

Titolo : Valutazione di J-integral in compositi polimerici antiurto per mezzo di pendoli strumentati.

G.CASTIGLIONI, L.COLOMBAROLI, T.CASIRAGHI (*)

MONTEFLUOS, Centro Ricerche

Via S. Pietro 50, 20021 Bollate MI.

SOMMARIO

E' stata valutata l'efficacia di una metodologia comparata per la determinazione della tenacità all'iniziazione e alla propagazione della fessura su diversi campioni di materiali polimerici antiurto.

La metodologia si avvale di pendoli strumentati per prove di flessione (TPB) e di trazione (DEN).

La comparazione è stata fatta mediante la determinazione dei valori di quattro parametri : J_{IC} , $dJ_T/d(W-a)$, T_M e J_T^* , dove J_{IC} rappresenta la J-integral all'iniziazione della fessura; $dJ_T/d(W-a)$ rappresenta il tasso di variazione di J-integral relativa alla fase di diffusione della fessura fino a rottura; T_M è il Tearing Modulus, infine J_T^* rappresenta un parametro empirico che consente di correlarsi con i valori classici di resistenza Izod e Charpy.

I risultati hanno mostrato che un giudizio di merito sulle qualità antiurto dei materiali è meglio supportato dall'esame comparato dell'insieme di questi parametri.

(*) Consulente Montedison, Via S. Denis 100, Sesto S.Giovanni MI.

INTRODUZIONE

In questi ultimi anni sono stati fatti notevoli sforzi per cercare di applicare i criteri della meccanica della frattura nel campo dei materiali polimerici sia tal quali che compositi.

Le principali società produttrici di questi materiali si sono mostrate, per ovvie ragioni, molto interessate nel dare uno sbocco positivo a tali sforzi.

Montedison, nelle sue diverse espressioni, ha avviato già da molti anni studi in questo senso, privilegiando in particolare gli aspetti metodologici associati con le misure di tipo impulsivo (1-3,8) ritenute le più critiche in modo particolare per i materiali antiurto.

Nell'ambito di questi studi le maggiori difficoltà sono state riscontrate nella valutazione dei materiali con basso modulo e bassa resistenza a snervamento, i quali manifestano elevate deformazioni plastiche all'apice degli intagli.

In questi casi si è soliti valutare la resistenza alla propagazione della fessura cercando di determinare sia J-integral di inizio propagazione della fessura (J_{IC}) che il tasso di variazione di J-integral nella fase di propagazione della fessura attraverso il ligament della provetta (dJ/da). Le tecniche che i caratterizzatori dei materiali polimerici hanno fin qui adottato (4-8) si riferiscono alle proposte di Begley e Landes (9), Rice (10), Ernst (11) e Paris (12). La tecnica più diffusa consiste nel sottoporre diverse provette intagliate acutamente a deformazioni crescenti e poi scaricate, dopodichè esse vengono rotte a bassa temperatura con una tecnica opportuna. La crescita della fessura è valutata osservando sulla superficie di frattura il segno lasciato dall'avanzamento lento della fessura avvenuto durante la fase di cari-

camento ed i valori di J sono calcolati mediante l'espressione di Rice, $J = 2U/B(W-a)$ per TPB, oppure $J = dU/da$. Nel presente lavoro viene proposta una tecnica differente basata su misure impulsive di flessione a tre punti (TPB) e di trazione doppio intaglio (DEN) condotte su provette aventi la profondità di intaglio variabile. La misura dei parametri J_{IC} e dJ/da è fatta considerando l'energia al carico limite e l'energia totale di rottura. La valutazione dell'efficacia della tecnica è stata svolta su sei diversi materiali antiurto commerciali alla temperatura ambiente, e su due di essi anche a diverse temperature. I risultati così ottenuti sono stati confrontati, quando è stato possibile, con quelli apparsi in letteratura.

PARTE SPERIMENTALE.

Materiali.

Sei diversi tipi di materiali antiurto commerciali sono stati esaminati. Il tipo di materiali, il contenuto di elastomero, unitamente al tipo di stampaggio e allo spessore della placchetta dalla quale sono stati ricavati i provini, sono riportati nella Tab. I.

Prove e provini.

Tutti i materiali sono stati esaminati a 23°C e solo i campioni ABS III e ATS anche a temperature comprese tra -60°C e 60°C.

I valori di modulo elastico (E) e di sollecitazione a snervamento (σ_y) sono stati determinati a trazione rispettivamente con il metodo del rimbalzo (13,14) alla velocità di 0.1 m/s e per urto secondo il metodo ASTM D 1822/S modificato (14) alla velocità di 2 m/s.

Le prove di meccanica della frattura sono state condotte secondo due metodologie: flessione TPB e trazione DEN. La velocità di prova era di 1 m/s. L'esame è stato svolto su provini aventi profondità di intaglio variabile per entrambi i due tipi di provette tra 0.5 - 0.8 a/W e 2a/W.

Gli intagli sono stati eseguiti in due tempi, prima con fresa circolare di spessore 0.5 mm e profilo di taglio arrotondato, poi acutizzati con una lametta da barba per una profondità di circa 0.2 mm.

RISULTATI

Modulo elastico (E) e carico di snervamento (σ_y).

Nelle Tab. I e II sono raccolti i valori di ogni campione. Questi valori, determinati a velocità di prova dello stesso ordine di grandezza di quella di meccanica della frattura, sono stati poi usati per calcolare i valori di Tearing Modulus.

Meccanica della frattura. TPB e DEN.

I valori di J-integral sono stati determinati elaborando i dati ricavabili dalle curve sperimentali simili a quelle illustrate nelle Fig. 1 e 2. Le curve di Fig. 1 riguardano le prove TPB e DEN condotte a 23°C, e si riferiscono ai campioni ABS III e ATS. Quelle di Fig. 2 riguardano gli stessi campioni, ma si riferiscono alle sole prove DEN condotte però a diverse temperature. Tutti i risultati sono raccolti nelle Tab. I e II.

Procedure di elaborazione dei dati di meccanica della frattura.

J-integral di iniziazione della fessura J_{IC} .

I valori di questo parametro sono stati calcolati sulla base dell'energia al carico massimo (U_L), in accordo con il prin-

cipio di Begley e Landes (9):

$$J_{IC} = \frac{\Delta U_L}{B \Delta(W-a)} \quad \left| \quad \delta_L = \text{costante} \right.$$

dove B è lo spessore del provino.

Per le prove TPB la costanza dello spostamento al carico massimo risulta come fatto sperimentale (ved. Fig. 1a e 1c), ma non per le prove DEN (ved. Fig. 1b e 1d). Per le prove DEN la condizione di isospostamento è stata ottenuta svolgendo opportune operazioni di normalizzazione nel modo indicato nell'Appendice A.

Nella Fig. 3 sono riportati, per tutti i campioni esaminati alla temperatura di 23°C, i diagrammi dei valori di U_L/B per TPB e U_L''/B per DEN in funzione della profondità dell'intaglio. Dalla pendenza delle rette, determinata con il metodo dei minimi quadrati, sono stati ricavati i valori di J_{IC} , questi sono riportati nella Tab. I; si osserva che essi sono praticamente indipendenti dal tipo di provetta usata.

I valori ottenuti sono dello stesso ordine di grandezza di quelli misurati da Riccò e altri (16).

Il valore di J_{IC} sembra dipendere sia dal tipo di matrice che dal tipo di elastomero (nel caso di ABS e ATS le matrici sono identiche ma non l'elastomero disperso).

J-integral di rottura, J_T , $dJ_T/d(W-a)$ e J_T^*

L'energia spesa per propagare la fessura fino alla separazione completa della provetta in due metà può essere utilizzata per calcolare il valore di J-integral di propagazione, solo quando la rottura è di tipo stabile.

