a causa della propagazione anomala.

#### **10.4) Le traiettorie dei raggi sonori.**

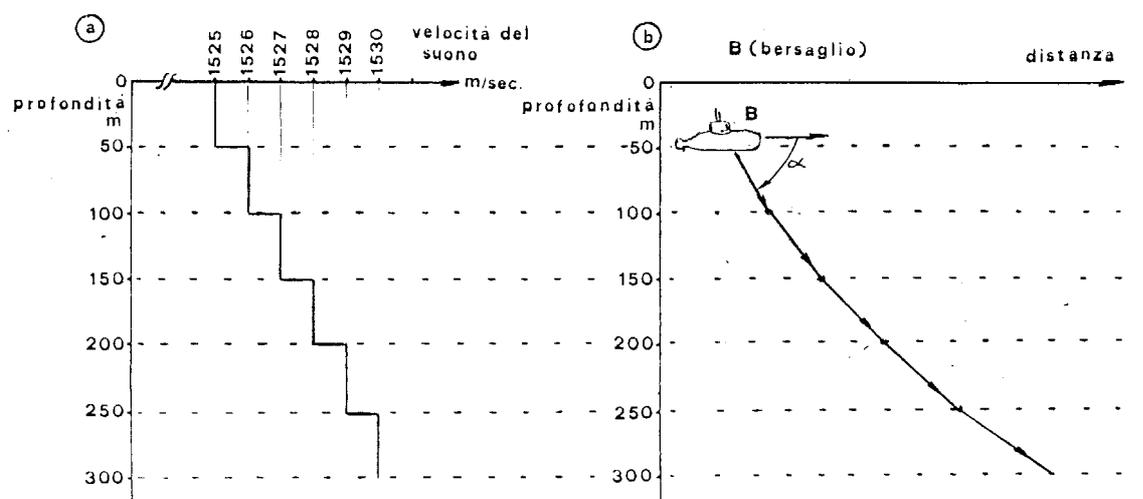
Dalla conoscenza della velocità del suono alle diverse profondità del mare è possibile calcolare e tracciare il percorso dei raggi sonori per consentire all'operatore del sonar di conoscere quali sono, in una certa zona di mare e in un particolare momento, le possibilità operative del sistema di localizzazione.

Il calcolo delle traiettorie dei raggi sonori ed il loro tracciamento viene eseguito automaticamente da speciali apparecchiature elettroniche che ricevono, in modo opportuno, o il valore della velocità del suono o le variabili da cui essa dipende.

La velocità del suono viene misurata con appositi strumenti detti "bati velocigrafi", ai quali sono collegati speciali sensori, sistemati all'esterno del sommergibile, che consentono di effettuare la misura a diverse profondità. La velocità del suono può essere inoltre calcolata dopo aver misurato la temperatura e la salinità del mare alle diverse quote. Il rilievo della temperatura dell'acqua viene eseguito con un dispositivo chiamato "batitermo-

grafo”, al quale è collegato un sensore sistemato all’esterno dello scafo; il batitermografo consente di registrare direttamente la temperatura dell’acqua in funzione della profondità.

A questo punto ci si può chiedere in che modo varino le traiettorie dei raggi sonori quando varia la loro velocità di propagazione; una semplice dimostrazione è data in Fig. 10.5.



**fig. 10.5** Propagazione anomala del suono - 1° modello.

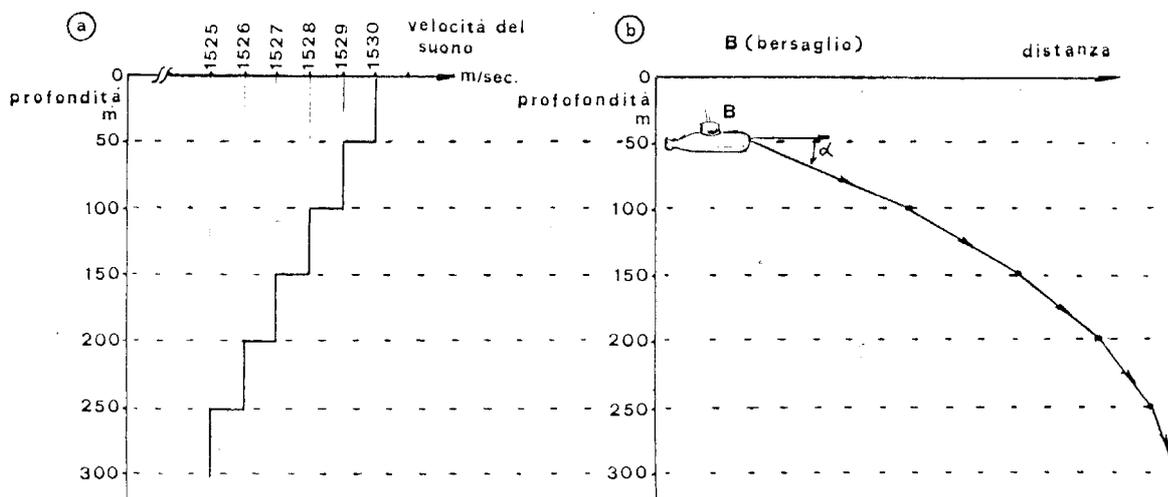
Nella parte a) è riportato un ipotetico andamento della velocità del suono in funzione della profondità, nella parte b) la corrispondente variazione della traiettoria calcolata, che subisce un raggio sonoro a causa della differenza di velocità a cui è sottoposto durante il percorso.

Per chiarire il comportamento del fenomeno si suppone che la velocità del suono subisca delle variazioni discontinue (a scalini) figura 10.5/a, passando da 1525 m/sec a quota 0, a 1530 m/sec a quota 250 m con un incremento costante di velocità di 1 m/sec ogni 50 m di profondità. Consideriamo il bersaglio attivo, posto a 50 m di profondità, di figura 10.5/b. Esso irradia il suo rumore secondo infiniti raggi sonori che si staccano per propagarsi in tutte le direzioni; esaminiamo ora il comportamento di uno di questi, il cui tracciato è mostrato in figura 10.5/b.

Il raggio lascia il bersaglio con un’angolazione  $\alpha$  che resta costante nel

tratto di mare che va da 50 a 100 m dato che in esso la velocità del suono è costante (1526 m/sec). Quando il raggio entra nella fascia di mare che va da 100 a 150 m la velocità di propagazione aumenta (1527 m/sec) ed esso subisce una modificazione della sua inclinazione verso l'alto; in questo tratto l'angolo  $\alpha$  subisce una prima riduzione di valore. Successivamente, nel passare nella zona tra 150 e 200 m, il raggio assume un nuovo valore della velocità, superiore al precedente, diventando 1528 m/sec e subisce un'ulteriore inclinazione verso l'alto e il valore di  $\alpha$  decresce ancora. Il fenomeno si ripete per gli strati successivi, in cui la velocità assume valori sempre maggiori (1529 e 1530 m/sec) e l'inclinazione del raggio si sposta ancora sensibilmente verso l'alto.

