

*Dispositivo pneumatico per la misura di parametri di resistenza di campioni di roccia sottoposti a carico dinamico.*

# Pneumatica applicata

**Roberto Folchi**

Vincitore Borsa di studio Festo

*Scopo del presente lavoro è stato la messa a punto di un sistema di misura di parametri meccanici di campioni di roccia sottoposti a carico dinamico.*

*In seguito ad uno studio teorico si è realizzato un dispositivo di prova per sollecitare provini di roccia. Il dispositivo è costituito da un cannoncino ad aria compressa che lancia un proiettile di acciaio su di un'asta la quale sottopone a carico il provino e questo, a sua volta, è contrastato assialmente da un'altra asta.*

*Si sono effettuate prove in varie condizioni sperimentali e dai risultati è stato possibile individuare una tendenza di comportamento del materiale.*

La previsione dei risultati di processi industriali quali la perforazione, la frantumazione meccanica e l'abbattimento con esplosivi si basa su relazioni semi-empiriche la cui affidabilità lascia spesso a desiderare. Non è infatti ancora possibile stabilire con precisione una legge di dipendenza fra i vari parametri che intercorrono nei fenomeni di rottura di materiale tipo litoidi, come ad esempio: tempo di applicazione del carico, energia assorbita nella fase di disgregazione meccanica, lo stato di fratturazione conseguente, ecc. Un buon grado di approssimazione nella conoscenza del legame fra questi parametri e quindi del risultato di una certa soluzione tecnica, consentirebbe la scelta della soluzione tecnica ottimale con conseguente netto miglioramento della qualità del prodotto finale e con un più efficiente impiego delle risorse tecnico-economiche a disposizione.

Nell'ambito delle ricerche collegate a queste problematiche si è messo a punto, nel Laboratorio dell'Istituto di Arte Mineraria della facoltà di Ingegneria (Università degli Studi di Roma), un dispositivo di prova che permette di sollecitare provini di roccia in varie condizioni di carico dinamico consentendo altresì la misura dei parametri fisici ad essi collegati.

Un'onda d'urto, che costituisce il carico dinamico, viene generata dall'impatto di pistoni di varie lunghezze spinti da un circuito ad aria compressa. Essendo la misura piuttosto delicata (i tempi in gioco sono dell'ordine del microsecondo) si è affrontata con la massima serietà il problema della «affidabilità» e della «riproducibilità» della prova, condizioni che si sono ricercate attraverso una approfondita analisi teorica ed una accurata scelta dei componenti. Nel seguito è riportata la descrizione del sistema di prova ed una breve trattazione dei problemi connessi alla misura. Si esporranno inoltre i risultati preliminari ottenuti dalla sperimentazione effettuata su provini di Marmo di Carrara e di Calcere di Coreno Ausonio, con particolare riguardo ai problemi energetici connessi alla fratturazione.

## Basi teoriche

L'apparato di misura si basa sulla applicazione della teoria semplificata della propagazione di un impulso elastico lungo una barra cilindrica.

La propagazione dell'impulso viene considerata per «onde elastiche longitudinali piane non dispersive». Si considera cioè trascurabile il moto radiale del ge-

nerico elemento di asta attraversato dall'onda, si assumono costanti i valori dei parametri associati all'impulso lungo i piani ortogonali all'asse della sbarra e si trascurano le attenuazioni in ampiezza delle componenti armoniche.

Queste ipotesi possono essere ritenute rigorose se il diametro della sbarra è di almeno un ordine di grandezza inferiore alla lunghezza d'onda dell'impulso e per ampiezze di sollecitazioni entro i valori limite di comportamento elastico dell'acciaio, [1], [2] e teoria di Pochhammer Chree [3].

La soluzione generale dell'equazione della propagazione di onde longitudinali in una barra è data da:

$$u = f(x - c_1 t) + F(x + c_1 t)$$

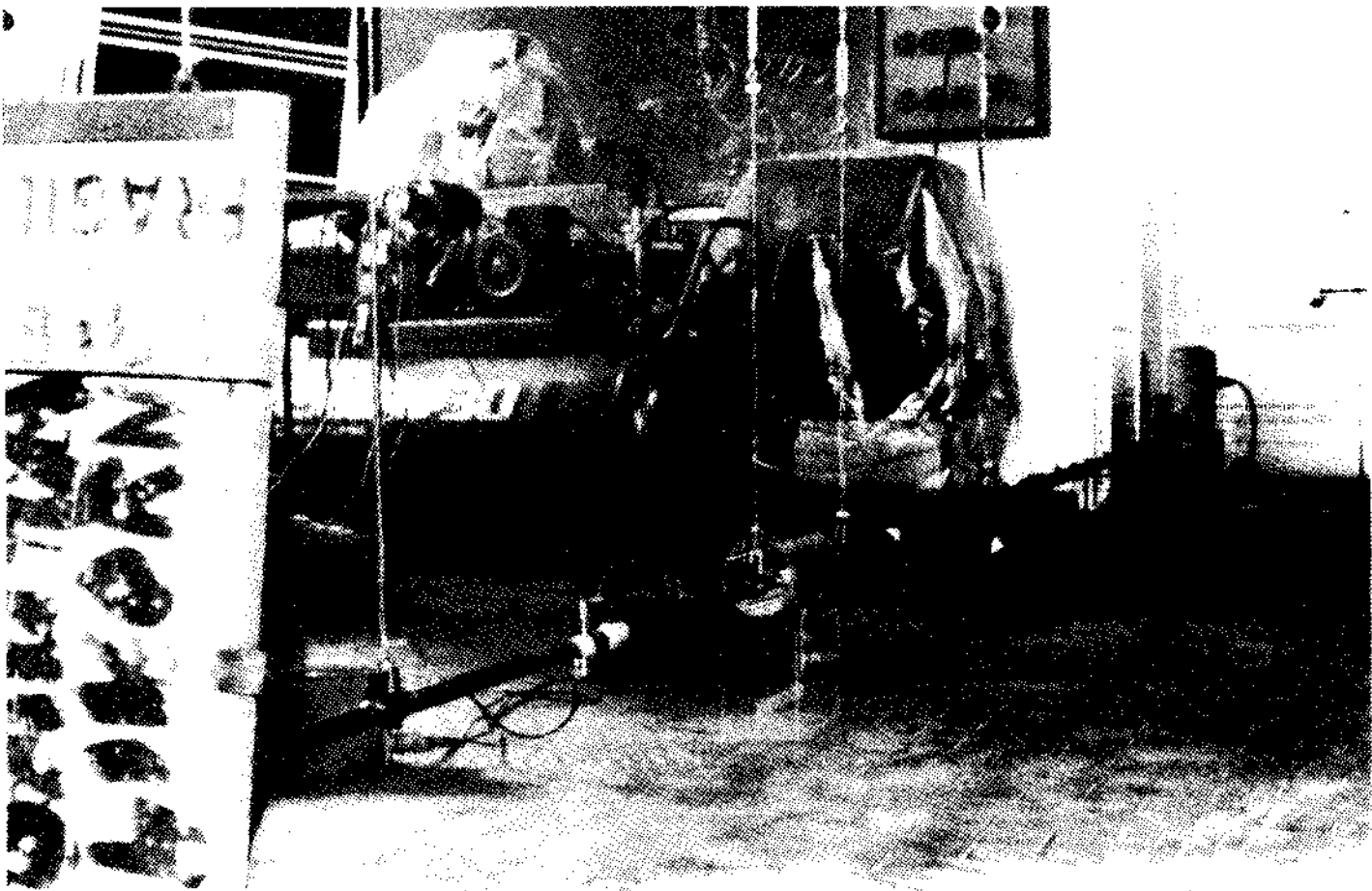
dove:

u = spostamento della generica sezione dalla sua posizione di riposo,  
x = distanza della generica sezione dall'origine di riferimento,

c<sub>1</sub> = velocità di propagazione delle onde elastiche rispetto all'origine di riferimento,

t = tempo,

f ed F = funzioni arbitrarie ed indipendenti; ad esempio: sen w, exp w, cost., ... con w = (x + c<sub>1</sub>t).



Vista d'insieme del dispositivo di prova e del dispositivo di misura dell'onda. Da sinistra verso destra: paraurti, seconda asta con punto di misura, provino e contenitore di sicurezza per la proiezione di frammenti di roccia, prima asta e punto di misura, cannone e sistema pneumatico.

Ponendo uguale a zero una delle due funzioni si ha:

(con  $F = 0$ )  $u = f(x - c_L t)$  che rappresenta un'onda che viaggia nel verso delle  $x$  crescenti;

(con  $f = 0$ )  $u = F(x + c_L t)$  che rappresenta un'onda che viaggia nel verso delle  $x$  decrescenti.

### Forma d'onda risultante dall'impatto coassiale di due sbarre di stessa sezione e lunghezze disuguali

Si consideri una sbarra (pistone) di lunghezza « $l$ » che va ad impattare un'altra di lunghezza molto maggiore, dello stesso materiale a densità « $\rho$ » e con ugual sezione trasversale, (fig. 1). Dall'impatto si generano delle sollecitazioni di compressione che si propagano con egual ampiezza « $-\delta_c$ » e con velocità « $c_L$ » lungo le due sbarre a partire dalle superfici di contatto. Dopo il tempo  $t = l/c_L$ , l'onda raggiunge la superficie libera del pistone e si riflette come onda di trazione.

L'ampiezza dell'onda di trazione riflessa si può con buona approssimazione considerare di valore assoluto pari a quella di compressione, infatti:

$$\delta_c / \delta_t = (\rho_a c_{La} - c_L) / (\rho_a c_{La} + c_L).$$

Essendo l'impedenza acustica dell'aria

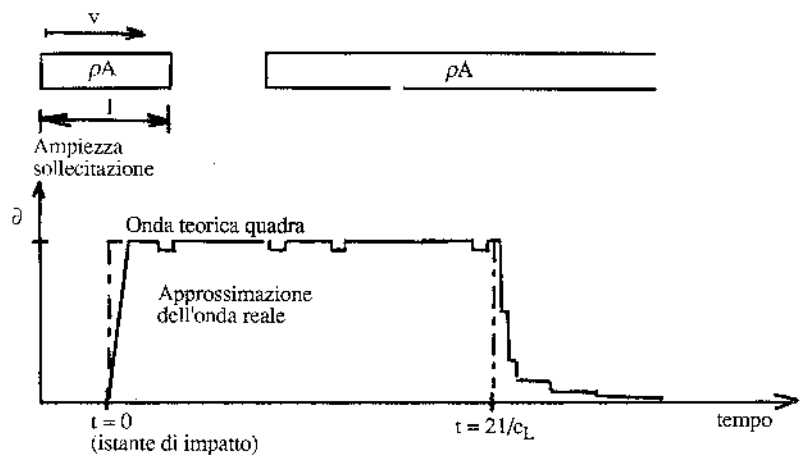


Fig. 1 - Impatto coassiale di due sbarre di ugual diametro e lunghezze differenti. Forma d'onda teorica e reale generata nell'asta lunga.

$Z_a = \rho_a c_{La}$  trascurabile rispetto a quella dell'acciaio  $Z = \rho c_L$  ne segue che  $\delta_t = -\delta_c$ .

L'onda di trazione riflessa annulla le tensioni di compressione fino a quando, al tempo  $t = 2l/c_L$ , raggiunta la superficie d'impatto, lascerà il pistone completamente non-sollecitato. Nello stesso istante non la pressione di contatto delle su-

perfici si annulla e la forza di compressione sulla testata dell'asta precipita a zero. La risultante forma d'onda assume la forma di fig. 1, [4].

La ampiezza della sollecitazione indotta nell'asta è data da:  $\delta_c = c_L v$ , dove « $v$ » è la velocità d'impatto del pistone. Dall'istante di tempo  $t = 2l/c_L$  tutta l'energia cinetica del pistone, pari a  $E_c = 0.5$

$Alv^2$ , sarà trasformata in energia elastica  $E_c$  associata all'onda.  
 $E_c = Al\delta^2 / 2E = Al(\rho v c_t)^2 / 2E = Al\rho v^2 / 2$ , dove  $E$ : modulo di elasticità.

Nel caso della procedura sperimentale in esame, il pistone che va ad impattare l'asta presenta delle scanalature dove sono alloggiati delle guarnizioni di tenuta, inoltre la superficie d'impatto non è piana ma leggermente bombata (fig. 2). Ciò comporta una modifica della forma d'onda teorica.

La forma d'onda risultante è di assai difficile risoluzione e richiederebbe l'ausilio di un elaboratore elettronico; si può tuttavia dire che essa non si discosta notevolmente da quella dovuta ad un pistone cilindrico (fig. 2), [4].

