

L'EFFETTO DELLE ONDE DI URTO  
SU MODELLI  
DI CHICCHI DI GRANDINE

DI ROGER F. FAVREAU

E GUY G. GOYER

L'EFFETTO DELLE ONDE DI URTO  
SU MODELLI  
DI CHICCHI DI GRANDINE

DI ROGER F. FAVREAU

E GUY G. GOYER



## PREMESSA

*Nel suo costante impegno a portare un contributo di progresso e di chiarificazione nei problemi della difesa delle colture agricole dai danni della grandine, l'Unione Nazionale Antigrandine ha deciso di pubblicare, nella versione italiana, l'importante lavoro dei ricercatori Roger F. Favreau e Guy G. Goyer membri, rispettivamente, del Collège Militaire Royal, Saint Jean, P.Q., Canada e del National Center for Atmosphere Research, Boulder Colorado. Quest'ultimo è il più importante organo di ricerca sulla fisica dell'atmosfera degli Stati Uniti, ed è emanazione della National Science Foundation.*

*Il lavoro di Favreau e Goyer presenta per l'Italia una particolare importanza perché trae la sua origine dai lavori sperimentali e teorici compiuti da un italiano, O. Vittori, proprio in sede di sperimentazione antigrandine sollecitata e coordinata dall'UNA e condotta grazie ad una collaborazione stabilita fra il Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste ed il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica. Successivamente, come già noto, la responsabilità delle ricerche è stata assunta dal Centro Nazionale di Fisica dell'Atmosfera e Meteorologia - CENFAM - del Consiglio Nazionale delle Ricerche, con la collaborazione dei suddetti Enti e dell'UNA.*

*È certamente motivo di profonda soddisfazione per noi constatare che le idee formulate per la prima volta in Italia, in un primo tempo accolte con molta circospezione nel mondo degli studiosi, abbiano avuto, col passare degli anni - come ogni germe valido e portatore di verità - quei riconoscimenti e quelle conferme che il presente lavoro testimonia. Il processo di ricerca innescato da Vittori ora continua in varie parti del mondo, con sviluppi assai interessanti, ai quali l'UNA non mancherà di dare la giusta diffusione.*

*Un particolare ringraziamento al Dr. E. Avarello che ha curato la traduzione del lavoro dell'originale apparso sul n. 2 del Journal of Applied Meteorology, aprile 1967.*

Il Presidente  
Avv. GINO SARTORI



# L'effetto delle onde di urto su modelli di chicchi di grandine

DI ROGER F. FAVREAU

(del Collège Militaire Royal, Saint Jean P. Q., Canada)

E GUY G. GOYER

(del National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado)

Ricerche eseguite presso le Canadian Industries Ltd, Masterville, Canada

(Manoscritto ricevuto il 17 ottobre 1963, riveduto il 17 ottobre 1966)

Traduzione dal *Journal of Applied Meteorology*

Aprile 1967 - Vol. 6 - Pagg. 326, 335

a cura di E. AVARELLO

## RIASSUNTO

È stato esaminato in laboratorio l'effetto delle onde d'urto prodotte da sostanze esplosive su cubi di ghiaccio.

Le prove d'impatto su cubi previamente esposti ad onde d'urto dimostrano che l'azione di queste indebolisce i cubi e che l'effetto è molto più accentuato allorquando detti cubi contengono una colonna d'acqua.

Il fenomeno osservato viene discusso in base alla teoria delle onde di shock; la diminuita resistenza all'urto dei cubi di ghiaccio sembra dovuta a fenomeni di cavitazione da onde d'urto producentisi all'interno di colonne d'acqua contenute nei cubi stessi.

Tenendo presente che i cubi di ghiaccio contenenti colonne d'acqua simulano grossolanamente i chicchi di grandine naturali, i risultati osservati suggeriscono la possibilità che le onde di shock, provocate dagli esplosivi, potrebbero indebolire i chicchi naturali in modo analogo. Perciò, le cariche esplosive contenute nei razzi antigrandine potrebbero concepirsi come costituire un mezzo pratico per ridurre i danni prodotti dalla grandine.

## I - INTRODUZIONE

L'effetto delle esplosioni sui chicchi di grandine è stato per lungo tempo un argomento controverso, per es., RONCALI (1960 *a, b*), LIST (1963) e VITTORI (1965).

L'uso delle cariche esplosive portate da razzi come pratico mezzo per ridurre l'azione distruttiva della grandine ha guadagnato popolarità in taluni paesi europei, fra cui l'Italia, la Svizzera, l'Austria e il Kenia,



come descritto in una pubblicazione edita dall'Ufficio Tecnico Antigrandine Italiano <sup>(1)</sup>, e come riferito da VITTORI (1960) <sup>(2)</sup> e H. W. SANSOM (1965). Secondo questi ultimi, l'azione dei razzi esplosivi all'interno di un temporale grandinigeno si risolve in un ammorbidimento dei chicchi di grandine che, perciò, si spappolano all'impatto col suolo. I chicchi « molli » che ne risultano divengono meno dannosi alle colture.

Gli agricoltori hanno osservato che fra il momento in cui i razzi vengono lanciati e quello in cui i chicchi di grandine raggiungenti il suolo si trasformano da « duri » a « molli » passa un certo tempo. VITTORI ha calcolato che questo intervallo di tempo è uguale al tempo occorrente ad un chicco di grandine in caduta libera, di media grandezza, per raggiungere il suolo, a partire dall'altezza in cui sono esplosi i razzi.

Di conseguenza, egli ne dedusse che l'azione dell'esplosione sulla grandine deve essere istantanea e propose che i fenomeni di cavitazione indotti nelle bollicine d'aria contenute nei chicchi di grandine sono responsabili dell'indebolimento della struttura di questi ultimi.

Scopo del presente lavoro è di riportare un esame di laboratorio, circa gli effetti delle onde d'urto su campioni di chicchi di grandine prefabbricati, eseguito presso il laboratorio Ricerche Esplosive del Canadian Industries Ltd.

## 2 - I CHICCHI PREFABBRICATI

La struttura interna di un chicco di grandine non è completamente conosciuta. Purtroppo, secondo recenti teorie (LIST, 1961 e 1963), questi consistono di un involucro di ghiaccio contenente sacche piene d'acqua.

Poiché la formazione dei chicchi ha luogo nell'aria, si può stabilire che l'acqua in essi contenuta è ben aerata.

Per imitare tali chicchi di grandine sono stati preparati cubi di

<sup>(1)</sup> *La difesa dalla grandine in Italia durante il 1965*, Rapporto dell'Ufficio Tecnico Antigrandine Italiano.

<sup>(2)</sup> O. VITTORI, *Rapporto preliminare sullo studio degli effetti delle esplosioni sui chicchi di grandine*, 1959, Ministero dell'Agricoltura e delle Foreste.

ghiaccio da cm  $1 \times 1 \times 1$  raffreddando acqua corrente in recipienti di plastica.

L'acqua usata è stata previamente esposta all'aria per diverse ore, in modo che potesse essere interamente aerata.