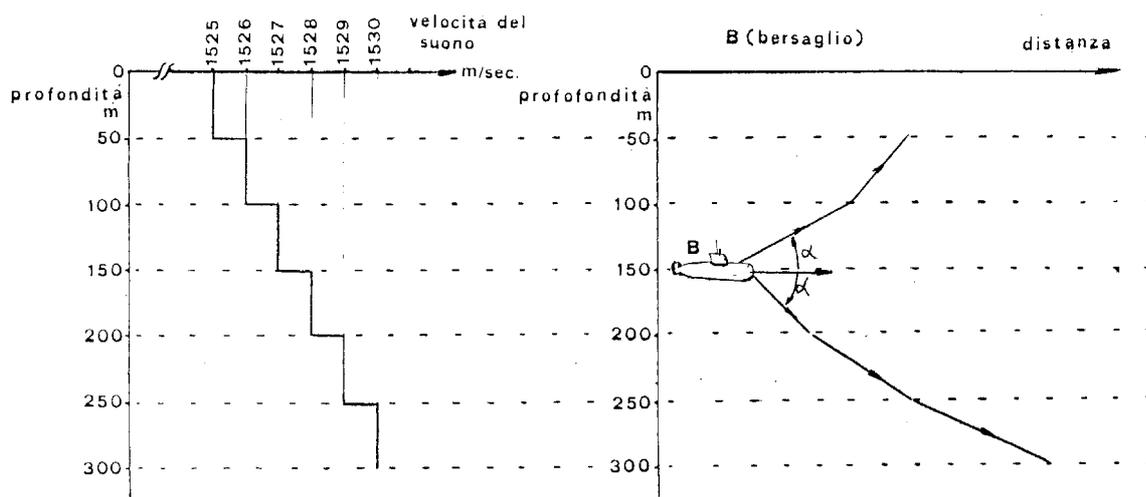
Dall'esempio fatto si può concludere che il percorso del raggio sonoro è una spezzata, perché la variazione della velocità di propagazione è a scaglioni: se questa fosse continua, come nei casi pratici, la traiettoria sarebbe una curva. Inoltre tutti i raggi sonori emessi dal bersaglio attivo subiscono l'effetto indicato per il singolo raggio, con la conseguenza che tutta l'energia acustica emessa segue una modificazione di traiettoria nel senso indicato dall'esempio. Se la legge di variazione della velocità di spostamento cambia, subiscono un corrispondente cambiamento anche le traiettorie dei raggi come è indicato in Fig. 10.6.



**fig. 10.6** Propagazione anomala del suono - 2° modello.

La nuova figura mostra che la velocità di propagazione varia in modo diverso rispetto all'esempio precedente; essa è 1530 m/sec a quota 0 e decresce fino a 1525 m/sec. a quota 250 m. Il raggio sonoro, dopo aver percorso con l'inclinazione  $\alpha$  lo strato da 50 a 100 m alla velocità di 1529 m/sec, entra nello strato adiacente dove la velocità di spostamento diviene 1528 m/sec e per conseguenza subisce una variazione dell'inclinazione verso il basso. Dato che le velocità assunte dal raggio negli strati successivi sono decrescenti, la sua inclinazione si sposta sempre più verso il basso, dando luogo alla spezzata tracciata in figura 10.6.

Se il bersaglio è posizionato a quote più profonde le traiettorie dei raggi sonori indicate nelle figure precedenti assumono un aspetto diverso. Il primo caso si presenta quando la velocità del suono è crescente con la profondità: facendo riferimento alla Fig. 10.5/c, in cui il bersaglio è posto a 150 m, esaminiamo il comportamento di due raggi sonori irradiati uno verso il fondo e l'altro verso la superficie. Il raggio diretto verso il fondo si trova nelle stesse condizioni già viste in figura 10.5/b (velocità del suono crescente lungo il percorso) e la sua traiettoria è uguale a quella della figura citata. Il raggio diretto verso la superficie assume invece, lungo il percorso, velocità del suono decrescenti che incrementano l'angolo  $\alpha$  e danno luogo ad una traiettoria che si allontana dall'asse del battello.



**fig. 10.5/c** Propagazione anomala del suono - 3° modello.

Il secondo caso si presenta quando la velocità del suono è decrescente con la profondità: nella Fig. 10.6/c il bersaglio è posto a 150 m, il raggio irradato verso il fondo segue la stessa traiettoria indicata nell'esempio di figura 10.6/b (velocità del suono decrescente lungo il percorso), mentre il raggio diretto verso la superficie, assumendo velocità crescenti, subisce un decremento dell'angolo  $\alpha$  dando luogo ad una traiettoria che si avvicina all'asse del battello.

