

# VALUTAZIONE DEL DANNEGGIAMENTO IN MATERIALI COMPOSITI A MATRICE METALLICA TRAMITE MONITORAGGIO DI EMISSIONE ACUSTICA

*E. Gariboldi\**, *C. Santulli\*\**, *F. Stivali\*\*\**, *M. Vedani\**

\* Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica

\*\*Centro Comune di Ricerca di Ispra - Istituto per l'Ingegneria dei Sistemi ed Informatica

\*\*\*Università di Roma La Sapienza - Dipartimento di Ingegneria Chimica

## SOMMARIO

Vengono descritti i risultati di prove volte alla valutazione del danneggiamento di materiali compositi a matrice metallica mediante monitoraggio dell'emissione acustica. La ricerca è stata intrapresa con lo scopo seguire contemporaneamente l'evoluzione del danneggiamento durante le prove di trazione in relazione al comportamento meccanico evidenziato dalle curve sforzo deformazione. Si è presa in esame una lega di alluminio 2014 rinforzata con 20% in volume di particelle di allumina e a scopo di confronto è stata inclusa nella sperimentazione anche la corrispondente lega 2014 non rinforzata. Gli esami sono stati completati da analisi frattografiche che hanno permesso di indicare quali meccanismi di danneggiamento agivano nei due diversi tipi di materiali.

## INTRODUZIONE

I risultati di recenti ricerche condotte sui materiali compositi a matrice metallica hanno messo in evidenza che il loro comportamento meccanico è significativamente influenzato dall'accumularsi, al procedere della deformazione imposta, dei fenomeni di decadimento microstrutturale, ai quali ci si riferisce parlando genericamente di danneggiamento. Questo fenomeno a sua volta dipende da altre variabili quali la resistenza della matrice, il tipo e la quantità di rinforzo e la temperatura di esercizio del materiale. In buona parte degli studi condotti, il danneggiamento è stato misurato con metodi indiretti quali la diminuzione del modulo elastico. Ne sono un esempio i lavori pubblicati da Llorca e Poza [1], Corbin e Wilkinson [2] e Lloyd [3] per i compositi rinforzati con particelle. Essi concordano nell'indicare che il progredire del danneggiamento durante la deformazione del materiale porta a raggiungere livelli di deterioramento significativi ben prima dell'istante della rottura. Inoltre è stato generalmente osservato che il danneggiamento si distribuisce entro l'intero tratto utile sollecitato.

Dal quadro delle indicazioni disponibili risulta che, in aggiunta al dimensionamento di organi meccanici in base ai convenzionali parametri quali il limite elastico ed il carico di snervamento, il corretto utilizzo dei materiali compositi comporta la necessità di disporre di dettagliate informazioni sull'innescò e sull'evoluzione del processo di danneggiamento. In tal modo diventa possibile definire un livello limite di carico oltre il quale la struttura

del materiale è soggetta ad un degrado strutturale critico che, per stadi successivi, può condurre al collasso finale.

L'applicazione della tecnica dell'emissione acustica risulta quindi di particolare interesse per la valutazione del danneggiamento nei materiali compositi a matrice metallica. Sull'argomento si citano [4-5] alcuni lavori svolti su campioni costituiti da fibra singola immersa in un volume di alluminio e le ricerche sui compositi rinforzati con fibre corte eseguite da alcuni degli autori della presente memoria [6,7].

In questo contesto la tecnica del monitoraggio dell'emissione acustica è in grado di fornire l'effettiva criticità di un livello di carico e risulta pertanto di estrema utilità quale strumento di valutazione in tempo reale per l'accertamento sperimentale del comportamento dei materiali compositi a matrice metallica. È inoltre possibile disporre di interessanti risultati che si prestano ad essere correlati con quelli di altri esami, quali quelli frattografici al SEM, in grado di indicare gli effettivi fenomeni del deterioramento strutturale su scala microscopica.

## PROCEDURE SPERIMENTALI

Sono stati studiati compositi in lega di alluminio 2014 (Al/0.8Si/4.4Cu/0.8Mn/0.5Mg) con rinforzo del 20% in volume di particelle approssimativamente equiassiche di allumina. A scopo di confronto sono state esaminate anche le corrispondenti leghe 2014 non rinforzate. Entrambi i materiali sono stati caratterizzati dopo trattamento termico allo stato T6 comprendente: solubilizzazione a 500°C per 2 ore, tempra in acqua e invecchiamento artificiale a 160°C per 14 ore.

