

DISTRIBUZIONE DELLE SOLLECITAZIONI SU RECIPIENTI A PRESSIONE IN FILAMENT WINDING DURANTE LA PROVA IDRAULICA

C. Caneva - C. Santulli - F. Stivali

Dip. Ing. Chimica e dei Materiali - Univ. di Roma *La Sapienza*

SOMMARIO

Il comportamento di un recipiente a pressione in materiale composito è ancora poco conosciuto. In particolare sono poco noti i fenomeni di innesco e di evoluzione del danneggiamento che si produce sotto carico. Una importante occasione di verifica è costituita dalla prova idraulica prevista dalla normativa di collaudo che precede l'esercizio. Con la pressurizzazione infatti il recipiente viene sollecitato per la prima volta ai carichi massimi previsti ed è quindi in questa occasione che nel materiale composito vengono sviluppati fenomeni di assestamento e ripartizione dei carichi, con possibili microcedimenti strutturati interessanti la matrice, le fibre, o l'interfaccia.

In questo lavoro vengono presentati i risultati delle indagini effettuate su recipienti a pressione realizzati secondo la tecnologia del *filament winding*, avvalendosi di misure di estensimetria e di Emissione Acustica, registrate durante la prova.

In base ai risultati ottenuti si è osservato che l'attività acustica rilevata è in ottima correlazione con i fenomeni di danneggiamento che si vanno producendo. Dallo studio dei parametri più significativi della Emissione Acustica, in correlazione con i dati estensimetrici è anche possibile riconoscere il tipo ed il livello di danneggiamento.

INTRODUZIONE

La produzione di manufatti in materiale composito FRP mediante la tecnologia del *filament winding* si è andata affermando nel corso degli ultimi tre decenni grazie alle notevoli opportunità che questa tecnologia è in grado di offrire.

Il processo di formatura del composito è relativamente semplice ed avviene mediante l'avvolgimento di fibre continue, impregnate di resina ed opportunamente tenute in tensione, attorno ad un mandrino posto in rotazione.

Alla fine del processo di formatura, il mandrino può essere rimosso ovvero lasciato in situ come parte integrante del componente prodotto.

In pratica la tecnologia del *filament winding*, mediante la sovrapposizione di vari strati di fibre con diversa angolazione, consente di realizzare, con un'unica operazione, strutture relativamente complesse [1].

Inoltre ha il pregio che il composito si ottiene partendo direttamente dalle materie prime costituenti il materiale (fibre e matrice) senza dover ricorrere a lavorazioni intermedie per la preparazione di semilavorati.

A fronte di questi vantaggi la tecnologia del *Filament Winding* comporta alcune difficoltà operative non facilmente risolvibili. Mentre infatti le limitazioni imposte alla simmetria rotazionale dei manufatti sono state superate con l'introduzione di macchine a più assi, il controllo dei parametri critici di processo (quali ad esempio la velocità e l'angolo di avvolgimento, la tensione del filo, la cinetica di polimerizzazione della resina), non è stato ancora ben definito e costituisce oggetto di ricerca. Si stanno infatti sperimentando diverse soluzioni, utilizzando sistemi automatizzati governati da computer.

In generale, nel corso del processo produttivo dei materiali compositi, nel momento in cui si va generando la microstruttura e si conferisce al componente la forma desiderata, può accadere che l'insieme fibra-matrice venga sottoposto a sollecitazioni di tipo meccanico. (vedi fig.1).

In particolare, nel caso del *filament winding*, la tensione delle fibre sul mandrino spinge la resina, già depositata, a fluire nelle tre direzioni dello spazio, dando così luogo ad un flusso viscoso che è funzione di diversi fattori e che varia al variare dello strato di avvolgimento considerato.

Inoltre nel corso della formatura le fibre subiscono delle microdeformazioni ed accumulano energia elastica; quindi il sistema fibra-matrice assume un comportamento complessivo di tipo viscoelastico in cui, al pari del materiale composito finito, la risposta viscosa è dominata dalla matrice polimerica, mentre la risposta elastica è dominata dalle fibre.

In definitiva, si può affermare che il materiale conserva una sorta di "codice genetico", derivante dall'insieme di eventi verificatisi durante il processo di fabbricazione, il quale può essere letto ed interpretato mediante opportune metodiche di indagine.

In tale contesto rivestono particolare importanza metodi di indagine quali l'Emissione Acustica e l'estensimetria che consentono di avere contemporaneamente sia valutazioni sulla coerenza funzionale del materiale a quanto imposto in sede progettuale, sia informazioni sugli eventi che avvengono nel materiale sottoposto a sollecitazioni meccaniche (vedi fig.2) [2 ,3].