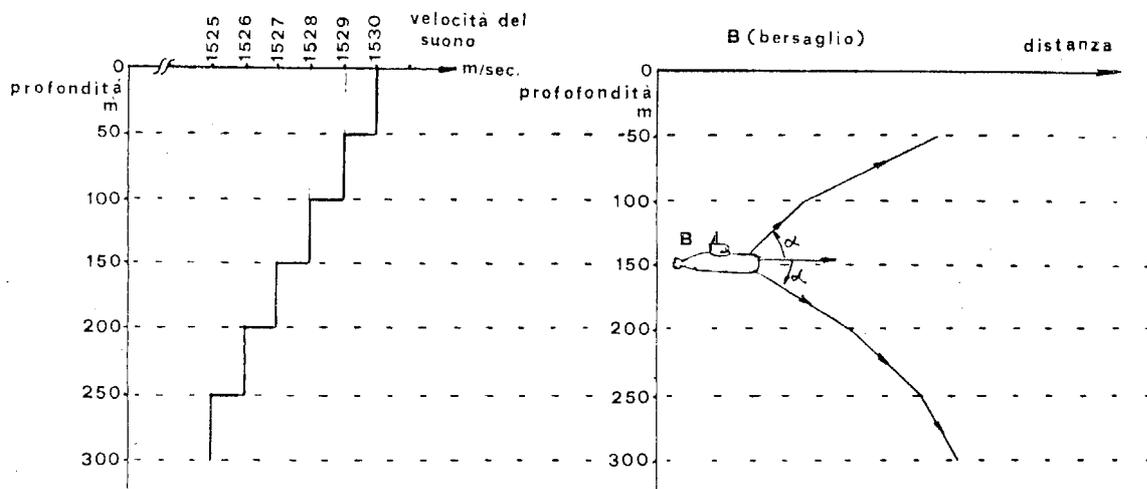


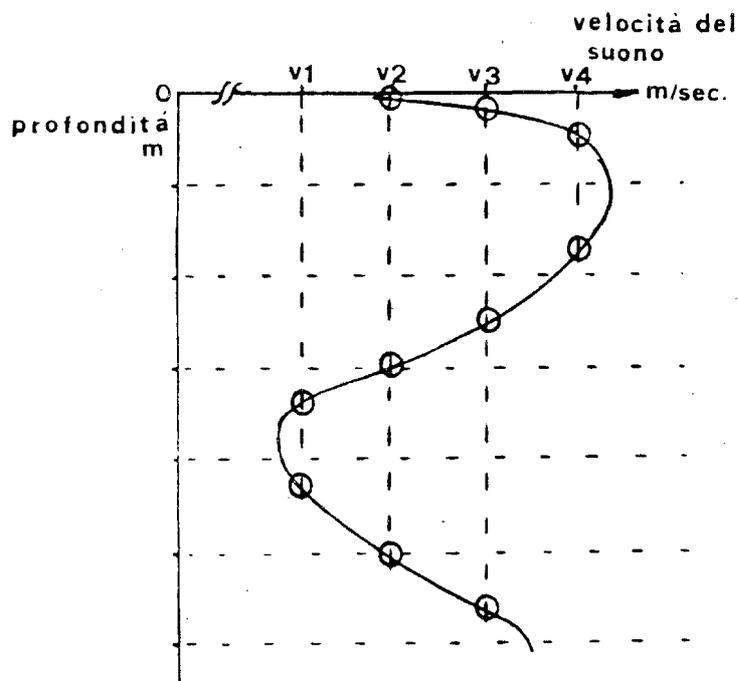
fig. 10.6/c Propagazione anomala del suono - 4° modello

### 10.5) Esempi caratteristici della propagazione anomala.

E' molto interessante indagare sul comportamento della propagazione anomala per vedere quali sono le effettive limitazioni che essa impone al sonar. Prima di passare in esame i casi più significativi è necessario fare un'ulteriore precisazione sull'andamento della velocità del suono in funzione della temperatura presente alle diverse profondità.

Le cause, che producono le variazioni di velocità di propagazione del suono nell'acqua, sono tali da fare assumere alla velocità stessa valori tanto crescenti che decrescenti alle diverse profondità. La temperatura dell'acqua infatti può essere variamente distribuita, a volte presenta valori superiori alle quote basse rispetto a quelle alte o viceversa, oppure aumenta e poi diminuisce diverse volte a quote successive. Per tale ragione i dia-

grammi indicativi della variazione della velocità, in funzione della quota, sono a “più valori”. In altre parole accade sovente che la stessa velocità del suono si riscontri a profondità diverse così come è mostrato in Fig. 10.7.



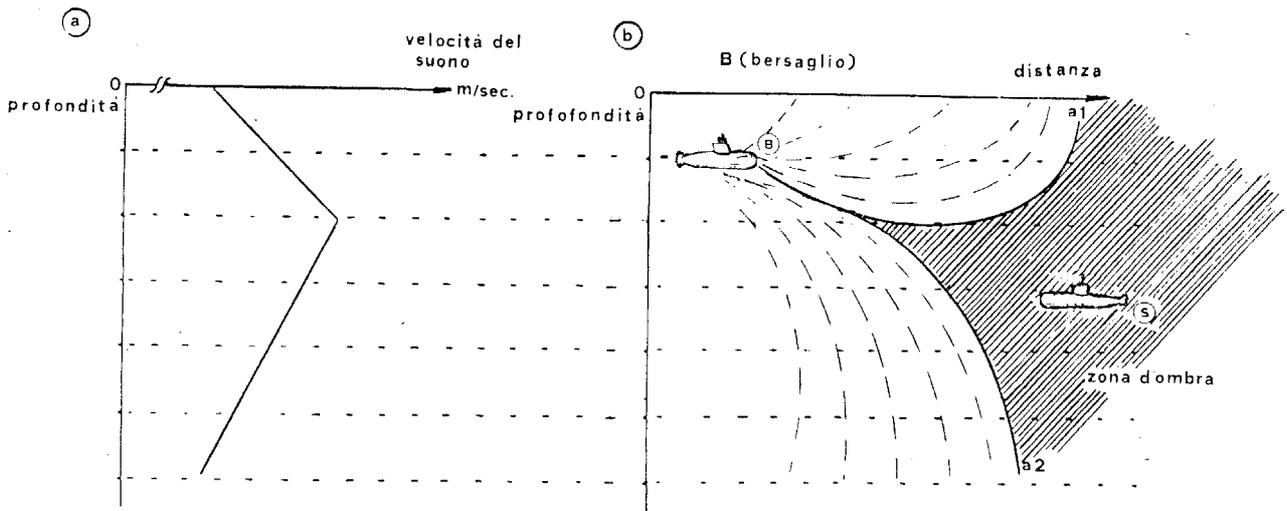
**fig. 10.7** *Variazione della velocità del suono a “più valori”.*

La curva mette in evidenza che le velocità  $V_1$ ,  $V_4$  si verificano a due valori di profondità diversi, mentre le velocità  $V_2$ ,  $V_3$  si manifestano a tre valori di profondità.

In seguito a queste particolari leggi di variabilità delle velocità del suono si possono calcolare i caratteristici comportamenti dei raggi sonori che ora mostreremo.

Il primo caso che esaminiamo si può verificare quando la velocità di propagazione del suono varia crescendo dalla superficie del mare ad una certa profondità, per poi decrescere da quella quota verso il fondo (vedi Fig. 10.8/a). In tali condizioni si origina, secondo la teoria del tracciamento dei raggi, la propagazione indicata in Fig. 10.8/b.

In essa si osserva che i raggi sonori emessi da un bersaglio attivo B, stazionario a quota non profonda, sono deviati in modo tale che l'energia acustica non prosegue il suo percorso oltre i due raggi limiti a1 e a2. Il sommergibile S, che si trova nella zona tratteggiata, anche se vicino al bersaglio, apparentemente non può localizzarlo con il sonar.



**fig. 10.8** Propagazione anomala del suono - 5° modello.

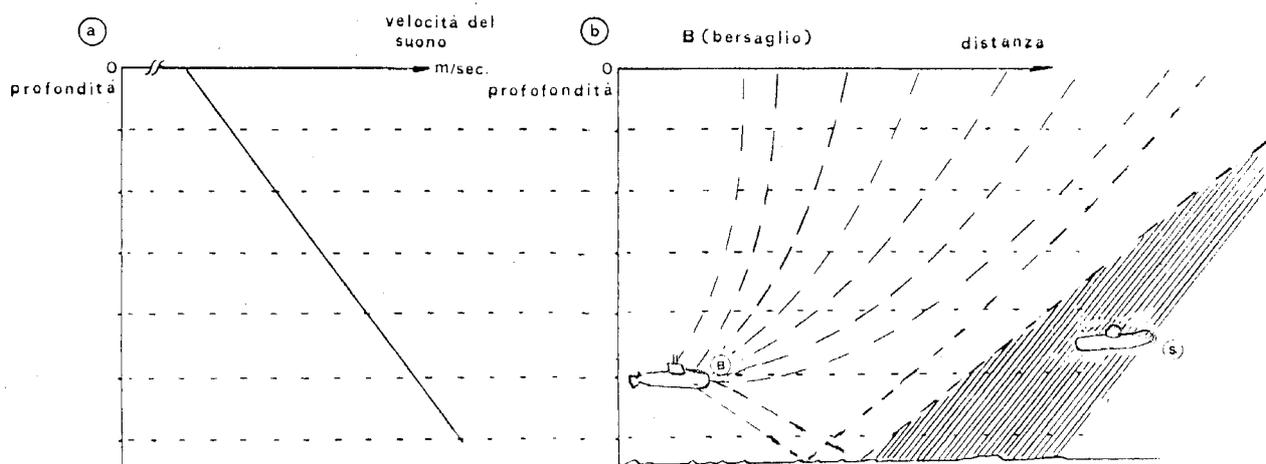
Nella vasta zona "d'ombra" il livello della pressione acustica irradiata dal bersaglio non è mai praticamente nullo, anche se il calcolo delle traiettorie dei raggi indica il contrario, perché una piccola quantità di energia valica, in realtà, i due raggi limiti. L'attenuazione del rumore del bersaglio è comunque tanto elevata che in simili condizioni il sonar del sommergibile non può scoprirlo se non a distanze di pochi chilometri.

