

STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DELLA FRATTURA CON TECNICHE CINEMATOGRAFICHE, IN PROVE IN DOPPIA TORSIONE (DT) SU MATERIALI POLIMERICI

R.Frassine, T.Riccò, M.Rink, A.Pavan

Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria Chimica  
"G.Natta" - Politecnico - Piazza L.da Vinci, 31  
20133 Milano

RIASSUNTO

La prova in doppia torsione è un metodo diretto e di facile impiego per lo studio del comportamento a frattura di materiali le cui proprietà dipendono dalla velocità di sollecitazione applicata, come nel caso dei polimeri.

Gli aspetti cinematici e dinamici dello sviluppo e della propagazione del fronte curvo di frattura sono stati studiati con l'ausilio di tecniche di ripresa cinematografica. Ciò ha consentito di delinare le condizioni e i limiti di applicabilità dell'analisi tradizionale della doppia torsione, in relazione alle dimensioni dei provini e alla fenomenologia di propagazione della frattura.

INTRODUZIONE

La prova di frattura in doppia torsione (DT), sviluppata nel corso degli ultimi quindici anni da numerosi autori, è un metodo diretto e di pratica esecuzione per caratterizzare la resistenza a frattura di materiali il cui comportamento dipende dalla velocità di sollecitazione.

Il presente lavoro è stato condotto ai fini di indagare alcuni aspetti fenomenologici caratteristici di questa

prova. L'apporto della tecnica di registrazione cinematografica, adottata per visualizzare l'avanzamento della cricca durante la prova, ha consentito di ricavare utili informazioni sugli aspetti cinematici e dinamici del processo di frattura.

#### LA PROVA IN DOPPIA TORSIONE

La configurazione della prova è schematizzata in Fig.1.

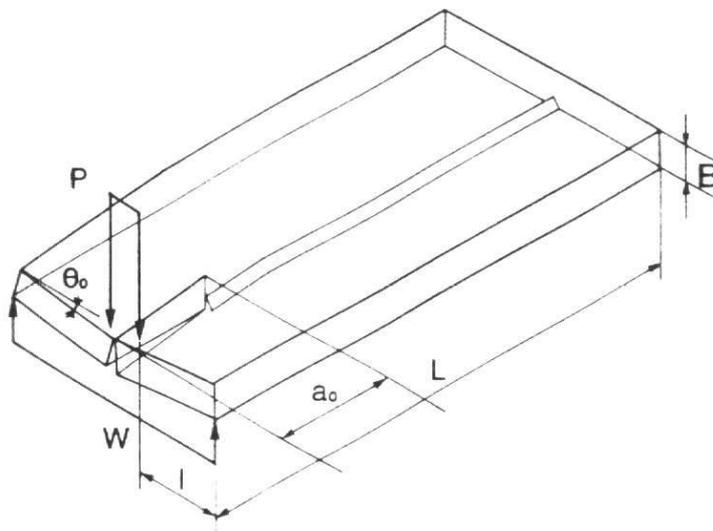


Fig. 1. Configurazione di prova per un provino DT

Il provino consiste in una piastra rettangolare, nella quale è praticato un intaglio laterale acuto e una scanalatura sulla faccia inferiore, che permetta di guidare la cricca lungo il piano di mezzeria del provino stesso.

La sollecitazione è applicata in quattro punti e provoca la torsione delle due barre rettangolari, separate dall'intaglio. Lo studio di questo problema può essere in prima approssimazione risolto mediante l'analisi tradiziona-

le della torsione pura (1). Secondo tale analisi la cedevolezza del provino dipende linearmente dalla lunghezza della cricca ed è data da :

$$c = \frac{2(1+\nu)l^2}{k_1 E W B^3} \cdot a + c_0 \quad (1)$$

Il tasso di rilascio dell'energia di deformazione è esprimibile, nella sua forma generale, come:

$$G_c = \frac{P_c^2}{2} \left( \frac{dc}{dA} \right) \quad (2)$$

oppure, in termini di derivata rispetto ad  $a$ , come:

$$G_c = \frac{P_c^2}{2} \frac{dc}{da} \left( \frac{dA}{da} \right)^{-1} \quad (3)$$

Nel caso in cui il profilo del fronte di frattura si mantenga invariato durante la sua propagazione :

$$\frac{dA}{da} = B_c \quad (4)$$

Combinando le eq. 1, 3 e 4, si perviene ad una equazione di  $G_c$  per la prova in doppia torsione:

$$G_c = \frac{2(1+\nu)l^2 p_c^2}{k_1 E W B_c B^3} \quad (5)$$

dalla quale appare che, una volta fissati i parametri geometrici, il valore di  $G_c$  dipende soltanto da  $P_c$  ed è, in particolare, indipendente da  $a$ .

