

IGF8 - VIII Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Genova, 27 - 29 maggio 1992

ANALISI NUMERICA E SPERIMENTALE DEI MODI DI ROTTURA
DI UN PROVINO CHARPY V.

M. Marchetti

Dipartimento Aerospaziale, Università di Roma "La Sapienza"
via Eudossiana, 16 - Roma

C. Maricchiolo, P.P. Milella, A. Pini

ENEA-DISP Divisione Tecnologie
via V. Brancati, 48 - 00144 Roma

SOMMARIO

Lo studio ha riguardato una serie di provini Charpy-V in SA508 Cl. 3, provati tra -50 °C e +20 °C. Tramite il codice agli Elementi Finiti SPACCA-P è stata valutata l'estensione della cerniera plastica alla rottura. I calcoli sono stati verificati per mezzo di una tecnica di colorazione che utilizza il "reagente di Fry". Le zone plastiche evidenziate sui provini sono state confrontate con quelle ottenute dal calcolo.

Lo studio ha dimostrato che, anche in condizioni di carico dinamico ed a temperature alle quali il materiale dovrebbe essere fragile, la rottura nei provini Charpy-V si sviluppa attraverso larghi scorrimenti plastici, sotto condizioni di tensione nel piano e senza triassialità.

SCOPO

Lo scopo del presente articolo è l'analisi del modo di rottura di provini Charpy-V in acciaio al carbonio basso-legato. In particolare si è posta l'attenzione alla determinazione, sia per via sperimentale che numerica, degli scorrimenti plastici che si verificano in prossimità dell'intaglio, in un campo di temperature dove il modesto assorbimento di energia denota un comportamento fragile del materiale.

DESCRIZIONE DELLE PROVE

Presso i laboratori dell'ENEA Casaccia (Roma) sono state effettuate 4 prove Charpy-V strumentate su provini standard ASTM ricavati da una virola di acciaio, tipo SA 508 Cl. 3, che viene utilizzato per la costruzione di recipienti in pressione di reattori nucleari.

La composizione chimica dell'acciaio impiegato è riportata in tabella 1.

I risultati delle prove effettuate sono riassunti nella tabella 2.

Nella figura 1 è mostrato un esempio della registrazione del carico applicato dal pendolo al provino durante la prova.

Questo diagramma di carico, opportunamente linearizzato, è stato utilizzato nella modellazione agli Elementi Finiti della prova.

SIMULAZIONE NUMERICA

Per la simulazione numerica delle prove di resilienza illustrate nel paragrafo precedente è stato utilizzato un codice di calcolo agli Elementi Finiti denominato SPACCA-P (Studio di Propagazione ed Arresto di Cricche in Condizioni di Accelerazione variabile, versione elasto-Plastica). Tale codice (Rif. 1) consente lo studio dello stato di sollecitazione, durante la fase di carico e di eventuale propagazione, in strutture bidimensionali criccate, permettendo di simulare un comportamento del materiale di tipo elasto-plastico.

Per la discretizzazione della struttura sono stati adoperati 285 elementi isoparametrici parabolici, triangolari e quadrangolari. Il modello realizzato rappresenta solo metà provino, dal momento che il problema è simmetrico. La figura 2 riporta un disegno del modello in cui è possibile notare un infittimento dei nodi in prossimità dell'intaglio.

Sono stati utilizzati vincoli unidirezionali per tutti i nodi lungo il piano di simmetria AB. Un vincolo unidirezionale è stato utilizzato anche in corrispondenza al punto C, per simulare l'appoggio del provino durante la prova. La forza, variabile nel tempo, è stata applicata in corrispondenza al punto A. La legge di variazione della forza stessa nel tempo è stata ricavata dai diagrammi forza-tempo registrati durante l'esecuzione della prova, opportunamente linearizzati. Come dato di ingresso per il codice, è stata fornita anche la curva tensioni-deformazioni del materiale. Per tener conto dell'effetto di dipendenza dello snervamento dalla temperatura di prova e dalla velocità di deformazione, è stata adottata la formula (Rif. 2):

$$\sigma_{sn} = C \left(e^{\frac{112.8}{T}} \cdot Sr^{\frac{5.54}{T}} \right) \quad (1)$$