Se adattiamo il disegno di figura 10.8/b al caso della localizzazione attiva si può pensare il sommergibile posto in alto a sinistra e il bersaglio situato nella zona d'ombra. In questa ipotesi i raggi tracciati nel disegno rappresentano le traiettorie degli impulsi emessi dal trasmettitore del sonar, che sono contenuti entro i due raggi limiti. Una piccola parte dell'energia emessa dal sonar, nei casi pratici, supera i limiti e invade la zona d'ombra, consentendo la localizzazione attiva del bersaglio, ma con elevatissime riduzioni delle portate di scoperta, che non si adattano alla filosofia operativa di un sommergibile.

Un secondo caso di propagazione anomala è dovuto all'effetto combinato della variazione della velocità del suono, con il manifestarsi della riflessione delle onde acustiche causate dal fondo marino.

Anche in questa particolare condizione si ha la formazione di una zona d'ombra che ostacola la localizzazione sonar.

Il fenomeno si verifica quando la velocità del suono cresce dalla superficie del mare fino a quote più profonde come è mostrato in Fig. 10.9/a. Con un tale andamento della velocità del suono si origina, secondo il calcolo del tracciamento dei raggi, la loro deviazione verso la superficie, rinforzata da quella parte dei raggi che vengono riflessi dal fondo (vedi Fig. 10.9/b).



**fig. 10.9** Propagazione anomala del suono - 6° modello.

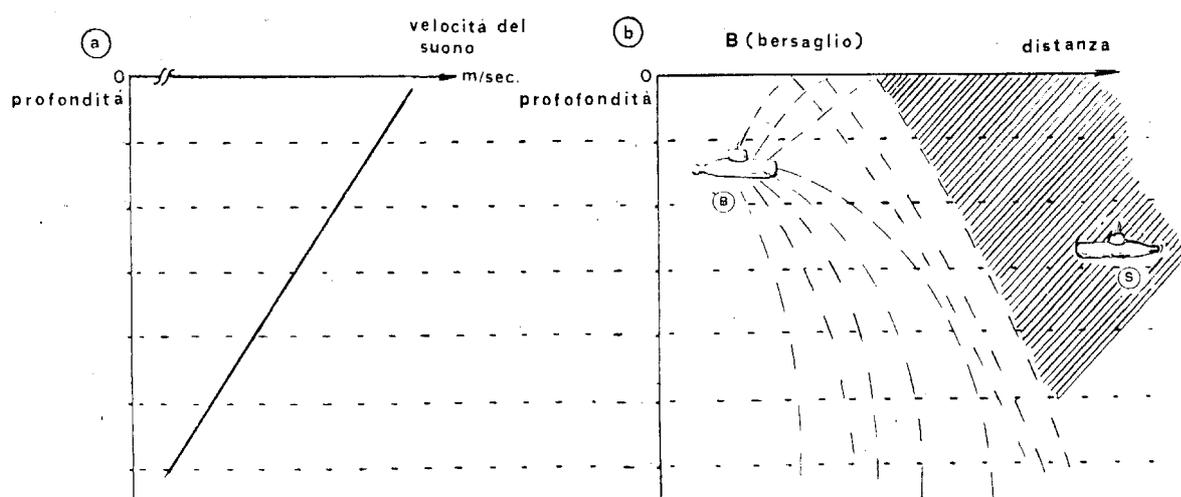
Nella figura si nota che una parte dei raggi sonori emessi dal bersaglio attivo B, che staziona a quota profonda, sono deviati verso la superficie. Quella parte di essi, emessi verso il basso, colpisce il fondo che la riflette in alto creando, nella parte destra del tracciato, una parziale zona d'ombra. Il sommergibile S che si trova in quella zona può scoprire il bersaglio soltanto se la distanza che lo separa da esso è di pochi chilometri. La scoperta può essere effettuata a distanze più elevate se il sommergibile S si sposta verso quote meno profonde.

Il caso che abbiamo esaminato si adatta anche alla localizzazione attiva se si pensa di invertire, nella figura 10.9/b, la posizione del bersaglio con quella del sommergibile. In tale ipotesi infatti i raggi sonori tracciati rappresentano la traiettoria degli impulsi emessi dal sonar. Soltanto una piccola parte di energia acustica impulsiva, che riesce a penetrare nella zona d'ombra, consente al sonar la scoperta del bersaglio. Le distanze di sco-

perta risultano di gran lunga inferiori a quelle ottenibili in assenza di questa anomalia di propagazione. Soltanto con un cambiamento di quota, verso l'alto, il sommergibile potrebbe realizzare una scoperta attiva a distanza di ragionevole sicurezza.

Si ha un terzo caso di propagazione con zona d'ombra, quando l'anomalia della curvatura dei raggi sonori si combina con il loro effetto di riflessione sulla superficie del mare.

Questo nuovo aspetto delle traiettorie dei raggi si verifica quando la variazione della velocità del suono decresce dalla superficie del mare verso il fondo, così come è indicato nella Fig. 10.10/a. Dal calcolo eseguito per il tracciamento dei raggi sonori si vede che essi subiscono una deviazione verso il fondo rinforzata da quella parte di essi che sono riflessi dalla superficie (vedi Fig. 10.10/b).



**fig. 10.10** Propagazione anomala del suono - 7° modello.

La figura mostra che i raggi sonori emessi da un bersaglio attivo B, che è posizionato a quota non profonda, sono deviati verso il fondo. Quella parte dei raggi che sono irradiati sulla superficie vengono riflessi da questa sempre verso il fondo, dando luogo ad una zona d'ombra nella parte destra del tracciato. Questa situazione è ben più limitativa per il sonar di quella precedente, perché si viene a formare una sorta di barriera schermante dal

fondo alla superficie. Per tale ragione la capacità di scoperta del sonar del sommergibile S si riduce a pochi chilometri e tale rimane anche se il mezzo varia la sua quota.

Similmente ai casi precedenti anche questo studio sul tracciamento dei raggi sonori si presta per le previsioni di portata sonar della componente attiva. Con una propagazione di questo tipo la scoperta attiva si riduce a distanze praticamente inutilizzabili per un sommergibile.