### Applicazioni della teoria al dispositivo di prova

Si consideri un provino di spessore «s» posto fra due sbarre. Un'onda d'urto, di ampiezza pari ad « $-\delta_I(t)$ » che viaggia lungo un'asta, incidendo sulla superficie del provino, genera un'onda riflessa « $+\delta_R(t)$ » ed un'onda trasmessa « $-\delta_T(t)$ » (fig. 3). Si consideri ora la soluzione generale della propagazione di onde longitudinali lungo una sbarra nel ca-

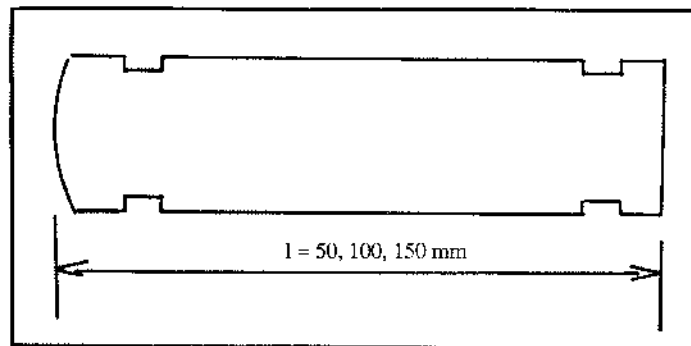


Fig. 2 - Geometria del proiettile utilizzato per generare l'onda d'urto sulla sbarra.

Dispositivo di prova.  
 Particolare del sistema pneumatico: filtro riduttore e deumidificatore, polmoncino, valvola a manicotto.

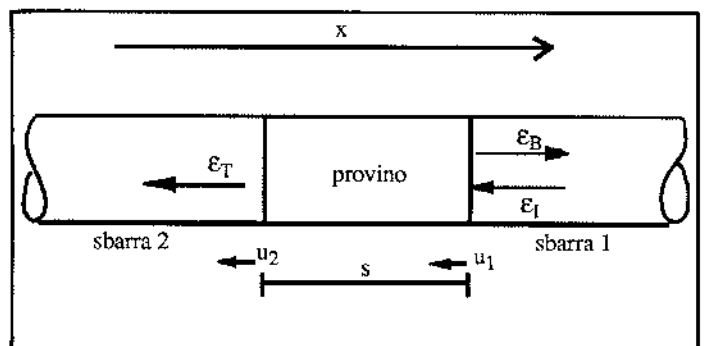
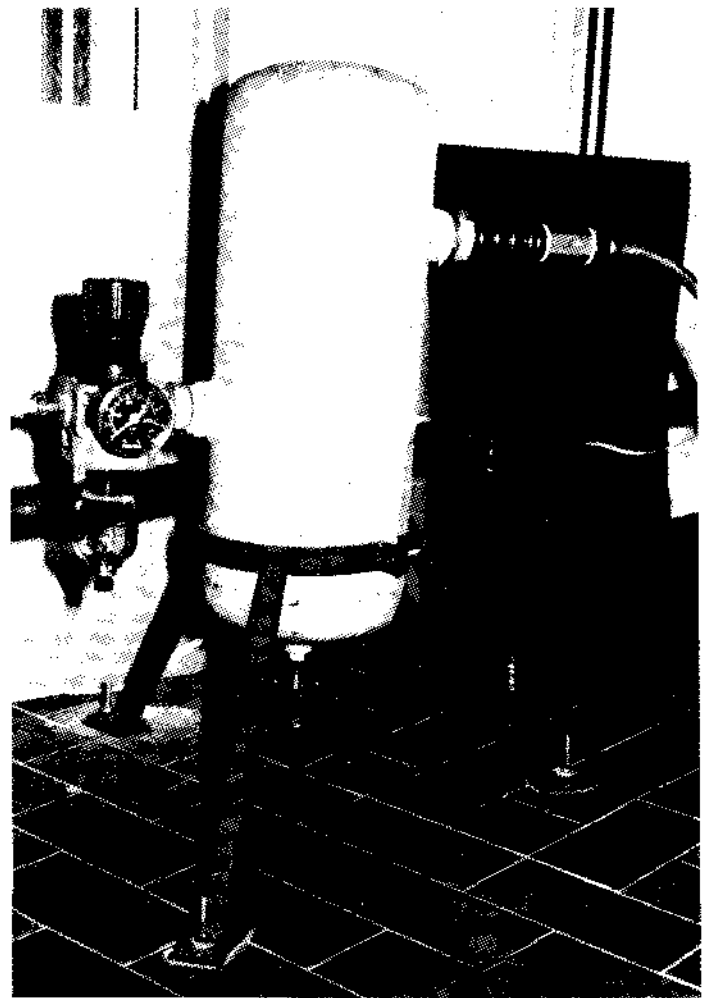


Fig. 3 - Provino di roccia posto fra le due sbarre.  
 $u$  = spostamento di un punto al tempo  $t$ ;  $\epsilon$  = deformazione;  $x$  = distanza dall'origine di riferimento del punto (o della sezione) sottoposto a spostamento.

so di propagazione nel verso delle  $x$  decrescenti:  $u = F(c_L t + x)$ . Facendo le derivate parziali rispetto a  $x$  e  $t$  si avrà:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \dot{F}(c_L t + x)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_L \dot{F}(c_L t + x) = c_L \frac{\partial u}{\partial x} = c_L \epsilon$$

ne segue:

$$u = c_L \int_0^{t_0} \epsilon dt$$

Lo spostamento della superficie fra provino e prima asta sarà dovuto ad onda incidente ed onda riflessa:

$$u_1 = c_L \int_0^{t_0} \epsilon_I dt - c_L \int_0^{t_0} \epsilon_R dt = c_L \int_0^{t_0} (\epsilon_I - \epsilon_R) dt$$

Lo spostamento della superficie fra provino e seconda asta sarà dovuto solamente all'onda trasmessa:

$$u_2 = c_L \int_0^{t_0} \epsilon_T dt$$

la deformazione del provino sarà:

$$\epsilon_p = (u_2 - u_1) / s = c_L / s \int_0^{t_0} (\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) dt.$$

Se  $F_1$  ed  $F_2$  sono i carichi alle estremità del provino, considerando:

