

# Caratterizzazione di ammassi rocciosi e strutture in calcestruzzo tramite tomografie soniche e restituzione dei coefficienti di attenuazione (M.A.P.)

Autori: D. Milani<sup>1</sup>, S. Priano<sup>1</sup>, D. Rovetta<sup>2</sup>, M. Signori<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Solgeo s.r.l., <sup>2</sup> Politecnico di Milano

L'analisi e l'elaborazione delle onde acquisite ai sensori, permette di stimare un modello elastico del sottosuolo illuminato dall'esperimento sismico. Tale modello può essere definito dalla velocità di propagazione e dal coefficiente di attenuazione delle onde sismiche che vi si propagano.

Il calcolo dei coefficienti di attenuazione può essere facilmente effettuato per esperimenti in cui si acquisiscano segnali sufficientemente energetici nei punti corrispondenti agli estremi della traiettoria (raggio) che attraversa il mezzo di cui si vuole determinare l'attenuazione.

## Tomografia Sonica Onde P

Il rilievo di tomografia sonica permette di ricavare mappe (tomogrammi) della distribuzione della velocità di propagazione delle onde longitudinali lungo sezioni piane. Il punto di partenza per la ricostruzione di tali mappe è dato dalla misura dei tempi di propagazione delle onde longitudinali lungo un elevato numero di percorsi i quali, con diverse inclinazioni, si incrociano mutuamente nella zona delimitata dalla geometria di posizionamento dei punti di trasmissione e ricezione.

Noti i tempi di percorso e partendo da un modello iniziale i campi di velocità vengono ricavati con un procedimento di calcolo iterativo di tipo S.I.R.T. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique). Questo si basa sulla progressiva riduzione dello scarto fra i tempi misurati e i tempi calcolati dopo il processo di ray-tracing, il quale ricostruisce l'andamento dei percorsi dei raggi in funzione del campo di velocità.

