

Diagnostica del costruito: prove non distruttive a mezzo di onde elastiche sui calcestruzzi degli speroni della diga del Molato

Dott. Ing. Silvio Levrero *

SOMMARIO

Si riferisce su una indagine sistematica, effettuata precipuamente con utilizzo di prove non distruttive basate sulla misurazione della velocità di propagazione di onde elastiche, sui calcestruzzi degli speroni della diga del Molato che sbarrava il torrente Tidone alla stretta di Molato in Provincia di Piacenza.

La finalità dell'indagine consisteva nella determinazione della resistenza a compressione di suddetti calcestruzzi.

Sono state eseguite più di 1300 misurazioni e tramite taratura su 20 campioni prelevati a mezzo di carotaggio e portati a rottura con prove di compressione, si è ricavata la legge sperimentale che lega la velocità di propagazione delle onde elastiche alla resistenza.

La elaborazione statistica ha permesso di estendere i risultati delle prove in laboratorio sulle carote a quelle non distruttive eseguite in sito.

Oltre alla determinazione della resistenza a compressione, si è potuto valutare il modulo elastico ed individuare soluzioni di continuità e disomogeneità.

1. DESCRIZIONE DEL MANUFATTO

Trattasi di diga a volte multiple che consta di una serie di voltine in c.a. di spessore sottile a generatrici inclinate che appoggiano su speroni in calcestruzzo opportunamente distanziati attraverso la gola da sbarrare.

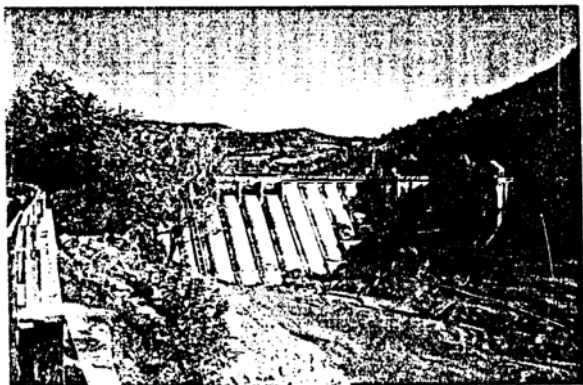


Fig. 1 - Vista della diga del Molato.

La parte centrale ad archi multipli consta di 17 volte in calcestruzzo armato che scaricano su 16 speroni intermedi e, alle estremità, sui tronchi di diga a gravità massiccia.

La struttura massiccia in sinistra è ad andamento planimetrico normale all'asse della diga, mentre quella in destra è a profilo spezzato con angolo di 90°.

Le volte hanno generatrici inclinate di 45° sull'orizzontale e le loro direttrici, in piani normali alle prime, sono cerchi, con raggio d'estradosso costante di 5 m.

Le volte sono ammarate alla base in uno zoccolo di calcestruzzo che costituisce le fondazioni della diga; esse sono armate con doppio ordine di ferri, disposti secondo le direttrici e le generatrici (vedi sezione in figura 2).

Gli speroni hanno a monte la stessa inclinazione delle volte; il loro spessore è variabile da m. 0,90 in sommità a m. 2,40 alla base; l'interasse è di 10 m.

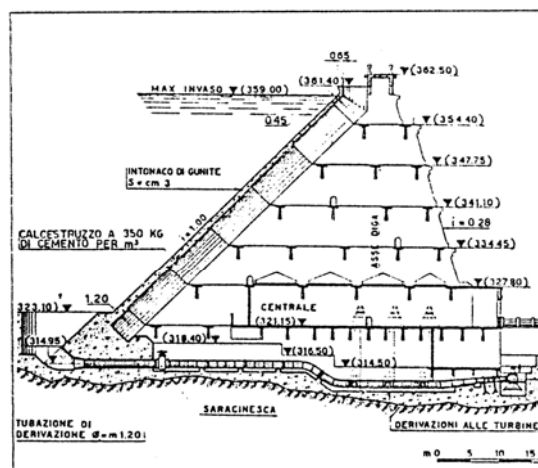


Fig. 2 - Sezione longitudinale.