ove T è la temperatura in °K, Sr lo strain rate in s^{-1} , σ_{sn} è lo snervamento del materiale in MPa. La costante C deve essere calibrata in relazione al particolare materiale che si sta adoperando. Nel nostro caso deve essere $\sigma_{sn}=460$ MPa per temperatura ambiente ($T=298$ °K) ed in condizioni quasi statiche ($Sr=5 \cdot 10^{-4} s^{-1}$), per cui si ricava $C=363$. Con il valore di C così determinato è possibile riutilizzare l'equazione (1) per calcolare lo snervamento alle temperature di prova e per gli strain rate effettivi. Si è ipotizzato che il coefficiente di incrudimento non dipenda da T e Sr, per cui la forma della curva tensione-deformazione si mantiene invariata rispetto alle condizioni di temperatura ambiente e di prova quasi-statica. In figura 3 la curva semplificata tensione-deformazione per condizioni quasi-statiche e di temperatura ambiente, per l'acciaio SA 508 Cl. 3, è confrontata con le curve adoperate per la simulazione numerica.

Il codice è in grado di fornire, come uscita, la deformata del provino e l'energia di deformazione assorbita, istante per istante. In particolare, l'andamento dell'energia assorbita è stato confrontato con le misurazioni di energia effettuate durante la prova, ipotizzando sia una condizione generale di tensione piana, che di deformazione piana.

Un esempio di confronto è mostrato nella figura 4, mentre nella tabella 3 sono

confrontati gli andamenti dello spostamento sperimentale e numerico, in corrispondenza al punto di applicazione del carico. Complessivamente si è trovato un buon accordo tra dati sperimentali e dati numerici per le prove KRC9, K20 e KRC11 utilizzando le condizioni di stato di tensione piano. Una minore approssimazione ha caratterizzato la simulazione della prova KRI2 (vedi figura 5).

Le simulazioni numeriche effettuate hanno permesso di evidenziare anche la presenza e l'estensione delle zone plastiche, in prossimità dell'intaglio. Nella figura 6 sono mostrate, ad esempio, le distribuzioni delle tensioni nel provino KRC9, in corrispondenza dell'ultimo passo di carico analizzato, per uno stato di tensione o deformazione piano.

STUDIO METALLOGRAFICO

Lo studio metallografico ha avuto lo scopo di evidenziare le zone plastiche sulle facce laterali, o sulle superfici più interne, dei provini adoperati per le prove. Il pezzo da analizzare è stato sottoposto ad una procedura di preparazione comprendente:

- a) taglio del provino (nel caso di studio delle sezioni interne)
- b) raschiatura iniziale per eliminare le imperfezioni (per le sezioni interne)
- c) lucidatura con pasta diamantata.

Successivamente la superficie del provino è stata trattata con un reagente denominato "liquido di Fry" (Rif. 3), per un tempo variabile tra i 10 e i 60 s.

Si è proceduto distribuendo, in modo uniforme, il liquido sulla superficie da trattare per 4-5 s, osservando, dopo ogni applicazione, il risultato al microscopio, fino ad ottimizzare il contrasto tra zone più brillanti (quelle plasticizzate) e meno brillanti (le zone che non hanno subito deformazioni permanenti).

In figura 7 è riportata l'immagine della superficie del provino KRC9, per il quale era stato riportato anche il risultato dell'analisi numerica.

Le figure 8 e 9 mostrano, rispettivamente, la superficie esterna ed una superficie circa 1.5 mm più interna del provino KRC11. In figura 8 si nota la piccola zona plasticizzata in corrispondenza dell'appoggio. In figura 9 si nota come, nella zona più interna, permanga un'ampia deformazione plastica, con totale assenza di un cuore centrale elastico. Tale ampia deformazione plastica è rappresentativa di uno stato di tensione nel piano.

La tabella 4 riporta un confronto tra alcune dimensioni caratteristiche della zona plastica, nel caso sperimentale e numerico, per i provini KRC9 e K20.

CONCLUSIONI

Le conclusioni principali che possono esser riportate sono:

1) la rottura di un provino Charpy-V avviene in condizioni prevalenti di tensione piana e in presenza di rilevanti scorrimenti plastici. Questo comportamento del provino si manifesta anche a temperature (-50 °C) alle quali, normalmente, il materiale si comporta in modo fragile;

2) è stata messa a punto una procedura per evidenziare le zone plastiche sulle superfici dei provini Charpy-V, mediante un trattamento chimico delle superfici stesse. Le dimensioni principali delle zone plastiche, evidenziate

sperimentalmente e calcolate numericamente, sono in buon accordo.