Durante le prove sperimentali è stata effettuata la rilevazione dell'emissione acustica dei materiali sollecitati in trazione fino alla rottura. Il sistema di acquisizione dell'emissione acustica utilizzato era il LOCAN AT della PAC con due sensori risonanti a 150 kHz applicati alle due estremità del tratto utile dei campioni. La soglia era posta a 31 dB e l'amplificazione presentava un guadagno totale di 60 (=40+20) dB.

## RISULTATI

I principali dati di resistenza meccanica determinati dalle prove di trazione sui materiali in esame sono riassunti in tabella I. Essi evidenziano il generale comportamento dei materiali compositi che si traduce in maggiori valori del carico di rottura e di snervamento rispetto alle proprietà della corrispondente lega di alluminio non rinforzata. Come svantaggio si ha tuttavia il ben noto calo dell'allungamento a rottura che, nel presente caso, si riduce di un ordine di grandezza.

Le figure da 1 a 4 mostrano due tipiche curve di trazione dei materiali esaminati insieme con gli andamenti delle velocità di variazione della deformazione in funzione del tempo durante la prova. Questi ultimi andamenti specificano con maggiore dettaglio l'evoluzione temporale della deformazione imposta ai materiali durante le prove e si sono dimostrati particolarmente interessanti per la possibile correlazione con i dati di emissione acustica presentati in seguito. In particolare, essendo state condotte prove con velocità di

spostamento della traversa costante, risulta ben evidenziata la fase di plasticizzazione dei materiali. Essa è accompagnata dal un differente accumulo di energia elastica della struttura dell'apparecchiatura di trazione che porta ad un aumento della velocità di deformazione subita dal provino.

*Tabella I. Proprietà meccaniche medie dei materiali studiati.*

Materiale	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)
2014 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	521	500	1.1
2014	438	340	19.1

L'analisi frattografica è stata eseguita sia sulle superfici di frattura dei provini che su sezioni longitudinali del tratto utile degli stessi. Si è notato che, per effetto dei carichi trasmessi e per la presenza di precipitati infragilenti all'interfaccia matrice/particelle [8], il cedimento dei campioni in trazione avveniva in seguito alla frattura delle particelle di allumina, come mostrato nelle figure 5 e 6. Le cricche formatesi avevano poi la possibilità di propagare secondo un modo duttile nella matrice, collegandosi tra loro fino a condurre al cedimento finale. Nelle leghe 2014 non rinforzate si è osservato invece che le cricche si innescavano a partire dai numerosi composti intermetallici presenti nella lega che, anche in questo caso, costituivano i siti di nucleazione per un meccanismo di frattura di tipo duttile.

Per quanto riguarda la rilevazione dell'emissione acustica sui provini in lega 2104, è possibile trarre informazioni sul comportamento del materiale dall'evoluzione del diagramma dei conteggi cumulativi in funzione del tempo durante l'intera durata della sollecitazione, come mostrato in figura 7. Il grafico mostra un danneggiamento che procede con una certa gradualità ed è ripartito in tre fasi corrispondenti al tratto elastico, allo snervamento ed al tratto delle grandi deformazioni plastiche. Si può notare che il limite elastico osservabile con l'emissione acustica coincide con buona approssimazione con quanto desumibile dalla curva sforzo-deformazione. Inoltre si osserva che la estesa deformazione plastica della lega è tale da rendere estremamente silenzioso il periodo di prova che prelude alla rottura. Ciò suggerisce anche il completamento della frattura delle inclusioni non metalliche.

In figura 8 è riportata la classica distribuzione quasi-gaussiana degli eventi di emissione acustica in funzione dell'ampiezza. Il raggrupparsi degli eventi in una fascia di pochi dB di ampiezza indica la presenza di un solo fenomeno prevalente di danneggiamento. Le figure 9 e 10 chiariscono poi che l'attività acustica è principalmente dovuta alla deformazione plastica della lega; gli eventi sono infatti in gran parte di lunga durata (fino oltre i  $5 \cdot 10^3$   $\mu$ s), di ampiezza modesta (con limite inferiore a circa 40 dB) e con numero di conteggi anche superiore ai 1000. Va osservato a questo proposito che il numero di conteggi di emissione acustica è collegato da una dipendenza di tipo  $C=A \epsilon^n$  [6,7] con la deformazione del materiale.