La sbadacchiatura tra i contrafforti è costituita da sette serie di nervature in c.a. con sezione a T, disposte orizzontalmente a diverse quote; lungo la verticale la distanza fra ogni serie di archi di controvento è di m. 6,65.

Le strutture massicce laterali hanno il paramento verso acqua verticale e quello esterno sagomato a gradoni.

2. DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La strumentazione utilizzata era composta da:

a) un dispositivo che genera impulsi di vibrazioni meccaniche in sincronismo con un segnale elettrico; questo pilota l'avvio di una unità di visualizzazione della vibrazione in ricezione (vedi punto d seguente);

* A.I.C.E. S.r.l.

b) un dispositivo che riceve le vibrazioni meccaniche e le trasforma in segnali elettrici (ricevitore);

c) un dispositivo di amplificazione regolabile e di trattamento del segnale emesso dal ricevitore;

d) un dispositivo elettronico di misura e visualizzazione dell'intervallo di tempo fra istante di emissione ed istante di ricezione dell'impulso stesso.

L'emettitore era costituito da un dispositivo meccanico (martello strumentato) che creava un impulso di vibrazione tramite l'impatto veloce di un battente; per ogni misurazione venivano eseguiti n. 16 impatti. Sulla testa del martello era alloggiato un trasduttore di forza (cella di carico da 200 KN modello 9061 Kistler) che generava all'istante dell'impatto, un segnale elettrico trasmesso e registrato nel dispositivo di cui al punto "d"; tale segnale dava l'istante temporale dall'inizio di propagazione dell'onda elastica. Il dispositivo di ricezione era costituito da un accelerometro piezoelettrico, fissato sul lato opposto delle sperone; detto accelerometro (tipo 4370 Brüel & Kjær) trasformava in segnali elettrici le vibrazioni meccaniche ricevute.

Il dispositivo di misura, processamento, registrazione e visualizzazione del segnale era costituito da un analizzatore di spettro a due canali (tipo ONO SOKKI CF 350) settato nel dominio del tempo. Tramite il software presente nell'analizzatore era possibile mediare i valori delle 16 battute eseguite per ogni misurazione e provvedere alla visualizzazione simultanea degli impulsi con ampiezze comparabili. Tutti i segnali così processati, una volta determinato l'intervallo di tempo intercorrente tra la emissione e la ricezione, venivano registrati su supporti magnetici costituiti da floppy disk da 3" e quindi, successivamente stampati.

Un tipico diagramma relativo alla stampa di cui sopra è consegnato in figura 3: in alto è riportato il segnale relativo alla battuta (emissione) ed in basso il segnale relativo alla ricezione.

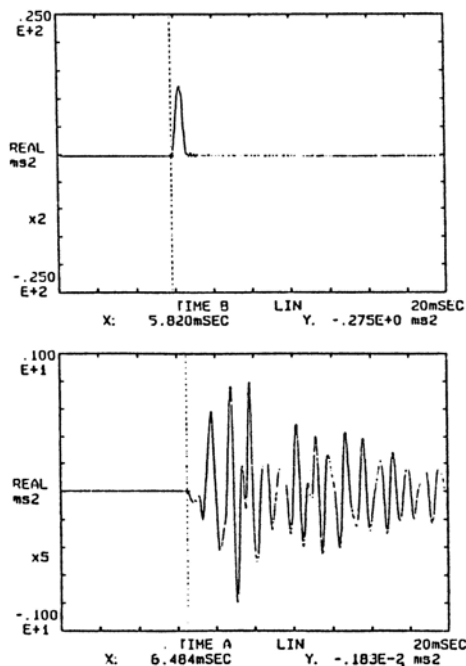


Fig. 3 - Segnale di emissione e di ricezione delle onde soniche.

