

## CONFRONTO TRA RETTE DI BLUNTING SPERIMENTALI E TEORICHE SU ACCIAIO PER VESSEL A533B CLASSE 1

C.Rinaldi, E.Lucon, V.Bicego - CISE SpA, Milano

### RIASSUNTO

L'individuazione della linea di blunting costituisce un aspetto tutt'altro che secondario nell'ambito di una prova di Meccanica della Frattura, dal momento che la maggior parte delle normative definisce i parametri critici del materiale all'intersezione di tale linea, o di una parallela ad essa, con la curva di regressione dei dati sperimentali. L'alternativa che si presenta allo sperimentatore consiste nello scegliere tra la determinazione sperimentale della linea di blunting attraverso misure costose e assai delicate, e il tracciamento della stessa in base ad una delle equazioni teoriche (del tipo  $J = m \cdot \Delta a$ ) proposte dalle diverse normative. Presso il Laboratorio Materiali del CISE e' in corso un'attivita' di determinazione sperimentale della linea di blunting attraverso misure al SEM della zona di stiramento all'apice della cricca (Stretch Zone Width). E' stata condotta una serie di prove di integrale-J su campioni di acciaio A533B cl.1 a temperatura ambiente, interrompendo le prove in fase di blunting; successivamente e' stata misurata la SZW sui campioni rotti e su repliche ottenute, sotto carico, mediante infiltrazione con gomme siliconiche. Viene presentato il confronto tra le rette di blunting ottenute in tal modo (sia "on load" sia "off load") e quelle teoriche proposte dalle diverse normative. Le misure di SZW sono state condotte secondo quanto previsto dalla proposta di normativa EGF, avendo tuttavia cura di non includere tra le posizioni di misura punti anomali della zona di stiramento.

# CONFRONTO FRA RETTE DI BLUNTING SPERIMENTALI E ANALITICHE SU UN ACCIAIO PER VESSEL

C.Rinaldi, E.Lucon, V.Bicego - CISE SpA, Milano

## RIASSUNTO

L'individuazione della linea di blunting costituisce un aspetto importante nell'ambito delle prove di Meccanica della Frattura in campo Elasto-Plastico (EPFM), dal momento che la maggior parte delle normative definisce i parametri critici del materiale all'intersezione di tale linea, o di una parallela ad essa, con la curva di regressione dei dati sperimentali. L'alternativa che si presenta allo sperimentatore consiste nello scegliere tra la determinazione diretta della linea di blunting attraverso misure costose e delicate, e il tracciamento della stessa in base ad una delle relazioni analitiche (del tipo  $J = m \cdot \Delta a$ ) proposte dalle diverse normative. Nel quadro di un programma di ricerca ENEL-CRTN, e' in corso presso il laboratorio prove materiali del CISE un'attivita' di determinazione sperimentale della linea di blunting attraverso misure al SEM della zona di stiramento all'apice della cricca (Stretch Zone Width, SZW). E' stata condotta una serie di prove di integrale J su campioni di acciaio A533B cl.1 a temperatura ambiente, interrompendo le prove in fase di blunting; successivamente e' stata misurata la SZW sui campioni rotti e su repliche ottenute mediante infiltrazione con gomme siliconiche. Viene presentato il confronto tra le rette di blunting ottenute in tal modo e quelle analitiche proposte dalle diverse normative.

## 1. INTRODUZIONE

Nella prima fase di una prova di tenacita' in regime EPFM si verifica il cosiddetto fenomeno del "blunting", consistente in un avanzamento apparente della cricca per effetto dell'arrotondamento del suo apice. In questa fase, la curva  $J-\Delta a$  del campione e' normalmente rappresentata da una linea retta, che congiunge l'origine degli assi con il punto di innesco della crescita duttile della cricca.

La determinazione della retta di blunting, in generale, puo' essere di tipo analitico o sperimentale. Nel primo caso, esistono alcune relazioni matematiche che, in base a certi modelli, legano J (oppure CTOD) e  $\Delta a$  in fase di blunting; le piu' usate verranno esaminate nel capitolo successivo.