Passando all'esame dei materiali compositi, la figura 11 permette di osservare come gli eventi di emissione acustica siano distribuiti su un ampio intervallo di ampiezze, mostrando la tipica compresenza di diversi fattori di danneggiamento verificatisi nel corso della prova quali le rotture di particelle di dimensioni eterogenee, con valori piuttosto alti delle ampiezze.

In figura 12 viene riportato l'andamento dei conteggi cumulativi durante la prova. Si nota una ripida crescita iniziale dei conteggi che si stabilizzano poi a livelli più modesti con un'attività acustica caratterizzata da eventi a maggiore durata (fino a 2800  $\mu$ s) in tutto il periodo corrispondente alla deformazione elastica. Il secondo cambiamento di pendenza di tale curva è invece significativo dello snervamento del composito che, per le caratteristiche proprie di questi materiali, è seguito da un breve periodo di plasticizzazione della matrice prima del cedimento finale. Durante la prima e la terza fase l'attività acustica risulta più vivace, molto probabilmente per la presenza di fenomeni di alterazione relativi alle particelle di allumina, implicanti un maggiore rilascio di energia. Tali fenomeni sono, per la parte iniziale della prova, essenzialmente i microspostamenti del rinforzo nella direzione del carico e la inevitabile fratturazione delle particelle di dimensioni eccessivamente grossolane o pretensionate. Nell'ultima fase invece, si infittiscono in modo marcato le rotture di particelle che conducono al collasso del materiale. Le figure 13 e 14 completano l'analisi dei dati di emissione acustica mostrando almeno due tipologie di eventi concorrenti. La maggior parte piuttosto brevi e di ampiezza variabile connessi con il rinforzo (individuabili in figura 13 dalla scia ad andamento prevalentemente orizzontale) ed i restanti più lunghi e di ampiezza approssimativamente costante connessi con la deformazione della matrice (scia ad andamento verticale).

## CONCLUSIONI

I risultati sul monitoraggio dell'emissione acustica hanno permesso di rilevare una ottima corrispondenza con le principali fasi del comportamento meccanico in trazione. È apparsa particolarmente interessante la possibilità di individuare in termini estremamente precisi la fase di inizio della plasticizzazione sia nei materiali compositi che nelle corrispondenti leghe non rinforzate.

Pur essendo ancora necessario ampliare il numero di prove ed approfondire l'elaborazione dei dati di emissione acustica per ricavare risultati più specifici e di carattere quantitativo, si è dimostrato che nelle leghe 2014 non rinforzate gli eventi di emissione corrispondono ad un'unica tipologia di danneggiamento. Al contrario, l'ampia gamma di emissioni nei compositi sta ad indicare meccanismi di deterioramento strutturale differenziati.

È stato infine evidenziato che nei materiali compositi il numero di conteggi di emissione è significativamente maggiore ad indicazione del fatto che la tendenza al danneggiamento è più accentuata rispetto al caso delle leghe non rinforzate.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. J. Llorca, P. Poza, Mater. Sci. Eng., A185 (1994) 25.
2. S.F. Corbin, D.S. Wilkinson, Acta Metall. Mater., 42, 4 (1994) 1329.
3. D.J. Lloyd, Acta Metall. Mater., 39, 1 (1991) 59.
4. I. Roman, R. Aharonov, Acta Metall. Mater., 40, 3 (1992) 477.
5. R.B. Clough, F.S. Biancaniello, H.N.G. Wadley, U. R. Kattner, Metall. Trans., 21A (1990) 2747.
6. C. Caneva, C. Santulli, A. Soloni, F. Stivali, Atti X Conv. Naz. IGF, Torino, 1994.
7. C. Caneva, C. Santulli, F. Stivali, Atti 7a Conf. Naz. sulle Prove non Distruttive, Monitoraggio, Diagnostica, Ferrara, 199.
8. J.C. Lee, N. Subramanian, Y. Kim, J. Mater. Sci., 29 (1994) 1983.