L'intervallo di tempo intercorrente tra la emissione e la ricezione è determinato dal cursore posizionato all'inizio dei due suddetti eventi; in ascissa sono riportati i valori temporali la cui differenza permette di determinare il tempo di propagazione dell'onda e, nota la distanza, la velocità di propagazione.

3. PROCEDURA DI ESECUZIONE DELLE PROVE

Nella scelta della ubicazione dei punti di misura, si è seguito il criterio di testare i calcestruzzi degli speroni con percorsi delle onde elastiche che individuassero un ideale tracciato continuo.

Inoltre si è seguito il criterio di analizzare i calcestruzzi degli speroni alle quote più basse, fatta eccezione per lo sperone 10 dove è stata condotta una analisi dalla base fin quasi alla quota del coronamento: in particolare, per detto sperone, le acquisizioni sono state effettuate seguendo una maglia di m. 2x2 e ponendo i sensori di ricezione traslati sia orizzontalmente che verticalmente di m.1 rispetto ai punti di batturta.

In fig. 4 si riporta l'ideale percorso continuo delle onde elastiche.

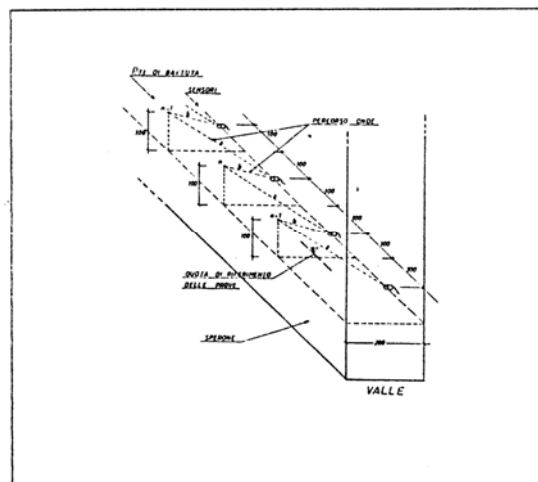


Fig. 4 - Percorso ideale delle onde elastiche nello sperone 10.

4. ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI

4.1 Analisi delle prove di compressione e conseguenti tarature

Al fine di trovare una relazione tra la resistenza a compressione dei calcestruzzi e la velocità di propagazione delle onde soniche, sono state prelevate dagli speroni 20 carote sulle quali sono state eseguite misurazioni della velocità di propagazione di onde elastiche e quindi prove di schiacciamento in laboratorio.

Su 5 carote sono state eseguite, inoltre, prove per la determinazione del modulo elastico secante.

La tabella 1 riassume i dati ottenuti in laboratorio.

carota	diametro (mm)	massa volumica (Kg/dm ³)	velocità onde long. (m/s)	resistenza cubica (MPa)	modulo elastico (N/mm ²)
8/1	99	2,365	3375	12,3	15245
11/5	99	2,375	3555	23,8	22735
10/140	99	2,385	3435	16,4	18120
19/21	99	2,390	3400	18,1	14480
15/8	99	2,295	3010	10,5	10540
15/11	150	2,200	3010	8,9	
15/2	150	2,220	3065	11,5	
10/143	150	2,200	3110	8,4	
9/7	99	2,285	3240	10,8	
18/12	150	2,195	3210	19,0	
10/82	99	2,365	3280	9,6	
9/3	99	2,360	3355	11,8	
9/14	99	2,360	3345	14,8	
5/12	150	2,300	3310	18,3	
4/3	150	2,225	3030	16,0	
9/18	99	2,336	3055	10,1	
5/6	150	2,233	3300	12,6	
13/17	150	2,135	3105	10,9	
16/19	99	2,305	3305	17,2	
17/18	99	2,415	3685	24,4	
media		2,297	3259	14,27	16224
dev. std.		0,081	186	4,72	4535

Tabella 1 - Riepilogo risultati delle prove di laboratorio su carote.