L'energia a rottura, normalizzata rispetto allo spessore (U_T/B), è stata utilizzata sia per il calcolo di J_T che rappresenta

la variazione di J-integral al variare della profondità della fessura. Dall'andamento di J_T al variare della dimensione del ligament è stato poi calcolato il tasso di variazione di energia specifica $dJ_T/d(W-a)$. Dall'energia totale normalizzata U_T/B è stato eseguito poi il calcolo di un'altra proprietà, indicata come J_T^* , della quale si parlerà in seguito.

La valutazione di J_T è lecita solo se la forma del tracciato forza-spostamento è simile per tutte le provette, indipendentemente dalla profondità dell'intaglio iniziale. Ciò è in accordo con le ipotesi di Martinelli e altri (15). La normalizzazione è risultata possibile per tutti i materiali esaminati. Nella Fig. 4 sono mostrati due esempi riguardanti le prove TPB e DEN per il campione ABS III. Nelle stesse figure sono riportati gli andamenti dei fattori di normalizzazione del carico (R_p) e dello spostamento (R_s).

Per le prove TPB la normalizzazione riguarda solo il carico, poichè lo spostamento risulta praticamente indipendente dalla profondità dell'intaglio iniziale; per le prove DEN la normalizzazione riguarda sia il carico che lo spostamento. È risultato che il fattore di normalizzazione è uguale per carico e spostamento.

Si è quindi proceduto al calcolo di J_T e di $dJ_T/d(W-a)$. Imponendo la condizione che per dimensione nulla del ligament deve essere nulla anche l'energia si è osservato che i punti sperimentali sono ben descritti da un'equazione di secondo grado (Fig. 5). I parametri della stessa sono stati determinati mediante regressione di secondo ordine. Si ottiene quindi l'importante risultato che per l'intervallo di profondità d'intaglio considerato $dJ_T/d(W-a)$ è indipendente da $(W-a)$ e $(W-2a)$. I valori calcolati sono riportati nella Tab. I.

Un secondo metodo, meno rigoroso, ma certamente efficace di valutare le proprietà di resistenza dei materiali a frattura tenace, è quello di valutare il valore di J_T entro un range prefissato di profondità di intaglio normalizzato. Esso viene qui indicato come J_T^* . Si richiede anche in tal caso che valga la similitudine delle curve carico-spostamento. Esso può venire misurato in termini di pendenza media efficace nell'intorno del range di profondità di intaglio prescelto (nel presente caso i limiti prescelti sono $0.5-0.8 a/W$ e $2a/W$).

Un esempio del procedimento è illustrato nella Fig. 6: le pendenze sono state misurate mediante regressione lineare ed i risultati sono riportati nella Tab. I.

Tearing Modulus - T_M

Disponendo dei valori di E e σ_y , determinati a velocità di prova dello stesso ordine di grandezza delle misure di meccanica della frattura, è possibile ottenere i corrispondenti valori di Tearing Modulus:

$$T_M = \frac{dJ_T}{d(W-a)} \quad \frac{E}{\sigma_y^2}$$

Variatione delle proprietà dei materiali con la temperatura.

Nella Fig. 7 è illustrato l'andamento dei valori di J_{IC} , J_T^* , $dJ_T/d(W-2a)$ e T_M in funzione della temperatura relativamente alle prove DEN.

I valori di J_{IC} dell'ATS incrementano da 60° a 40°C , rimangono costanti tra 40° e -20° per poi decrescere rapidamente a -40°C ; quelli dell'ABS III rimangono anch'essi costanti tra 40°C e 0° , (questo andamento si accorda bene con quello

trovato da Riccò e altri (16) su ABS utilizzando un'altra tecnica e a velocità di tre ordini di grandezza inferiore). A -20°C , a differenza dell'ATS, i valori incrementano sensibilmente fino a -40°C , per poi decrescere a -60°C (questo andamento è in accordo con quello trovato da Sridharan et al. (17)). Nella stessa figura è illustrato l'andamento di J_T^* per ABS e ATS. Nel primo caso J_T^* risulta essere praticamente indipendente dalla temperatura, mentre nel secondo caso sembra che J_T^* passi attraverso un massimo non molto pronunciato. Un andamento del tutto simile è espresso dai valori di $dJ_T/d(W-2a)$. Questo risultato, a prescindere dai valori assoluti conferma la validità dell'assunto fatto in precedenza sulla significatività di J_T^* . Infine anche la variazione dei valori di T_m segue un andamento simile a quello delle due proprietà appena descritte. Le differenze più evidenti che risultano dal confronto dei parametri determinati con queste prove sono: da un lato l'ABS manifesta in generale una minore resistenza alla propagazione della fessura, dall'altro lato esso mostra una temperatura di transizione del processo di propagazione della fessura da stabile ad instabile inferiore di circa 40°C rispetto a quella dell'ATS. Ciò è da attribuire al diverso tipo di elastomero disperso nella matrice.

COMMENTO E CONCLUSIONI

Con questo lavoro si è voluto mostrare che è possibile valutare la tenacità dei materiali polimerici con bassi valori di modulo e di resistenza a snervamento adottando i criteri della meccanica della frattura in condizioni di snervamento diffuso mediante misure impulsive condotte su pendoli strumentati.

E' stato eseguito inoltre un confronto fra i dati di J_{IC} , J_T^* , $dJ_T/d(W-a)$ e T_M ottenuti su provini TPB e DEN.

Si è mostrato che le curve sperimentali carico-spostamento così ottenute risultano simili per le diverse profondità di intaglio e tali da consentire una loro normalizzazione; sono così attendibili i calcoli per la determinazione dei parametri sopra citati.

Il confronto tra le misure TPB e DEN ha mostrato che i valori di J_{IC} , in rapporto alle condizioni operative qui adottate, risultano indipendenti dalla geometria della provetta; non altrettanto succede per il parametro J_T^* , dove i valori derivati dalla prova DEN risultano sensibilmente superiori a quelli della prova TPB. Ciò dipende molto probabilmente, oltre che dalla dimensione delle provette, dal differente modello tensionale che nel caso della provetta DEN risulta più efficace nel diffondere il cedimento per craze anche in luoghi relativamente lontani dalle superfici di frattura.

L'indipendenza dal tipo di provetta è stata invece verificata anche per i parametri $dJ_T/d(W-a)$ e T_M , anche se in questi casi si nota una maggiore dispersione dei valori.

Il confronto tra i campioni di ABS, diversi tra di loro per contenuto di elastomero, ha mostrato che i valori di J_{IC} , J_T^* , $dJ_T/d(W-a)$ e T_M non presentano grandi variazioni per contenuti di elastomero tra il 17% e il 26%. Questo risultato è in accordo con gli andamenti trovati da Riccò e altri (16) con una diversa tecnica di misura e a basse velocità di prova.

I valori di J_{IC} ottenuti in questo lavoro risultano leggermente superiori in modo particolare alle basse temperature di prova; ciò può dipendere dalla variazione di σ_y per effetto della velocità di prova.

Un altro evidente effetto della velocità di prova è osservabile in termini di transizione fragile-duttile. Nel caso del lavoro citato la transizione sembra essere inferiore a -70°C per velocità di prova di 5 mm/min. , mentre nel caso di prove impulsive si osserva il passaggio da propagazione stabile a propagazione instabile a circa -40°C .

Infine da questo lavoro si può trarre un'importante conclusione in merito alla tecnica di misura adottata. Essa è risultata semplice, rapida e affidabile e tale da poter essere adottata da qualunque laboratorio con un minimo di apparecchiature strumentate.

La sperimentazione condotta per anni nel nostro laboratorio ha mostrato che la caratterizzazione di un prodotto secondo questa tecnica può essere svolta in tempi brevi compatibili con le esigenze industriali (2 o 3 ore).