RIFERIMENTI

- 1) C. Lusso, C. Sampietri. "Studio della propagazione dinamica di cricche in strutture bidimensionali in campo elasto-plastico: il programma SPACCA-P". Rapporto CISE 2931 per ENEA.
- 2) P.P. Milella. "Effect of temperature and strain rate on the yield strength of BCC materials". In corso di pubblicazione.
- 3) Jevons Dudley. "Strain detection in mild steel by special etching". Iron and Steel Institute. Vol. CXI n.1.

	% in peso	% max ammessa
carbonio	0.180	0.250
manganese	1.330	1.500
fosforo	0.010	0.025
zolfo	0.004	0.025
silicio	0.270	0.400
nickel	0.735	1.000
cromo	0.100	0.250
molibdeno	0.495	0.600
rame	0.060	

Tab.1 Composizione chimica dell'acciaio A508 CL3

Sigla prova	Temperat. (°C)	Tempo al carico max (mSec)	Valore del carico max (KN)	Energia al carico max (Joule)	Energia a rottura (Joule)
KRC9	0.000	0.4100	18.3999	30.8999	33.3500
K20	-50.000	0.3100	18.8899	22.7200	25.5299
KRC11	20.000	0.6600	18.9900	52.7879	150.830
KRI2	-50.000	0.1200	18.0200	6.23999	11.350

Tab.2 Risultati delle prove sperimentali

Tempo (mSec)	Carico (KN)	Energia sperim. (Joule)	Energia numerica (Joule)	Spost. sperim. (mm)	Spost. numerico (mm)
0.0543	11.87	1.786	1.682	0.294	0.254
0.0970	14.45	5.283	7.612	0.517	0.278
0.1940	15.98	12.423	13.903	0.999	1.151
0.2680	16.61	18.207	18.500	1.378	1.456
0.3375	17.41	24.090	23.544	1.719	1.764
0.4142	18.40	30.900	29.946	2.060	2.136

Tab.3 Confronto tra i risultati numerici e sperimentali dello spostamento in mezzzeria dell'energia assorbita per il provino KRC9 (T=0 C) in condizioni di tensione piana.