Alternativamente, la retta di blunting puo' essere individuata sperimentalmente eseguendo misure dell'ampiezza della zona di stiramento (SZW) formatasi all'apice della cricca durante il suo arrotondamento. Dal punto di vista dell'impiego corrente, tale soluzione presenta tuttavia alcuni svantaggi:

- le misure al SEM su campioni rotti dopo le prove forniscono solo i valori di  $SZW_c$  ( $c$  = valore critico all'inesco); misure istantanee di SZW durante il blunting sono possibili solo mediante apposite prove interrotte. Si tratta in ogni caso di misure costose e con scarsa riproducibilita' tra diversi laboratori, a causa della soggettivita' di interpretazione delle morfologie di frattura;
- le tecniche monocampione (Unloading Compliance e Potential Drop) dal canto loro non garantiscono un grado di precisione sufficiente nella prima parte della curva  $J-\Delta a$ , laddove la crescita di cricca e' al massimo dell'ordine di qualche decimo di millimetro.

Risulta percio' evidente la convenienza di poter disporre di una relazione analitica per la retta di blunting che si dimostri affidabile per una classe sufficientemente ampia di materiali.

## 2. MODELLI DI BLUNTING

Non tutte le normative per prove di tenacita' in regime EPFM prevedono l'uso della retta di blunting per determinare i parametri critici del materiale.

La procedura del CEGB (Central Electricity Generating Board) /1/, ad esempio, definisce quale parametro critico del materiale il valore di  $J$  all'intersezione della curva di best-fit dei dati sperimentali con la verticale condotta da  $\Delta a = 0.2$  mm ( $J_{0.2}$ , fig.1). Analoga posizione e' assunta dalla normativa British Standards BS 5762:1979 /2/ e dalla proposta di normativa ASTM /3/ per la determinazione del CTOD all'inesco della crescita duttile.

La normativa giapponese JSME S001-1981 /4/, dal canto suo, non prevede alcuna relazione analitica per la retta di blunting; quest'ultima viene tracciata sulla base di almeno due misure di SZW, eseguite al termine di altrettante prove interrotte in fase di blunting. L'integrale  $J$  all'inesco ( $J_i$ ) puo' essere ottenuto individuando, sulla retta cosi' ottenuta, il valore di  $J$  corrispondente al valore medio delle SZW misurate su altri campioni (fig.2a), oppure all'intersezione della retta di blunting con un best-fit lineare dei dati sperimentali (fig.2b).

La normativa ASTM E813 per prove di tenacita' in regime EPFM, viceversa, non contempla la possibilita' di determinare sperimentalmente la retta di blunting, ma impone l'uso dell'equazione

$$J = 2\sigma_f \Delta a \quad (1)$$

dove  $\sigma_f$  = flow stress del materiale, e' la media aritmetica dello sforzo di snervamento e dello sforzo di rottura del materiale alla temperatura di prova. Nonostante la recente introduzione di una nuova versione della normativa ASTM /5/, che ha sostituito quella in uso fino all'anno scorso /6/, le innovazioni non hanno contemplato alcuna modifica all'equazione (1), sebbene essa sia comunemente ritenuta sovrastimare i valori di  $\Delta a$  in fase di blunting.

L'intersezione della retta di equazione (1) (ASTM E813-81) o della sua parallela a 0.2 mm (ASTM E813-87) con la curva di regressione dei dati sperimentali, individua il valore del parametro critico  $J_{Ic}$  (fig.3).

La proposta di normativa formulata dall'EGF (European Group on Fracture) /7/, infine, prevede entrambe le possibilità, pur attribuendo la priorità alla determinazione sperimentale della blunting line mediante misure di SZW sui campioni rotti dopo la prova; in tal caso, la retta di blunting è ottenuta congiungendo l'origine degli assi  $J-\Delta a$  (o CTOD- $\Delta a$ ) con il punto della curva di regressione dei dati sperimentali avente  $\Delta a = \overline{SZW}_c$  (per prove condotte con tecnica monocampione) oppure  $\Delta a = \overline{SZW}_c$  (per prove condotte con tecnica multicampione) (fig.4).