$E$  = modulo di elasticità dell'acciaio,  
 $A$  = superficie trasversale della sbarra,  
 $A_p$  = superficie trasversale del provino di roccia,  
 $\delta_p$  = sollecitazione media del provino, sarà:

$$F_1 = EA(I - R) \text{ ed } F_2 = EA_T$$

$$P = (F_1 + F_2) / 2 \cdot l / A_p =$$

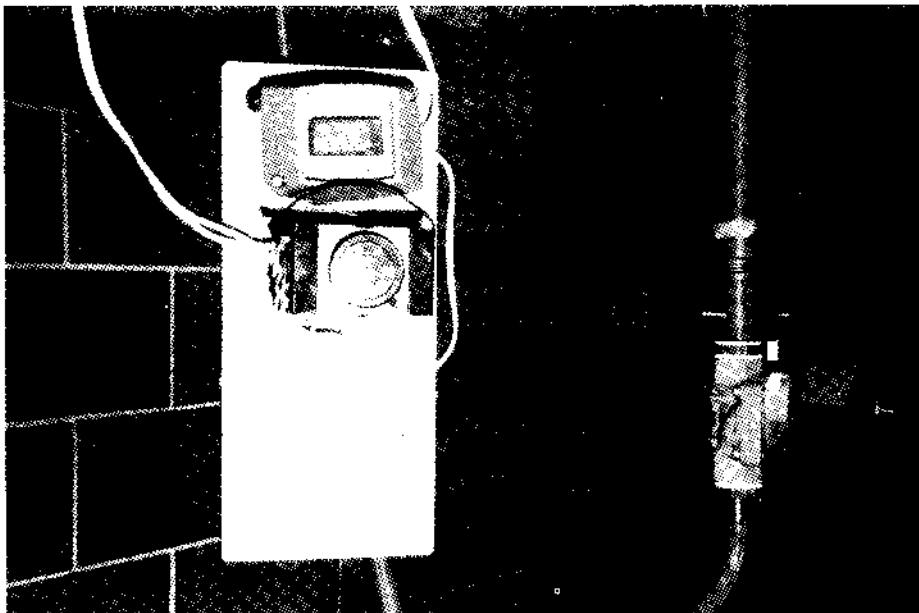
$$= 0.5 A / A_p (I - R - T).$$

Ciò è stato calcolato considerando sol-

lecitazioni e deformazioni uniformemente distribuite nel provino e per uno spessore infinitesimo del provino stesso. Con una certa approssimazione ciò può essere ritenuto valido per campioni di piccolo spessore [5].  
 Posta  $W_L$ ,  $W_R$  e  $W_T$  rispettivamente l'e-

onda riflessa sulla prima asta e come onda trasmessa sulla seconda.  
 Per ottenere differenti tempi di carico si sono utilizzati proiettili di tre differenti lunghezze: 50, 100 e 150 mm.  
 Per semplificare l'allineamento del proiettile con la sbarra e per limitare i

La velocità d'impatto, e quindi l'ampiezza dell'onda d'urto generata, è stata variata regolando la pressione dell'aria di mandata e variando con un temporizzatore il tempo di apertura dell'elettrovalvola, (vedi fig. 5).  
 Per la planarità e l'allineamento del si-



Dispositivo di prova, Culatta, elettrovalvola e dispositivo per il comando dell'elettrovalvola costituito da un interruttore di sicurezza (blu), un temporizzatore ed un interruttore di comando apertura valvola.

nergia connessa con onda incidente, riflessa e trasmessa sarà:

$$W_T = A c_L / E \int_0^{t_0} \delta^2 dt = A c_L E \int_0^{t_0} \epsilon^2 dt;$$

$$W_R = \dots\dots\dots;$$

$$W_I = \dots\dots\dots;$$

Calcolando l'integrale del quadrato della deformazione dell'asta per l'onda diretta, riflessa e trasmessa, è possibile risalire indirettamente all'energia trattenuta nel provino [5].

## Dispositivo di prova

Il dispositivo di prova è costituito da due sbarre di acciaio tipo UNI C 40 lunghe 1500 mm ciascuna e di diametro  $\varnothing = 22$  mm; esse sono sospese al soffitto con asse coincidente. Fra le due aste è posto il provino di roccia da analizzare, (vedi figg. 4 e 5).

Mediante un cannoncino ad aria compressa si lancia un proiettile cilindrico dello stesso materiale e dello stesso diametro della sbarra. Il proiettile, entrando in collisione con la sbarra, genera un'onda longitudinale che viene registrata prima dell'impatto con il campione di roccia sulla prima asta, e dopo come

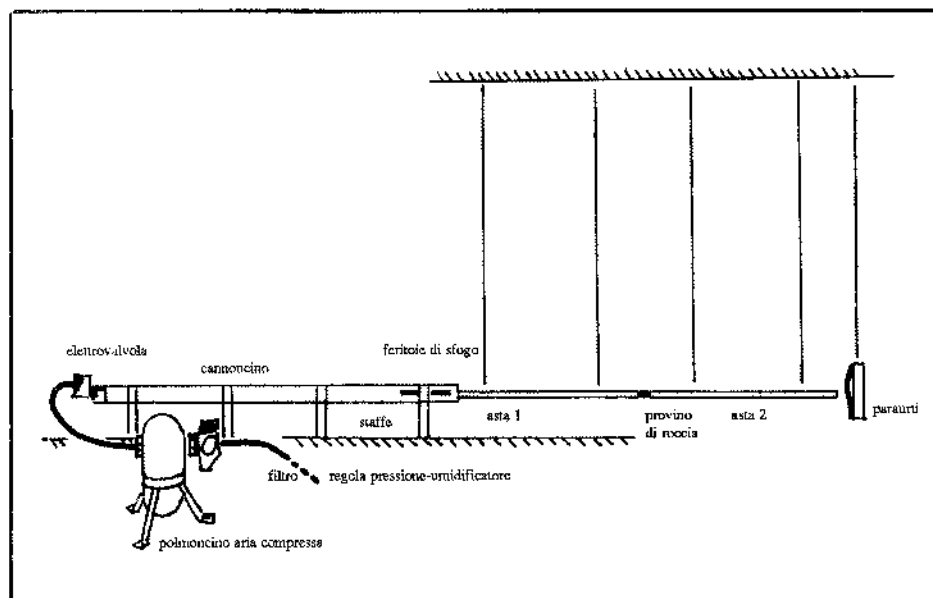


Fig. 4 - Schema del dispositivo di prova.

danni alle superfici collidenti, la testa battente del proiettile è stata leggermente arrotondata.

Ad evitare che si formi un cuscinetto d'aria fra il proiettile e la sbarra si sono ricavate due feritoie di sfogo allineate, lunghe 100 mm ciascuna, all'estremità del tubo di lancio.