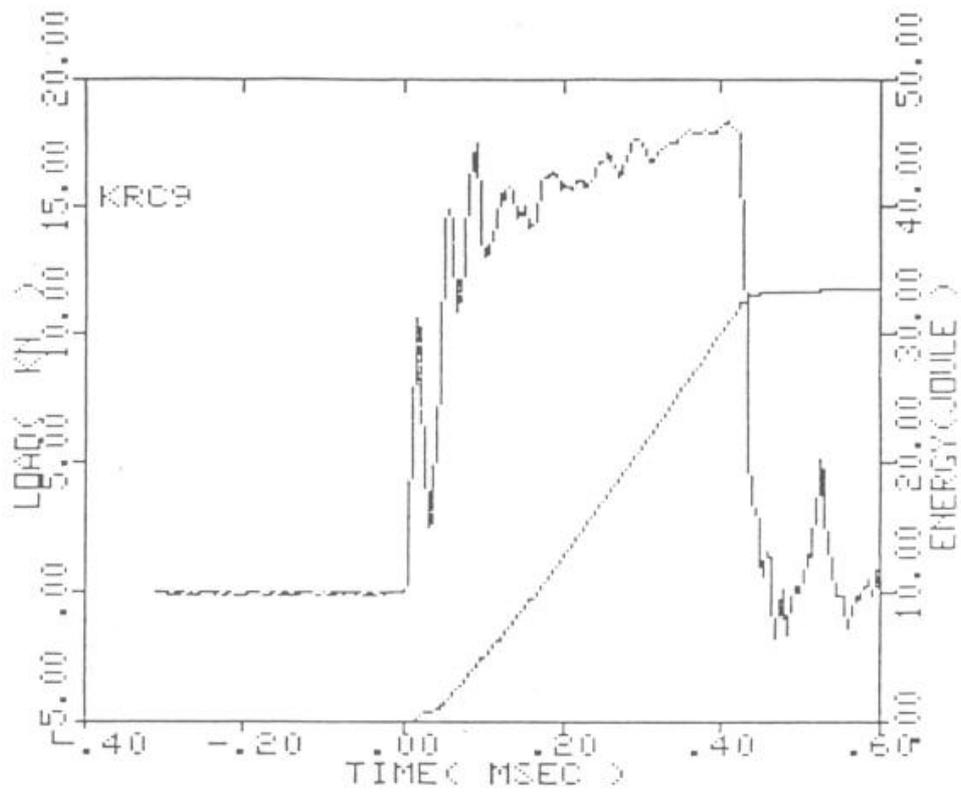


FIG.1 Registrazione di una prova Charpy strumentata

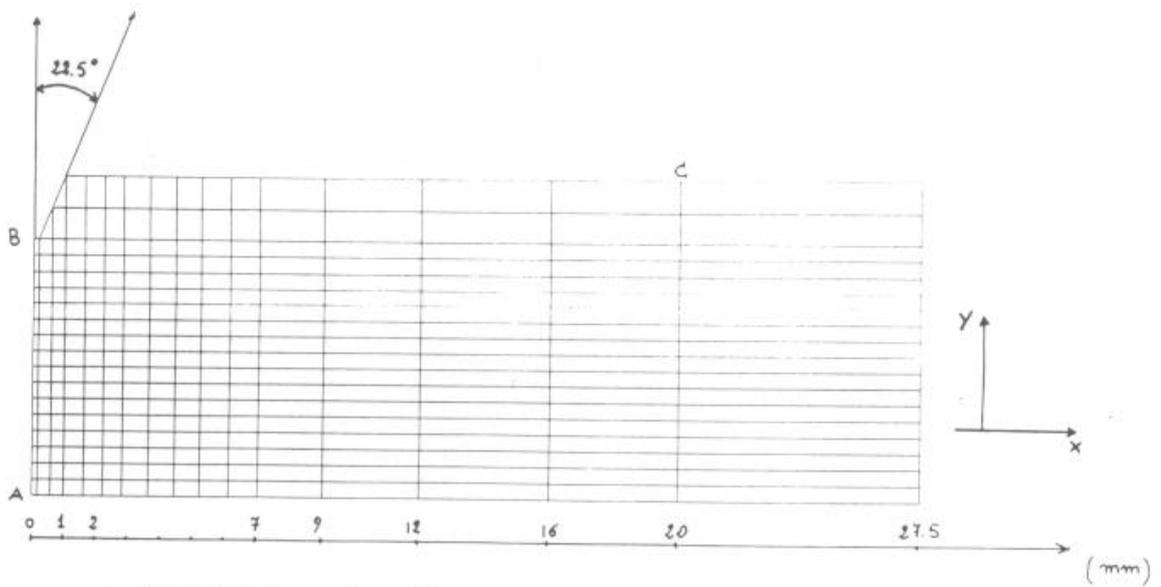


FIG.2 Schematizzazione agli E.F. del provino Charpy V

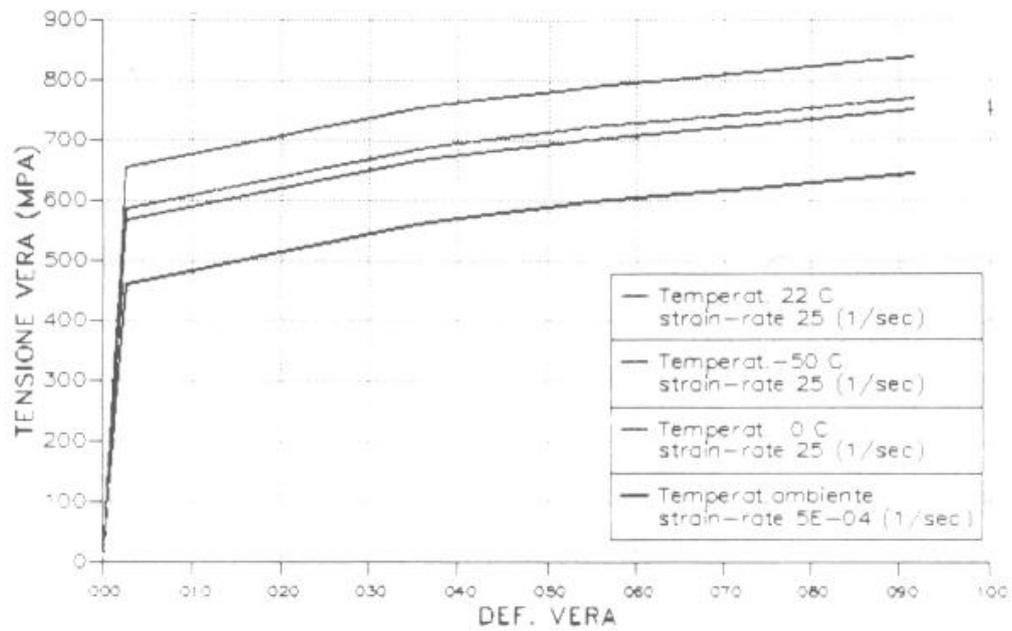