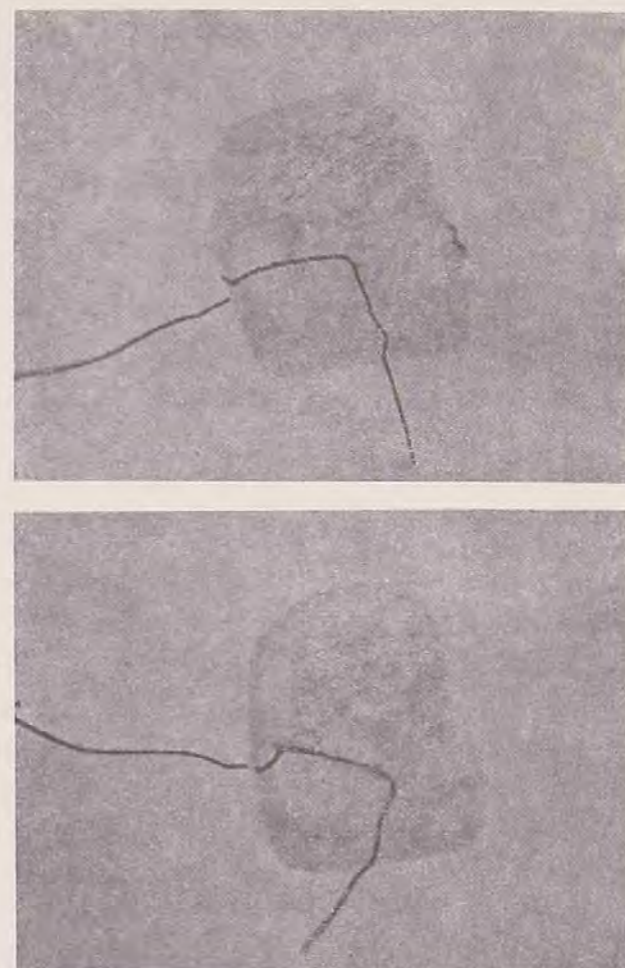


Fig. 1 - In alto, un cubo di ghiaccio prima della esposizione a shock; sotto, dopo l'esposizione allo shock.

Come mostra la Fig. 1, all'interno del cubo è stato immerso un sottile filo di rame. Facendo poi investire il cubo da un forte fascio di luce, attorno al filo si è formata una colonna d'acqua prodotta dal forte assorbimento di energia luminosa da parte del filo brunito, rispetto



al ghiaccio trasparente. La fusione del ghiaccio attorno al filo è stata osservata a mezzo di un microscopio ed è stata sospesa non appena la colonna di liquido attorno al filo raggiungeva un diametro di circa 1,5 mm.

Questo modello prefabbricato simulava i chicchi di grandine naturali solo in quanto tutti e due sono formati da cavità piene d'acqua avvolte da un involucro di ghiaccio; in ambedue i casi l'acqua era ben aerata<sup>(3)</sup>.

### 3 - ESPOSIZIONE ALLO SHOCK

I cubi di ghiaccio del genere sopra descritto furono sottoposti ad onde d'urto generate da esplosioni, di intensità variabile.

Nella massima parte delle esperienze è stata usata una carica di alto esplosivo di  $\frac{1}{3}$  di libbra, distante 3 piedi dal cubo, come mostrato in Fig. 2.

L'entità iniziale delle cariche sperimentate era di  $\frac{1}{3}$  di libbra; essa diminuiva fino ai limiti di potenza del solo detonatore (0,0014 libbra).

Gli esperimenti sono stati eseguiti entro un recipiente di acciaio costruito « ad hoc » per questo tipo di ricerche. Fu inoltre progettato un adatto contenitore per la sistemazione dei cubi di ghiaccio. Questo consisteva di un robusto telaio di legno, il cui fondo e le cui quattro pareti sono stati rivestiti di uno strato di gomma spugnosa spessa 2 pollici; il coperchio consisteva semplicemente di una griglia di rame per

<sup>(3)</sup> Più recenti lavori hanno mostrato che un corpo estraneo (così come il sottile filo di rame) facilita la cavitazione della massa d'acqua sottoposta a shock.

Questa osservazione, che sarà discussa nei dettagli in una prossima pubblicazione, solleva alcuni dubbi circa l'applicabilità sui chicchi naturali del valore di soglia della superpressione ottenuta in questo studio.

Tuttavia, la presenza di materiale insolubile riscontrata nei chicchi di grandine (N.d.T. - ROSINSKI JO, *Solid water - Insoluble particles in hailstones and their geofisical significance*, in *Journal of Applied Meteorology*, vol. 5, n. 4, 1966, pp. 481-492; ROSINSKI, Conferenze del 18 e 19 settembre 1967 sui temi: *Water insoluble particles in precipitation and Natural ice nuclei*) potrebbe egualmente favorire la cavitazione sotto pressioni relativamente basse delle onde di shock.

permettere il passaggio dell'onda d'urto. Questo telaio fu sistemato sul fondo del recipiente, con il cubo di ghiaccio poggiato sullo strato di gomma spugnosa e con la carica esplosiva sospesa verticalmente sulla griglia (vedi Fig. 2). Lo strato di gomma spugnosa preveniva i danni che il cubo avrebbe subito all'urto contro le pareti del recipiente, mentre la griglia evitava che il cubo fosse proiettato fuori dal suo alloggiamento. In questa maniera qualunque danno osservato si sarebbe dovuto attribuire al diretto effetto delle onde di shock.

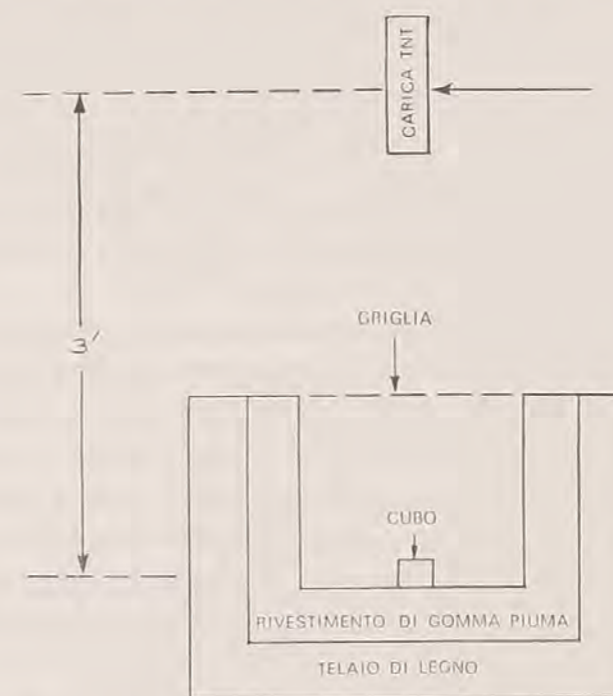


Fig. 2 - Sistemazione sperimentale per l'esposizione simulata dei cubi di ghiaccio a shocks da esplosivo.

La procedura adottata è la seguente. Da un frigorifero è stato prelevato un cubo di ghiaccio e sistemato in una campana di politene, refrigerata a  $-78^{\circ}\text{C}$ , ove veniva esposto ai raggi di luce; mediante un microscopio si poteva osservare la fusione che aveva luogo nell'intorno del filo di rame. Il cubo veniva quindi trasferito in una scatola portatile refrigerata ( $-78^{\circ}\text{C}$ ) e portato nella camera di scoppio. Dopo aver sistemato il cubo nel contenitore rivestito di gomma spugnosa, si



provocava la detonazione della carica di esplosivo. Il cubo, infine, veniva riportato nella campana di politene, refrigerata, per l'esame o per le prove sotto urto.

L'intera operazione durava complessivamente circa 5 minuti; due di questi erano impiegati per le operazioni nella camera a fuoco.

#### 4 - PROVE D'IMPATTO

Per poter determinare quantitativamente l'indebolimento subito dai cubi di ghiaccio a causa delle onde di shock, è stata eseguita una

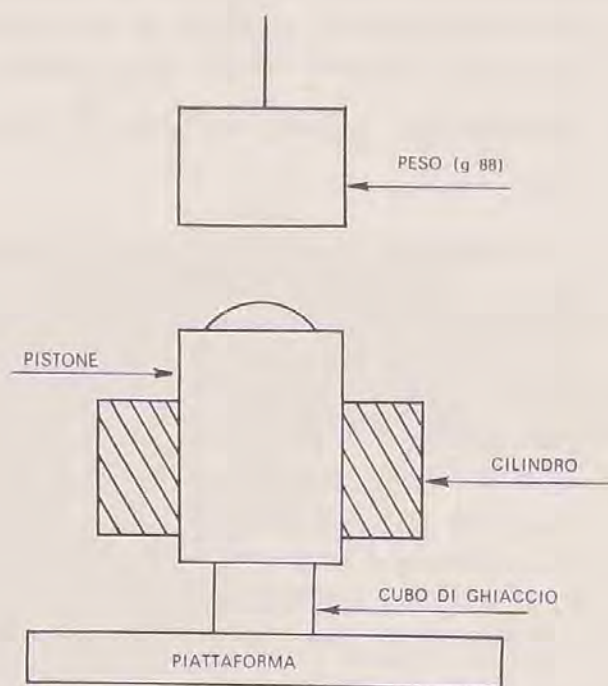


Fig. 3 - Apparato ad impatto per le prove di schiacciamento.

serie di prove d'impatto mediante un apparecchio speciale (Fig. 3) consistente in una piattaforma su cui veniva piazzato il cubo di ghiaccio; sopra il cubo vi era un cilindro ed un pistoncino, oltre che un peso di g 88, che poteva essere fatto cadere sul pistone da un'altezza stabilita.