Qualora la zona di stiramento non sia chiaramente distinguibile sulle superfici di frattura, la procedura consente di ricorrere alla seguente relazione analitica per la retta di blunting:

$$J = \frac{\sigma_0}{0.4 d_n} \Delta a \quad (2)$$

per la curva  $J-\Delta a$ , e

$$\delta = \frac{\sigma_0}{0.8 \sigma_y d_n} \Delta a \quad (3)$$

per la curva CTOD- $\Delta a$ , dove  $\sigma_0$  è il limite di sforzo elastico e  $d_n$  è funzione dell'esponente di incrudimento  $n$  e della deformazione  $\sigma_0/E$ . I coefficienti 0.4 e 0.8 in tali relazioni sono fattori empirici di forma proposti originariamente da Schwalbe /8/. La base teorica del modello è invece dovuta ad una relazione di blunting derivata da Shih /9/, e fatta propria anche da EPRI /10/:

$$\delta = d_n \frac{J}{\sigma_0} \quad (4)$$

### 3. ATTIVITA' SPERIMENTALE

Nell'ambito di un programma di ricerca ENEL-CRTN svolto al CISE per la caratterizzazione di un acciaio per vessel nucleare, sono state eseguite cinque prove di integrale J a temperatura ambiente su campioni 1TCT dell'acciaio A533B cl.1, interrotte a diversi valori di J in fase di blunting.

A campione sotto carico, è stata ottenuta una replica dell'apice di cricca mediante infiltrazione con gomma siliconica. La procedura prevede il mantenimento sotto carico del campione per il tempo necessario all'indurimento della replica. L'uso alternativo di Heat Tinting + immersione del provino in azoto liquido + successiva rottura fragile per sovraccarico è invece inadatto, perché induce richiusura dell'apice della cricca quando il campione è fuori carico. L'effetto è comunque stato valutato mediante una prova apposita.

Le repliche, estratte dal campione a frattura ultimata, sono state rivestite con un sottile strato d'oro ed esaminate al SEM. Misure di SZW sono state eseguite anche direttamente sui provini rotti per post-fatica.

L'attività è ancora in fase di svolgimento, e non tutti i problemi tecnici nell'esecuzione delle prove sono stati risolti. In particolare su 4 prove nelle quali è stata praticata l'infiltrazione, in due casi si sono avute difficoltà a seguito di insufficiente penetrazione della gomma siliconica o strappo della replica in fase di estrazione. Delle due repliche "valide" ottenute, inoltre, solamente una ha consentito di eseguire misure lungo tutto il fronte della cricca; nell'altro caso, infatti, la gomma siliconica era penetrata solo parzialmente fino all'apice della cricca, e le misure sono state effettuate solamente in corrispondenza di una parte del fronte. Pur con queste limitazioni è stato però possibile ricavare già da questo stadio dell'attività delle informazioni interessanti.

Le misure di SZW al SEM sono state effettuate sui singoli campioni secondo le indicazioni della proposta di normativa EGF /77/. Si ritiene opportuno precisare due particolari del metodo utilizzato:

- nell'intorno di ciascuna posizione di misura prevista dalla proposta citata, il punto esatto per la misura del valore locale di SZW è stato scelto in modo da evitare sia irregolarità locali (macrovuoti intorno ad inclusioni), sia zone in cui la SZ è incompleta sulla controparte in esame /11/.
- nell'esecuzione della singola misura di SZW, l'ampiezza delle cricche secondarie parallele al fronte della precriccatura è stata sottratta dal valore di SZW misurato tra precriccatura e post-fatica.

#### 4. RISULTATI

I risultati delle misure di SZW effettuate sui campioni (SZWcamp) e sulle repliche (SZWrep) sono riportati in tab.1.