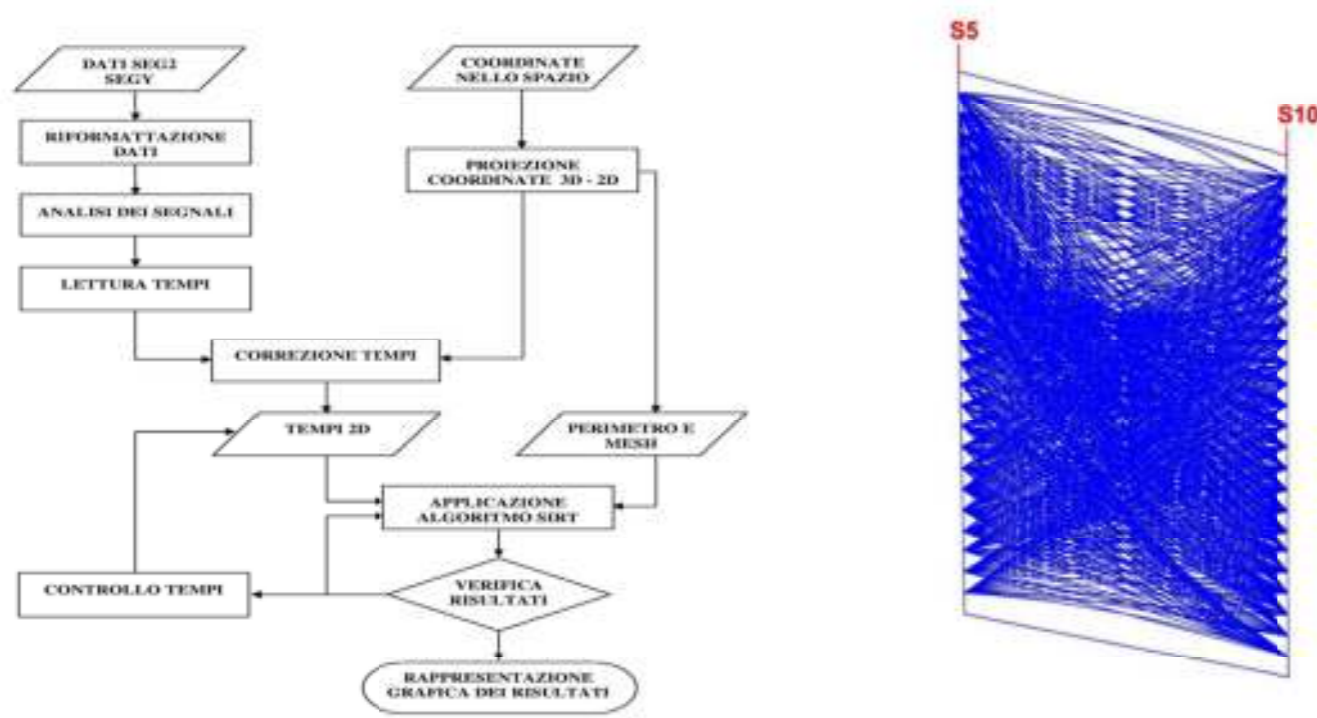


Fig. 1 (Sx) Schema di flusso dell'elaborazione tomografica (Dx) Esempio di costruzione dei percorsi tramite Ray-tracing

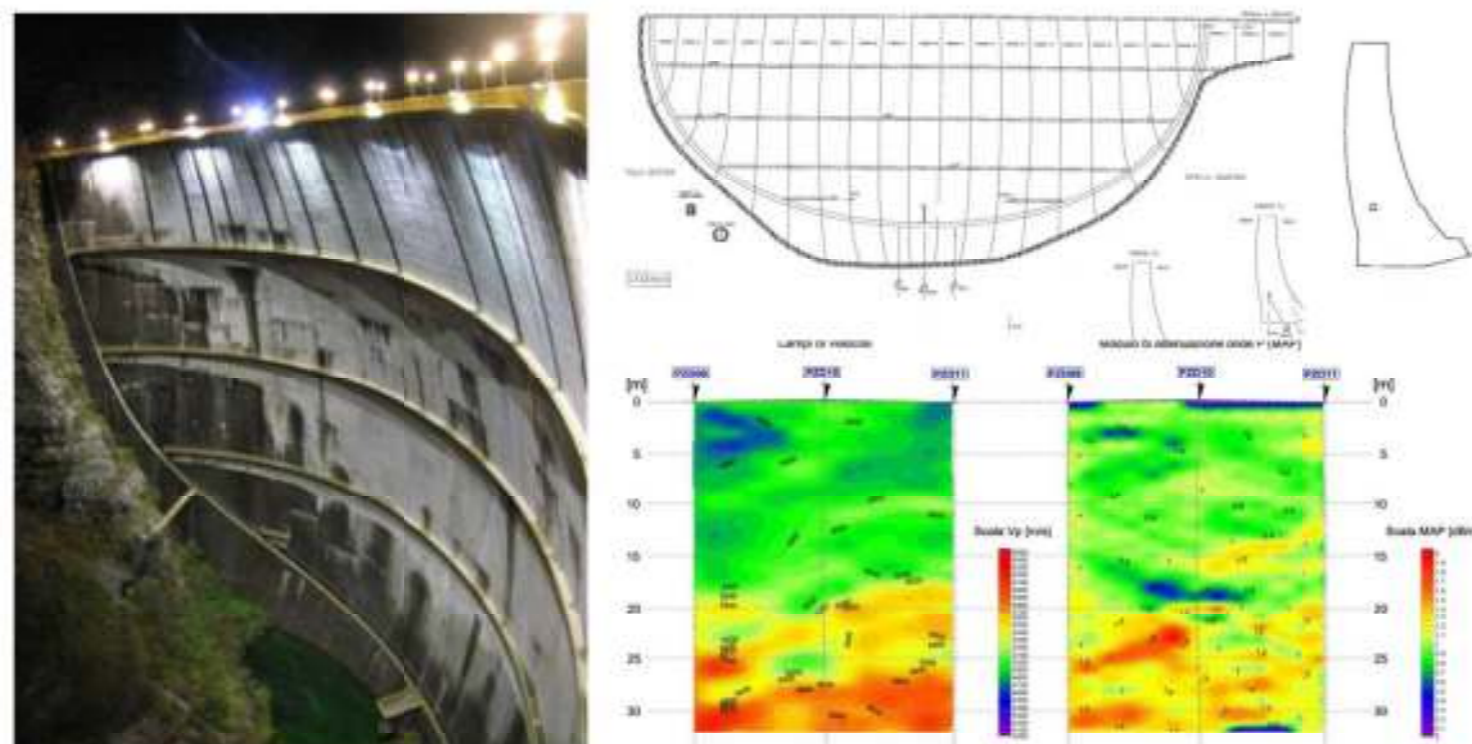


Fig. 2 Esempio di tomografia sonica e restituzione dei moduli di attenuazione ricavati alla base di una diga ad arco