Nella Fig. 3 si può osservare che il peso, il pistone ed il cubo

giacciono lungo la stessa linea verticale e che il cilindro guida il movimento del pistone lungo questa linea.

L'intero apparecchio venne sistemato in una campana refrigerata ( $-78^{\circ}\text{C}$ ). Prima dell'impatto, il fondo inferiore del pistone restava poggiato sulla faccia superiore del cubo. Il peso veniva quindi lasciato cadere da una altezza prestabilita e, successivamente, si provvedeva all'esame del cubo; questo poteva risultare frantumato oppure sano. Nel primo caso, l'altezza di caduta veniva diminuita per la prova da eseguirsi col successivo cubo, mentre nel secondo caso essa veniva aumentata; si applicava, in tal modo, il metodo Bruceton.

I risultati riferiti ad alcune serie di tali prove potevano essere adottati per determinare l'altezza di caduta in cui il 50% dei cubi venivano frantumati.

Usando una tecnica come quella descritta ed un gran numero di cubi di ghiaccio inizialmente identici, furono eseguite quattro serie di prove.

Ciascuna serie comprendeva circa 20 cubi. Per la prima serie furono usati cubi non trattati, contenenti, cioè, un filo di rame, ma non esposti ai raggi luminosi o ad onde d'urto. Nella seconda serie, furono usati cubi esposti ai raggi luminosi e contenenti una colonna d'acqua del diametro di 1,5 mm. Nella terza serie, si fece uso di cubi esposti sia alla luce sia ad onde d'urto da esplosivo. La quarta serie fu eseguita su cubi che erano stati esposti ad onde d'urto, ma senza che fossero stati trattati con la luce; non contenenti, perciò, alcuna colonna d'acqua.

TAV. 1 - Resistenza dei cubi di ghiaccio ai vari trattamenti.

Trattamento	Altezze per il 50% delle rotture (cm)	Deviazione standard (cm)	Energia cinetica (ergs)	Numero dei cubi sottoposti alle prove
Cubi non trattati (non esposti) .	20.2	$\pm 0.8$	1,740,000	50
Cubi esposti solo ad onde di shock . . . . .	19.9	$\pm 0.9$	1,510,000	20
Cubi esposti solo alla luce . .	18.4	$\pm 0.9$	1,410,000	16
Cubi esposti sia alla luce sia ad onde di shock . . . . .	12.7	$\pm 0.8$	1,100,000	20



In tutte e quattro le serie fu mantenuto un intervallo costante di tempo fra il momento in cui il cubo veniva tolto dal frigorifero e quello in cui esso veniva sistemato nell'apparecchio per l'esposizione agli shocks. In tal modo, come riportato nella Tav. 1, le altezze per il 50% delle rotture dei cubi di ghiaccio rappresentano separatamente l'effetto di indebolimento dovuto all'esposizione alla luce, alle onde d'urto e ad ambedue i trattamenti.

Dalla Tav. 1 si possono trarre le seguenti conclusioni:

a) L'esposizione alla sola luce riduce l'altezza di rottura, per il 50% dei cubi trattati, di 1.8 cm.

b) L'esposizione sia alla luce sia alle onde d'urto riduce l'altezza di 7.5 cm; perciò, il netto effetto delle onde di shock in un cubo, quando sia presente una colonna di acqua, è molto più grande di quello ottenibile su un cubo solido. Questo maggior effetto dovrebbe, a maggior ragione, verificarsi sui chicchi di grandine naturali dato che questi contengono diverse intrusioni d'acqua, mentre i cubi di ghiaccio usati nel presente lavoro contenevano solo il 2.6% di acqua (una colonna d'acqua di 1.5 mm di diametro, lunga circa 1.5 cm per cubi da cm  $1 \times 1 \times 1$ ).

##### 5 - SPIEGAZIONE POSSIBILE

I risultati sperimentali delle prove d'impatto indicano che il passaggio di un'onda di shock esercita un effetto trascurabile sui cubi di ghiaccio non trattati; purtuttavia, i cubi contenenti solo una colonna d'acqua ne vengono sostanzialmente indeboliti.

È stato fatto un tentativo per la ricerca di una logica spiegazione di questo fenomeno mediante un più attento esame dei cubi, prima e dopo l'esposizione all'urto. È stato dapprima notato che l'aspetto esterno dei cubi, contenessero oppure no una colonna d'acqua, non viene mai apprezzabilmente alterato dall'esplosione. Ciò è mostrato dalla fotografia della Fig. 1, in cui si vede lo stesso cubo prima e dopo l'esposizione all'onda d'urto. Ai cubi di ghiaccio, infatti, veniva provocato un danno esterno molto piccolo, persino quando essi erano posti quasi a contatto con una carica esplosiva. Un effetto di indebolimento

tangibile veniva reso evidente soltanto attraverso le prove d'impatto, in cui i cubi venivano sottoposti ad una grande quantità di energia addizionale; quantità di gran lunga superiore alla piccola quantità di

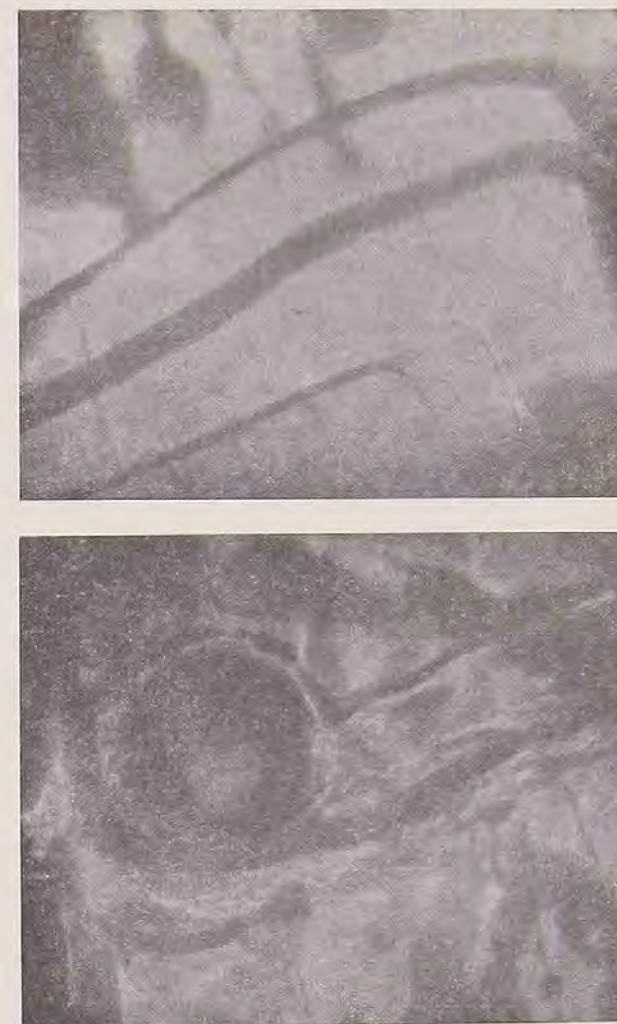


Fig. 4 - In alto, una microfotografia della colonna d'acqua prima dell'esposizione allo shock; in basso, dopo l'esposizione allo shock.

che il *passaggio dell'onda causi semplicemente un indebolimento della struttura interna dei cubi contenenti una colonna d'acqua*, predisponendoli a frantumarsi più agevolmente quando altra energia venga loro energia prima impartita dal passaggio dell'onda d'urto. Ciò fa pensare



susseguentemente impartita. Nel caso di chicchi naturali, questa energia addizionale viene data dall'impatto col suolo.