Tali informazioni permettono di meglio interpretare i fenomeni danneggiamento e di cedimento strutturale del materiale composito e di correlarli ai contributi degli eventi locali che hanno avuto luogo nel corso del processo di formazione.[4].

Pertanto, nonostante i recenti sviluppi avuti, anche per questa tecnologia sono molte le problematiche ancora aperte. In particolare la scarsa accuratezza del controllo dei parametri di processo suesposti porta oltre a scostamenti di qualità dei prodotti anche alla difficoltà di tradurre sul manufatto le caratteristiche strutturali di progetto. In tal modo le prestazioni ottenibili sono largamente al di sotto delle possibilità offerte dalla tecnologia.

Va rilevato del resto che il livello di accuratezza del controllo dei parametri di processo deve essere definito sulla base della qualità e delle prestazioni meccanico-strutturali desiderate. La valutazione di tale livello di accuratezza deve provenire da specifiche prove di controllo sui manufatti.

Per quanto riguarda la valutazione della qualità, è stato dimostrato che la prova di pressurizzazione idraulica, prevista dalle norme di collaudo per i recipienti in pressione, opportunamente strumentata con l'Emissione Acustica, è perfettamente adatta. [5].

Non è invece stata ancora definita una metodologia di valutazione del comportamento meccanico-strutturale del manufatto la quale consenta di ottenere le necessarie informazioni sulla dinamica di reazione alle sollecitazioni imposte. Informazioni che vanno poi correlate con le specifiche di progetto.

A tal fine viene presentata una metodologia di prova basata sulla misura estensimetrica delle deformazioni e sulla rilevazione dell'Emissione Acustica svolta, durante il caricamento a pressione del manufatto. Anche in questo caso si è ritenuto opportuno utilizzare il caricamento idraulico.

PROCEDURA SPERIMENTALE

MATERIALI

Il recipiente in pressione preso in esame era prodotto con la tecnologia del *filament winding* avvolgendo fibre di Kevlar 49, impregnate di resina epossidica, attorno ad un mandrino chiuso di PVC, opportunamente pressurizzato in modo da acquisire la necessaria rigidità.

Il mandrino non veniva rimosso al termine della fase di formatura e pertanto andava a costituire il *liner* interno del recipiente.

La bombola così ottenuta presentava due inserti metallici in lega leggera per il montaggio del valvolame, aveva un volume utile di 3 litri ed un peso a vuoto intorno ai 400 g

Il materiale composito risultava costituito da un laminato asimmetrico e sbilanciato realizzato mediante un avvolgimento elicoidale a $+25^\circ$ e -25° , ed uno circonferenziale a 90° .

METODOLOGIA DI PROVA

Sono state condotte due serie di prove.

La prima prevedeva il caricamento delle bombole fino alla pressione massima di progetto, pari a 40 bar. In tal modo si poteva effettuare la misura dello stato di distribuzione delle sollecitazioni sulle diverse parti della bombola nelle condizioni normali di lavoro.

La seconda prevedeva invece il caricamento fino al collasso per consentire una caratterizzazione completa della dinamica di danneggiamento delle diverse parti del composito costituente la bombola, dalle fasi di innesco a quella di cedimento strutturale.

In entrambi i casi le prove sono state condotte pressurizzando acqua nella bombola secondo un diagramma a gradini. Ciascun gradino era di altezza pari a 10 bar, con fermate a carico costante di 5 minuti ognuna tra un gradino e l'altro.

Il monitoraggio del carico è stato effettuato con un manometro piezoelettrico il cui segnale veniva acquisito insieme ai parametri dell'Emissione Acustica.

EMISSIONE ACUSTICA

Il monitoraggio delle prove è stato effettuato con una strumentazione multicanale tipo LOCAN AT della PAC. Sono stati utilizzati 4 canali di rilevazione indipendenti. I trasduttori piezoelettrici erano di tipo PZT risonanti a 140 kHz. Tale frequenza è tra le più adatte per raccogliere i segnali emessi dai fenomeni di danneggiamento che si verificano sotto carico in un materiale composito come quello studiato.

Dei quattro canali utilizzati, due sono stati posti di guardia per filtrare gli eventuali disturbi provenienti dal sistema di caricamento. Le due sonde sono state pertanto collocate alle estremità della bombola, in corrispondenza degli inserti in lega leggera dei due fondi.

I due canali in ascolto, invece, erano collocati nel tratto cilindrico della bombola lungo una stessa generatrice, in posizione equidistante dalla mezzeria e dalla testata del recipiente.