## Definizione dei coefficienti di attenuazione

Dal punto di vista matematico, l'onda che, al tempo  $t$ , ha percorso lo spazio  $x$  dalla sorgente elastica  $S_x$ , può essere espressa da un segnale  $s(x, t)$  tempo e spazio-variante. Tale segnale viene spesso rappresentato, in forma più compatta, nel dominio trasformato spazio-frequenza,  $(x, f)$ , facendo uso della trasformata di Fourier rispetto al tempo:

$$S(x, f) = F[s(x, t)] = \frac{1}{x} S_0(f) e^{-kx}$$

dove  $\frac{1}{x}$  rappresenta il termine di riduzione d'ampiezza dovuto alla divergenza sferica del fronte d'onda,  $S_0(f)$  rappresenta lo spettro dell'onda sorgente posizionata in  $(S_0(f) = S(x_0, f))$  e  $k$  è il numero d'onda, così definito:

$$k(f) = \alpha(f) + j\beta(f) = \alpha(f) + j \frac{2\pi f}{v(f)}$$

$\alpha(f)$  è il coefficiente d'attenuazione, misurato in [Np/m],  $\beta(f)$  è la costante di fase, misurata in [rad/m],  $v$  è la velocità d'onda, misurata in [m/s].

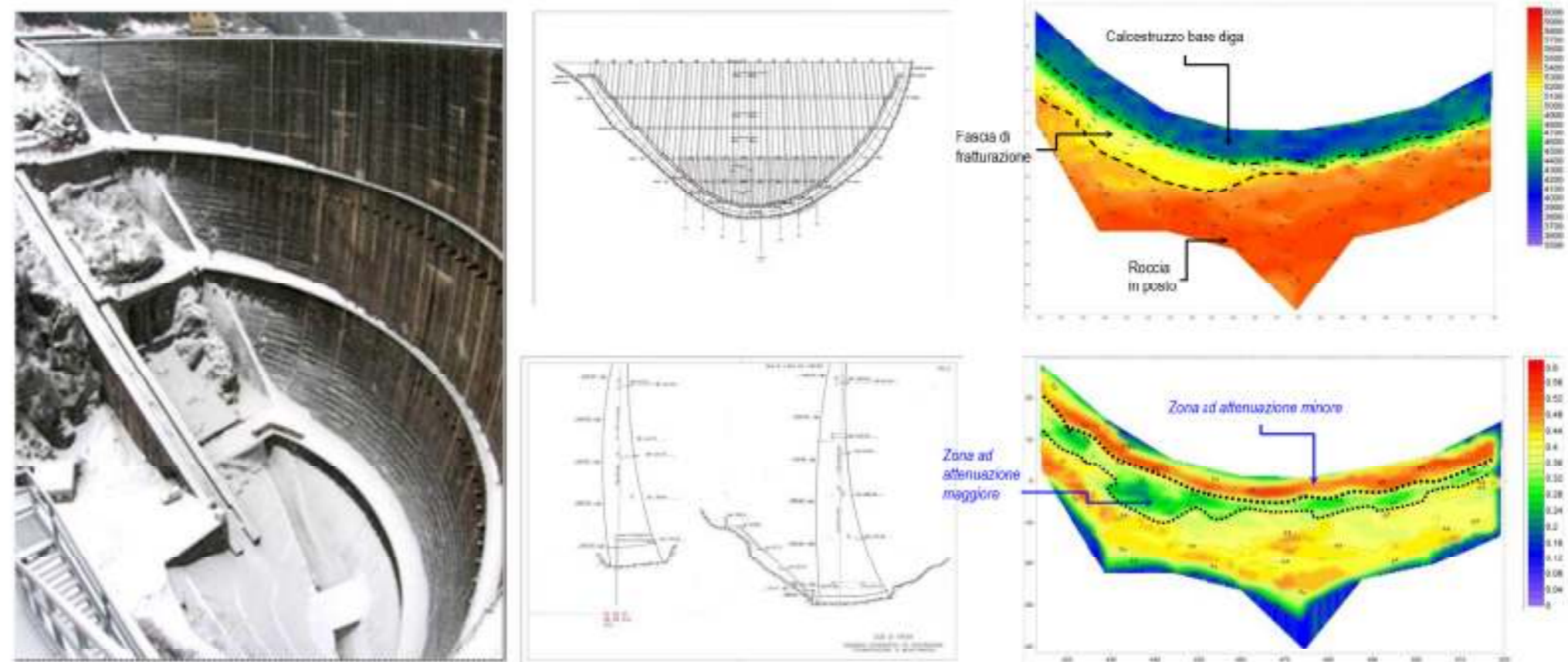


Fig. 3 Esempio di tomografia sonica (in alto) e rispettivi valori di attenuazione (m/Db) ricavati per il basamento roccioso di una diga ad arco

Introducendo le ampiezze  $\tilde{S}_i(f)$  e  $\tilde{S}_j(f)$ , normalizzate rispetto alla divergenza sferica, si ottiene:

$$\alpha_y(f) = \frac{\ln \left| \frac{\tilde{S}_i(f)}{\tilde{S}_j(f)} \right|}{|x_j - x_i|}$$

Il coefficiente di attenuazione espresso in [dB/m] vale:

$$A_y(f) = 20 \text{Log}(e) \alpha_y(f) = \frac{20 \text{Log} \left| \frac{\tilde{S}_i(f)}{\tilde{S}_j(f)} \right|}{|x_j - x_i|}$$

E' anche possibile effettuare una stima integrale del coefficiente di attenuazione, che spesso, a causa del rumore, risulta essere più robusta e consistente.