Per poter eseguire una verifica circa le idee espresse nell'ultimo paragrafo, è stata attentamente esaminata la struttura interna dei cubi, prima e dopo l'esposizione all'urto, con un microscopio a forte ingrandimento che potesse essere messo a fuoco su una piccola regione interna del cubo. I risultati tipici sono stati riprodotti nella Fig. 4, in cui sono mostrate le microfotografie di una regione prossima al centro del cubo, eseguite prima e dopo l'esposizione all'urto. La fotografia è ingrandita di 30 volte. Il sottile filo di rame si vede chiaramente; esso forma un angolo brusco insieme alla colonna d'acqua che lo circonda.

Da osservazioni simili a quelle fatte per la Fig. 4, si può affermare che la struttura interna del ghiaccio « appare » molto sollecitata dopo l'esposizione allo shock.

Tuttavia, da una più attenta osservazione, si nota all'interno della colonna di acqua, precedentemente chiara, la comparsa di bollicine di gas, chiaramente prodotte dall'esplosione. Nella Fig. 4, per esempio, si vede una grossa bolla di 1,2 mm di diametro formatasi all'interno dell'acqua. Tali bolle furono osservate su *tutte* le prove eseguite, a condizione che l'intensità dello shock superasse un certo limite di soglia. Come appresso si vedrà, la formazione di queste bollicine di gas è compatibile con l'ipotesi che nell'interno della colonna d'acqua abbiano luogo fenomeni di cavitazione da onde di shock. Per dimostrare l'asserto, occorre rivedere brevemente il fenomeno della cavitazione.

## 6 - LA CAVITAZIONE

Generalmente parlando, il fenomeno della cavitazione ha luogo quando le forze di tensione che si producono in un liquido determinano la formazione di cavità o di bolle. Se il mezzo liquido è costituito di acqua aerea, tali cavità normalmente contengono aria.

Allorquando la forza di tensione che ha prodotto le bolle d'aria viene a mancare, queste ultime si contraggono radialmente. Questa contrazione genera una perturbazione che si propaga nel liquido che avvolge tali bolle. Tuttavia, quando il sistema di sollecitazioni che dà

luogo alla formazione di bolle va ripetendosi, queste subiscono successive espansioni e contrazioni; le bolle, cioè, si mettono ad oscillare radialmente.

Il modo più comune per fare entrare in oscillazione le bolle di gas consiste nel trasmettere radiazioni ultrasonore nel liquido contenente le bolle. Il fenomeno che si verifica quando si fa ciò è stato studiato da BLAKE (1949), WILLARD (1953), CRAWFORD (1955), BRIGGS et al. (1947) ed altri. Questi ricercatori hanno osservato che se in un liquido viene applicato un campo ultrasonico per una certa durata, le bolle microscopiche (presumibilmente già presenti nel liquido; si pensa che tali bolle microscopiche esistano in qualsiasi acqua aerea) crescono fino a dimensioni visibili. Questa crescita può essere spiegata col fatto che il gas disciolto nel liquido si diffonde attraverso la superficie di separazione liquido-gas della bolla.

Durante il semi-ciclo positivo della vibrazione ultrasonora applicata, la soluzione liquido-gas diviene sotto-satura per cui il gas sfugge dalla bolla passando in soluzione nel liquido; il contrario avviene durante il semi-ciclo negativo.

Tuttavia, la superficie media che delimita le bolle è minore durante il semi-ciclo positivo rispetto a quella che si ottiene durante il semi-ciclo negativo. Per tale motivo le bolle si arricchiscono di una quantità netta di gas per ogni ciclo intero e, perciò, esse tendono a crescere<sup>(4)</sup>.

Per di più, come avviene nella massima parte dei sistemi oscillatori, la bolla oscillante può mettersi in risonanza con la frequenza del campo ultrasonico applicato.

SMITH (1935) dedusse che per un dato campo applicato di fre-

---

<sup>(4)</sup> (N.d.T.) In pratica, per ogni ciclo intero si ha:

a) una contrazione della bolla durante il semi-ciclo positivo per effetto della fuga di gas che va a saturare la soluzione liquido-gas (divenuta insatura sotto l'azione della prima semionda di shock);

b) una espansione della bolla durante il semiciclo negativo per effetto del trasferimento di gas dalla soluzione liquido-gas all'interno della bolla;

c) come risultato finale, si ha un aumento del volume della bolla a causa della maggiore quantità di gas immesso nella bolla durante la fase negativa rispetto a quella che ne sfugge durante la fase positiva.



quenza  $f_o$ , la risonanza ha luogo quando il raggio medio  $r_o$  delle bolle raggiunge il valore dato da

$$r_o = \frac{K}{f_o} \quad (1)$$

dove  $K$  dipende dal mezzo liquido, dal gas contenuto nella bolla e dalla pressione ambiente. Per esempio, se  $f_o$  è di 330 Kc/sec, sarà raggiunta la risonanza quando  $r_o$  raggiunge il valore di 0,01 mm; se  $f_o$  è di 33 Kc/sec, la risonanza avrà luogo quando  $r_o$  avrà raggiunto il valore di 0,1 mm, mentre se  $f_o$  è di 3,3 Kc/sec, si avrà la risonanza con  $r_o = 1$  mm. In pratica, vengono impiegate frequenze comprese fra 50 e 3000 Kc/sec.

Consideriamo ora una bolla di raggio medio iniziale  $r$ , oscillante sotto l'effetto di un campo di pressione variabile a frequenza  $f_o$ . Se  $r$  è minore di  $r_o$ , dove  $r$  corrisponde all' $f_o$  dell'equazione (1), la bolla crescerà finché  $r$  si approssima al valore di  $r_o$ . Mentre ciò avviene, l'ampiezza dell'oscillazione cresce rapidamente divenendo non sinusoidale. Questo processo continua finché  $r$  cresce oltre  $r_o$ , dopo di che l'ampiezza dell'oscillazione diviene nuovamente più piccola. Ordinariamente, a partire da questo momento,  $r$  diviene tanto grande che la galleggibilità della bolla è tale da spingerla verso l'alto.

CROWFORD (1955), BRIGGS et al. (1947), WILLIARD (1953) ed altri hanno osservato che grosse bolle risalgono alla superficie del liquido dopo che fosse stata provocata la cavitazione per via ultrasonica; osservazioni sperimentali hanno indicato che tali bolle sono il prodotto della coalescenza di diverse bolle ottenute per effetto di post-cavitazione. La Fig. 5 mostra il raggio approssimato, in funzione del tempo, di una bolla in oscillazione di dimensioni crescenti fino ai limiti della risonanza, sotto l'influenza di un campo di pressione applicato. Nella Fig. 5 il campo non è sinusoidale, ma consiste piuttosto di una serie di onde quadre. Come in appresso si vedrà, ciò non comporta alcuna differenza al processo secondo cui  $r$  cresce fino al valore di risonanza  $r_o$ .

Secondo WILLIARD (1953), perché una bolla d'aria microscopica sospesa in acqua cresca fino a limiti di risonanza è necessario un tempo di 0,3 msec.