ESTENSIMETRIA

Sono stati utilizzati quattro estensimetri elettrici a resistenza del tipo 6/120, posti in corrispondenza della mezzeria del recipiente, orientati in direzione circonferenziale ed in direzione longitudinale, due a due su una generatrice e su quella diametralmente opposta.

La centralina estensimetrica per la misura delle deformazioni era del tipo statico, il collegamento a mezzo ponte con resistenza campione da 120 ohm.

RISULTATI

Le prove, condotte con l'utile supporto delle due tecniche, l'estensimetria e l'Emissione Acustica, hanno permesso innanzitutto di evidenziare il differente ordine di grandezza delle deformazioni longitudinali e trasversali della bombola: al collasso le prime risultavano dell'ordine di $2 \times 10^4 \mu\text{m/m}$, mentre le seconde arrivavano circa a $2.7 \times 10^3 \mu\text{m/m}$.

Pur essendo il comportamento complessivo di deformazione del recipiente nelle aspettative di progettazione del laminato, esso può essere meglio analizzato seguendolo nella sua evoluzione.

Nella prima serie di prove, effettuate con caricamenti al di sotto del limite di impiego di progetto, sia la deformazione longitudinale che la trasversale aumentavano proporzionalmente con la sollecitazione, in progressione pressochè lineare (fig. 3).

Nelle prove fino al collasso si notava invece che mentre la deformazione longitudinale acquista, al di sopra della pressione di progetto una velocità di crescita inferiore, quella trasversale tende ad aumentare. Quest'ultimo effetto è da attribuire a rotture di matrice che si verificano negli strati interni a $+25^\circ$ ed a -25° , mentre il comportamento delle deformazioni longitudinali conferma che in effetti lo strato circonferenziale a 90° resiste almeno fino a 60 bar.

I dati di Emissione Acustica non fanno che confermare quanto sopra detto: si osserva infatti che oltre l'80 % degli eventi di Emissione Acustica ad alta energia (maggiore di 100 unità) hanno origine al di sopra dei 40 bar di pressione (vedi fig.4).

Inoltre (fig. 5) la prima fermata a carico costante che ha implicato fenomeni di Emissione Acustica rilevanti risulta essere, per la totalità dei recipienti esaminati, proprio quella a 40 bar.

Nello stesso diagramma si osserva discreta attività acustica durante il passaggio da 30 a 40 bar. Soffermandosi, però, solo sugli eventi ad altissima ampiezza (oltre 75 dB), indicativi di rotture di fibre, possiamo notare che tali eventi si verificano in quantità significativa solo oltre i 40 bar, mentre eventi di lunga durata (oltre i $2 \times 10^3 \mu\text{sec}$) si osservano anche a più basse pressioni.

Infatti le fig. 6 e 7 mostrano come la zona di più intense delaminazioni e plasticizzazioni all'interno del laminato, evidenziabili rispettivamente dai due parametri *durata* e *conteggi*, coincida con la parte centrale della prova tra i 30 ed i 40 bar.

Dall'osservazione della tab.1, si può poi notare una più intensa rilevazione dell'emissione acustica da parte di un canale rispetto all'altro, specie in prossimità del collasso finale del recipiente. Questo effetto è risultato comune a tutte le prove, ed è stato confermato dalle misure estensimetriche, in cui è sempre un unico estensimetro a mostrare rilevanti deformazioni permanenti.

Questo indica una rottura del recipiente notevolmente più complessa di una semplice rottura in mezzeria, dovuta, oltre che alla particolare costruzione della bombola, anche all'oggettiva difficoltà di ottenere un laminato angle-ply perfettamente bilanciato anche dal punto di vista del singolo fascio di fibre.

CONCLUSIONI

Con la metodologia di indagine utilizzata è stato possibile caratterizzare la dinamica del comportamento meccanico strutturale di recipienti in composito realizzati secondo la tecnologia del *filament winding*.

Con l'estensimetria è stato possibile distinguere nettamente la variazione dell'andamento carico-deformazione in corrispondenza dell'innesco dei danneggiamenti strutturali, mentre con l'emissione acustica è stato possibile riconoscere il tipo del danneggiamento. Dall'insieme di tali dati è stato così possibile individuare il livello dello spessore del laminato in cui hanno preso origine i danneggiamenti.