Nel corso di una prova di frattura a velocità di deformazione costante, la velocità della cricca è esprimibile in termini di carico critico e di cedevolezza nel modo seguente:

$$\dot{a} = \frac{\dot{x}}{P_c (dC/da) + C (dP_c/da)} \quad (6)$$

Poichè tipicamente il carico critico si mantiene costante durante la propagazione della cricca, si ottiene

$$\dot{a} = \frac{\dot{x}}{P_c (dC/da)} \quad (7)$$

da cui si vede che, per  $\dot{x}$  costante, anche  $\dot{a}$  è costante.

Tramite le eq. 5 e 7 è possibile determinare la caratteristica del materiale  $G_c(\dot{a})$ .

In calce a questa schematica trattazione è necessario fare alcune precisazioni:

- a) La variazione lineare della cedevolezza con la lunghezza della cricca è verificata sperimentalmente soltanto in un certo intervallo di lunghezza di cricca: più precisamente, per cricche molto corte ( $dC/da$ ) è più bassa del valore teorico e per cricche molto lunghe più alta (2).
- b) Il profilo del fronte di frattura è fortemente incurvato, ed esiste perciò una distribuzione di velocità "locali" lungo il fronte stesso. Pertanto si rende necessaria una correzione dei valori di  $G_c$  (o di  $\dot{a}$ ) dati dalle precedenti equazioni, da apportare mediante un fattore di forma moltiplicativo (3, 4, 5).

## RISULTATI SPERIMENTALI

### Esame cinematico

L'esame dettagliato delle riprese cinematografiche mostra l'esistenza di tre stadi distinti durante la propagazione della frattura (Fig. 2):

- I. Lo sviluppo della cricca, a partire dall'intaglio iniziale, attraverso tutto lo spessore,  $B_c$ , del provino.
- II. La traslazione rigida del profilo della cricca lungo l'asse di simmetria del provino (asse x). In questo stadio la velocità di traslazione è costante e quindi la frattura avviene in condizioni di stazionarietà.
- III. La rottura finale, di schianto, del provino stesso.

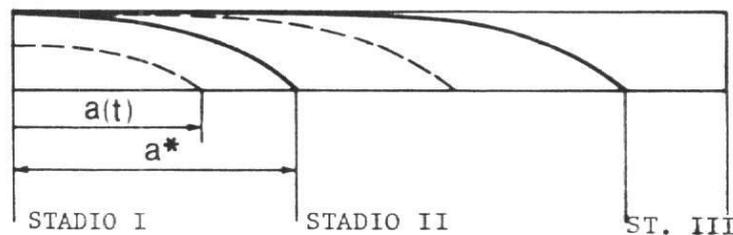


Fig. 2. Stadi di propagazione della cricca

Si può notare, inoltre, che anche lo sviluppo della cricca nella fase I può essere ricondotto ad una traslazione rigida dello stesso profilo della fase II, la qua-

le avviene con velocità costante in una direzione inclinata di pochi gradi rispetto all'asse x. Ciò nonostante, nello stadio I non è lecito affermare la stazionarietà del fenomeno di frattura poichè la forma effettiva del fronte, e quindi la distribuzione delle velocità "locali", cambia continuamente durante l'avanzamento della cricca.

Influenza della geometria. L'analisi delle deformazioni (4, 6) mostra che le variabili geometriche del provino, come pure le proprietà del materiale, modificano la forma del fronte di frattura. L'analisi cinematografica ha tuttavia messo in evidenza che la profondità della scanalatura sulla faccia inferiore,  $(B-B_c)$ , non modifica la forma, la giacitura e la direzione di traslazione del profilo geometrico (Fig. 3). La Fig. 4 mostra invece l'effetto della larghezza W e del diverso materiale sulla forma del fronte di frattura, in accordo con i risultati di altri autori (4).

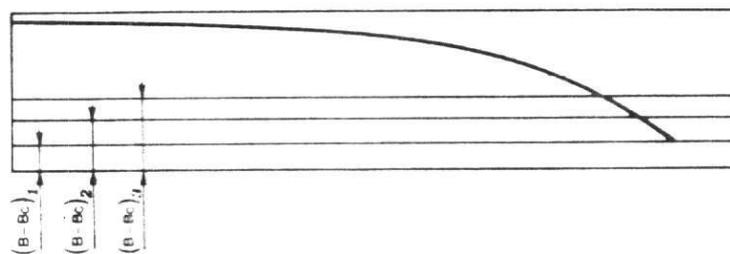


Fig. 3. Profili del fronte di frattura per diverse profondità di scanalatura.