Nel presente lavoro non è stato considerato il problema delle dimensioni delle provette secondo le indicazioni comprese nella norma ASTM E 399. Riteniamo che questo argomento, della massima importanza da un punto di vista metodologico, vada affrontato tenendo conto di altre considerazioni pratiche come quella che generalmente gli oggetti prodotti con materiale polimerico hanno spessori che non superano i 5 mm.

BIBLIOGRAFIA

1. T.CASIRAGHI, Pol. Eng. Sci. 18 (1978) 833.
2. T.CASIRAGHI, A.SAVADORI, Plastic & Rubber, Mat. & Appl. February (1980) p1.
- 3a. T.CASIRAGHI, G.CASTIGLIONI, T.RONCHETTI, Atti della III Giornata della Chimica Montedison, pag. 112, 22 genn. 1985.
- 3b. idem, presentato per la pubblicazione a J.Mat. Sci.
4. J.G.WILLIAMS, S.HASHEMI, Int. Conf. Toughening of Plastics II 2-4 July 1985 London, 13
5. J.M.HODKINSON, J.G.WILLIAMS, J.Mat. Sci. 16 (1981) 50.
6. S.HASHEMI, J.G.WILLIAMS, Polimer, 27 (1986) 384.
7. T.RICCO, M.RINK, A.PAVAN, Congresso di Reologia, Settembre 1980 Napoli.
8. A.SAVADORI, M.BRAMUZZO, C.MAREGA, Polymer Testing, 4, N°1 (1984) 73.
9. J.A.BEGLEY, J.D.LANDES, ASTM STP 514 (1972) 1.
10. J.R.RICE, P.C.PARIS, J.G.MERKLE, ASTM STP 536 (1973) 231.
11. H.A.ERNST, P.C.PARIS, J.D.LANDES, ASTM STP 743 (1981) 476.
12. P.C.PARIS, H.TADA, H.ZAHOOR, H.ERNST, ASTM STP 668 (1979) 5.
13. T.CASIRAGHI, Pol. Eng. Sci. 23 (1983) 902.
14. Raccolta metodi interni Montedison CRS Bollate.
15. A.MARTINELLI, E.MONTI, S.VENZI. Paper presented at the 11th Plenary Meeting of European Group of Fracture, May 30-31 1985, Milan.
16. T.RICCO, M.RINK, S.CAPORUSSO, A.PAVAN, Conf. Inter. of Toughening of Plastics II, 2-4 July 1985 London.
17. N.S.SRIDHARAN, L.J.BROUTMAN, Conf. Inter. of Toughening of Plastics, 4-6 July, 1978, London.

PROPRIETA' (A)	UNITA' DI MISURA	ABS I	ABS II	ABS III	ATS	PP COP.	PMMA AR
<u>Contenuto di elastor.</u>	%	17	20	25.6	26	22	18
<u>Tipo di stampaggio</u>		compres.	compres.	compres.	iniezione	iniezione	compres.
<u>Spessore provini</u>	mm	3	3	3	3	3	3
<u>Modulo elastico (E)</u>	MNm ⁻²	2400	1980	1770	1950	1600	2550
<u>Sollecitaz. snerv.(C)</u>	MNm ⁻²	60	52	50	60	44	74
<u>Meccanica frattura(D)</u>							
<u>TPB</u>							
- J _{IC}	KJm ⁻²	6.2	5.8	6.1	8.5	5.5	3.5
- J _T *	KJm ⁻²	16.3	17.3	18.5	37.5	33.0	5.3
- dJ _T / d(w-a)	MNm ⁻²	5.5	5.4	6.0	16.6	15.3	1.1
- T _r		3.7	3.9	4.2	9.0	12.6	0.5
<u>DEN</u>							
- J _{IC}	KJm ⁻²	6.0	5.5	5.4	9.0	5.5	3.5
- J _T *	KJm ⁻²	46.0	40.2	37.1	69.0	44.8	instab.
- dJ _T / d(w-2a)	MNm ⁻²	6.8	5.0	5.2	13.6	9.4	instab.
- T _r		4.5	3.7	6.6	7.3	7.7	instab.

(A) Tutte le prove sono state svolte a 23°C.

(B) Modulo elastico rimbalzo svolto secondo metodo Montedison (13,14), $V_0 = 0.2$ m/s.

(C) Urto a trazione svolto secondo metodo ASTM D 1822 modificato (14), $V_0 = 2$ m/s.

(D) Ved. testo, $V_0 = 1$ m/s.

TAB. I - Valori di modulo elastico a rimbalzo, sollecitazione a snervamento e parametri della meccanica della frattura di diversi campioni antiurto commerciali.

PROPRIETA'	UNITA' DI MISURA	ABS III						ATS											
		-40°C		-20°C		0°C		-40°C		-20°C		0°C		23°C		40°C		60°C	
		-60°C	-40°C	-20°C	0°C	23°C	40°C	-40°C	-20°C	0°C	23°C	40°C	60°C	-40°C	-20°C	0°C	23°C	40°C	60°C
<u>Modulo elastico</u> (A)	MNm ⁻²	-	2050	1920	1830	1770	1650	2270	2170	2050	1950	1850	1750	2270	2170	2050	1950	1850	1750
<u>Sollecitaz. snerv.</u> (B)	MNm ⁻²	-	77	65	57	50	49	95	80.5	70	60	55	51	95	80.5	70	60	55	51
<u>Meccanica frattura</u> (C)																			
<u>DEFN</u>																			
- J _{1C}	kNm ⁻²	2.7	1.3	10.0	9.2	9.4	9.0	1.6	7.0	7.5	8.5	7.0	4.8	1.6	7.0	7.5	8.5	7.0	4.8
- J _T *	kNm ⁻²	instab.	instab.	55.0	51.2	57.1	56.8	instab.	instab.	instab.	69	71	62	instab.	instab.	instab.	69	71	62
- dJ _T /d(W-2a)	MNm ⁻²	instab.	instab.	8.2	8.2	8.2	8.2	instab.	instab.	instab.	13.6	16.1	11.8	instab.	instab.	instab.	13.6	16.1	11.8
- T _M		instab.	instab.	4.2	3.5	6.3	5.1	instab.	instab.	instab.	7.3	9.8	7.9	instab.	instab.	instab.	7.3	9.8	7.9

(A) Modulo elastico rimbazzo, metodo Montedison (13,14), $V_0 = 0.2$ m/s.

(B) Urto a trazione, metodo AGTE modificato (14), $V_0 = 2$ m/s.

(C) Ved. testo, $V_0 = 1$ m/s.

TAB. II - Valori di modulo elastico, sollecitazione a snervamento e parametri della meccanica della frattura DEN di due materiali antiurto in funzione della temperatura di prova.