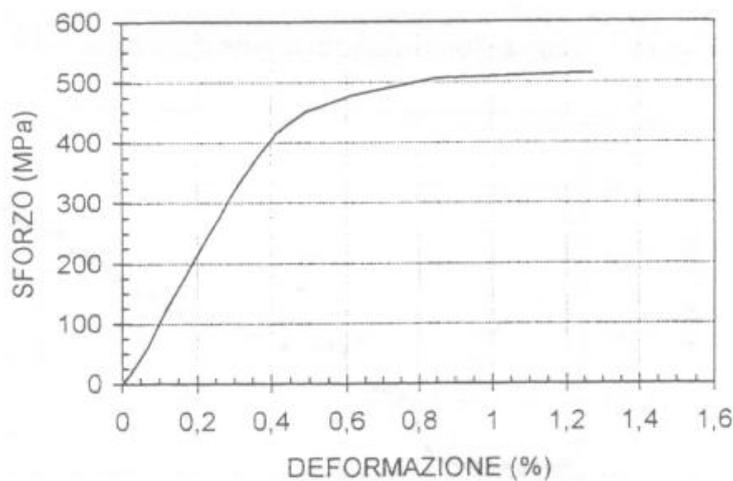


Figura 1. Curva sforzo-deformazione del composito 2014  $Al_2O_3$ .

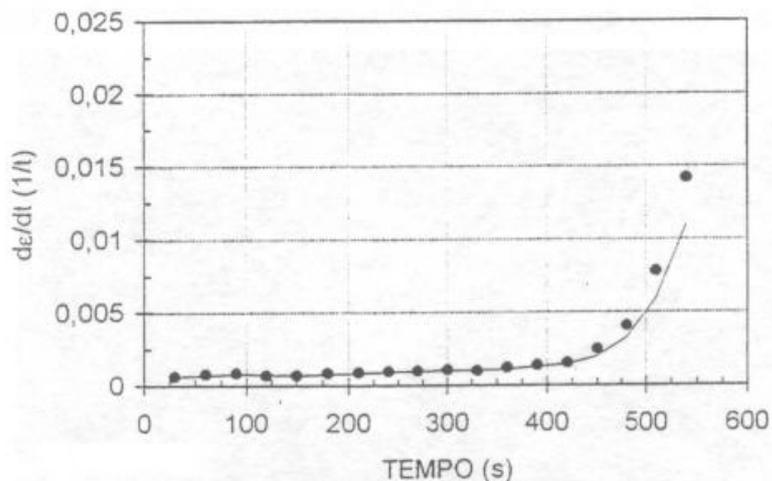


Figura 2. Curva derivata della deformazione-tempo per il composito 2014  $Al_2O_3$ .

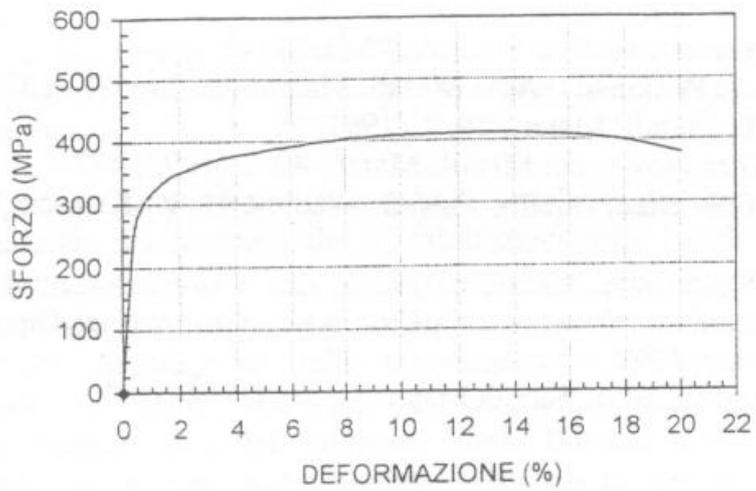


Figura 3. Curva sforzo-deformazione della lega 2014.

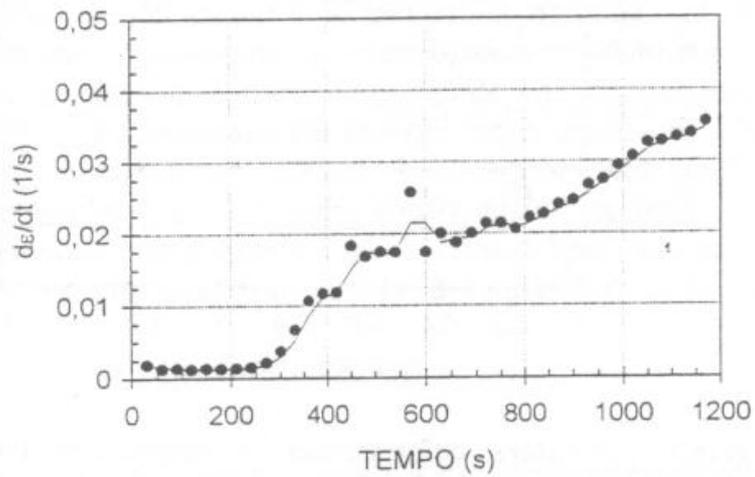


Figura 4. Curva derivata della deformazione-tempo per la lega 2014.