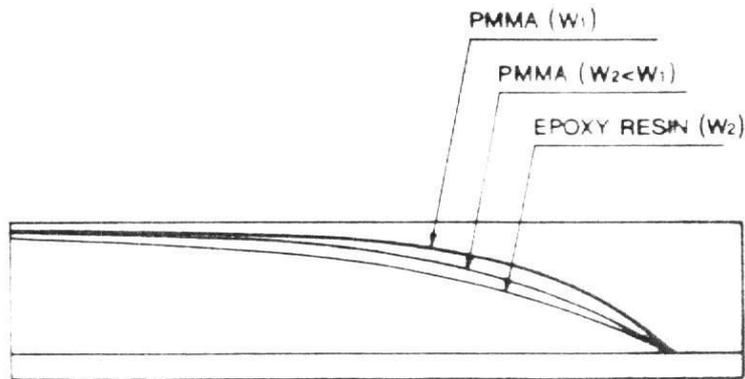


Fig. 4. Profili del fronte di frattura per differenti materiali e larghezze del provino.

#### Esame dinamico

In Fig.5 è riportato un tipico diagramma del carico in funzione del tempo, per una prova effettuata a velocità di deformazione costante: l'analisi cinematografica consente di far corrispondere a questo un diagramma dell'avanzamento (nominale) della cricca in funzione del tempo. Si osserva che, dapprima, il carico cresce linearmente finchè la cricca comincia a propagarsi (inizio dello stadio I), quindi la curva passa per un massimo e raggiunge un "plateau" (stadio II) fino alla rapida caduta in corrispondenza dello schianto (stadio III).

Peraltro, la velocità nominale della cricca,  $\dot{a}$ , diventa costante (inizio dello stadio II) prima che il carico stesso abbia raggiunto il "plateau": cioè la condizione di stazionarietà "cinematica" è raggiunta quando quella "dinamica" non è ancora soddisfatta. Questo risultato non è in contrasto con l'analisi teorica precedente (eq. 6) dalla quale appare che  $P_c$  può variare an-

che se  $\dot{a}$ ,  $\dot{x}$  e  $dC/da$  sono costanti.

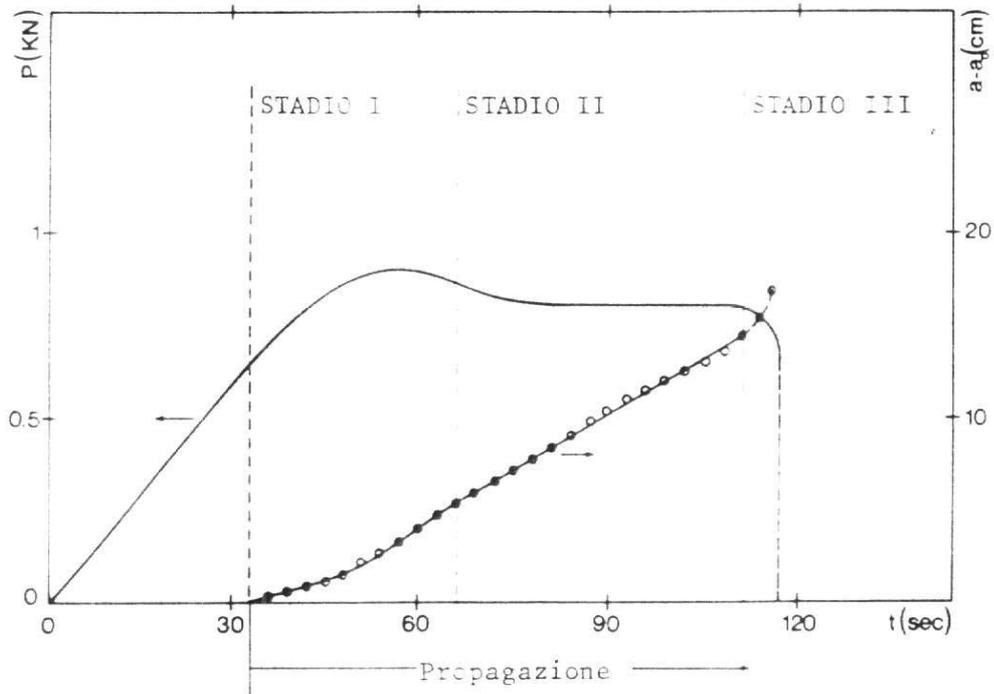


Fig. 5. Carico e lunghezza nominale di cricca in funzione del tempo durante una prova in doppia torsione (dimensioni del provino: 12 x 50 x 200 mm).

E' possibile dimostrare, però, che per materiali che presentano  $G(\dot{a})$  costante o monotonamente crescente, il carico deve raggiungere asintoticamente il suo valore di equilibrio (3).

Energia di frattura. E' possibile valutare l'energia consumata per unità di area di frattura, direttamente dalla sua definizione:

$$G_c = \frac{dU}{dA} \quad (8)$$

stabilendo una corrispondenza cronologica tra le immagini registrate dell'avanzamento della cricca durante la prova e il diagramma carico-spostamento, come mostrato in Fig. 6.