Gli esempi che abbiamo esaminato ci hanno dato un'idea realistica delle difficili condizioni in cui può venirsi a trovare un sommergibile che deve effettuare le operazioni di localizzazione subacquea.

La propagazione anomala è una caratteristica che si verifica prevalentemente nelle stagioni calde o in particolari zone di mare.

Nelle stagioni fredde invece, dato che la temperatura dell'acqua è più uniforme alle diverse quote, si ha una minor variabilità della velocità di spostamento delle onde acustiche con la profondità e le traiettorie dei raggi si avvicinano di più alla propagazione normale.

Nell'introdurre nel paragrafo 10.3 i primi elementi sulla propagazione anomala, è stato detto che in alcuni casi essa può essere favorevole al funzionamento del sonar. Infatti si possono verificare, in condizioni particolari di variazione della velocità del suono con la quota, dei fenomeni che consentono la propagazione del suono a distanze che a volte raggiungono le centinaia di chilometri.

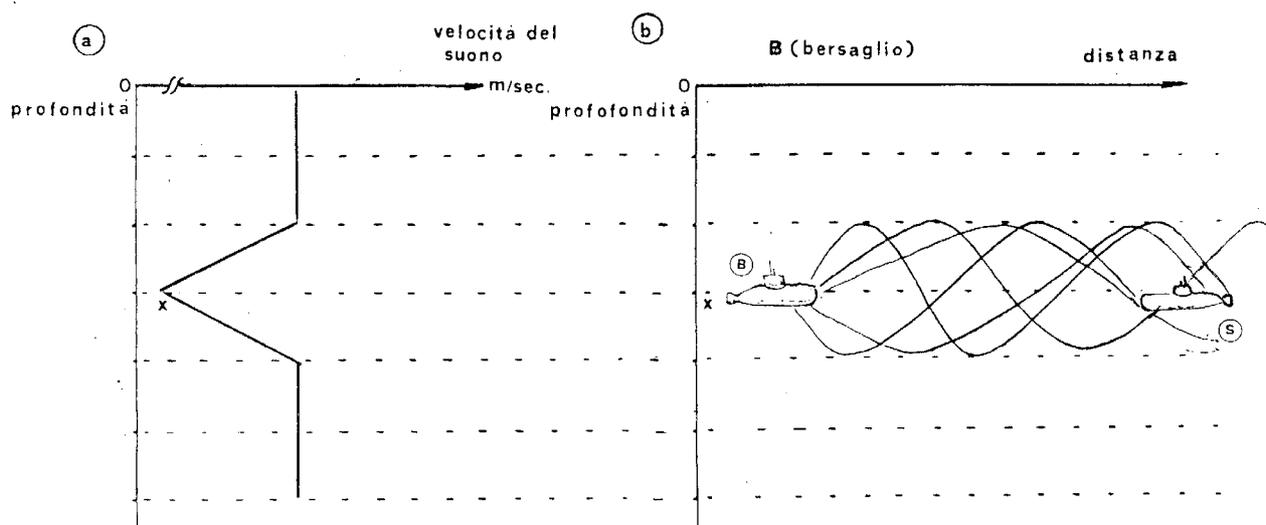
Uno di questi fenomeni, detto di "canalizzazione", si origina quando la velocità del suono varia in funzione della profondità, come indicato nella Fig. 10.11/a.

Dalla figura si vede che la velocità è costante nella prima fascia di mare, inizia a decrescere rapidamente da una certa quota in poi, per cambiare tendenza e crescere dalla quota X verso il fondo dove riprende ancora ad essere costante.

Con questo tipo di variazione della velocità si ha la formazione di traiettorie ondulate dei raggi dovute all'inversione di tendenza indicata nel punto X. Infatti sopra tale punto i raggi subiscono una curvatura verso il basso, mentre sotto di esso la subiscono verso l'alto.

In tali condizioni di variabilità della velocità di spostamento delle onde acustiche il calcolo delle traiettorie denuncia una propagazione dei raggi secondo percorsi ondulati, che si allontanano dal bersaglio senza creare zone d'ombra davanti ad esso (vedi Fig. 10.11/b).

Nella figura si vede il bersaglio attivo B posto alla quota X; esso irradia il



**fig. 10.11** Propagazione anomala del suono - 8° modello

suo rumore lungo traiettorie che sono contenute entro una fascia di mare abbastanza limitata da essere definita un “canale” di propagazione. Il sommergibile S, che si trova all’interno del canale, può localizzare il bersaglio a distanze impensabili anche quando la propagazione è normale. Naturalmente se il sommergibile è fuori del canale ha poche probabilità di scoprire il bersaglio, dato che la maggior quantità di energia acustica che esso emette è canalizzata. Questo tipo di propagazione si adatta ottimamente anche alla scoperta attiva.

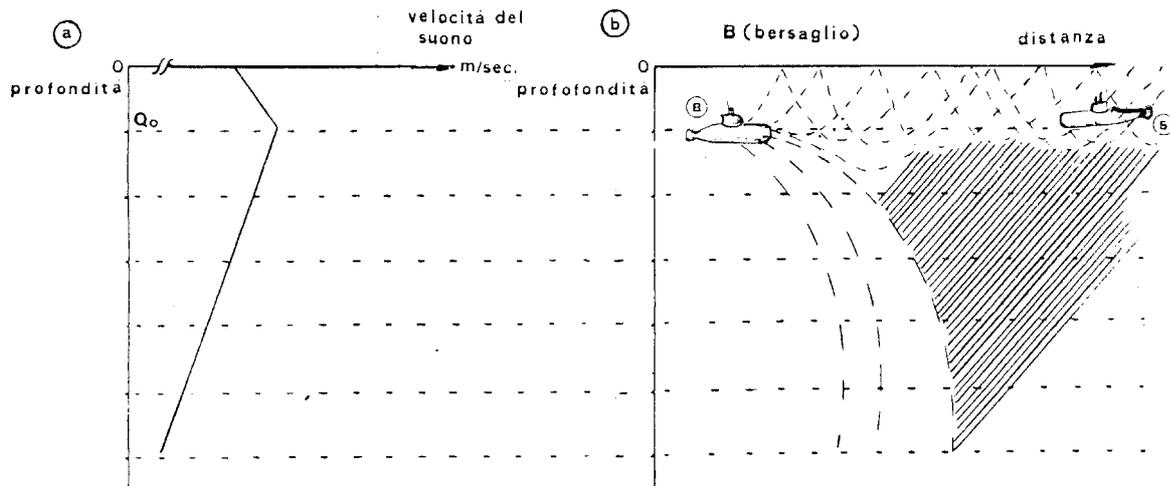
Un altro tipo di propagazione anomala che consente, a volte, di localizzare un bersaglio a grande distanza è quella detta a “festoni”. Essa prende tale nome dall’aspetto dei raggi sonori che nei grafici sembrano “attaccati alla superficie del mare” come un drappeggio.

La propagazione a festoni si verifica per la concomitanza di due cause: una particolare variazione della velocità del suono con la quota e la riflessione delle onde acustiche da parte della superficie del mare.