Le superfici di testa del proiettile e dell'asta si sono mantenute rigorosamente pulite da grasso e polvere.

stema sbarra-provino-sbarra-proiettile si è utilizzata una livella di precisione e uno squadra agrimensorio intervenendo sulle staffe di supporto del tubo di lancio, sulle guide di ancoraggio delle corde di acciaio di supporto delle aste, su snodi e tendifilo montati sulla corda. Le sbarre sospese balisticamente al soffitto, in assenza del provino di roccia, vengono a contatto ed una volta inserito il provino fra esse questo si mantiene in equilibrio per forze di attrito.

Per eliminare danni al cablaggio del trasduttore montato sulla seconda asta si limita la corsa di quest'ultima con un paraurti sospeso al soffitto.

Durante le prove per verificare il completo passaggio dell'onda si ponevano in contatto le testate delle due aste e si verificava l'eguaglianza dei valori dell'energia registrati su prima e seconda asta.

**Sistema di misura dell'onda d'urto**

L'onda d'urto è stata registrata mediante estensimetri a resistenza posizionati sulle aste a 750 mm dal campione di roccia. La lunghezza dell'asta e la posizione degli estensimetri sono state stabilite tali da non avere nella registrazione sovrapposizioni dell'onda incidente con l'onda riflessa.

Il segnale è stato registrato e condizionato mediante amplificatori differenziali a larga banda e quindi memorizzato su di un oscilloscopio digitale «pretriggerato» sul trasduttore della prima asta; la frequenza di campionamento si è posta pari ad 1MHz con una frequenza di taglio per il fenomeno «aliasing» di 400 KHz. L'elaborazione del segnale si è effettuata via software dall'oscilloscopio digitale.

**Trasduzione dell'onda d'urto**

Per la trasduzione dell'onda d'urto si sono impiegati estensimetri elettrici a resistenza tipo 0.6 120 LY 11 della HBM. Tra i parametri che legano la scelta di un estensimetro per una certa misura, si è data la massima priorità alla lunghezza della griglia attiva. Essendo il fenomeno in esame caratterizzato da elevate frequenze, si è ritenuto necessario realizzare la superficie di misura quanto più possibile approssimabile a puntiforme. Infatti, considerando una velocità delle onde longitudinali dell'acciaio di circa 5000 m/s, una frequenza massima delle componenti armoniche del segnale di 2 MHz, si avrà una lunghezza d'onda pari a  $\lambda = c_L / \text{frequenza} = 5000 / 2 \times 10^6 = 2.5 \text{ mm}$ . Nella misura di fenomeni di-

Stato di fratturazione conseguente a valori crescenti dell'energia dell'onda di carico su provini di calcare di Coreno Ausonio.

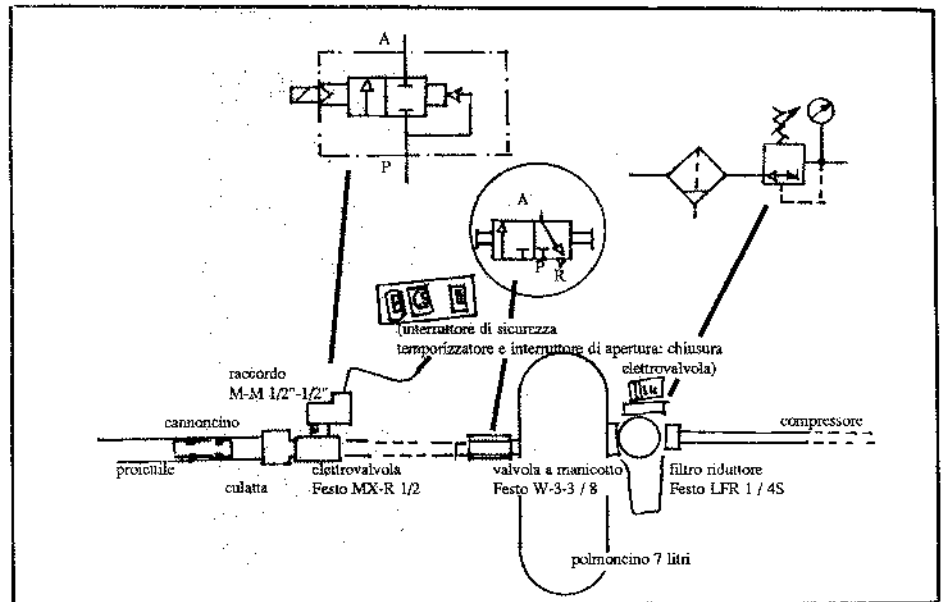


Fig. 5 - Schema del sistema pneumatico.

namici è necessario un estensimetro la cui lunghezza della griglia attiva sia pari o inferiore a  $1/6 \div 1/10$  della lunghezza dell'onda, [6]. Da ciò segue la scelta dell'estensimetro LY 11 la cui lunghezza di griglia attiva è di 0.6 mm. È inoltre da far notare che la barra è di acciaio rettificato, conseguentemente la rugosità superficiale è dell'ordine dei 3  $\mu\text{m}$ , tale da garantire uniformità di comportamento sotto la griglia dell'estensimetro.

**Disposizione degli estensimetri a ponte. Tensione di alimentazione del ponte**

Gli estensimetri incollati sull'asta si sono collegati secondo la configurazione a «mezzo ponte di Wheatstone». Ciascuno dei due rami attivi del ponte è stato realizzato collegando in serie due estensimetri incollati sull'asta in posizione diametralmente opposta, fig. 6.

La disposizione degli estensimetri data in fig. 6 assomma una serie di vantaggi: — una più spinta dinamica di registrazione (la configurazione a mezzo ponte innalza la frequenza limite superiore del-

la banda passante)

— aumentando la resistenza del ramo attivo a 240  $\Omega$  si consente una tensione di alimentazione del ponte più elevata a parità di condizioni di dissipazione del calore della griglia (la resistenza di un solo estensimetro è pari a 120  $\Omega$ ). Essendo la tensione di alimentazione del ponte più elevata si avrà un segnale di uscita più elevato a parità di microdeformazione misurata, ciò consente di diminuire il guadagno dell'amplificatore e quindi di aumentare la risposta in frequenza (maggiore è il guadagno di amplificazione, più bassa è la risposta in frequenza).

La condizione ottimale di dissipazione del calore dalla griglia dell'estensimetro, per acciaio di grosso spessore, per prova dinamica con alto livello di accuratezza, si ottiene per densità di potenza sulla griglia di  $7.8 \div 16 \text{ KWatt/m}^2$ , vedi tabella 1, [7].