Dai dati sui 4 campioni rotti per post-fatica, cioè escludendo il campione rotto per sovraccarico dopo immersione in azoto liquido, è stata determinata la retta di blunting  $J - SZW_{camp}$ . Una analoga retta è stata calcolata per i dati  $J - SZW_{rep}$ . Anche se in quest'ultimo caso sono disponibili due soli dati, il valore del coefficiente angolare della retta è stato ritenuto significativo. Questa considerazione, del resto condivisa dalla normativa giapponese prima citata, è stata supportata anche dai risultati di una semplice analisi condotta sui 4 dati sperimentali di  $J - SZW_{camp}$ : i valori dei coefficienti angolari, ottenuti considerando ogni volta due dati distinti fra tutte le combinazioni possibili, sono risultati stabili (tab.2).

Entrambe le rette di blunting  $J - SZW_{camp}$  e  $J - SZW_{rep}$  sono riportate in fig.5, insieme ai relativi punti sperimentali ed anche alle rette analitiche previste da ASTM (eq.1) e EGF (eq.2). Due osservazioni emergono con evidenza:

- le rette di blunting ottenute sperimentalmente, sia da misure su campioni che da misure su repliche, si collocano in una posizione intermedia fra i due modelli ASTM e EGF (vedi anche fig.6);
- le misure di SZW effettuate su repliche forniscono risultati superiori a quelli ottenuti con l'osservazione frattografica dei campioni.

La discrepanza al secondo punto ha a che fare con gli aspetti metodologici della misura, che dovranno essere ulteriormente indagati e chiariti. Alcuni elementi di possibile diversità sono già forse individuabili. La misura su replica descrive una situazione "on load" del campione, comprensiva cioè del contributo elastico all'apertura dell'apice dell'intaglio, mentre la misura sul campione rotto considera la situazione "off load", puramente plastica. Inoltre non è da escludere che un certo rigonfiamento della replica possa avvenire dopo estrazione, in quanto durante l'infiltrazione la pasta siliconica è mantenuta pressata contro l'intaglio per favorire una buona penetrazione.

## 5. CONCLUSIONI

È stato descritto lo stato dell'arte relativo alle normative di impiego più comune per prove di tenacità in regime EPFM, con particolare riferimento agli aspetti che riguardano la definizione dei valori dei parametri critici all'innesco. Particolarmente importante a questo riguardo è la considerazione del comportamento del materiale durante lo stadio che precede l'innesco della frattura duttile, cioè della fase di blunting dell'apice della cricca.

Misure dirette della SZW per l'acciaio A533B, effettuate sia su campioni di prove interrotte sia su repliche ottenute per infiltrazione degli intagli mediante gomma siliconica hanno fornito risultati abbastanza diversi. Tuttavia da tali analisi, tuttora in corso di approfondimento, sembra emergere che la situazione reale di blunting per l'acciaio considerato è intermedia fra i modelli previsti da ASTM ed EGF.

## BIBLIOGRAFIA

- /11/ B.K.Neale, D.A.Curry, G.Green, J.R.Haigh and K.N.Akhurst, " A Procedure for the Determination of the Fracture Resistance of Ductile Steels", CEGB TPRD/B/0495/R84, October 1984.
- /2/ BS5762:79, "Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing", British Standards Institution, 1979.
- /3/ "Draft Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement", ASTM, August 1987.
- /4/ Kobayashi, H.H.Nakamura and H:Nakazawa, "Comparison of Jic Test Methods Recommended by ASTM and JSME", ASTM STP 856, 1985, pp.3-22.
- /5/ "Standard Test Method for Jic, a Measure of Fracture Toughness", E813-87, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol.03.01, ASTM, July 1987, pp.968-990.
- /6/ "Standard Test Method for Jic, a Measure of Fracture Toughness", E813-81, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Vol.03.01, ASTM, July 1986, pp.768-786.
- /7/ "EGF Recommendations for Determining the Fracture Resistance of Ductile Materials", 1st Draft, June 1987.
- /8/ K.-H.Schwalbe, "Crack Tip Opening Displacement for Work-Hardening Materials", International Journal of Fracture, Vol.25, 1984, pp.R49-R52.
- /9/ C.F.Shih, "Relationship between the J-integral and Crack Opening Displacement for Stationary and Extending Cracks", General Electric, Report No.79CR0075, 1979.
- /10/ EPRI, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", EPRI NP-1931, Project 1237-1, July 1981.
- /11/ D.T.Hoelzer et al., "A Study of the Correlation between CTOD and SZW", Script.Met. 20 (1986), 1575-80.