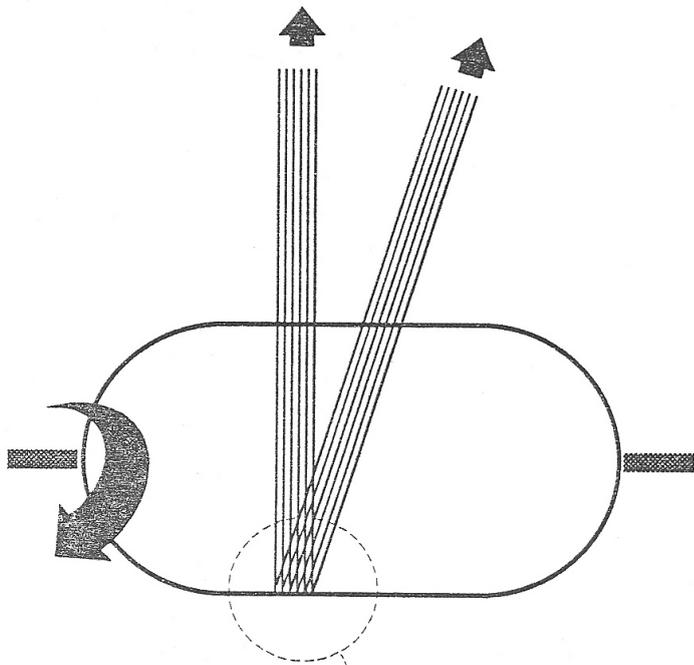
Un altro aspetto particolarmente interessante ai fini progettuali è l'evidenziazione della localizzazione dei danneggiamenti che tendono ad interessare preferenzialmente una sola mezzeria del recipiente.

In base ai risultati conseguiti si rileva la buona sinergia delle due tecniche di indagine utilizzate, l'estensimetria e l'emissione acustica.

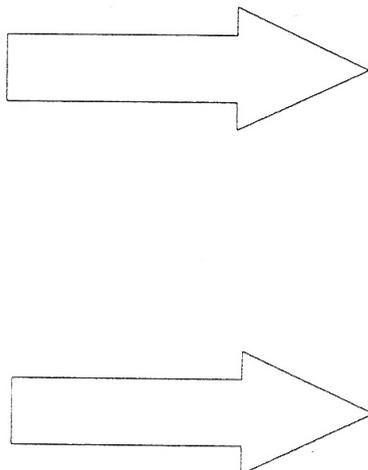
BIBLIOGRAFIA

- [1] G.S:Ger, D.G.Hwang, W.Y: Chen, S.E.Hsu. *Design and fabrication of High Performance Composite Pressure Vessels*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 10, 1988, pp.157-163.
- [2] C.Le Floc'h. *Acoustic Emission Monitoring of Composite High Pressure Fluid Storage Tanks*. NDT International, v. 19, n.4, 1986.

- [3] E.v. K.Hill, T.J. Lewis. *Acoustic Emission Monitoring of a Filament Wound Composite Rocket Motor Case during Hydroproof*. Material Evaluation v.42, n.1, 1984.
- [4] J. M. Berthelot. *Relation between Amplitudes and Rupture Mechanism in Composite Materials*. Journal of Reinforced Plastics and composites, vol.7, 1988.
- [5] C.Caneva, A.Franciosa, M.Mazzola, C.Santulli. *La valutazione della qualità su bombole in Filament Winding mediante Emissione Acustica*. Atti VIII Convegno Nazionale IGF (Gruppo Italiano Frattura), Genova 27-29 maggio 1992, pp. 289-297.



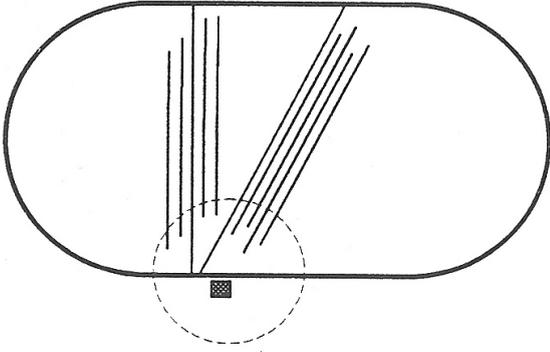
FASE DI FORMATURA



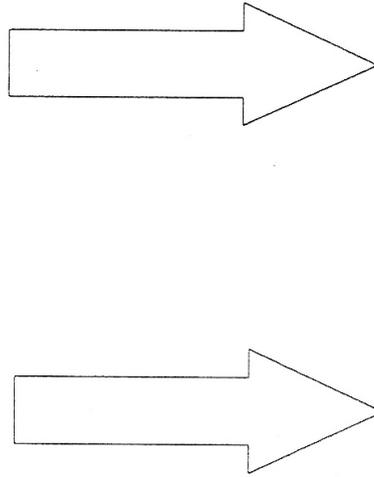
DIFETTI GENERATI DA ERRATA
IMPOSTAZIONE E/O CONTROLLO
DEI PARAMETRI DI PROCESSO

MICROTENSIONI E DEFORMAZIONI PRODOTTE IN
MODO INTRINSECO NEL CORSO DEL PROCESSO DI
FORMAZIONE DEL MATERIALE COMPOSITO

Fig. 1



INDAGINE NON DISTRUTTIVA



RILEVAZIONE DEI DIFETTI E
VERIFICA DELLA RISPOSTA
FUNZIONALE (COLLAUDO)