L'energia associata ai segnali acquisiti ai due diversi punti d'osservazione  $x_i$  e  $x_j$  è data da:

$$E_{S_i} = \int |S_i(f)|^2 df = \frac{1}{x_i^2} e^{-2\alpha x_i} \int |S_0(f)|^2 df = \frac{1}{x_i^2} e^{-2\alpha x_i} E_{S_0}$$

$$E_{S_j} = \int |S_j(f)|^2 df = \frac{1}{x_j^2} e^{-2\alpha x_j} \int |S_0(f)|^2 df = \frac{1}{x_j^2} e^{-2\alpha x_j} E_{S_0}$$

Il coefficiente di attenuazione espresso in [dB/m] vale:

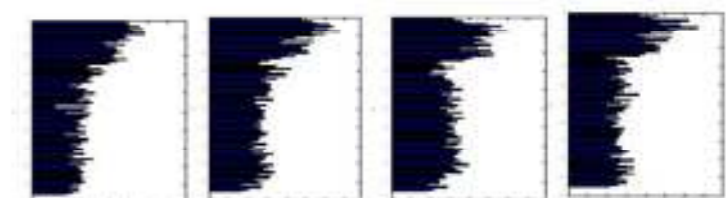
$$A_y = 20 \text{Log}(e) \alpha_y = \frac{10 \text{Log} \left[ \frac{E_{S_i}}{E_{S_j}} \right]}{|x_j - x_i|}$$

## Stima dell'energia sorgente

Nei casi in esame è stato generalmente utilizzato un approccio basato sulla stima dell'energia sorgente. La strumentazione utilizzata è caratterizzata infatti da una ripetitività degli impulsi generati ed un accoppiamento sorgente-roccia costante.

L'energia  $E_{S_0}$  del segnale sorgente è stata stimata in zone del modello dove le variazioni di ampiezza (o di energia) misurate sono più elevate ovvero dove sono più protette dall'effetto del rumore. Per la stima è stato utilizzato un approccio differenziale: si sono effettuate acquisizioni di segnali relativi a coppie di fori adiacenti nonché un buon numero di segnali corrispondenti a percorsi più lunghi.

In un caso specifico ad esempio il valore medio dell'energia stimata della sorgente *sparker*, si aggira attorno ai 76dB, in una banda di circa 2 kHz attorno alla frequenza centrale, pari a circa 5kHz.



## Considerazioni conclusive

L'analisi dei risultati in termini di MAP fornisce informazioni a compendio dei i risultati ottenuti in termini di tomografie in velocità.

Questo tipo di analisi permette di caratterizzare ammassi rocciosi e strutture in cls in maniera più esaustiva rispetto ad una semplice tomografia in velocità.