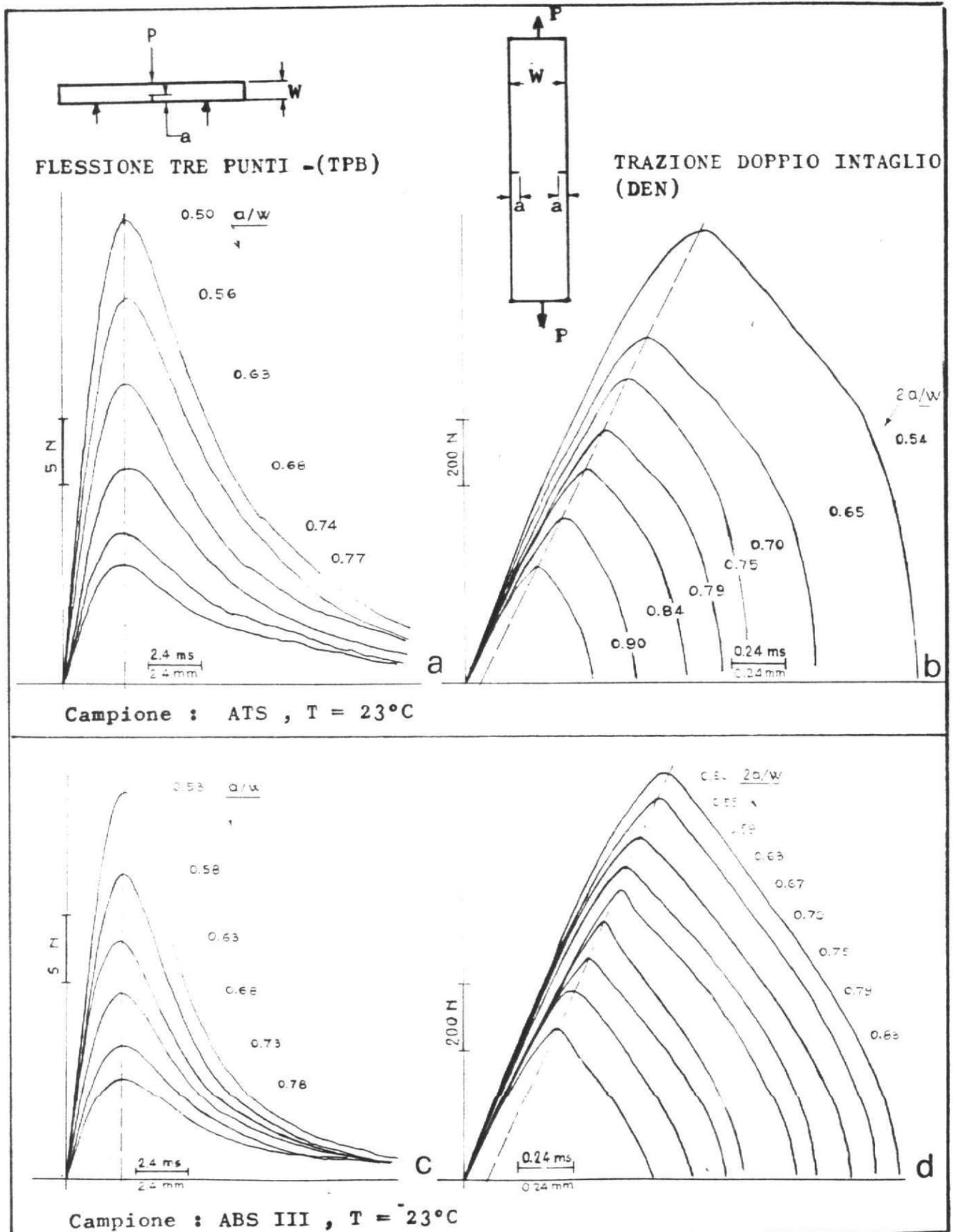


Fig. 1 - Meccanica della frattura. Curve sperimentali forza-tempo (e spostamento) per provini TPB e DEN di due materiali

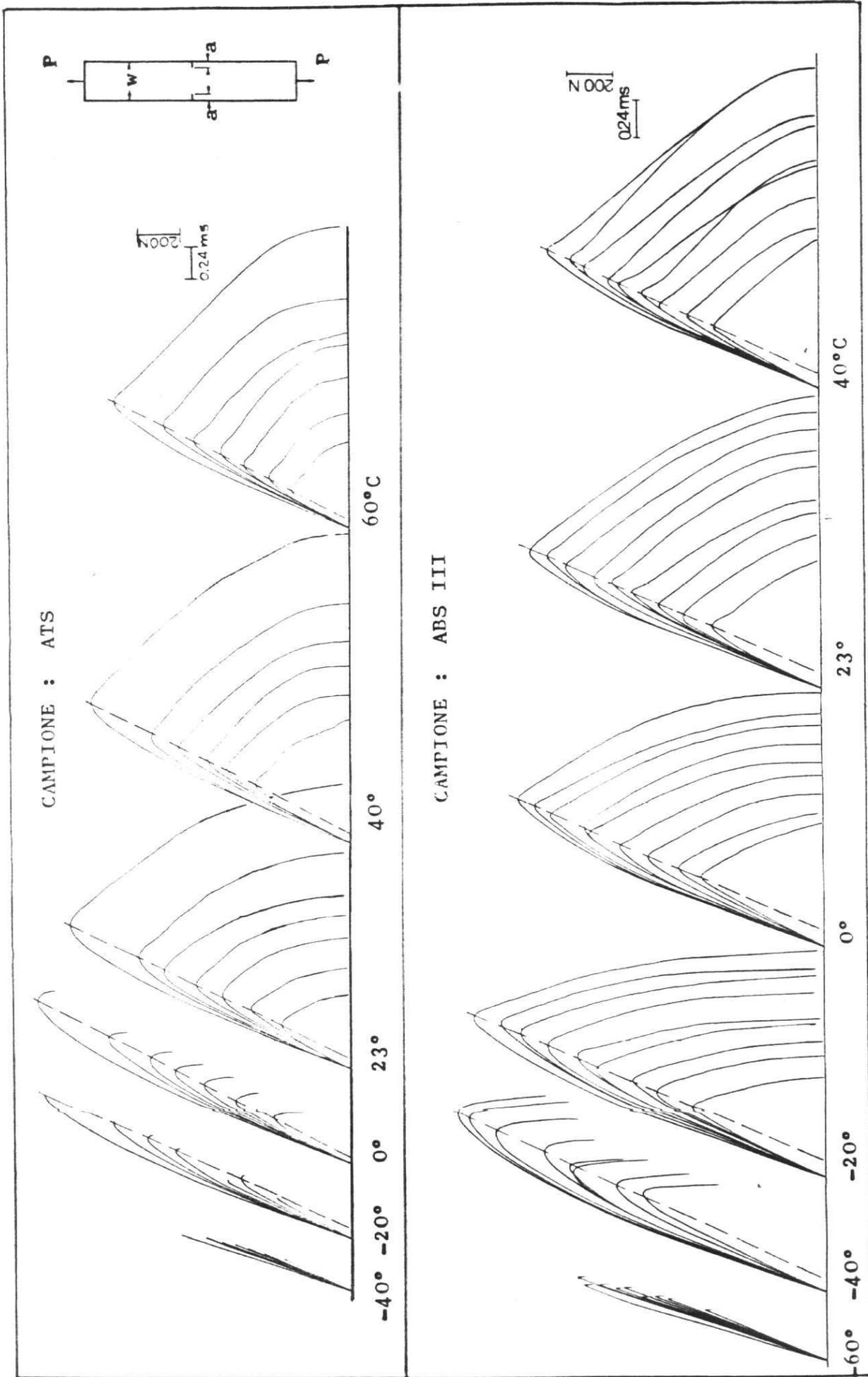


Fig. 2 - Meccanica della frattura DEN. Curve sperimentali forza-tempo (e spostamento) di due diversi materiali per provini tipo DEN aventi profondità di intaglio variabile tra $0.5 - 0.8 a/w$, e per diverse temperature di prova.