FIG.3 Andamenti della curva tens-deform. per l'acciaio A508 al variare della temperatura e dello strain-rate.

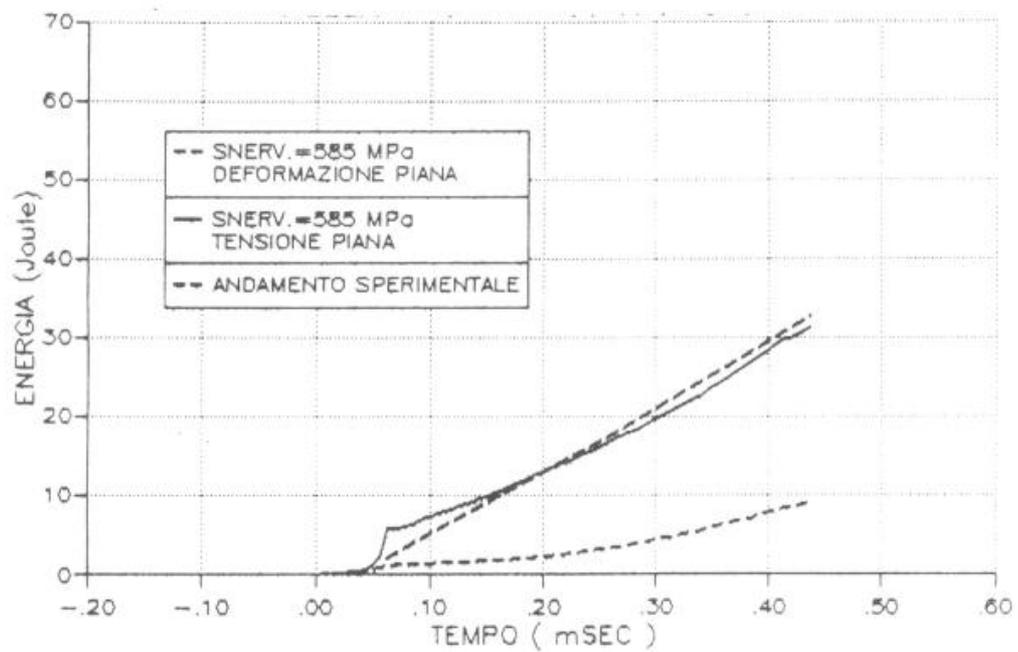


FIG.4 Confronto tra i risultati numerici e sperimentali dell'energia assorbita dal provino KRC9 (T= 0 C)