Potenza dissipata dalla griglia (Watt):  $P_G = E^2_P / 4R_e$

Densità di potenza (KWatt/m<sup>2</sup>):  $D_P = P_G / A_G$

ALCARE DI CORENO



Stato di fratturazione conseguente a valori crescenti dell'energia dell'onda di carico su provini di Marmo di Carrara.

po di salita(\*) in secondi e B è la banda passante in Hz). Nel caso di impulsi generati dall'impatto del proiettile l = 100 mm risultava un tempo di salita di 32 μs. Ne deriva una B = 11 KHz che rappresenta, in prima approssimazione, la frequenza di taglio del sistema.

Ricerca del punto nel sistema, causa del filtraggio del segnale

Si sono analizzati separatamente i vari componenti del sistema di misura ripristinando artificialmente, con un generatore di forme d'onda, condizioni simili a quelle sperimentali.

L'impulso teorico generato dall'impatto di un proiettile, ad esempio lungo 50 mm, produrrà sull'asta un'onda teorica quadra di lunghezza pari a 20 μs che corrisponde ad un'onda quadra generata con frequenza pari a 25 KHz. Collegando il generatore prima direttamente con il registratore e poi con l'amplificatore HBM si è notata una buona squadratura dell'onda registrata. Il tempo di salita per il collegamento generatore-amplificatore-registratore è di circa 10 μs. Si è quindi constatato che la filtrazione non avviene in questo anello della catena. Altri punti del sistema possibili cause di filtrazione sono:

- effetto grandezze capacitive-induttive-resistive distribuite nel sistema ponte estensimetrico-barra-cavetto di collegamento del ponte all'amplificatore, ma ciò è escluso perché queste grandezze possono iniziare ad avere una certa influenza per frequenze intorno ai GHz;
- griglia dell'estensimetro, ma ciò è escluso perché da ricerche risulta che esso tagli frequenze intorno ai 300 KHz, [9], [10].

Si può quindi affermare che la filtrazione avvenga in parte nella sbarra, per la teoria esposta in precedenza, e in parte nel supporto della griglia e nella colla fra supporto e sbarra. Va fatto notare che non essendo frequenti misure con estensimetri a resistenza a frequenze così elevate mancano in bibliografia dati significativi a proposito. C.C. Perry e H.R. Lisner [11] indicano una frequenza di taglio per estensimetri elettrici di circa 50 KHz.

Considerazioni sul contenuto energetico dell'onda

Il contenuto energetico dell'onda misu-

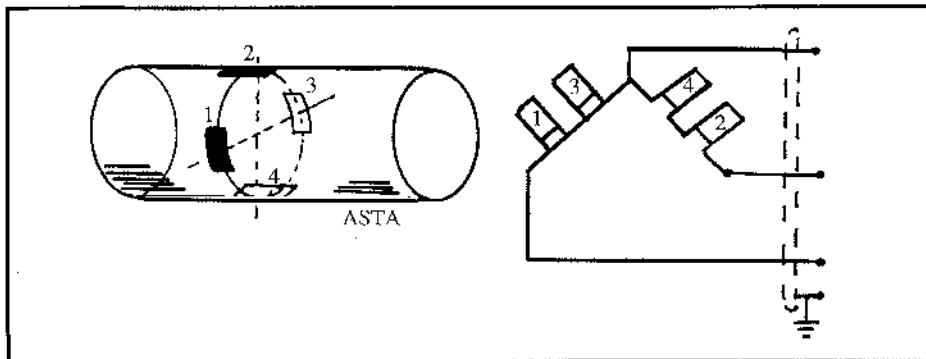


Fig. 6 - Posizione sull'asta degli estensimetri e loro collegamenti elettrici.

dove:

$R_e$  = resistenza dell'estensimetro,  
 $A_G$  = area della griglia (lunghezza della griglia attiva per larghezza dell'estensimetro),

$E_P$  = alimentazione del ponte in Volt ( $E_P$  si intende per un'alimentazione simmetrica del ponte, dove cioè la tensione applicata al braccio attivo è pari alla tensione di alimentazione del ponte).

La tensione di alimentazione ottimale del ponte sarà:

$$E_P = 2 R_e P_G A_G$$

Per i due estensimetri LY 11 della HBM collegati in serie sarà:

$A_G = 2(1 \times 0.6) \text{ mm}^2 = 1.2 \text{ mm}^2$ ;  
 $R_e = (120 + 120) = 240$ ;  
 $D_G = 7.8 \div 16 \text{ KWatt/m}^2$  risulterà quindi un  $E_P = 3 \div 4.3$  Volt. Per tale motivo si è stabilita una tensione di alimentazione del ponte pari a 4 Volt.

Sistema di amplificazione e di registrazione del segnale

Per l'amplificazione del segnale di uscita del ponte si sono utilizzati amplificatori differenziali HBM KWS 3020 (banda passante a guadagno minimo: 50 ÷ 60 KHz).

Per la registrazione del segnale si è utilizzato un registratore digitale di transienti: Transiscope 9000 della Difa.

In seguito all'elaborazione via software nel Transiscope si è trasferito il segnale su carta con un plotter analogico.

Fedeltà nella riproduzione dell'onda d'urto attraverso il sistema di misura

Appare necessario, per rigore tecnico, fare alcune considerazioni sulle distorsioni che il fenomeno reale subisce attraverso il sistema di misura.

Come visto precedentemente, la forma d'onda risultante dall'impatto di un proiettile cilindrico sulla barra di acciaio sarà di tipo quadra. La durata di questo impulso sarà funzione della lunghezza del proiettile. Data la velocità delle onde longitudinali nell'acciaio ( $c_L = 5150 \text{ m/s}$ ) la durata dell'impulso sarà:

$$t = 2 \cdot l / c_L$$

Per i tre proiettili utilizzati, la lunghezza dell'impulso sarà per i proiettili lunghi 50, 100 e 150 rispettivamente 20 μs, 40 μs e 60 μs. Durante le prove si è tuttavia notata una certa differenza fra l'onda teorica e quella misurata. L'onda misurata appariva infatti arrotondata e spanciata. Ciò ha indotto a pensare che in qualche punto della catena di misura ci fosse una filtrazione. Per stabilire quale fosse la frequenza di taglio del sistema si è utilizzata la formula approssimata [8]:  $T_s = 0.35/B$  (dove  $T_s$  è il tem-

(\*) Per tempo di salita di una funzione si intende il tempo necessario a passare dal 10% al 90% del suo valore massimo.