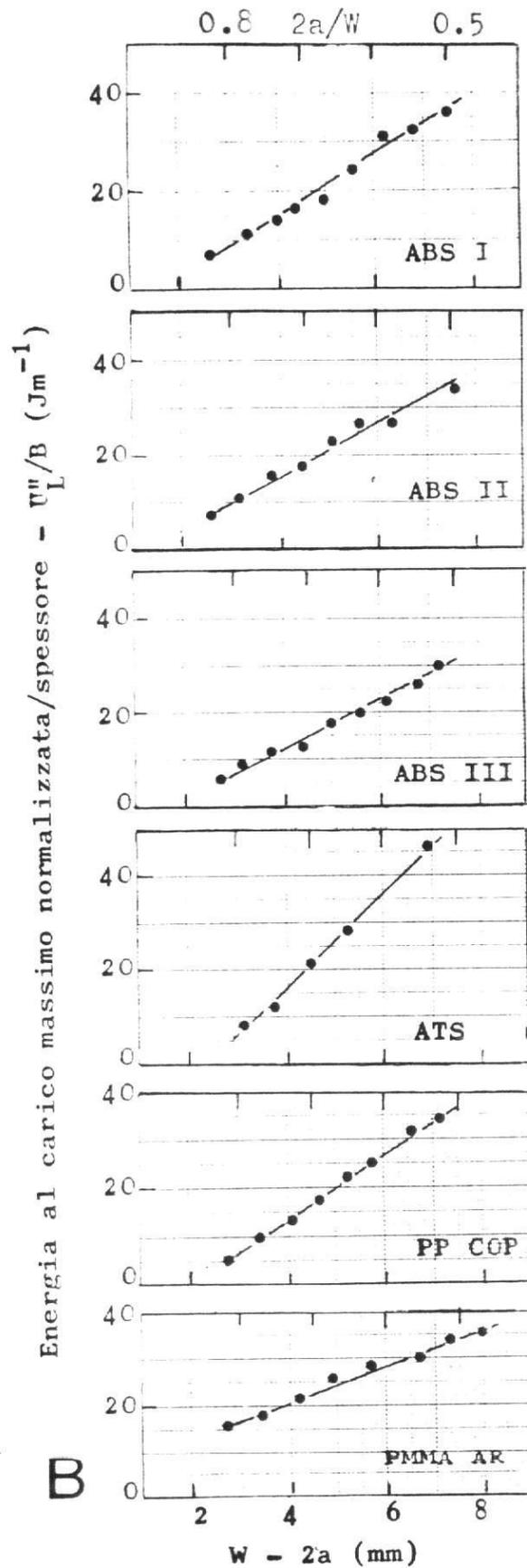
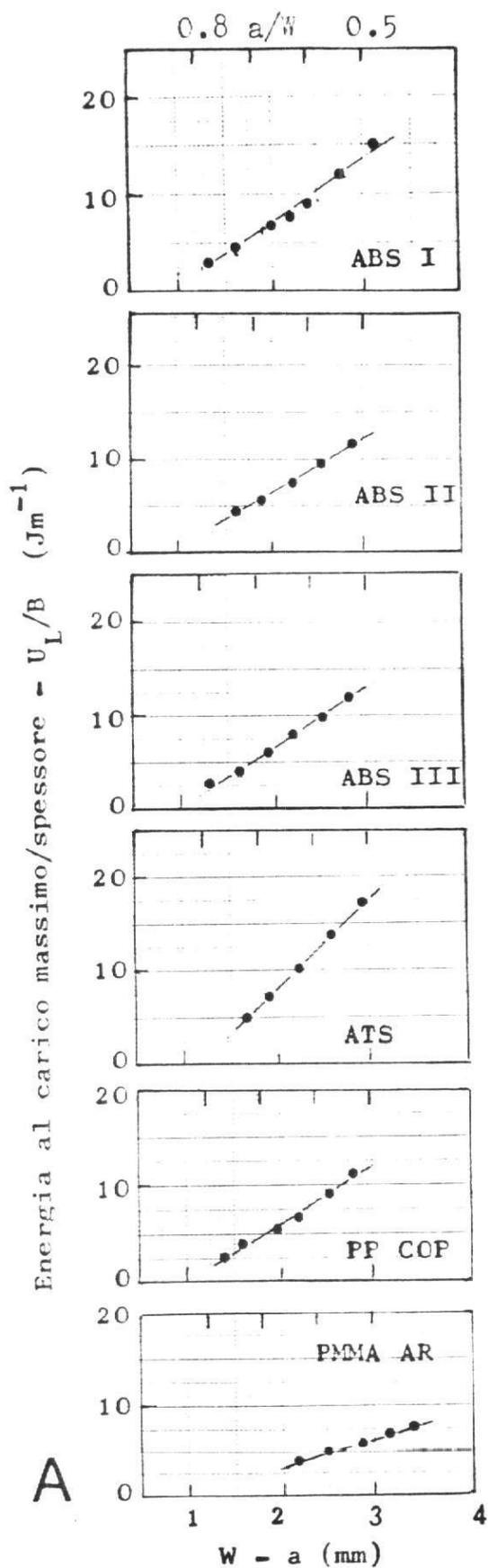


Fig. 3 - Meccanica della frattura A) TPB, B) DEN. Valori di U_L/B vs. $W-a$ e di U_L''/B vs. $W-2a$ rilevati in corrispondenza del carico massimo, mediante i quali sono stati calcolati i valori di J_{IC} dalla pendenza delle rette.

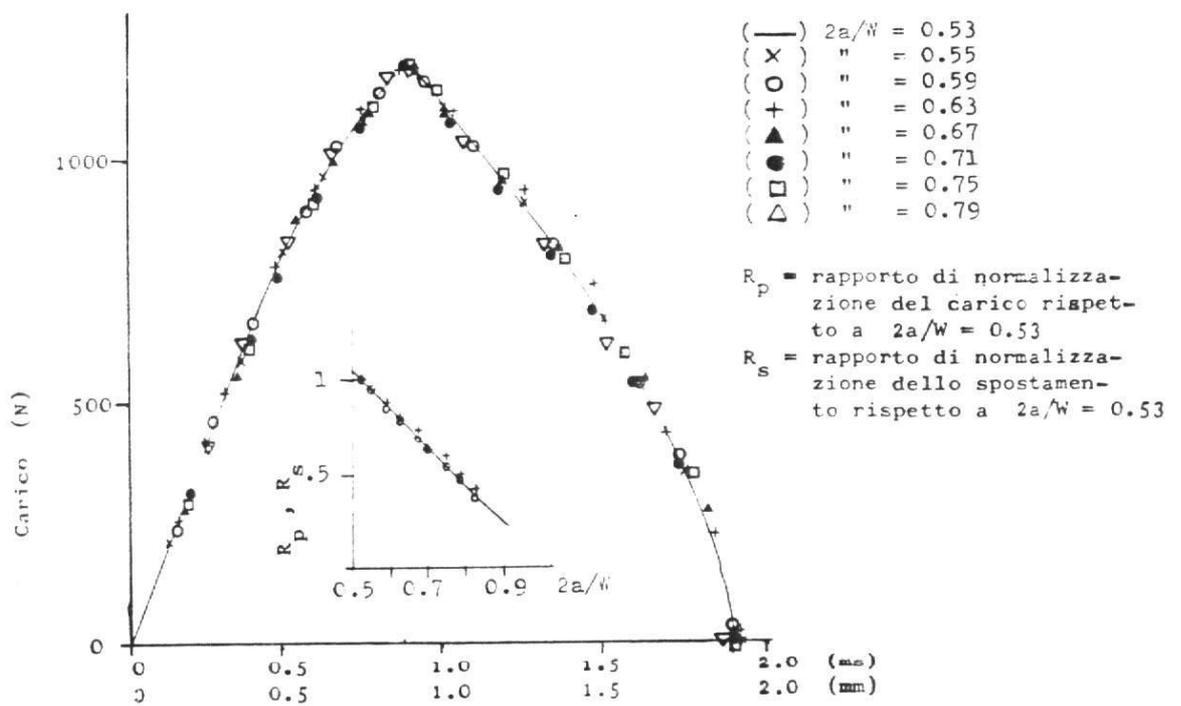
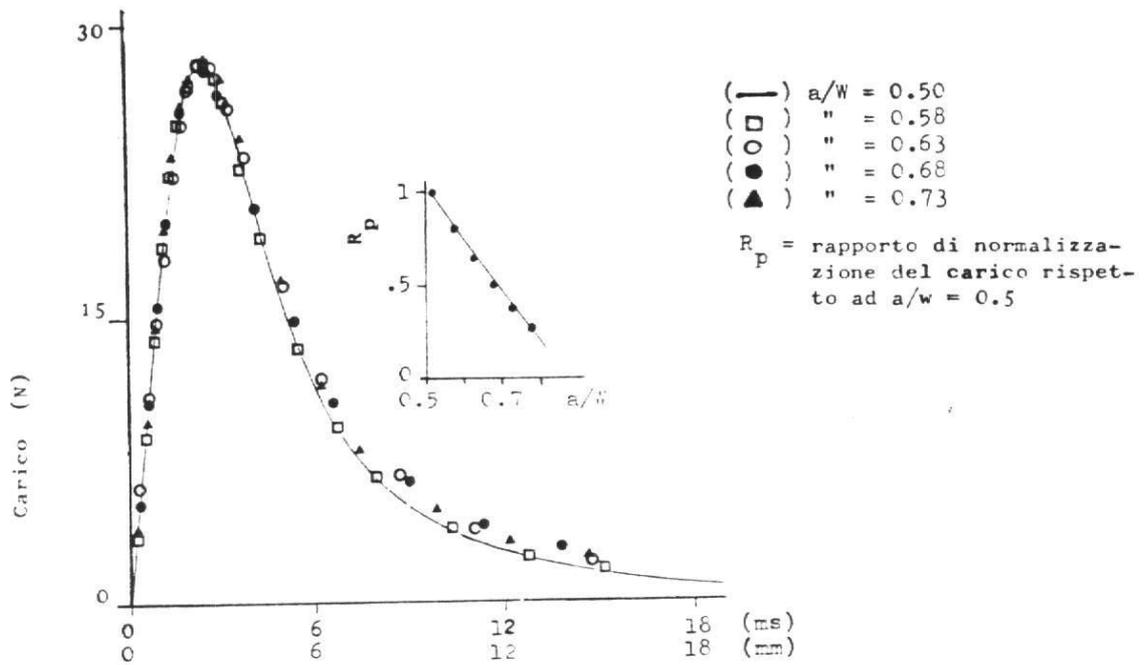