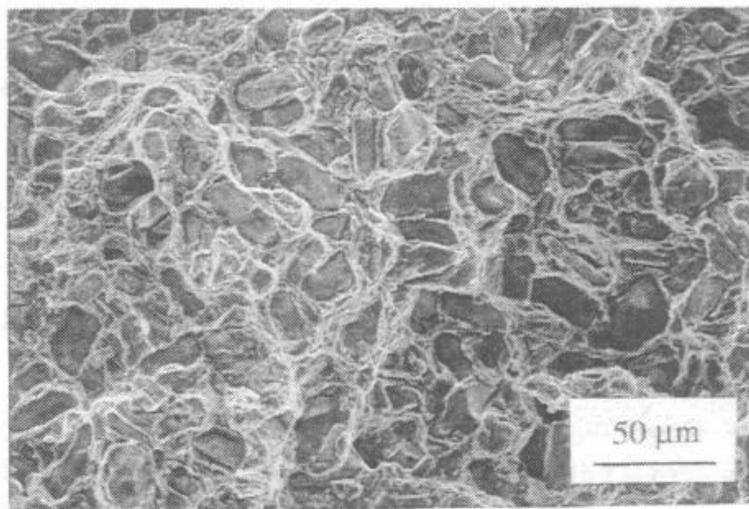


Figura 5. Superficie di frattura del composito 2014 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

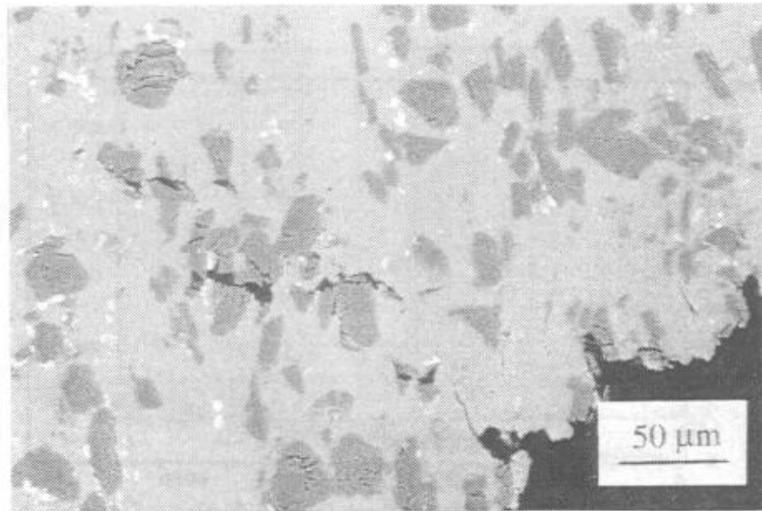


Figura 6. Sezione longitudinale di una provetta di composito 2014  $Al_2O_3$  fratturata in trazione. Direzione di carico lungo la verticale.

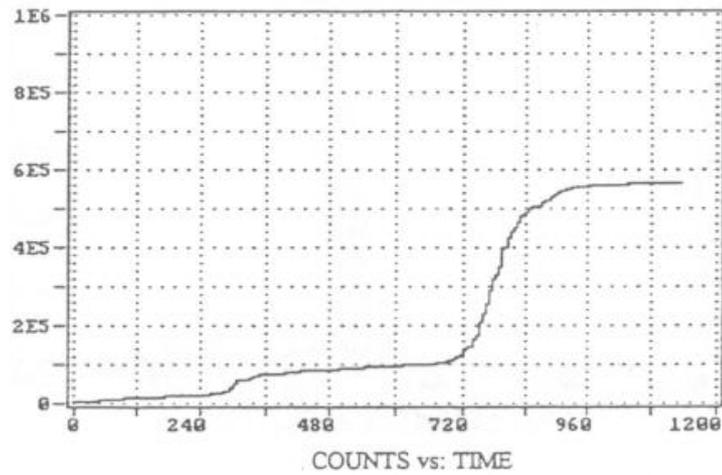


Figura 7. Curva cumulativa dei conteggi in funzione del tempo durante la prova per la lega 2014.