TAB. 1

Sigla campione	J (kN/m)	MISURE SU CAMPIONI		MISURE SU REPLICHE	
		SZW (mm)	n. misure	SZW (mm)	n. misure
X6-9	65.44	0.035	9	-	-
X6-20	76.57	0.048	9	0.057	9
X6-11	113.83	0.070	9	0.099	4
X6-25	123.30	0.073	9	-	-
X6-23(*)	46.88	0.014	9	-	-

(\*) Campione rotto in azoto liquido.

TAB. 2

Sigle campioni	N	b Coefficiente angolare (N/mm <sup>2</sup> )	S <sup>(*)</sup> (kN/m)
X6-9; X6-11	2	1675	7.6
X6-20; X6-25	2	1661	3.8
X6-9; X6-25	2	1723	5.7
X6-20; x6-11	2	1616	3.9
X6-9; X6-20	2	1690	7.8
X6-11; X6-25	2	1659	3.2
X6-20; x6-11 (repliche)	2	1198	9.6

(\*) 
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (J_i - bSZW_i)^2}{N-1}}$$
, essendo le rette del tipo  $J = bSZW$

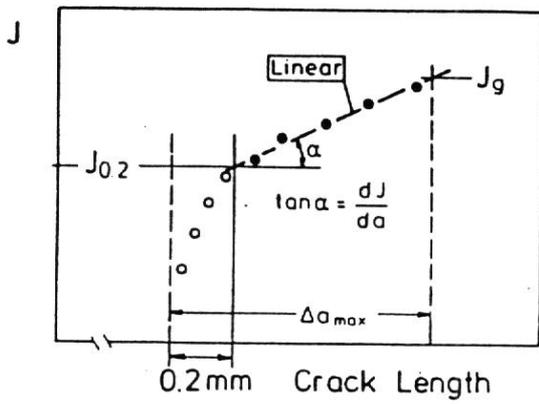


Fig. 1 - Determinazione di  $J_{0.2}$  secondo la procedura CEEB.

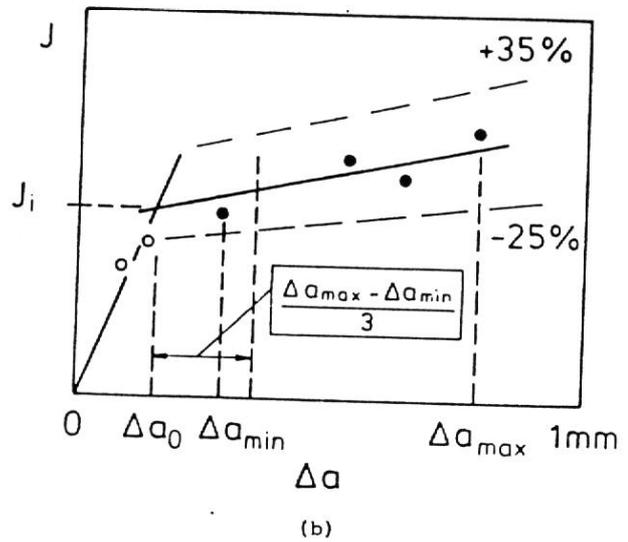
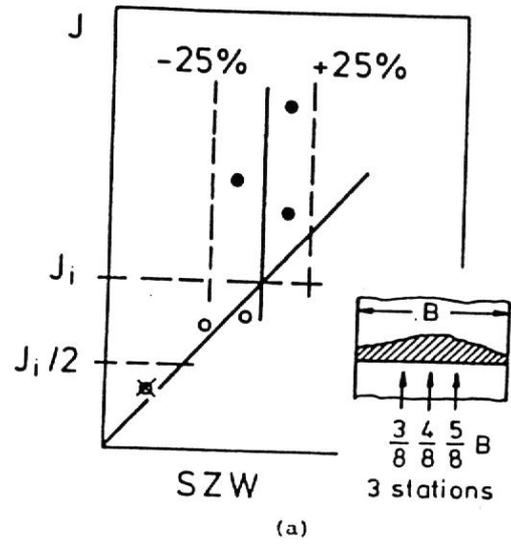


Fig. 2 - Determinazione di  $J_1$  secondo JSME S001-1981.