Ciò è dato dal fatto che è possibile compensare gli aspetti critici di un'inversione effettuata solo dal punto di vista dei tempi. Laddove infatti la trasmissione delle onde elastiche può essere maggiormente soggetta a dissipazioni del segnale sismico (vedi ad esempio porzioni di roccia fratturate, etc) un'inversione che prenda in considerazione invece il contributo energetico del dato acquisito può fornire in molti casi ulteriori ed utili informazioni al fine di una caratterizzazione di dettaglio dell'ammasso.

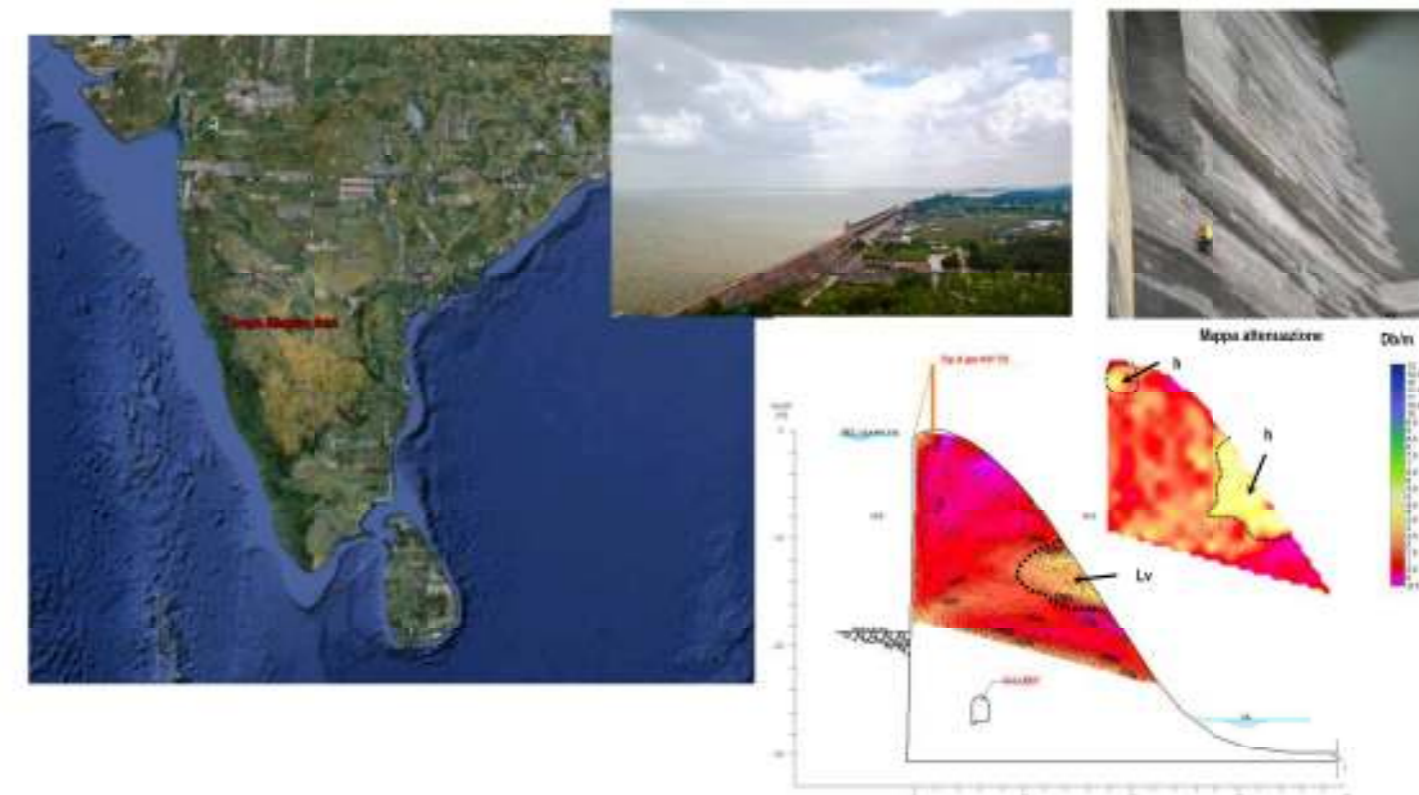


Fig. 4 Esempio di tomografia sonica e rispettivi valori di attenuazione ricavati sul paramento di una diga indiana a gravità

Bibliografia: Aki, Richards, Quantitative seismology, Freeman & Co., (1980).