RILEVAZIONE DELLE MICROTENSIONI E DEFORMAZIONI
(ANALISI E MIGLIORAMENTO DEL PROCESSO DI FORMAZIONE)

Fig. 2

DEFORMAZIONI vs CARICO

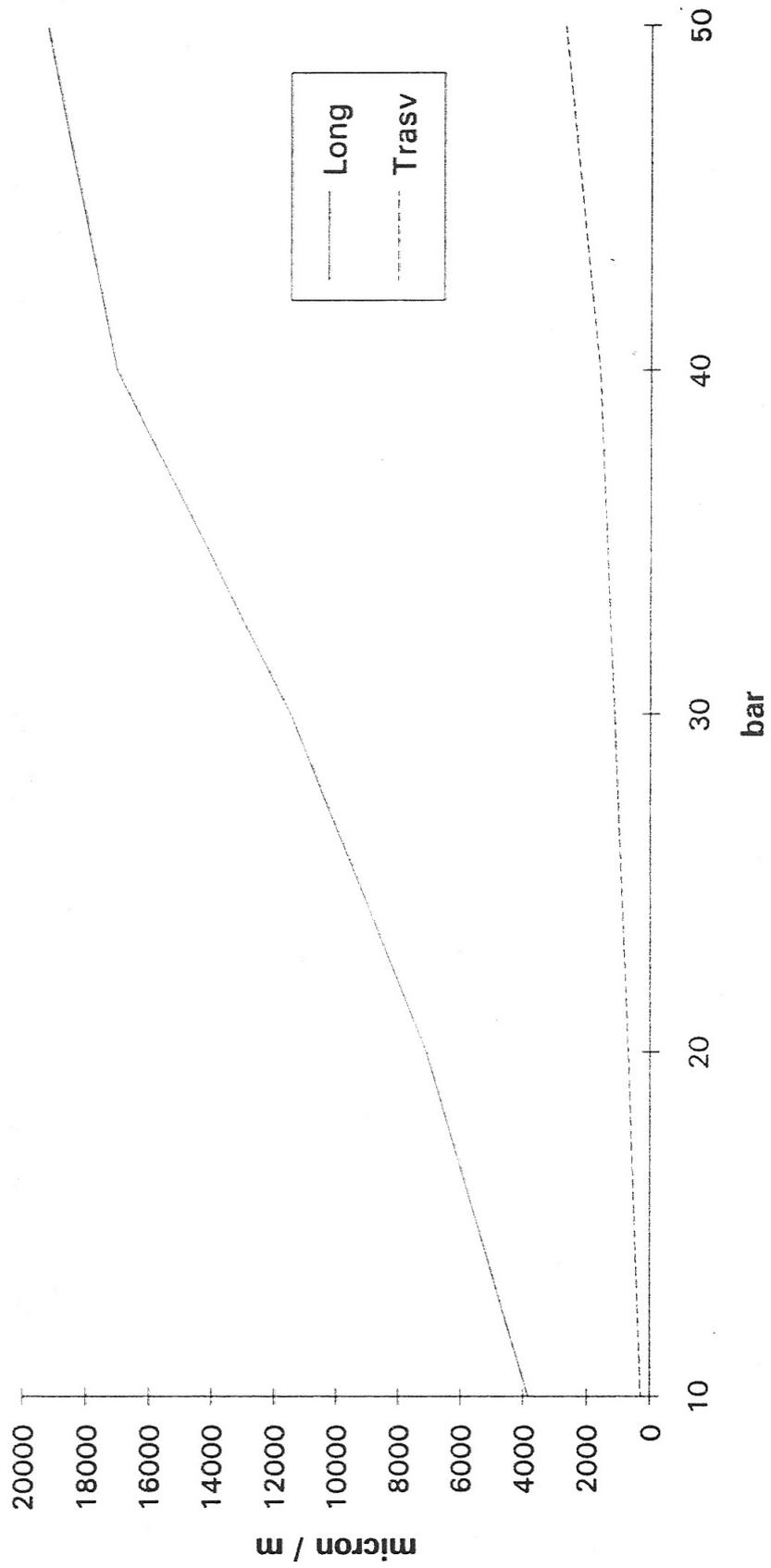


Fig. 3

ENERGIA DI E.A. vs CARICO