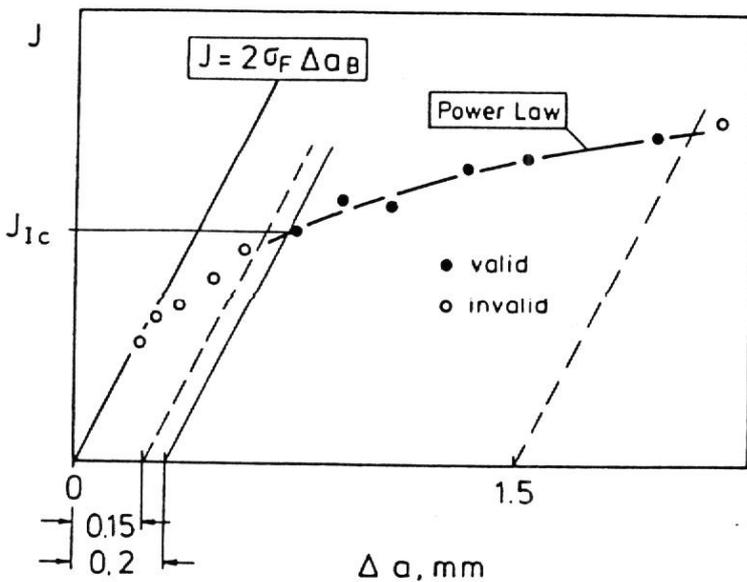


Fig. 3 - Determinazione di  $J_{Ic}$  secondo ASTM E813-87.

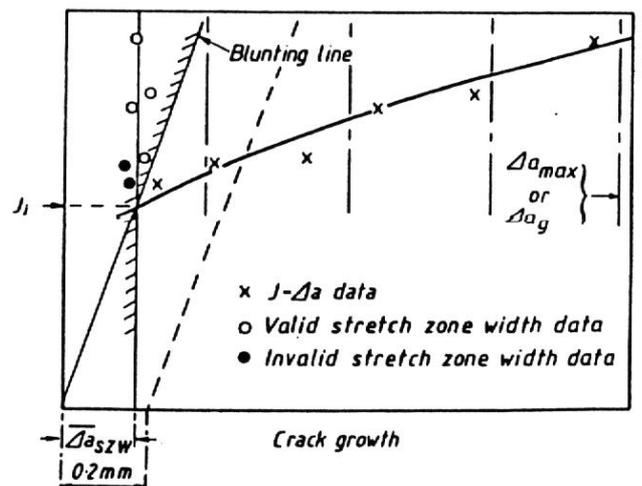


Fig. 4 - Determinazione di  $J_1$  secondo la proposta di normativa EGF (Giugno 1987)