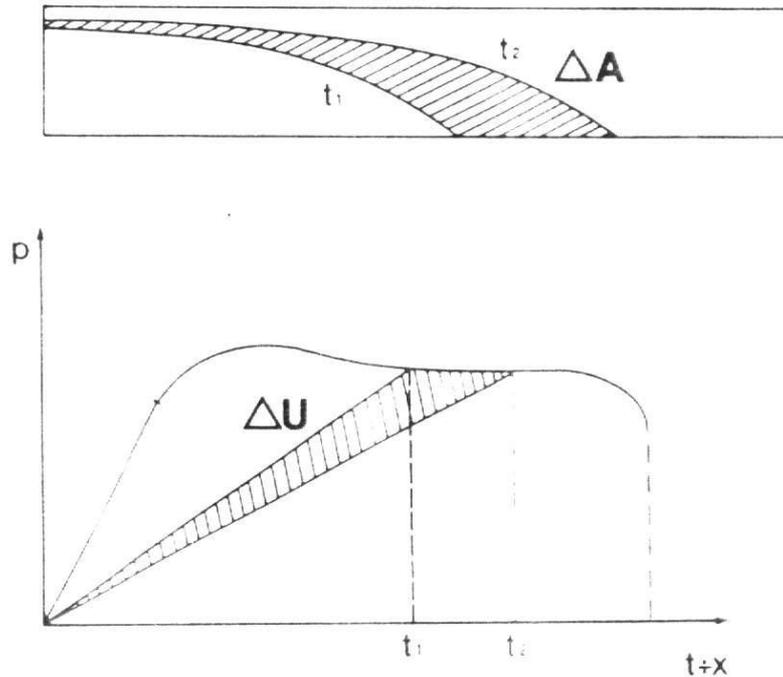


Fig. 6. Esempificazione del metodo usato per determinare l'area della superficie di frattura e l'energia di frattura.

Il valore così determinato è comunque un valore medio dell'energia assorbita non uniformemente lungo il fronte di frattura a causa della distribuzione di velocità.

Si osserva che la variazione di  $G_c$  con la lunghezza di cricca sembra riflettere quella del carico. L'analisi qui condotta consente di concludere che da un punto di vista pratico sia opportuno misurare  $G_c$  solo quando il

carico raggiunge il valore costante, cioè quando tutte le tre condizioni, statica dapprima, poi cinematica ed infine dinamica sono contemporaneamente soddisfatte. Il raggiungimento di tali condizioni può anche richiedere l'uso di provini molto lunghi.

Un confronto tra i valori ottenuti con questo metodo e quelli ottenuti con il metodo della cedevolezza (eq.5) mostrano una piccola ma sistematica differenza: per esempio  $G_c = 410 \text{ J/m}^2$  e  $G_c = 570 \text{ J/m}^2$ , rispettivamente, per un provino in PMMA. L'interpretazione di questo risultato richiede un ulteriore studio che è tuttora in fase di svolgimento.

Ringraziamenti. Questo lavoro è stato realizzato con il supporto finanziario del Progetto Finalizzato Chimica Fine e Secondaria, CNR, Roma.

## SIMBOLI USATI

- a - lunghezza nominale di cricca a partire dal piano di carico, misurata sulla faccia inferiore del provino.
- a\* - lunghezza di cricca per la transizione dallo stadio I allo stadio II (v. Fig. 2).
- $\dot{a}$  - velocità della cricca.
- A - area della superficie di frattura.
- B - spessore del provino.
- B<sub>C</sub> - spessore del provino in corrispondenza della scanalatura.
- C - cedevolezza del provino.
- C<sub>O</sub> - cedevolezza del provino per a = 0 (eq. 1).
- E - modulo di Young
- G<sub>C</sub> - tasso di rilascio dell'energia di deformazione elastica.
- l - braccio del momento torcente applicato.
- L - lunghezza del provino.
- k<sub>1</sub> - parametro geometrico.
- P<sub>C</sub> - carico critico.
- t - tempo.
- U - energia di frattura.
- x - deformazione applicata.
- $\dot{x}$  - velocità di deformazione.
- $\nu$  - coefficiente di Poisson.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., "Theory of Elasticity" Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1970.
- (2) Fuller, E.R., Jr., "Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials", ASTM STP 678, S.W.Freiman ed., 1979, pp. 3-18.
- (3) Leever, P.S., J. of Mat. Sci., vol. 17, 1982, pp. 2469-2480.
- (4) Stalder B., Kausch, H.H., J. of Mat. Sci., vol. 17, 1982, pp. 2481-2485.
- (5) Pollet, J.C., Burns, S.J., J. of Am. Cer. Soc., vol. 62, 1979, pp. 426-427.
- (6) Leever, P.S., Williams, J.G., J. of Mat. Sci., vol. 20, 1985, pp. 77-84.