Detto x il generico valore relativo alla velocità, y il generico valore relativo alla resistenza a compressione, è stato possibile determinare la correlazione della popolazione (x,y) nella forma:

$$y = A * e^{Bx} \Rightarrow \ln(y) = Bx + \ln(A)$$

Si è ottenuto per i dati consegnati in tabella 1:

$$\ln A = -1,3597$$

$$B = 0,001218$$

$$r = 0,715572 \text{ (coefficiente di correlazione)}$$

e conseguentemente $A = e^{(-1,3597)} = 0,2567377$ da cui si ha:

$$R_c \text{ (Mpa)} = 0,2567 * e^{(0,001218)V \text{ (m/s)}} \quad (1)$$

In figura 5 sono graficati i valori V/R_c (velocità longitudinali e resistenze cubiche sperimentali) e la relativa curva di interpolazione data dalla (1).

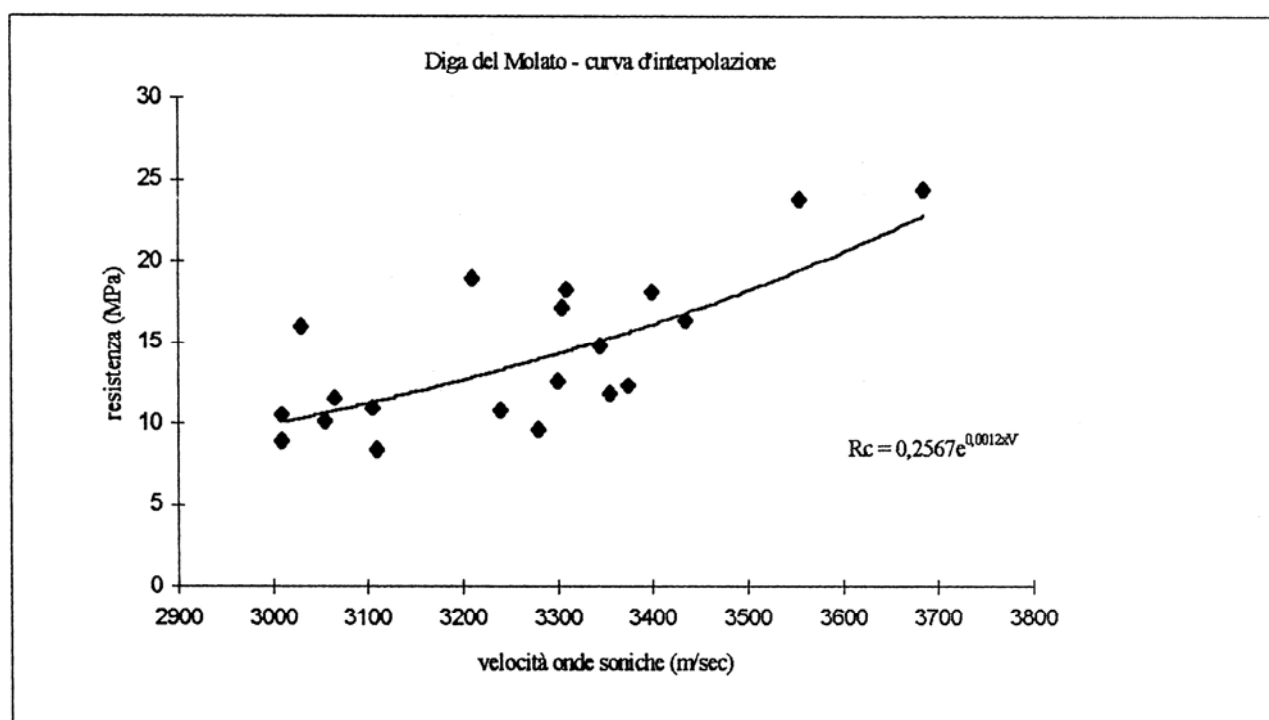


Fig. 5 - Correlazione tra velocità onde soniche e resistenze cubiche delle carote.