# APPLICAZIONI

Tab. 1 - Densità di potenza sulla griglia per varie condizioni di misura.

	Richiesta di precisione	ECCELLENTE campioni di alluminio duro o rame	BUONO acciaio sottile	DISCRETO acciaio inox sottile o titanio	SCARSO plastica, fibre di vetro e materiale epossidico	MOLTO SCARSO materiale acrilico o polistirene
STATICO	Alto	2 - 5 3,1 - 7,8	1 - 2 1,6 - 3,1	0,5 - 1 0,78 - 1,6	0,1 - 0,2 0,16 - 0,31	0,01 - 0,02 0,016 - 0,031
	Medio	5 - 10 7,8 - 16	2 - 5 3,1 - 7,8	1 - 2 1,6 - 3,1	0,2 - 0,5 0,31 - 0,78	0,02 - 0,05 0,031 - 0,078
	Basso	10 - 20 16 - 31	5 - 10 7,8 - 16	2 - 5 3,1 - 7,8	0,5 - 1 0,78 - 1,6	0,05 - 0,1 0,078 - 0,16
DINAMICO	Alto	5 - 10 7,8 - 16	5 - 10 7,8 - 16	2 - 5 3,1 - 7,8	0,5 - 1 0,78 - 1,6	0,01 - 0,05 0,016 - 0,078
	Medio	10 - 20 16 - 31	10 - 20 16 - 31	5 - 10 7,8 - 16	1 - 2 1,6 - 3,1	0,05 - 0,2 0,078 - 0,31
	Basso	20 - 50 31 - 78	20 - 50 31 - 78	10 - 20 16 - 31	2 - 5 3,1 - 7,8	0,2 - 0,5 0,31 - 0,78

rata rimane lo stesso dell'onda non deformata, a meno di fenomeni dissipativi che intervengono nella filtrazione e che, nel caso in esame, si sono considerati trascurabili. L'energia delle componenti armoniche a frequenza più alta si sposta su quelle a frequenza più bassa. Risulterà pertanto attendibile la misura di energia effettuata sull'onda deformata mentre le misure di ampiezza della sollecitazione risulteranno affette da un certo grado di approssimazione.

## Caratterizzazione geomeccanica dei due litotipi e preparazione dei provini (caratteristiche dell'acciaio)

Si sono impiegati in questa fase preliminare della ricerca due litotipi: Calcarea di Coreno Ausonio e Marmo di Carrara. Le caratteristiche meccaniche principali sono riassunte in tabella 2. I provini si sono realizzati da un unico blocco così da avere la massima omogeneità di caratteristiche, carotati con un carotiere a diamanti incastonati, con diametro  $\varnothing = 21.60$  mm e si sono spianati con uno scarto di parallelismo delle facce inferiori a 0.01 mm/21.60 mm. L'altezza media dei provini era di 45 mm.

Fig. 8 - Energia specifica trasmessa ( $W_T$  / Volume del provino) ed energia specifica incidente ( $W_I$  / Volume del provino).

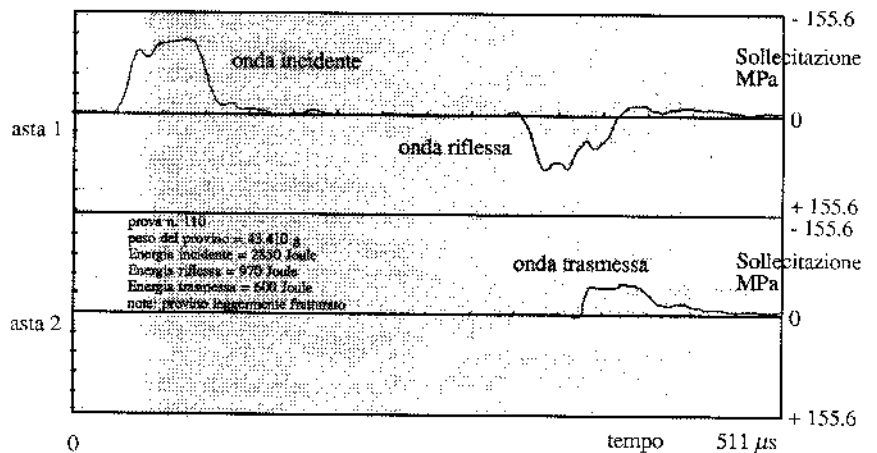
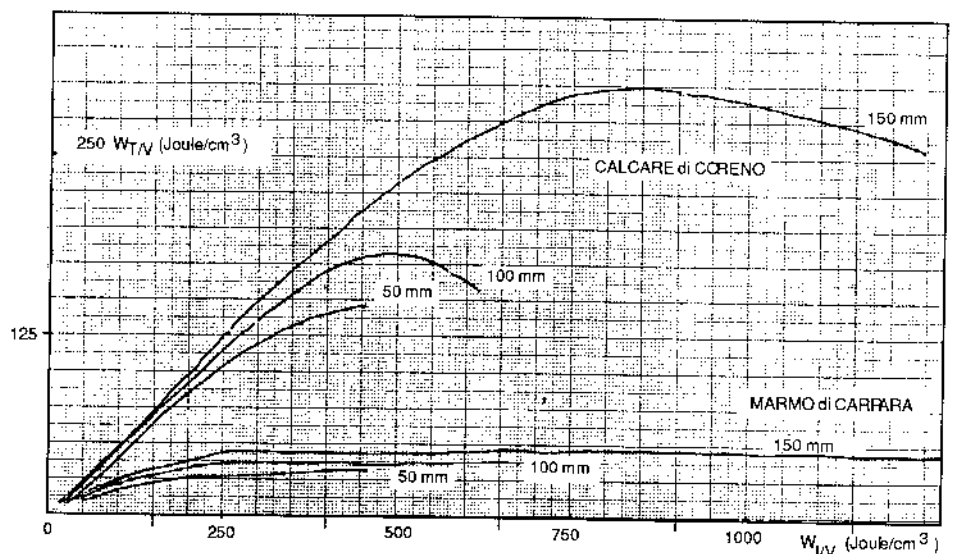


Fig. 7 - Registrazione di una prova e dati ad essa relativi. Proiettile lungo 150 mm. Provino di Marmo di Carrara.



Tab. 2 - Caratteristiche geomeccaniche dei due litotipi sottoposti a prova dinamica.