Durante le oscillazioni che inducono la risonanza, le perturbazioni di pressione prodotte dalla contrazione, o collasso, delle bolle sono di altissima intensità. Trattasi, infatti, di onde di shock; per bolle dell'ordine di 0,01 cm di diametro, i calcoli eseguiti da SILVER (1942) hanno mostrato che la pressione generata dallo shock è all'ordine di 1000 atmosfere. Ciò rappresenta, ovviamente, una pressione di gran lunga più

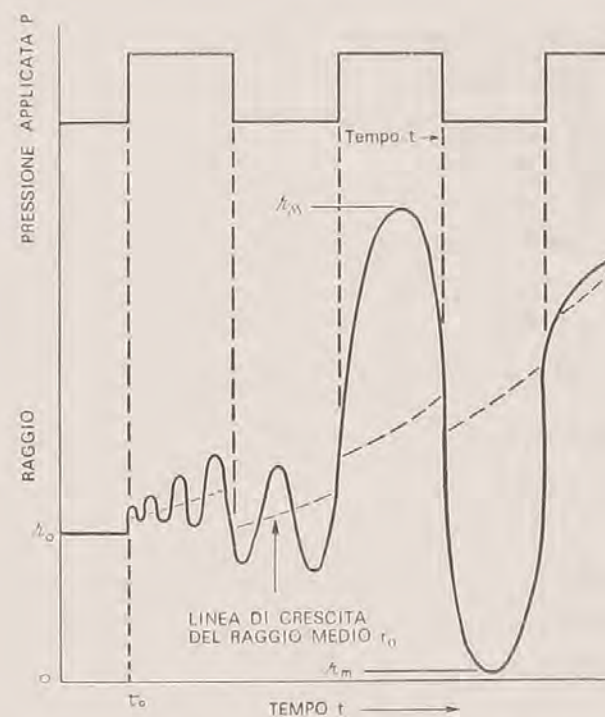


Fig. 5 - Crescita di una bolla oscillante per risonanza in un campo di pressione applicato.

elevata di quella che originariamente innesca la cavitazione. Gli urti che ne risultano, infatti, sono di tale elevata intensità che possono innescare ulteriori cavitazioni, il cui risultato può essere definito come una « reazione a catena ». Quest'ultimo fenomeno è stato osservato su vasta scala da WILLIARD (1953) e CRAWFORD (1955) in acqua aereata. I vari shocks secondari emessi, dopo che si sono formate numerose bolle in stato di collasso, sono, ovviamente, altamente dannosi per le pareti che contengono l'acqua. Nei limiti del presente lavoro, il termine



«cavitazione» sarà ordinariamente riferito al caso in cui le bolle soggette ad oscillazioni crescono fino a frequenze di risonanza dando luogo alla loro ulteriore espansione.

#### 7 - CONDIZIONI PER L'INNESCO DELLA CAVITAZIONE IN CUBI DI GHIACCIO

Come si è visto nell'ultimo paragrafo, i fenomeni di cavitazione innescati in un corpo liquido a mezzo di un campo di pressione danno luogo alla formazione di grosse bolle di gas che risalgono alla superficie del liquido. Se si può dimostrare che in un cubo di ghiaccio esposto alle onde di shock sussistono le condizioni necessarie perché abbia luogo la cavitazione, non è assurdo ammettere che le bolle di gas osservate dagli Autori nella colonna d'acqua contenuta nei cubi esposti a shocks siano anch'esse il risultato di fenomeni di cavitazione.

Le condizioni sono le seguenti:

- a) L'acqua che costituisce la colonna deve contenere aria disciolta.
- b) Dev'essere applicato un campo di pressione oscillante all'interno del cubo.
- c) Questo campo oscillante dev'essere applicato per un tempo sufficiente a provocare la cavitazione; secondo WILLARD (1953), è necessario un tempo di 0,3 msec.

Consideriamo innanzitutto la condizione a). I cubi di ghiaccio sono stati formati con acqua ben aereata; durante il ghiacciamento parte dell'aria precedentemente disciolta in quest'acqua si distacca per formare le bollicine disperse nel cubo (vedi Fig. 1). Purtuttavia, il ghiaccio trattiene una parte dell'aria in esso disciolta (per es., il 2% di aria in ghiaccio a 0°C); inoltre, quelle bollicine che originariamente si trovavano nell'ambito della colonna d'acqua si ridisciolgono nell'acqua di quest'ultima. Perciò la condizione a) è soddisfatta.

Consideriamo, in secondo luogo, la condizione b). Seppure con l'esplosione venga generata una sola onda di shock, sarà ora dimostrato che le riflessioni interne al cubo trasformano quest'onda in un campo

di oscillazioni. La Fig. 6 a mostra l'andamento esponenziale nello spazio di un'onda di shock generata da un esplosivo nell'istante in cui il ripido bordo frontale dell'onda si avvicina al cubo di ghiaccio. Sia  $D$  la «lunghezza» dell'impulso;  $D$  rappresenta, cioè, la distanza lungo la quale la pressione è maggiore di  $P_m/e$ , essendo  $P_m$  la pressione di picco ed  $e$  la base dei logaritmi naturali. La lunghezza  $D$  dipende dalle dimensioni della carica e dalla distanza fra la carica e il primo fronte dell'onda.

Per una carica di alto esplosivo nell'aria di 1/3 di libbra (150 g ca),  $D$  è rappresentata (scala di sinistra) in funzione della distanza dalla carica. Si può osservare che a tre piedi di distanza,  $D$  è lunga circa dieci centimetri, cioè 10 volte maggiore del lato del cubo di ghiaccio. Cosicché, in paragone al cubo, l'andamento dell'impulso di pressione appare come una discontinuità a forma di gradino.

Consideriamo ora ciò che avviene quando questa discontinuità a gradino raggiunge la faccia del cubo. Le Fig. 6 b, 6 c e 6 d mostrano l'andamento della pressione in vari istanti successivi. In 6 b il gradino di pressione si trova nelle immediate adiacenze della faccia del cubo. In 6 c esso è penetrato nel cubo e l'ampiezza del gradino di pressione trasmessa è il doppio di quella incidente. Questo effetto di raddoppiamento attraverso la discontinuità aria-solido è ben conosciuto; per es., esso è discusso nel Cap. 2 di COLE (1948). La Fig. 6 d si riferisce ad un breve tempo dopo che l'onda trasmessa è giunta sulla seconda faccia del cubo; l'onda d'urto riflessa nel ghiaccio da questa seconda faccia eguaglia in ampiezza l'urto trasmesso nel momento in cui incide sulla faccia riflettente; in questo caso, però, si tratta di un'onda di tensione. La pressione che risulta a destra dell'onda riflessa è perciò nulla. Quando l'onda riflessa nel cubo raggiunge la prima faccia viene nuovamente riflessa, ma come onda di compressione; questa inversione dell'onda riflessa dalla superficie di discontinuità solido-aria viene pure discussa da COLE.

Perciò ne risulta che onde di compressione e di decompressione percorrono alternativamente il cubo di ghiaccio. In un dato punto posto all'interno di questo l'andamento della pressione in funzione del tempo è simile a quello della parte superiore della Fig. 5. L'effetto delle due



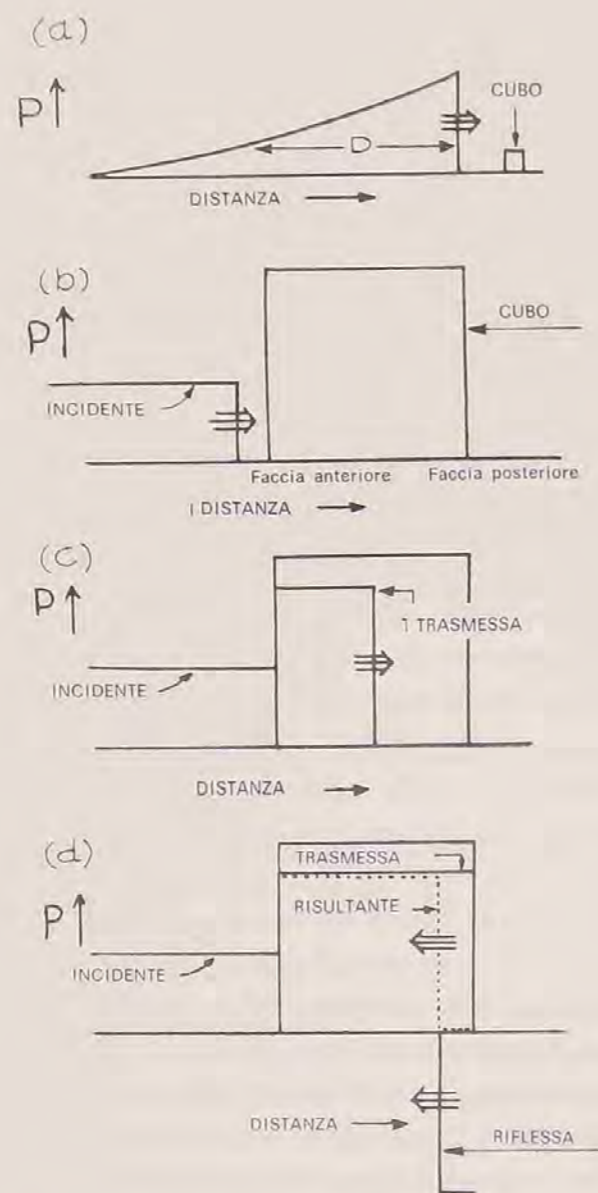


Fig. 6 - Comportamento della pressione nei vari istanti:

- (a) (b) - gradino della pressione nelle immediate adiacenze della faccia del cubo;
- (c) - subito dopo l'incontro con la faccia frontale;
- (d) - subito dopo la riflessione dalla faccia posteriore.

facce del cubo è perciò quello di suddividere in una serie di impulsi di pressione quadrati l'onda d'urto di lunga durata. Nel cubo si stabilisce in tal modo un campo di pressione oscillante. Viene così verificata la condizione *b*).

La durata di ciascun impulso può essere ottenuta dividendo le dimensioni del cubo (1 cm) per la velocità del suono nel ghiaccio ( $380.000 \text{ cm/sec}^{-1}$ ). Essa risulta di 2,6 microsecondi. Ciò corrisponde ad una frequenza di ripetizione di 190 Kc/sec, cioè una frequenza dello stesso ordine di grandezza del campo ultrasonico usato da WILLARD ed altri per lo studio della cavitazione nell'acqua.

L'analisi dianzi accennata è solo approssimativa. Poiché, come mostrato nella Fig. 6 a, la pressione susseguente al fronte d'urto cade lentamente, l'ampiezza dell'impulso della parte superiore della Fig. 5, in effetti, decresce lentamente. Inoltre, è stata trascurata la presenza delle superfici di discontinuità ghiaccio-acqua sussistenti fra le inclusioni di acqua e l'involucro di ghiaccio. Ciò è giustificato dal fatto che il ghiaccio e l'acqua hanno una impedenza acustica comparabile.

Prendendo in considerazione la diminuzione di pressione che si verifica a seguito del fronte d'urto e le discontinuità interne ghiaccio-acqua, la conclusione alla quale siamo arrivati non si modifica apprezzabilmente: fondamentalmente, si determina un campo di pressione oscillante; tutto ciò, d'altra parte, renderebbe più complicati i dettagli dell'analisi.

Una ulteriore discrepanza che non riguarda gli esperimenti con i cubi di ghiaccio, ma che riguarderebbe i chicchi di grandine, è il frutto che questi sono più sferici che cubici.

Nel caso di un'onda d'urto attraverso una sfera di ghiaccio, il campo della pressione oscillante che si determina non è così facilmente visualizzabile come nel caso di un cubo. Tuttavia, non c'è dubbio che in tutti i casi esistono modi normali di riflessione e che in un dato punto del chicco di grandine la pressione oscillerebbe in funzione del tempo in modo simile a quello indicato nella parte superiore della Fig. 5. Bisogna, inoltre, notare che il campo applicato nella parte superiore della Fig. 5 consiste di una serie di onde di pressione quadrate, mentre gli studi sulla cavitazione indotta da ultrasuoni sono stati condotti



usando onde sinusoidali. Tuttavia, calcoli eseguiti dagli autori sul comportamento di un semplice oscillatore armonico (a bolla gassosa) sotto l'azione di onde quadre hanno dimostrato che questo ultimo produce oscillazioni di ampiezza doppia rispetto a quella di un'onda sinusoidale di pari intensità. In conseguenza, un treno di onde quadre dovrebbe avere una efficacia doppia di quella delle onde sinusoidali per innescare la cavitazione.

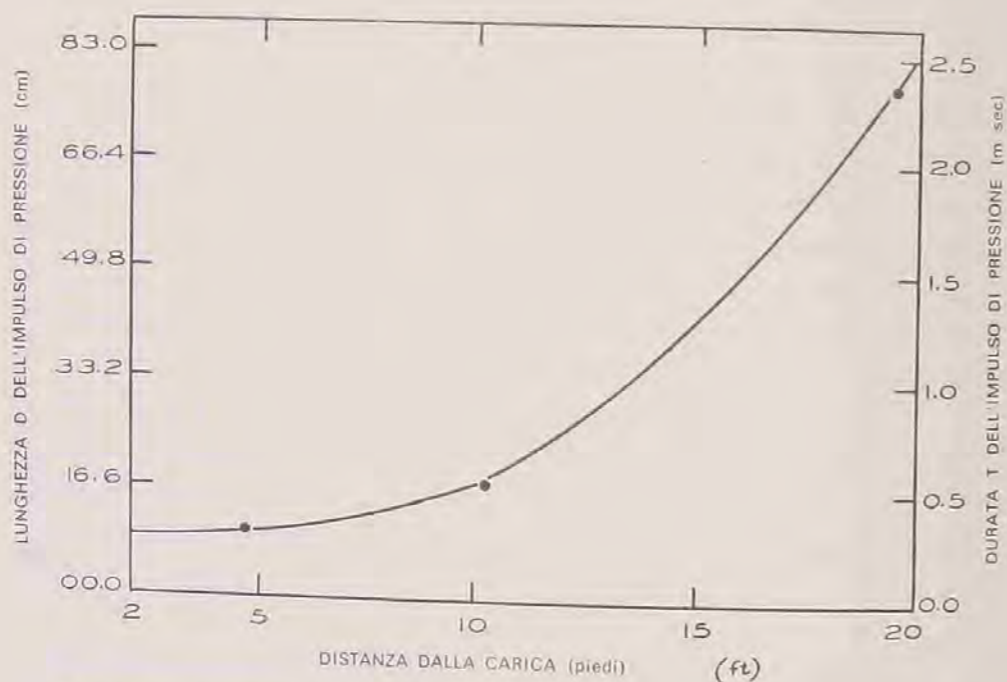


Fig. 7 - Lunghezza  $D$  e durata  $T$  dell'impulso di pressione ottenuti da  $1/3$  di libbra di alto esplosivo come funzione della distanza dalla carica.

In Fig. 7 la lunghezza dell'impulso  $D$  può essere convertita nella durata  $T$  dividendolo per la velocità del suono nell'aria.

La scala a destra della Fig. 7 mostra questa conversione. Si può così vedere che a tre piedi di distanza da una carica di  $1/3$  di lb di alto esplosivo la durata dell'impulso di pressione è circa 0,3 milli-secondi. Questa è dello stesso ordine di grandezza del tempo che WILLARD ha trovato necessario per la provocazione della cavitazione. In questo modo è stato applicato al cubo di ghiaccio un campo di pressione oscillante

per una durata sufficiente a causare la cavitazione e la condizione  $c$ ), più sopra stabilita, è perciò verificata.

Poiché è stato dimostrato che si verificano le condizioni  $a$ ),  $b$ ) e  $c$ ) quando un'onda d'urto passa attraverso un cubo di ghiaccio contenente una inclusione di acqua, gli autori suggeriscono la possibilità che le bolle osservate durante gli esperimenti risultino dalla cavitazione indotta dalle onde d'urto nella colonna d'acqua avvolgente il filo; ossia, le bolle simili a quelle di Fig. 4  $b$  corrispondono a quelle che salivano alla superficie nel lavoro di CROWFORD, BRIGGS ed altri ed in quello di WILLARD sulla cavitazione indotta da ultrasuoni.

#### 8 - VALORE DI SOGLIA PER LA PRODUZIONE DELLE BOLLE

Tutti i risultati finora presentati sono stati ottenuti per cubi di ghiaccio esposti ad onde d'urto prodotte dalla detonazione di  $1/3$  di libbra di alto esplosivo, alla distanza di tre piedi.