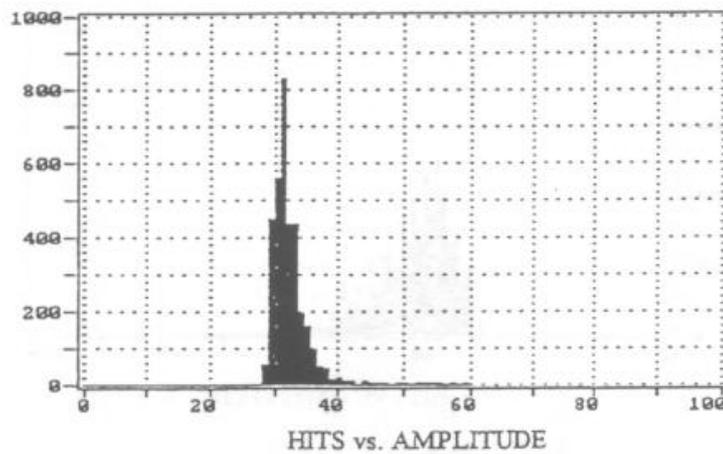


Figura 8. Diagramma di distribuzione dell'ampiezza degli eventi nella lega 2014.

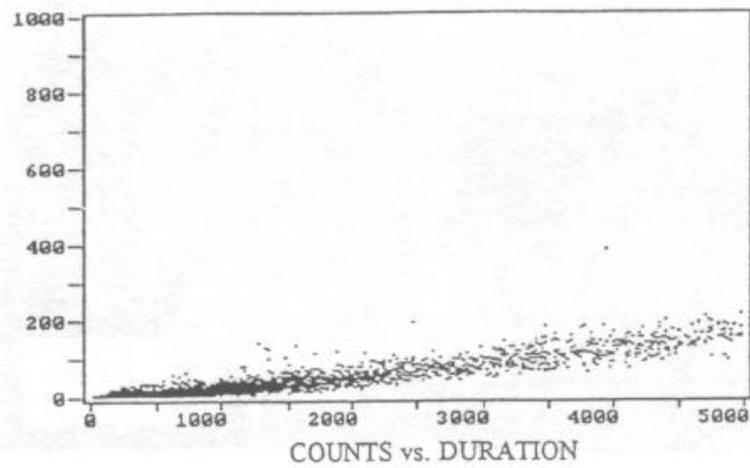


Figura 9. Distribuzione del numero di eventi in funzione della loro durata nella lega 2014.

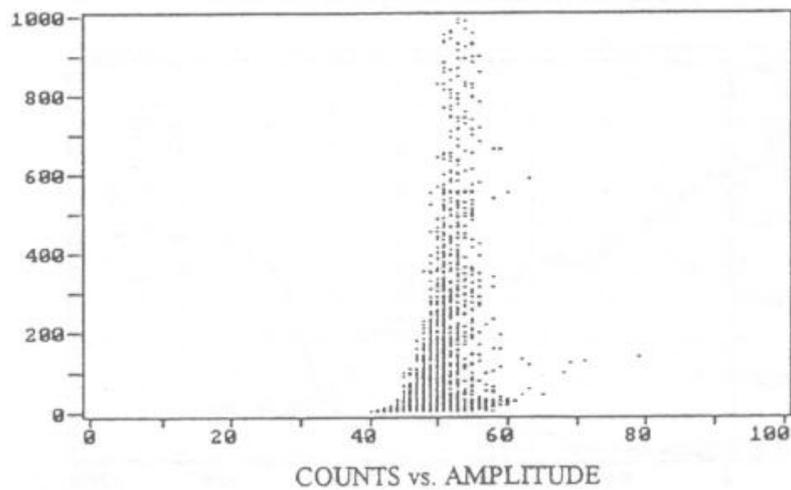


Figura 10. Distribuzione del numero di eventi in funzione della loro ampiezza nella lega 2014.