MARMO DI CARRARA/CALCARE DI CORENO			
Caratteristica	Marmo di Carrara	Deviazione standard	Marmo di Coreno
Peso dell'unità di volume ( $t/m^3$ )	$\gamma = 2,69/2,62$	0,5/0,1	0,5
Resistenza a trazione brasiliana (MPa)	$\delta_t = 5,2/4,7$	5,2/0,77	9/7
Resistenza a compres. uniaxiale (MPa)	$\delta_c = 91/144$	4,3/21,7	9/7
Porosità effettiva (/)	$n_e = 0,35/2,52$	0,41/0,2	9/9
Veloc. onde longit. (provino secco —m/s)	$c_l = 4010/4176$	130/110	9/9
Veloc. onde longit. (provino saturo —m/s)	$c_{l1} = 6038/6065$	65,3/47,4	9/9

L'acciaio impiegato per le sbarre è tipo UNI C 40, normalmente utilizzato per utensili [12], senza nessun processo di indurimento. Le sue principali caratteristiche meccaniche:

- resistenza a trazione:  $R = 570 \div 720$  MPa,
- modulo di elasticità:  $E = 204$  GPa,
- coefficiente di Poisson:  $\nu = 0,3$ ,
- peso specifico  $\rho = 7,84$  Kg/dm<sup>3</sup>,
- velocità onde longitudinali:  $c_l = 5150$  m/s (misurata sulle due sbarre).

## Risultati delle prove

Per ciascun tipo di provino si sono misurate: altezza, diametro e peso, quindi energia incidente ( $W_I$ ), energia riflessa ( $W_R$ ) ed energia trasmessa ( $W_T$ ). Una registrazione è riportata in fig. 7. Alcuni risultati sono esposti in fig. 8.

## Conclusioni

Nel redigere le conclusioni si riassumono brevemente alcuni passi fondamentali del lavoro svolto.

Attraverso considerazioni teoriche si sono ricercate le condizioni geometriche che consentissero l'applicabilità della teoria semplificata della propagazione di un'onda d'urto su un'asta d'acciaio. Si è quindi realizzato un dispositivo di prova che consentisse la misura dell'energia impartita, tramite questo dispositivo, ad un provino di roccia e dell'energia che esso lascia passare durante il processo di frantumazione.

Essendo la misura piuttosto delicata a causa delle elevate frequenze connesse all'onda, si è affrontato il problema della fedeltà e riproducibilità del fenomeno.

Si è visto che, nonostante alcune distorsioni nella riproduzione del fenomeno reale dovute al sistema di trasduzione, il dispositivo si è dimostrato affidabile per misure di energia.

Misure su due litotipi Marmo di Carrara e Calcarea di Coreno Ausonio, hanno messo in luce che, aumentando l'ampiezza della sollecitazione di carico ( $W_I$ ), aumenta anche l'energia trasmessa ( $W_T$ ), fino ad arrivare ad un punto in cui questa rimane costante all'aumentare di  $W_I$ . La roccia fra le due sbarre agisce quindi come un filtro «passabasso» dell'energia. Questa tendenza si nota molto bene nel Marmo di Carrara mentre è meno marcata nel Calcarea di Coreno il quale inoltre, a parità di  $W_I$ , consente il passaggio di valori più elevati di  $W_T$  (vedi fig. 8).

Va pure fatto notare che aumentando la lunghezza del proiettile, ovvero la lunghezza dell'onda di compressione di carico, aumenta l'energia che la roccia lascia passare e così pure il suo valore limite superiore. L'effetto filtrante della roccia, dunque, si fa sentire tanto più quanto minore è la lunghezza dell'onda di compressione che carica il provino. Un altro dato interessante è quello relativo all'energia trattenuta nel processo di rottura del provino di roccia posto fra le due sbarre:  $W_I - W_R - W_T$ . A parità di « $W_I$ » l'energia trattenuta aumenta con il diminuire della lunghezza dell'onda di carico: più veloce è il trasferimento dell'energia dall'asta al provino e maggiore sarà l'energia che la roccia è in grado di trattenere. È pure utile notare che l'energia trattenuta, a parità di condizioni di prova, è grosso modo la stessa nei due materiali, mentre come è stato già detto, molto maggiore è l'energia trasmessa dal Calcarea di Coreno. Questo fatto può essere spiegato in virtù della differente resistenza a compressione dinamica dei due materiali lapidei. Il Marmo di Carrara arrivando a rottura più velocemente del Coreno consente una maggiore riflessione dell'onda di-

retta sulla testata di carico dell'asta; questa diviene «superficie libera» in seguito alla rottura della roccia.

Si è così dimostrata l'affidabilità del dispositivo di misura pneumatico per una standardizzazione della caratterizzazione dinamica di campioni di roccia attraverso la quale si auspica, in ulteriori fasi di questa ricerca, l'acquisizione di dati relativi ad altri materiali e successivamente la loro correlazione statistica.

## Bibliografia

- [1] H. KOLSKY: «Stress waves in solids», N.Y. Dover Publications, Inc. 1963.
- [2] W. JOHNSON: «Impact strength of materials», J.W. Arrowsmith Ltd. Bristol, England 1972.
- [3] M. REDWOOD: «Mechanical waveguides», Pergamond Press, London 1960, pag. 300.
- [4] P.K. DUTTA: «The determination of stress waveforms produced percussive drill pistons of various geometrical designs», Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1968.
- [5] K.O. HAKAL EHTO: «The behaviour of rock under impulse loads - a study using the Hopkinson split bar method», Acta Polytechnica Scandinavica, C.I.M.S. n. 81, 1969 Helsinki.
- [6] Catalogo «Measurement Group» Raileigh NC, U.S.A..
- [7] Circolare TN-502, «Strain Gauge excitation levels», Measurement Group, Raileigh NC, U.S.A..
- [8] P. BERNARDI, P. REALI: «Misure e strumenti elettronici», Ed. Scientifiche Sidera, Roma.
- [9] F.P. BRANCA: «Nuovi risultati sul valore del fattore di taratura degli estensimetri elettrici in regime dinamico», pubblicazione C.N.R., 1968.
- [10] KOSCIRO OI: «Transient response of bonded strain gauges», Experimental Mechanics, Vol. 2, 1965.
- [11] C.C. PERRY, H.R. IISNER: «The strain gauge primer», Mc Graw Hill book company, N.Y., 1955. (Pag. 841).
- [12] Catalogo «ACCIAI DA COSTRUZIONE», Nuova SIAS acciai speciali, p.A. 20124 Milano.