I raggi sonori che si allontanano dal bersaglio possono giungere a grandi distanze soltanto se la superficie del mare consente una riflessione con poca attenuazione, cosa che avviene soltanto quando essa non è molto increspata dalle onde.

La legge di variazione della velocità del suono, che origina il fenomeno, è

riportata nel grafico di Fig. 10.12/a in funzione della profondità. Nella prima fascia di mare la velocità cresce con la profondità fino alla quota  $Q_0$ , dopo di che decresce fino al fondo. In una situazione di questo tipo, in base ai calcoli, si verifica la propagazione indicata in Fig. 10.12/b.



**fig. 10.12** Propagazione anomala del suono - 9° modello

Dalla figura si osserva che i raggi sonori emessi dal bersaglio attivo B, che staziona a quota non profonda, sono deviati verso la superficie e da questa riflessi indietro per poi essere nuovamente deviati contro di essa a seguito della caratteristica di variazione della loro velocità con la quota.

Se i raggi riflessi sono poco attenuati proseguono il loro cammino a festoni fino a raggiungere distanze molto elevate.

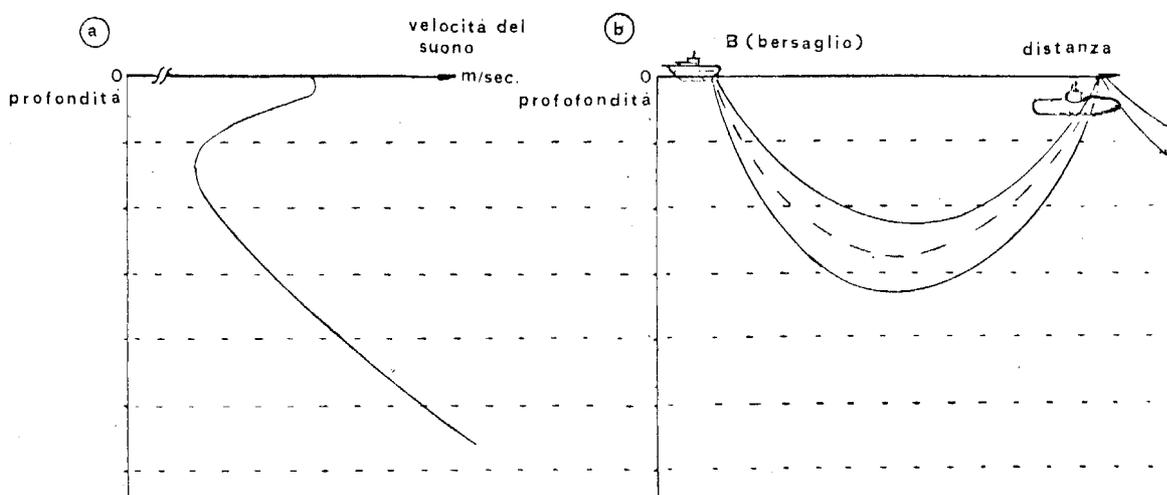
Le onde acustiche irradiate dal bersaglio verso il basso subiscono l'effetto della velocità prima crescente e poi decrescente e si piegano in direzione del fondo, dando luogo ad una zona d'ombra che si estende sotto il canale entro il quale si ha il percorso dei raggi. Il bersaglio B può quindi essere scoperto dal sommergibile S se esso naviga dentro lo strato d'acqua in cui sono concentrati i raggi sonori.

La scoperta diventa invece molto difficile se il sommergibile si trova nella zona d'ombra.

I tracciati a festoni possono rappresentare anche le traiettorie degli impulsi

emessi da un sonar installato su di un sommergibile che, nella figura 10.12/b, prende il posto del bersaglio. In tali condizioni la scoperta attiva, se il bersaglio è dentro lo strato a festoni, consente portate di scoperte eccezionali.

Concludiamo la rassegna dei modi di propagazione anomali che consentono la localizzazione a grande distanza, illustrando quella per “convergenza”. Essa si verifica soltanto in acque molto profonde e in condizioni particolari di variabilità della velocità del suono con la quota, che si presentano come mostrato in Fig. 10.13/a.



**fig. 10.13** Propagazione anomala del suono - 10° modello.

La conseguenza di questo andamento della velocità fa sì che i raggi sonori, emessi secondo una certa inclinazione dal bersaglio, in questo caso una nave in superficie, vengano deviati verso il fondo lungo ampi archi che volgono la loro concavità verso l'alto.

Quando i raggi hanno raggiunto una certa quota, molto profonda, iniziano a salire secondo delle traiettorie simmetriche rispetto alle precedenti, per convergere in superficie in un punto molto lontano dal bersaglio (vedi Fig. 10.13/b).

Questo fenomeno si ripete diverse volte, dato che la superficie del mare irradiata dalla prima convergenza dei raggi diventa a sua volta “sorgente acustica”. Essa riflette parte dell'energia ricevuta che si propaga con la stessa

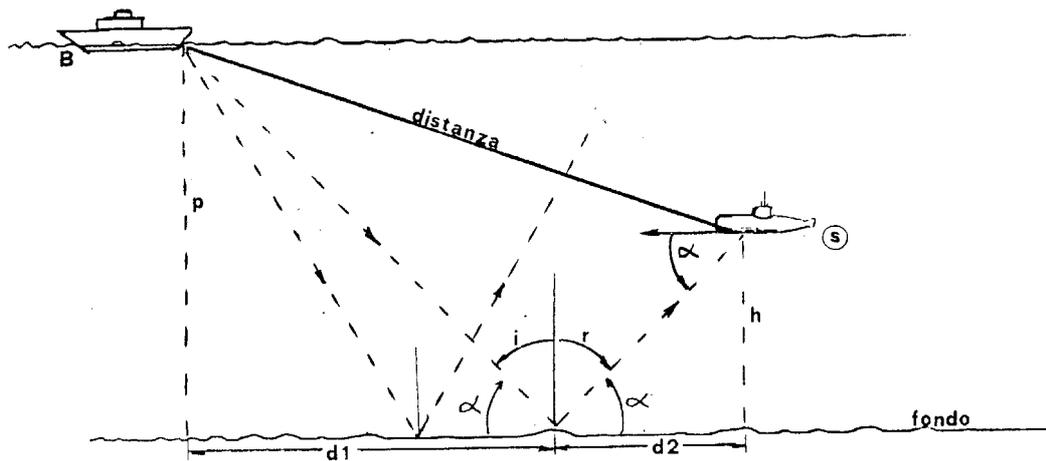
legge, per convergere una seconda volta a distanza ancora superiore e così via, fino all'esaurimento dell'energia per attenuazione o per cambiamento del tipo di propagazione.

Nella figura è indicato il sommergibile S, navigante a quota poco profonda, che localizza il bersaglio di superficie sfruttando la propagazione per convergenza.

### 10.6) La propagazione per riflessione sul fondo.

Un caratteristico tipo di propagazione che è usato dai sonar moderni è quello che sfrutta le riflessioni dal fondo marino.