Fig. 4 - Meccanica della frattura A) TPE, B) DEN.

Verifica sperimentale della similitudine delle curve carico-spostamento.

L'esempio qui riportato riguarda le curve del campione ABS III (ved. Fig. 1).

Accanto alle curve normalizzate sono diagrammati i fattori di normalizzazione vs. profondità di intaglio.

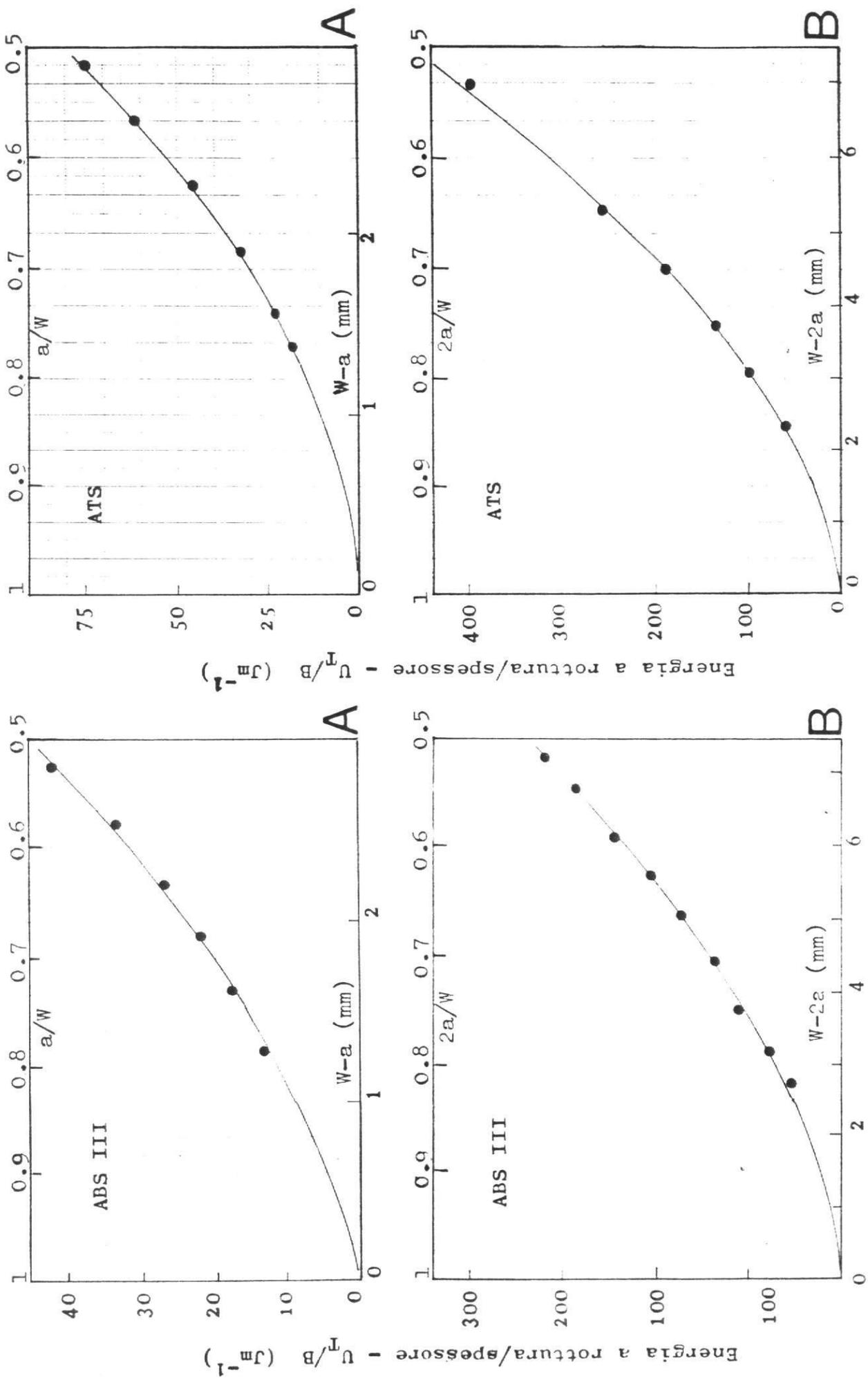


Fig. 5 - Meccanica della frattura A) TPB, B) DEN. (●) Valori di energia a rottura vs. ligament di due materiali e (—) curva di regressione quadratica secondo l'espressione $y = a + bx + cx^2$ mediante la quale sono stati calcolati i valori di $dJ_T / d(W-a)$