4.2 Estrapolazione dei risultati

La media dei valori della velocità di propagazione ottenuta dalle 1319 prove effettuate è risultata pari a 3331 m/s; la media dei valori della velocità di propagazione ottenuta sui 20 campioni su cui sono state effettuate le prove di compressione è risultata pari a 3259 m/s.

La sostanziale coincidenza dei valori (differenza intorno al 2%), ha confermato la significatività della relazione (1) e conseguentemente ad ogni misurazione di velocità si è associato un valore di resistenza a rottura.

Parimenti, utilizzando la (2) di seguito riportata, sono stati determinati i moduli elastici dinamici.

$$E_d = V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \frac{\Gamma}{g} \quad (2)$$

E' stato effettuato un confronto fra i valori del modulo elastico dinamico e statico (tabella 2).

carota	modulo elastico secante (MPa)	modulo elastico dinamico (MPa)
8/1	15245	22225
11/5	22735	24659
10/140	18129	23023
19/21	14480	22556
15/8	10540	17678
media	16224	22028
deviaz. standard	4535	2605

Tabella 2 - Riepilogo moduli elastici relativi alle carote.

Si è ottenuto un rapporto $E_d/E_s = 1,357$ con coefficiente di correlazione molto prossimo all'unità (0,9018) ad ulteriore dimostrazione della grande affidabilità dei risultati emersi dalla campagna di indagini eseguita.

5. CONCLUSIONI

Vengono di seguito in tabella 3 riepilogati i risultati più significativi dell'indagine.

Dai 1319 valori delle velocità ottenute è stato ricavato l'istogramma consegnato in figura 5.

Elaborando ulteriormente i risultati è stato determinato il valore della velocità al disotto del quale si trova il 5% della intera popolazione delle misure di velocità ottenute.

Detto valore è risultato essere pari a $V = 2775$ m/s; il corrispondente valore della resistenza risulta pari a 7,53 MPa.

sperone n°	quota (m)	V. media (m/s)	dev. std. %	R _c media associabile (m/s)
4	336,5	3324	18,8	19,22
5	331,8	3694	9,3	25,34
6	329,8	3206	8,8	13,44
7	323,2	3423	8,7	17,71
8	320,2	3509	9,6	20,03
9	323,2	3183	8,7	13,22
11	323,2	3652	8,2	23,53
12	329,8	3250	10,7	14,73
13	329,8	3230	10,7	13,71
14	325,9	3368	8,6	16,56
15	325,3	3157	17,2	14,64
16	325,3	3272	11,9	15,35
17	326,0	3406	13,4	19,29
18	326,3	3272	9,6	14,86
19	326,2	3542	8,1	20,62
SPERONE 10				
fila n°	quota (m)	V. media (m/s)	dev. std. %	R _c media associabile (m/s)
1	312,9	3515	8,1	19,89
2	314,9	3405	7,7	17,12
3	316,9	3393	6,9	16,71
4	318,9	3432	9,4	18,14
5	320,9	3433	9,9	18,22
6	322,9	3229	7,1	13,64
7	324,9	3164	7,7	12,68
8	326,9	3166	6,6	12,56
9	328,5	3194	7,0	13,06
10	330,9	3154	7,9	12,46
11	332,9	3257	6,9	14,09
12	334,9	3231	7,6	13,72
13	336,9	3230	6,8	13,55
14	338,9	3609	13,7	24,90
15	340,9	3122	9,5	12,27

Tabella 3 - Riepilogo risultati più significativi delle prove in situ.