Alcuni raggi sonori, emessi dal bersaglio secondo particolari inclinazioni, possono raggiungere il fondo seguendo traiettorie praticamente rettilinee. Se il fondo ha le caratteristiche adatte i raggi vengono riflessi senza subire notevoli attenuazioni e si propagano sempre secondo delle rette come è mostrato in Fig. 10.14.



**fig. 10.14** Propagazione del suono - riflessione dal fondo.

Nella figura è indicato il bersaglio B, in questo caso una nave in superficie, in cui sono evidenziati soltanto quei raggi sonori che, avendo particolare inclinazione, raggiungono il fondo.

Il sommergibile S può scoprire il bersaglio con il sonar se questo è dotato di speciali basi idrofoniche, sferiche o emisferiche, sistemate nella parte inferiore dello scafo, verso prua. Soltanto con questo particolare accorgimento tecnico è possibile sfruttare in modo ottimale la propagazione per riflessione dal fondo. Essa consente, oltre che buone portate di scoperta, anche la possibilità di valutare semplicemente la distanza del bersaglio. Infatti se il sonar misura l'angolo  $X$ , formato dalla direzione di provenienza del raggio rispetto all'asse del battello, conoscendo la profondità  $p$  dell'acqua in quella zona e la propria altezza  $h$  dal fondo, si può calcolare con facilità la distanza della nave, dato che la geometria della situazione è governata dalla legge per la quale l'angolo di riflessione  $r$  di un raggio è uguale a quello di incidenza  $i$ . Se la distanza è superiore a 1000 m questa è data con buona approssimazione dalla somma dei due segmenti  $d_1$  e  $d_2$  che possono essere determinati rapidamente mediante l'uso di tabelle, conoscendo l'angolo  $X$ , la profondità  $p$  e l'altezza  $h$  del sommergibile dal fondo.

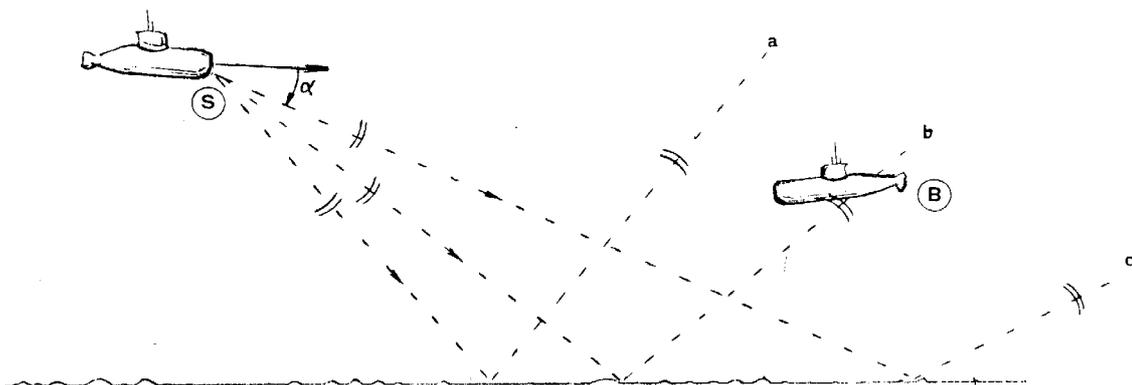
Con un calcolo poco più elaborato è possibile determinare con precisione la distanza anche se questa è inferiore a 1000 m.

Il modo di propagazione per riflessione dal fondo si presta bene anche per la localizzazione dei bersagli passivi.

Il sonar che effettua questa ricerca deve essere attrezzato con basi di emettitori sferiche o emisferiche opportunamente disposte sotto lo scafo del battello per indirizzare gli impulsi acustici verso il fondo. La trasmissione degli impulsi avviene con un fascio direttivo ad inclinazione variabile che origina diverse traiettorie: a, b, c, ecc, come mostrato in Fig. 10.15.

Con tale sistema, variando l'angolo di inclinazione  $X$  del fascio, si possono esplorare, successivamente, ampi tratti di mare a grande distanza per la scoperta dei bersagli con il metodo dell'eco.

Naturalmente questo tipo di propagazione impone che nella misura della distanza del bersaglio, in base al tempo di percorrenza dell'impulso (vedi paragrafo 5.3), venga tenuto conto dell'altezza del sommergibile dal fondo e dell'inclinazione del fascio di emissione dai quali dipende il maggior tratto di percorrenza rispetto ad una traiettoria rettilinea bersaglio-sommergibile.



**fig. 10.15** Scoperta bersaglio per riflessione sul fondo.

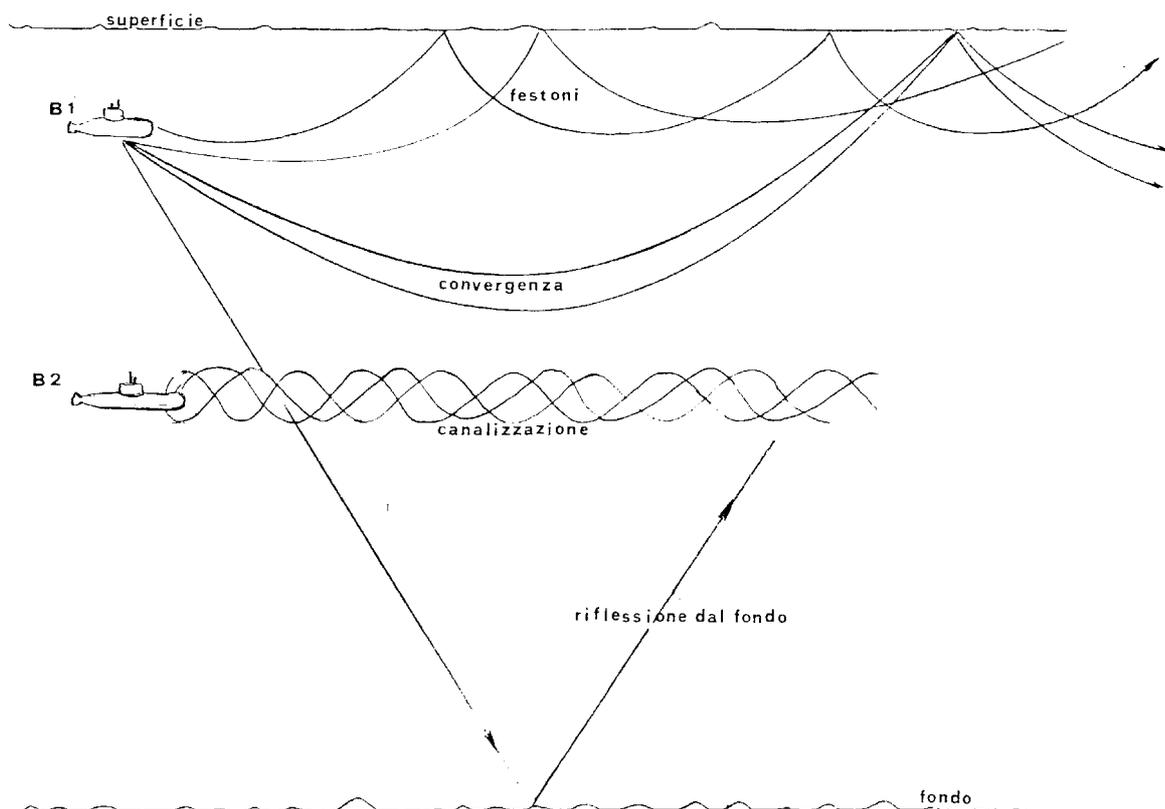
### 10.7) Sui modi di propagazione in generale.