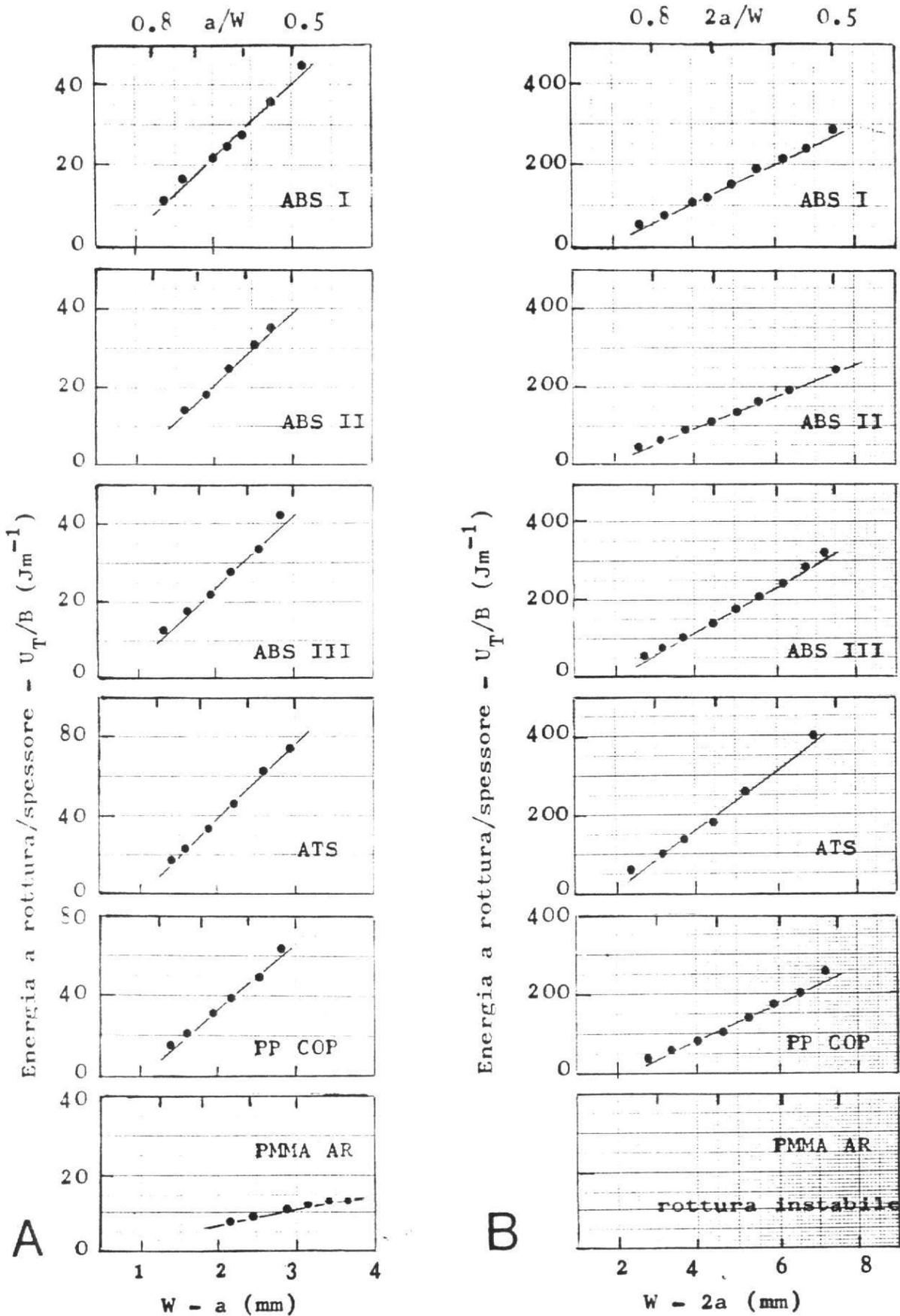


Fig. 6 - Meccanica della frattura A) TPB, B) DEN. Valori di U_T/B vs. $(W-a)$ e $(W-2a)$ rilevati in corrispondenza della rottura completa dei provini, mediante i quali sono stati calcolati i valori di J_{T1}^* dalla pendenza delle rette.

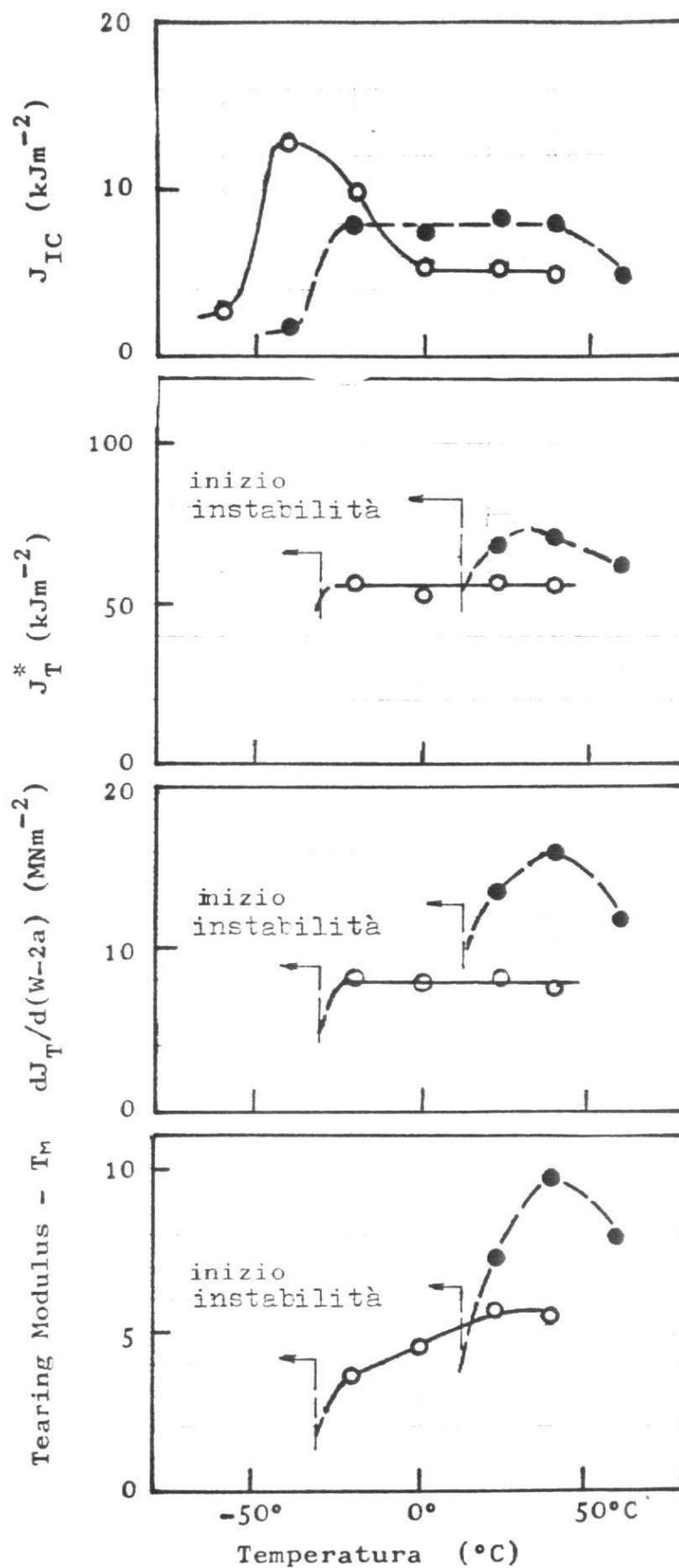


Fig. 7 - Meccanica della frattura DEN. Valori di J_{IC} , J_T^* , $dJ_T/d(W-a)$ e T_m vs. temperatura di prova per due materiali: (o) ABS III, (●) ATS.

APPENDICE A

Valutazione J-integral di iniziazione della fessura (J_{IC}) su provette tipo DEN.

J_{IC} può essere valutata sulla base del criterio indicato da Begley e Landes dai valori di energia al carico massimo (U_L) normalizzata allo spessore (B) in modo tale che sia rispettata la condizione di spostamento costante (δ_c) per tutti i provini aventi profondità di intaglio (a) variabile :

$$J_{IC} = \frac{\Delta U_L}{B \Delta 2a} \quad \left| \quad \delta_c = \text{costante} \right.$$

Poichè la condizione di spostamento costante non è verificata per i provini DEN è stato necessario svolgere alcune operazioni di normalizzazione.

E' mostrato qui di seguito una procedura grafica di normalizzazione riguardante un caso di rottura lineare elastico. Le stesse considerazioni sono risultate valide anche per i casi di deformazione elasto-plastica.

Si assuma di conoscere di un materiale - il cui comportamento sia di tipo lineare elastico fino a rottura - i valori di modulo elastico, di K_{IC} , di G_{IC} e dei fattori di forma Y e ϕ per le diverse profondità di intaglio. Note le dimensioni dei provini e le condizioni di prova è facile determinare per le diverse profondità di intaglio i corrispondenti valori di carico, di spostamento e di energia a rottura.