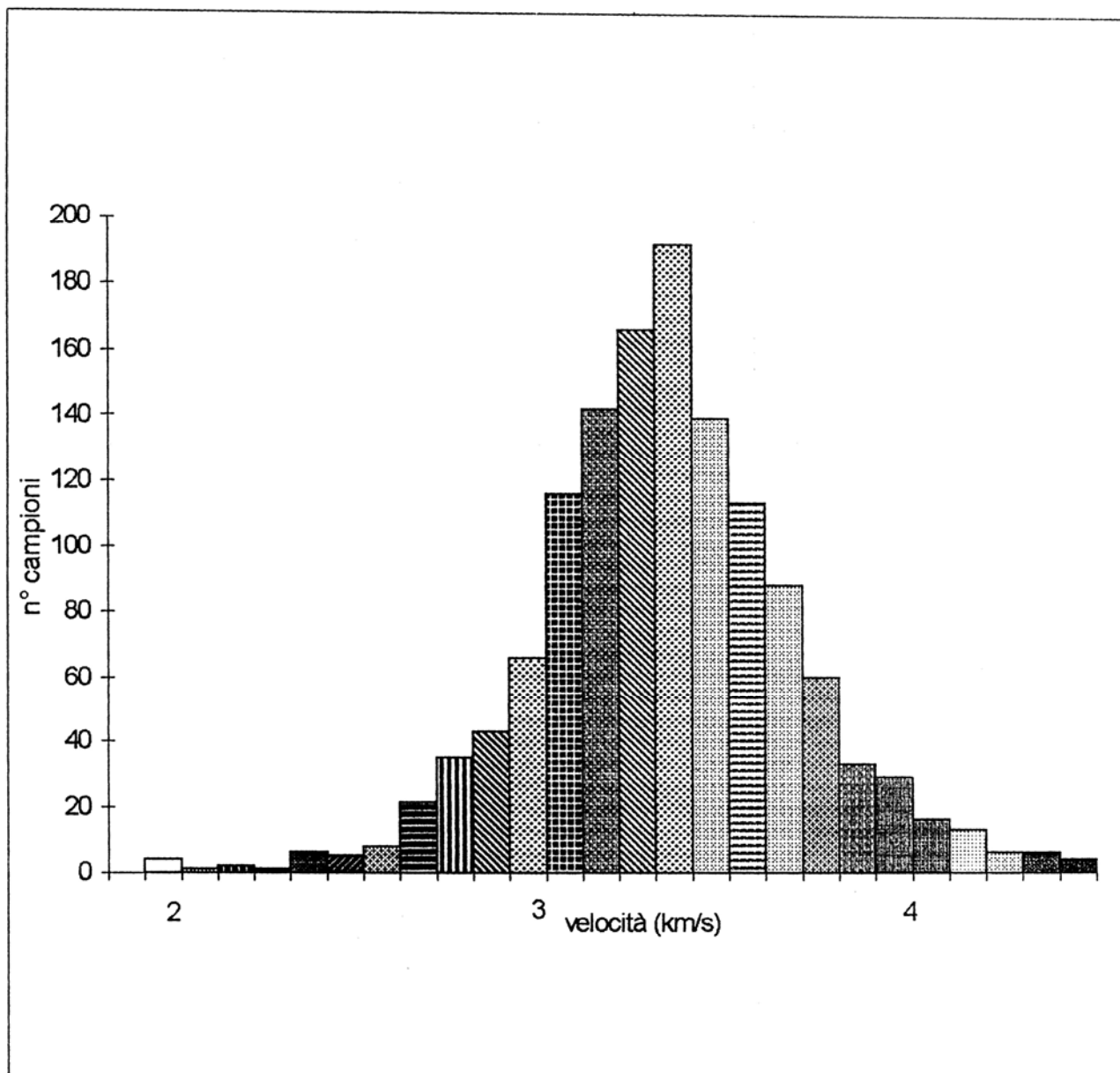


Fig. 6 - Istogramma delle frequenze relative alla velocità delle onde sonore.