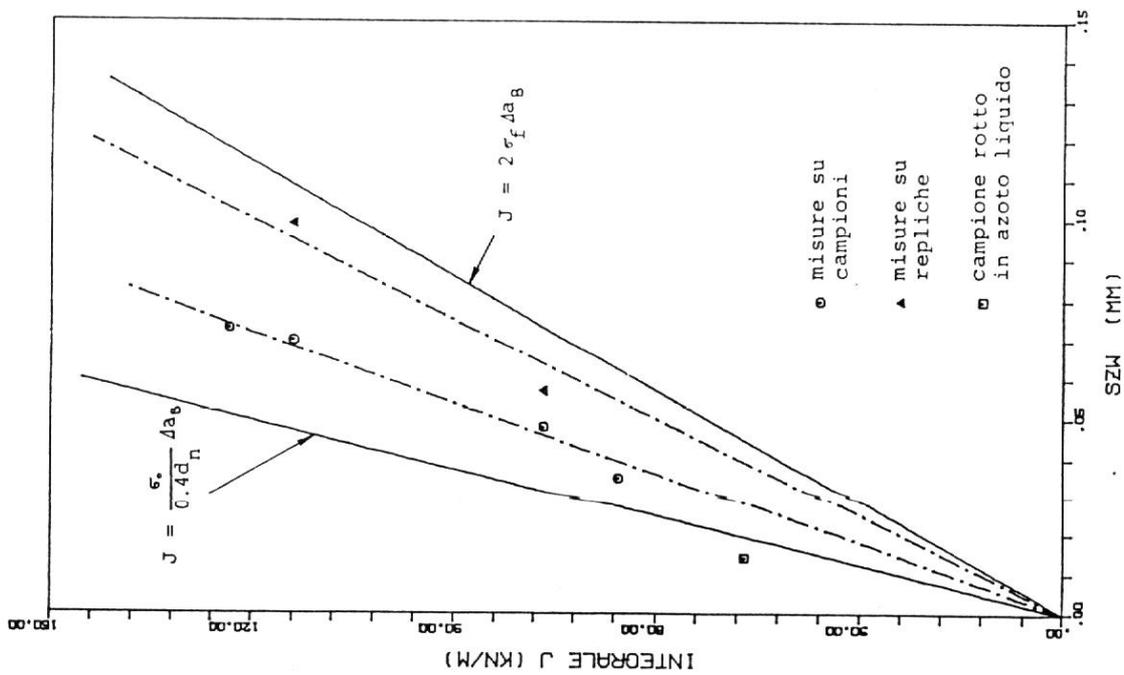


Fig.5 - Confronto tra rette di blunting analitiche e sperimentali.

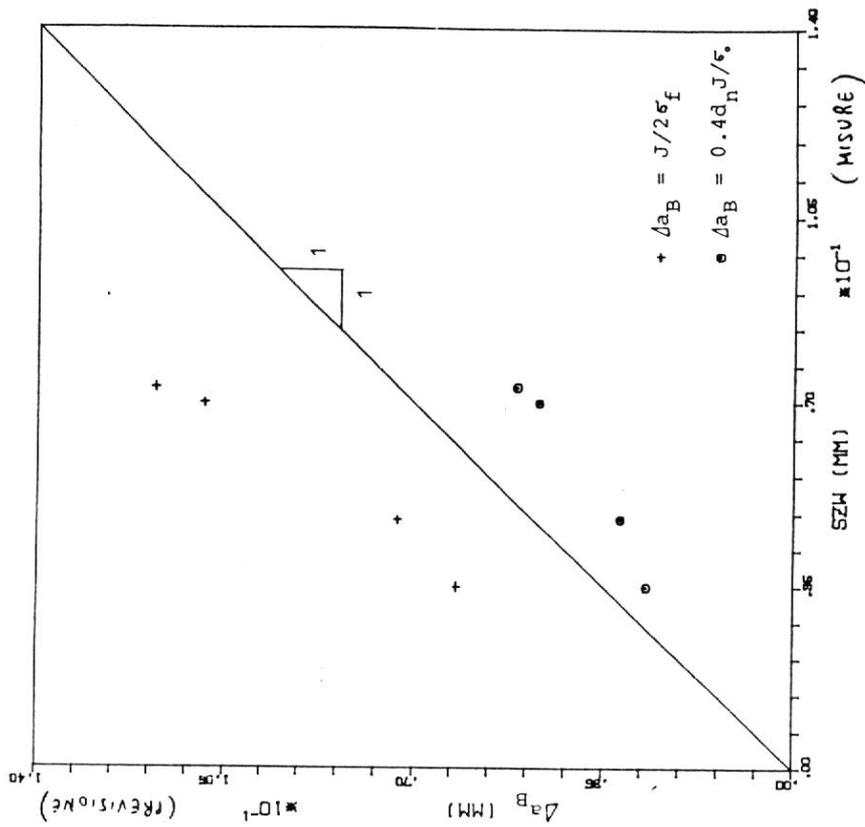


Fig.6 - Confronto tra valori  $\Delta a_B$  previsti e valori  $SZW$  misurati.