Siano le proprietà del materiale:

- E = 4000 MNm⁻²
- K_{IC} = 2.0 MNm^{-3/2}
- G_{IC} = 1.0 kJm⁻²

Se noti i fattori di forma Y e ϕ e le dimensioni dei provini, P e V
I valori di forza, spostamento ed energia si ricavano dalle

seguenti equazioni :

$$F_L = \frac{B W K_{IC}}{Y \sqrt{a}}$$

$$\delta_L = \frac{2 \phi Y \sqrt{a} K_{IC}}{E}$$

$$U_L = \frac{B W \phi K_{IC}^2}{E}$$

Nella Fig.1A sono riportate le curve teoriche di forza-spostamento ed i diagrammi dei corrispondenti valori di F_L , δ_L e U_L vs. $2a$, dove si osserva che sia il carico che lo spostamento a rottura variano linearmente nel tratto di profondità di intaglio normalizzato ($2a/W$) compreso tra 0.5 e 0.8.

Se ora si congiungono i punti corrispondenti al carico massimo dei provini aventi gli intagli compresi nel tratto indicato (ved. Fig. 1A/a), le aree sottese dai tracciati carico-spostamento risultano divise in due parti:

- le aree OAB aventi come base δ_c che risulta costante con il variare delle profondità di intaglio;
- le aree BAC aventi come base $(\delta_L - \delta_c)$ variabili con la profondità degli intagli.

Si può pensare che lo spostamento costante δ_c (entro gli intagli compresi tra 0.5 e 0.8) sia rappresentativo dello spostamento locale che compete al tratto di provino interessato al doppio intaglio. Se l'ipotesi fatta è corretta è possibile ora applicare il criterio di Begley e Landes per calcolare J_{IC} dai tracciati forza-spostamento in condizioni di isospostamento δ_c .

Tenendo conto di quanto detto sopra, l'energia (U'') riguardante la condizione di isospostamento può essere ottenuta dal-

la equazione :

$$OAB = U'' = U_L - \frac{1}{2} F_L (\sigma_L - \sigma_c)$$

La fig. 1A/c mostra l'andamento di U''/B in funzione della profondità di intaglio imposta. Il valore di G_{IC} si determina valutando l'inclinazione del tratto lineare del diagramma. Come volevasi dimostrare il valore di G_{IC} risulta uguale a quello imposto.

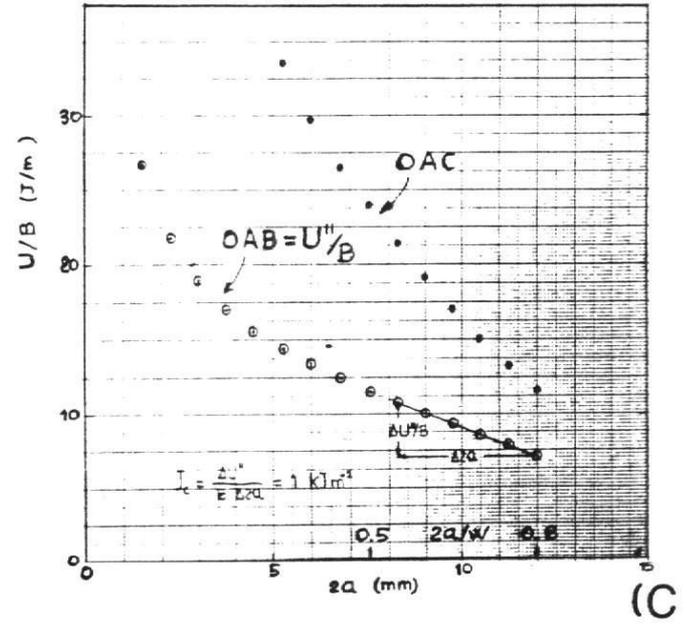
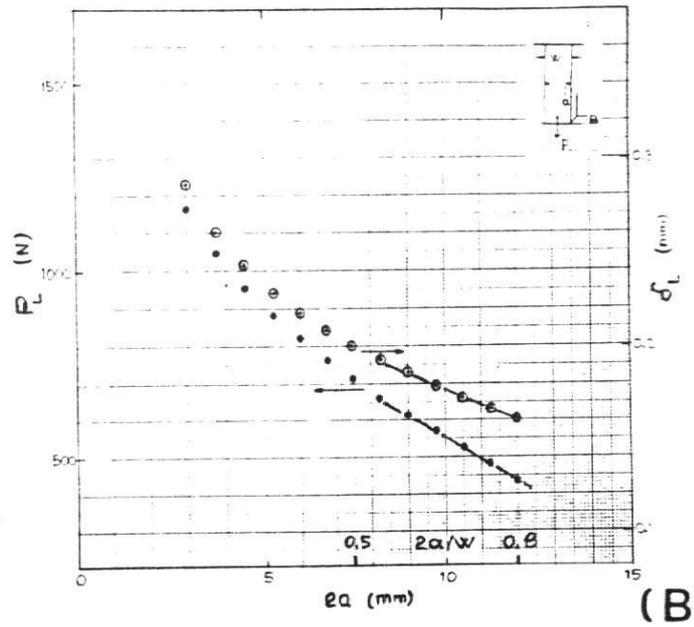
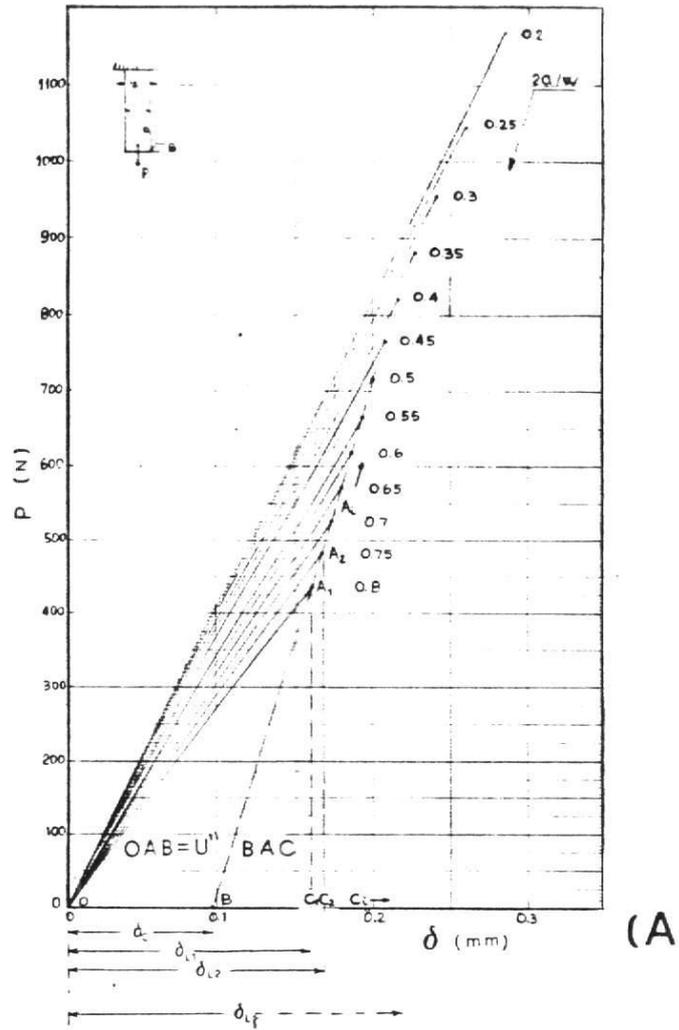


Fig. 1A - Meccanica della frattura DEN. A) Curve teoriche di forza-spostamento di rotture lineari elastiche, comprendenti l'indicazione grafica per l'ottenimento di U'' da U_L e per la determinazione di σ_c ; B) diagramma illustrante la variazione lineare di P_L e σ_L nel tratto di profondità di intaglio compreso tra 0.5 e 0.8 $2a/W$; C) diagramma illustrante la variazione di U''/B nel tratto di $2a/W$ compreso tra 0.5 e 0.8, la pendenza della retta è uguale a J_{IC} .