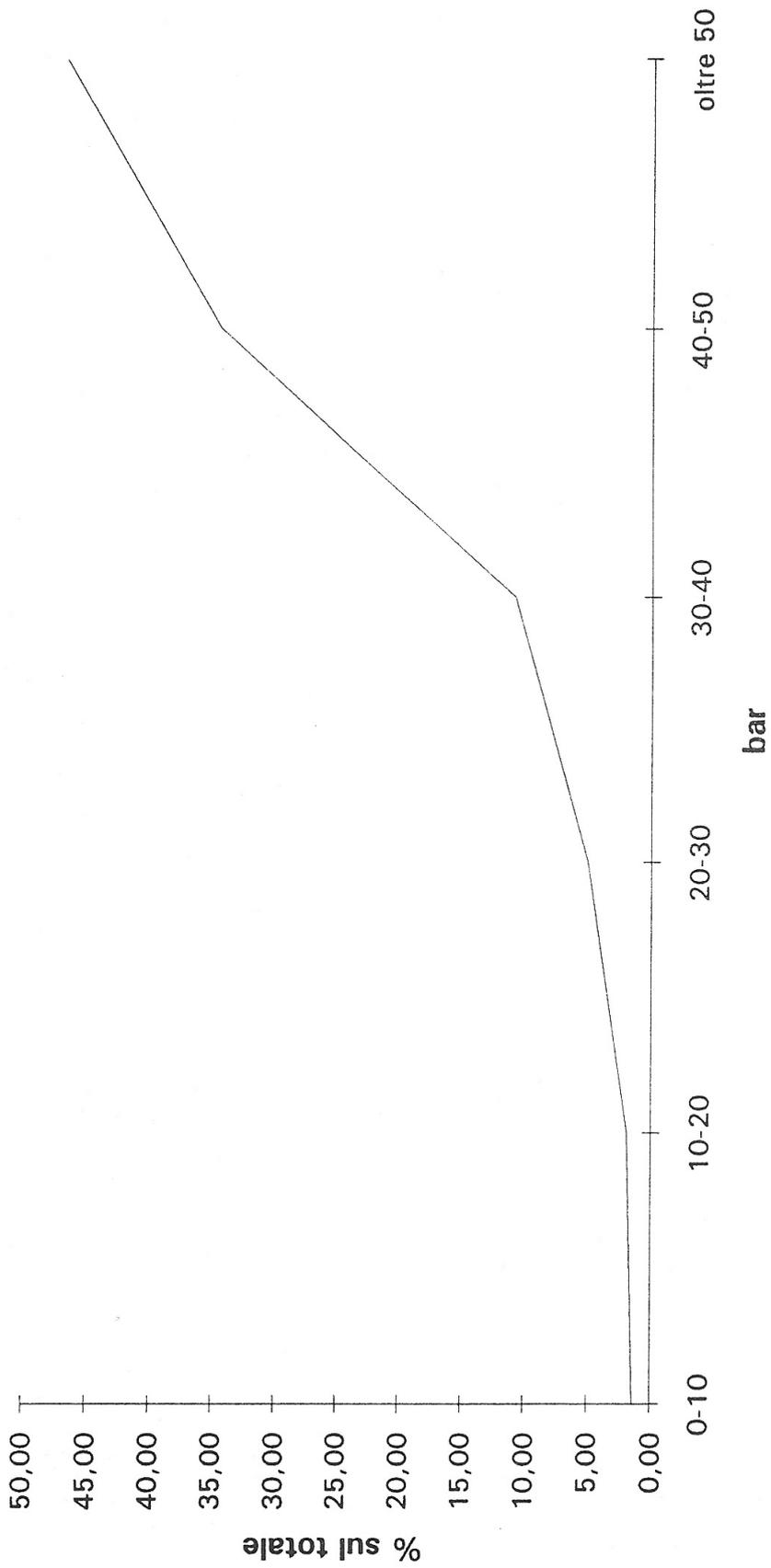


Fig. 4

ENERGIA AI VARI LIVELLI DI CARICO

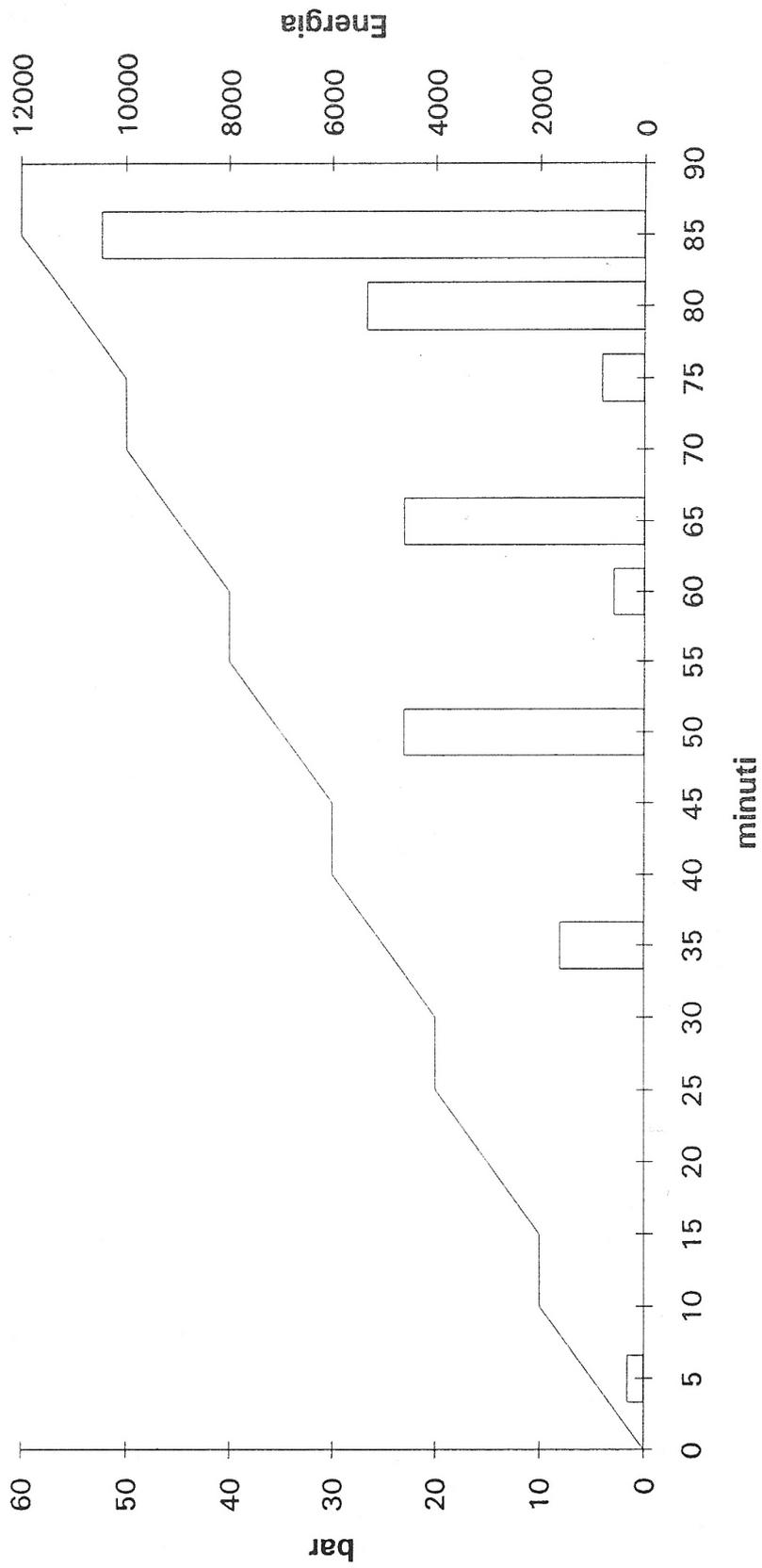


Fig. 5

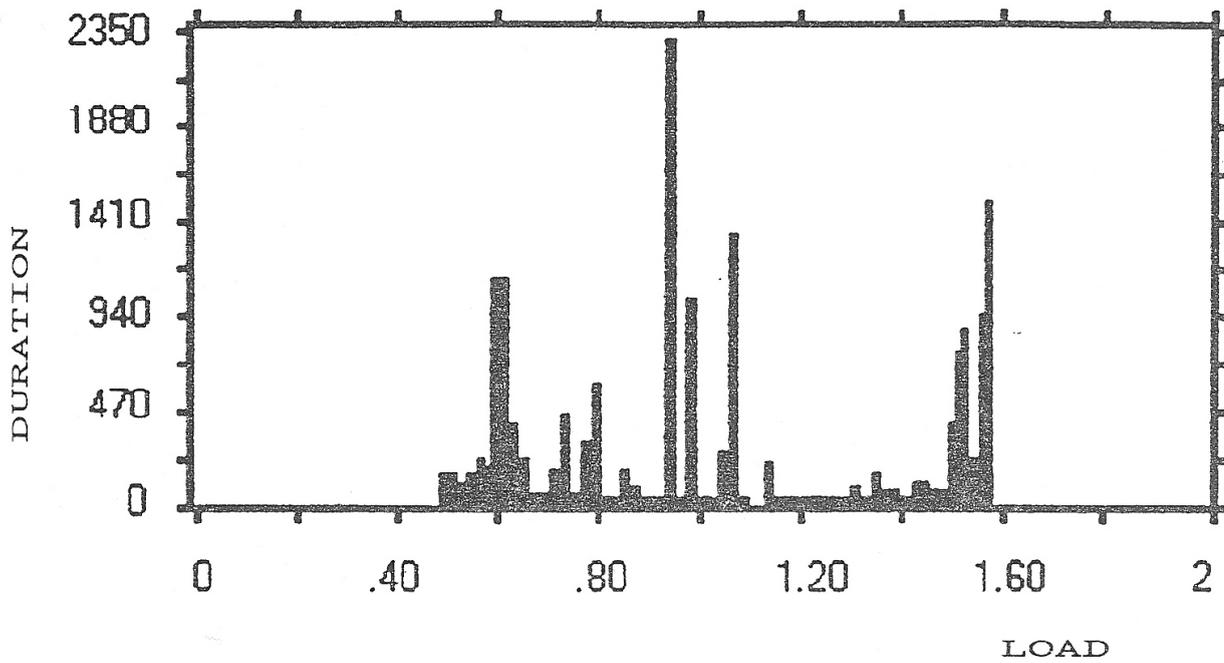


Fig. 6

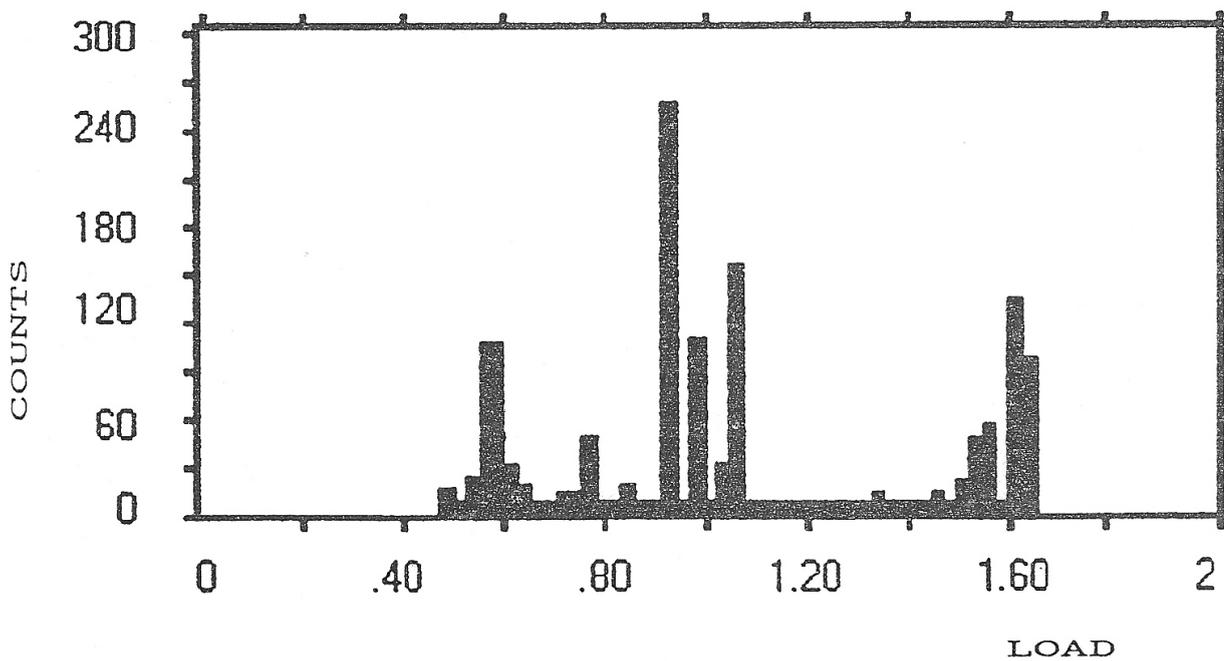


Fig. 7

TABELLA I - Eventi rilevanti (energia >100) in una prova

APPLICAZIONE DEL CARICO	PRESSIONE (bar)	EVENTI	CH. 1	CH . 2	ENERGIA TOTALE
salita	0 - 10	2	1	1	312
fermata	10	0	0	0	0
salita	10 - 20	0	0	0	0
fermata	20	0	0	0	0
salita	20 - 30	2	1	1	1611
fermata	30	0	0	0	0
salita	30 - 40	11	3	8	4609
fermata	40	3	2	1	581
salita	40 - 50	6	3	3	4612
fermata	50	2	1	1	812
salita	50 - 60	10	0	10	5331
scoppio	60	4	1	3	10455