È noto che la pressione di picco dell'onda d'urto varia col peso della carica. La pressione di picco misurata sperimentalmente a 3 piedi di distanza dall'estremità di un cilindro da  $1/3$  di libbra di alto esplosivo è risultata di 25 libbre/pollice quadrato. D'altra parte, gli studi con energie ultrasoniche hanno dimostrato che esiste un'intensità minima del campo di pressione al di sotto della quale non può essere innescata la cavitazione. CROWFORD (1955) ha determinato questa soglia in circa  $1/4$  di atmosfera, cioè 3.7 libbre/pollice<sup>2</sup>.

Se bolle come quelle di Fig. 4  $b$  vanno associate alla cavitazione, allora è anche da aspettarsi che la loro produzione avvenga solo per urti di intensità superiore al valore di soglia. Per investigare ciò sono stati eseguiti esperimenti: cubi di ghiaccio contenenti una colonna d'acqua sono stati esposti, a distanza costante di 3 piedi, ad urti di cariche progressivamente decrescenti di  $1/3$  di libbra fino a 0,0014 libbre di esplosivo. Ogni cubo è stato esaminato (prima e dopo l'esplosione) al microscopio ed è stato misurato il volume totale delle bolle prodotte. In alcuni casi fu notata una sola bolla, mentre in altri ne apparivano due o più. A questa differenza non è stato dato un particolare significato, poiché si è pensato che tutte le bolle osservate fos-



sero il risultato della coalescenza di un gran numero di piccole bolle di cavitazione. Perciò, in tutti i casi, è stato considerato come quantità significativa il volume totale delle bolle.

Nella Fig. 8 è riportato il grafico logaritmico del volume delle bolle in funzione del peso di esplosivo in grani; ad una libbra corrispondono 7000 grani. La maggior parte dei punti sono la media di parecchie prove. Si vede che il volume delle bolle prodotte diminuisce

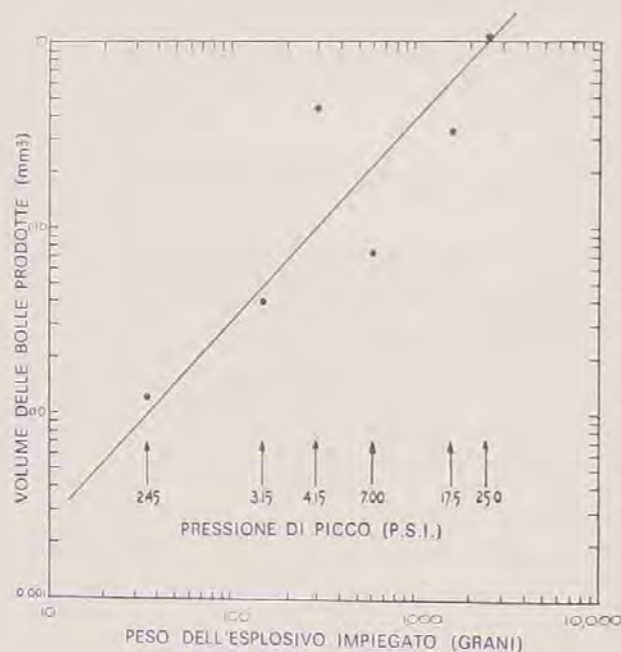


Fig. 8 - Volume delle bolle ottenute per cavitazione in funzione del peso dell'esplosivo. La pressione di picco del cubo di ghiaccio viene indicata per ciascun peso dell'esplosivo usato.

col diminuire del peso della carica. Non si hanno spiegazioni plausibili per il primo volume ottenuto intorno a 300 grani; cosicché è stata tracciata liberamente una retta.

I risultati di Fig. 8 sono in accordo con quelli di WILLARD (1953); quest'ultimo osservò che il numero di bolle risultanti dalla cavitazione in un liquido esposto ad energia ultrasonica aumentava con l'aumentare dell'intensità nel campo.

L'evidenza sperimentale di Fig. 8, che presenta un risultato simile,

rafforza l'ipotesi che nei chicchi di grandine simulata esposta alle detonazioni ha avuto luogo la cavitazione indotta da onde d'urto.

L'esistenza di una soglia di pressione per la produzione delle bolle risulta evidente dai dati riportati in Fig. 8. La pressione di picco corrispondente a ciascun peso di esplosivo usato è indicata sull'asse dell'ascisse.

Con 10 grani di esplosivo (1,97 libbre/pollice<sup>2</sup> di pressione di picco, alla distanza di 3 m dalla carica) non sono state osservate bolle in 2 prove. Con 35 grani (2,45 p.s.i. di pressione di picco) sono state osservate bolle in ciascuna delle 2 prove.

Un valore approssimato di soglia può essere stimato estrapolando i dati di Fig. 8 fino al volume di bolle aventi il valore zero su un diagramma lineare del volume in funzione della pressione d'urto; i risultati danno 2,2 libbre/inc<sup>2</sup> incidenti sul cubo, ossia 4,4 p.s.i. nel suo interno, che è piuttosto in buon accordo con la stima di CRAWFORD di una soglia di cavitazione indotta da ultrasuoni in acqua aerea di 3,7 libbre/pollice<sup>2</sup>. Cosicché, è ancora più accettabile il fatto che le bolle siano della stessa natura di quelle osservate da CRAWFORD ed altri.

## 9 - EFFETTI DELLA DISTANZA

I risultati presentati nella Tav. 1 indicano che sostanzialmente le onde d'urto esplosive indeboliscono i cubi di ghiaccio contenenti una colonna d'acqua.

La discussione dei paragrafi 5-6-7-8 permette di stabilire che le onde d'urto innescano la cavitazione entro la colonna d'acqua. Se è corretto supporre che esiste una relazione causa-effetto fra il verificarsi della cavitazione e l'indebolimento della struttura del ghiaccio, potrebbe allora essere stimata la distanza efficace per una data carica esplosiva.

La soglia per la produzione di bolle, come sopradetto, è stata determinata in circa 4 p.s.i. nell'interno del cubo, ossia 2 p.s.i. sulla faccia del cubo.

La Fig. 9 indica la pressione di picco prodotta a varie distanze dalla detonazione di 1 Kg di TNT in aria; questa carica corrisponde a quella portata dai razzi in Europa. Una pressione di picco di 2 p.s.i. si verifica a circa 30 piedi dall'esplosione. Questo campo di azione,



calcolato sulle basi della soglia per la produzione delle bolle nei cubi di ghiaccio, è molto minore della distanza di 1400 piedi stabilita per ogni razzo dagli italiani nelle loro operazioni di campagna (Ufficio Tecnico Antigrandine italiano, 1956).

La discrepanza potrebbe essere dovuta ad una o a parecchie delle ragioni seguenti:

a) La cavitazione potrebbe spiegare solo una parte dell'effetto di indebolimento misurato nei presenti studi (vedi Tav. 1).