Per chiarire ulteriormente i concetti relativi ai modi di propagazione che consentono la scoperta a grande distanza, nella Fig. 10.16 è riportato un disegno in cui sono mostrate contemporaneamente diverse traiettorie caratteristiche dei raggi sonori emessi da due bersagli attivi posti a quote diverse in una zona molto profonda.

I raggi che interessano i bersagli possono effettivamente seguire, nello stesso tempo, più di un modo di propagazione, come è indicato nella figura per il bersaglio B1, purché si verifichino le condizioni adatte di variabilità della velocità del suono in funzione della quota. Le onde acustiche irradiate dai bersagli sono emesse secondo una vasta gamma di direzioni e pertanto subiscono l'effetto della propagazione anomala in modo diverso in dipendenza dall'inclinazione di partenza e dallo strato in cui si trovano. Il bersaglio B2 è invece in una fascia di canalizzazione e tutti i raggi sonori che esso emette vengono convogliati entro tale fascia: in tali condizioni il modo di propagazione che si genera è unico.

Da quanto detto si deduce che, se un sommergibile deve fare azione di scoperta con il sonar in acque molto profonde, deve operare diverse variazioni di quota alla ricerca del canale di propagazione che gli consente il mi-

glior “contatto” con il bersaglio. La quota ottimale viene suggerita dall’elaboratore elettronico, che effettua il calcolo e il tracciamento dei raggi sonori, mettendo in evidenza la situazione contingente.



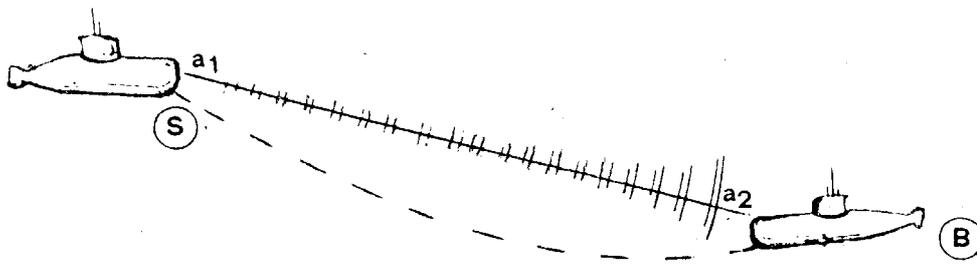
**fig. 10.16** Propagazione anomala del suono - 11° modello.

I mari che circondano il nostro paese non hanno profondità molto elevate ed i fenomeni di propagazione anomala sono limitati come numero. Nei mesi freddi la temperatura dell’acqua risulta abbastanza uniforme a tutte le profondità e la velocità del suono varia poco con la quota, per cui le anomalie della propagazione sono poco sentite. Nei mesi caldi invece cresce sensibilmente la temperatura degli strati superficiali, mentre resta piuttosto bassa quella degli strati inferiori. Questo fatto crea una notevole variazione della velocità di propagazione, che decresce con la profondità e dà luogo alle zone d’ombra mostrate in figura 10.10/b.

### 10.8) Gli effetti collaterali della propagazione anomala.

Nel paragrafo 10.3 abbiamo indicato, nell'errore di misura della quota, uno dei più appariscenti inconvenienti che possono essere causati dalla propagazione anomala. Un altro inconveniente è qui di seguito descritto: la misura della distanza con il metodo dell'eco è influenzata, a volte sensibilmente, dalla variazione della velocità di propagazione e dalla maggior estensione dei percorsi dovuti alla curvatura dei raggi.

Nella Fig. 10.17 è messo in evidenza questo fatto nell'ipotesi che il sommergibile S abbia emesso un impulso acustico nell'intento di misurare la distanza che lo separa dal bersaglio B.



**fig. 10.17** Errore nella misura della distanza con il metodo dell'eco a causa propagazione anomala del suono.

Se la propagazione fosse normale, l'impulso acustico percorrerebbe il segmento di retta da  $a_1$  verso  $a_2$  e l'eco corrispondente, nel percorso di ritorno, seguirebbe lo stesso segmento da  $a_2$  verso  $a_1$ .

La distanza del bersaglio verrebbe calcolata dal sonar in base al tempo di percorrenza di andata e ritorno ed alla presunta velocità del suono (vedi paragrafo 5.3). Se invece la propagazione è anomala tanto l'impulso di emissione quanto l'eco di ritorno dal bersaglio seguono la traiettoria curva indicata a tratto e il tempo di percorrenza è superiore al precedente. In questo caso, se non si calcolano le traiettorie dei raggi, il sonar valuta una distanza apparente superiore a quella reale.

Un altro inconveniente notevole dovuto alla propagazione anomala è l'aumento dell'attenuazione dei raggi sonori per divergenza e assorbimento

che, con l'aumento delle lunghezze delle traiettorie dovute alla curvatura dei raggi, viene ad essere molto più marcato di quello che sarebbe con la propagazione normale.

Lo sfruttamento delle propagazioni anomale, che consentono la localizzazione a grandi distanze, è di solito indirizzato nel campo delle frequenze più basse che subiscono soltanto l'effetto dell'attenuazione per divergenza dato che per esse l'attenuazione per assorbimento è poco sentita.

### **10.9) Le previsioni delle portate operative.**

La conoscenza del tipo di propagazione, ottenuta con il tracciamento automatico delle traiettorie dei raggi sonori, che si verifica in una data zona e in un certo momento, consente all'operatore del sonar di eseguire dei calcoli per stabilire, con una certa approssimazione, quali sono le distanze massime alle quali può localizzare un bersaglio, sia con la componente passiva che con quella attiva (previsione delle portate operative).

Questo tipo di valutazione, che viene effettuato, per la prima volta, in sede di progetto del sonar per conoscere le massime prestazioni (vedi paragrafi 12.3 – 12.4), necessita di un certo numero di elementi che l'operatore trova su appositi tabulati. Tra questi elementi figurano i livelli dei disturbi dovuti all'ambiente subacqueo.

Ipotizzando una certa condizione dello stato del mare, si introducono nei calcoli dei valori che conducono alla determinazione delle portate di scoperta con le incertezze dovute alle ipotesi fatte. Con l'impiego di una speciale apparecchiatura, che capta i disturbi fuori dello scafo del battello, possono essere misurati dall'operatore gli effettivi livelli del disturbo ambiente. In tal modo vengono inseriti nei calcoli dei valori reali così da ottenere previsioni di portata più attendibili.

Con quest'ultima descrizione si comprende, una volta di più, la grande importanza che hanno le indagini sulla propagazione del suono nelle attività di localizzazione del sonar.