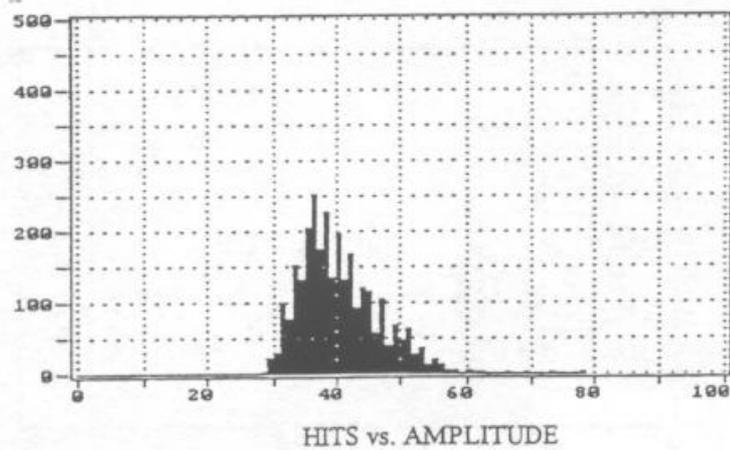


Figura 11. Diagramma di distribuzione dell'ampiezza degli eventi nel composito 2014  $Al_2O_3$ .

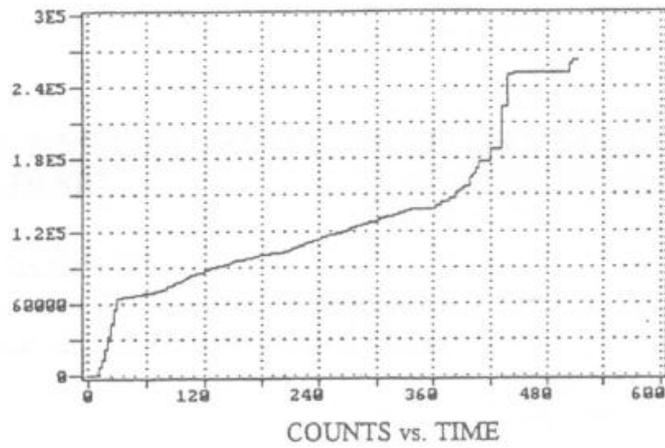


Figura 12. Curva cumulativa dei conteggi in funzione del tempo durante la prova per il composito 2014 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

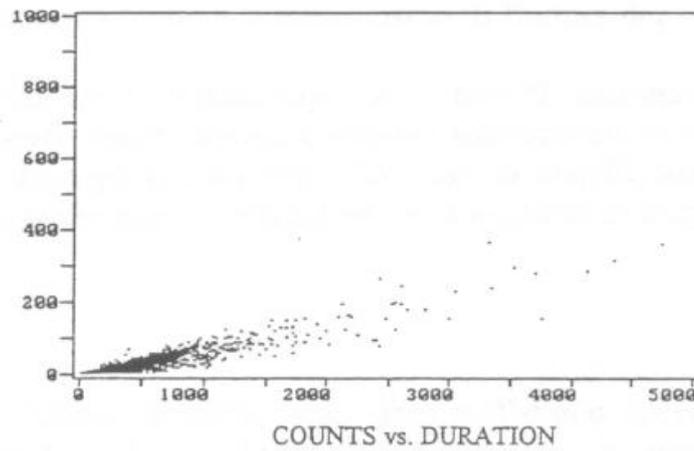


Figura 13. Distribuzione del numero di eventi in funzione della loro durata nel composito 2014 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

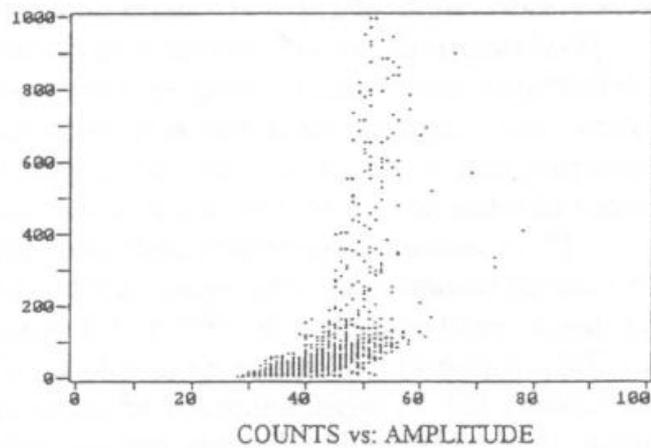


Figura 14. Distribuzione del numero di eventi in funzione della loro ampiezza nel composito 2014 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.