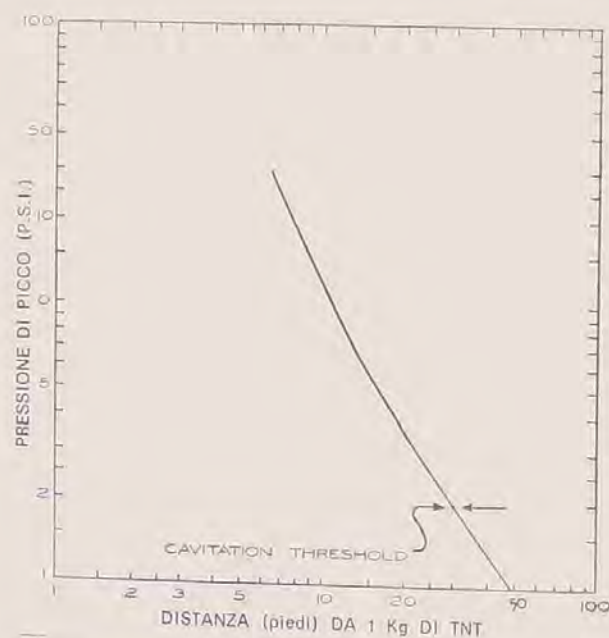


Fig. 9 - La pressione di picco in funzione della distanza ottenuta in aria da 1 kg di TNT.

b) La soglia per la generazione di bolle visibili è associata a cavitazione « catastrofica », il che avviene quando minute bolle oscillanti si ingrossano fino alla frequenza di risonanza e innescano un ulteriore accrescimento di bolle. È possibile che perfino i primi stadi della cavitazione, laddove le bolle oscillanti non siano ingrossate sufficientemente perché avvenga la coalescenza sotto forma di bolle visibili, intensifichino sufficientemente l'intensità dell'urto incidente affinché con 1 Kg di

carica il chicco solido di grandine venga cambiato in « molle » fino ad una distanza di 1400 piedi.

c) Il presente lavoro tratta di cubi di ghiaccio contenenti una sola colonna d'acqua. I chicchi di grandine naturale sono sferici e contengono molte inclusioni d'acqua. È possibile che la forma sferica dei chicchi, oppure le intrusioni di acqua in esse contenute agiscano in modo da focalizzare l'onda d'urto incidente; cosicché l'intensità di pressione in alcuni punti interni del chicco potrebbe essere sostanzialmente maggiore di quella dell'urto incidente.

Sembra che una maniera più diretta di determinazione della distanza alla quale si ha l'effetto di indebolimento riportato in Tav. 1 sia quella di misurare questo effetto nel cubo descritto nel paragrafo 4, per decrescenti livelli di intensità di onde d'urto.

#### 10 - RIGELO

Una continua fonte di ostacoli durante questo lavoro era dovuta agli effetti attribuibili al ricongelamento della colonna di acqua nell'interno del cubo di ghiaccio. Poiché la temperatura nel deposito frigorifero e nel sostegno del cubo era al di sotto di zero, il rigelo cominciava dopo la rimozione del raggio di luce usato per formare la colonna. Per es., i diametri della colonna visibile nelle fotografie di Fig. 4 avevano un diametro di 1,5 mm prima dell'esposizione all'urto e di 1,1 mm dopo; il che indica che il 50% dell'acqua si era ricongelata. Tuttavia ciò è stato un fatto eccezionale, poiché il cubo di Fig. 4 è stato portato avanti e indietro per mezzo miglio dalla camera di scoppio, fino allo speciale microscopio equipaggiato con camera fotografica. In prove regolari, eseguite con un microscopio ordinario posto nello stesso edificio della camera di scoppio, il rigelo è stato solo del 5-10%. Ciò nondimeno si può arguire che perfino questa piccola quantità di acqua ricongelata potrebbe essere responsabile, almeno in parte, dell'effetto di indebolimento osservato nei cubi.

Tuttavia, le seguenti osservazioni fanno pensare che la frazione



dell'indebolimento da attribuirsi al rigelo sia minore rispetto a quella da attribuirsi all'urto:

I) i risultati di Tav. 1 mostrano che l'effetto d'indebolimento netto dell'urto su cubi contenenti una colonna d'acqua ( $18,4 - 12,7 = 5,7$  cm) è il triplo dell'effetto netto dell'indebolimento dovuto all'esposizione alla luce ( $20,2 - 18,4 = 1,8$  cm). A questi 1,8 cm deve anche aggiungersi l'indebolimento dovuto al rigelo, dato che quest'ultimo effetto è evidentemente minore di quello dell'urto.

II) Il filo attorno al quale è stata fusa la colonna di acqua si estendeva fino all'esterno del cubo; cosicché la colonna d'acqua era aperta alle sue estremità, il che permetteva un « abbandono della pressione al momento del rigelo ».

Un'altra considerazione induce ancora a precisare che il rigelo giocava un ruolo minore. Si tratta del fatto che la produzione delle bolle nell'interno della colonna d'acqua sembrava essere intimamente connessa all'effetto di indebolimento osservato in quanto i due fenomeni sono stati osservati contemporaneamente.

Ora i risultati di Fig. 8 mostrano che, nelle prove eseguite con rigelo costante, il volume delle bolle prodotte varia fortemente con l'intensità dell'urto; cosicché l'intensità dell'urto ha più consistenza che non il rigelo.

Per queste ragioni gli Autori giudicano che i fenomeni investigati nel presente lavoro sono attribuibili al passaggio dell'onda d'urto piuttosto che al rigelo.

L'uso di cariche esplosive portate da razzi nella lotta contro la grandine è già un uso comune in Italia, Austria, Francia e Kenia.

Gli osservatori dei campi agricoli dicono che poco dopo che i razzi hanno cominciato ad essere lanciati la grandine cadente sembra diventare « molle » o « sfatta », in modo tale che i chicchi si frantumano più facilmente in seguito all'impatto sul suolo.

Se le osservazioni di campagna sono esatte e se è ragionevole ammettere che le esplosioni hanno condotto effettivamente gli effetti osservati, allora i risultati del presente lavoro mostrano che l'indeboli-

mento della struttura del ghiaccio per onde d'urto generate da esplosioni può essere riprodotto in laboratorio.

Gli Autori hanno trovato che la resistenza di chicchi simulati, misurata con semplici prove di rottura, era sostanzialmente diminuita dopo l'esposizione all'onda d'urto. In queste prove l'energia cinetica della massa d'impatto corrisponde a quella della grandine durante la sua caduta. I risultati delle prove di rottura dimostrano che si ha un indebolimento; tuttavia esse, da sole, non spiegano il meccanismo per il quale ha luogo questo indebolimento.

Le seguenti osservazioni, se considerate nel loro insieme, suggeriscono che almeno una parte dell'effetto d'indebolimento potrebbe essere prodotto dalla cavitazione:

a) l'indebolimento si ha soltanto quando un cubo di ghiaccio contiene una colonna d'acqua;

b) il passaggio dell'urto determina nel cubo di ghiaccio un campo oscillante; la frequenza di queste oscillazioni è compresa nel campo sconosciuto di frequenze che danno luogo alla cavitazione;

c) il campo oscillante dura 0,3 m/sec, riconosciuti necessari per causare la cavitazione;

d) il passaggio dell'onda d'urto produce bolle di gas nella colonna d'acqua. Tali bolle si osservano quando avviene la cavitazione;

e) la soglia di produzione delle bolle è circa 4,4 p.s.i., ossia essa è dello stesso ordine di grandezza della soglia di 3,7 p.s.i. necessaria per la cavitazione indotta da ultrasuoni;

f) il volume delle bolle prodotte aumenta con l'intensità dell'onda d'urto; un risultato simile è osservato nella cavitazione indotta da ultrasuoni.

In definitiva, allorché un cubo di ghiaccio contenente una colonna d'acqua simula anche molto grossolanamente un chicco di grandine, il rammollimento della grandine dovuto alle esplosioni potrebbe, almeno parzialmente, essere spiegato come effetto di cavitazione negli strati d'acqua contenuti nel chicco. Queste cavitazioni sono presumibilmente innescate dal campo di pressione oscillante provocato nell'interno



del chicco dal passaggio dell'urto esplosivo. Una volta innescata, la cavitazione genera entro il chicco urti secondari di intensità maggiore di quelle dell'urto incidente originario; tali urti secondari avrebbero un forte effetto di indebolimento della struttura interna del chicco. In seguito all'impatto col suolo, tale chicco si frantumerebbe più facilmente di quelli che non sono stati esposti all'urto. La presenza del filo, se fa sorgere alcuni dubbi sull'intensità della sovrappressione di soglia agente nella grandine naturale, non altera però la conclusione che allorquando si innesca la cavitazione in un volume di acqua contenuta nel ghiaccio si produce un indebolimento misurabile della struttura del ghiaccio stesso.

#### RICONOSCIMENTI

Molte persone associate alle Canadian Industries Limited hanno prestato la loro esperienza nel lavoro qui presentato.

I relatori desiderano ringraziare in modo particolare Mr. J. Blanchette e M.C. Ascher per i numerosi lavori sperimentali e Mr. G. Warren per le micro-fotografie.