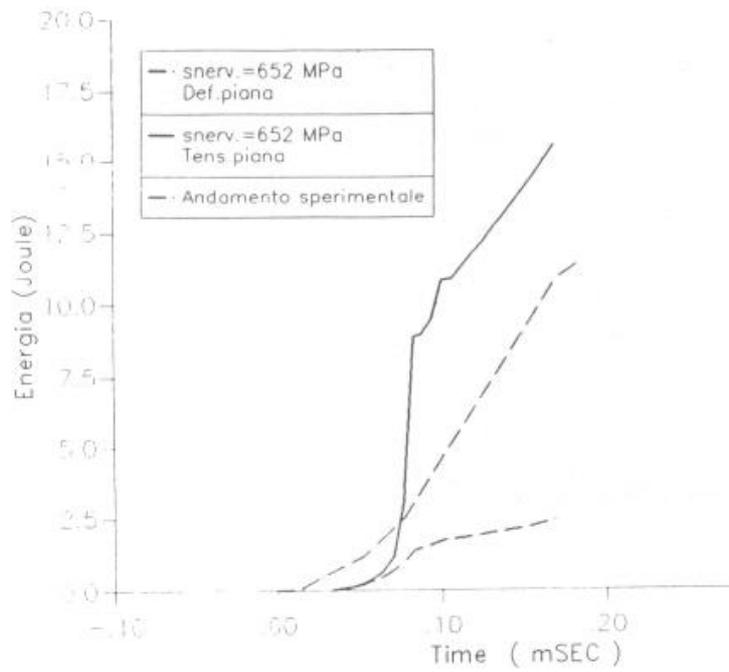


FIG.5 Confronto tra risultati numerici e sperimentali dell'energia assorbita dal provino KRI2 (T=-50 C)

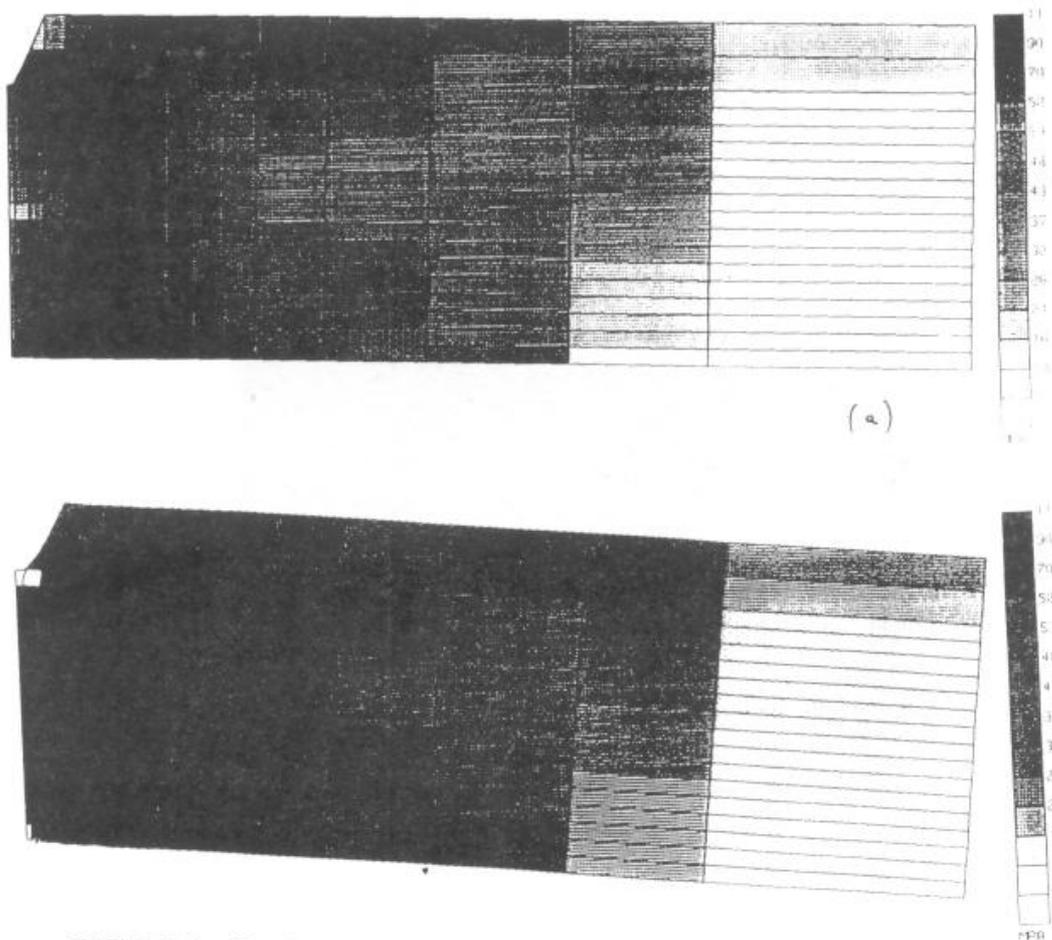


FIG.6 Distribuzione delle sollecitazioni nel provino KRC9 in condizioni: (a) plain-strain, (b) plaine-stress.

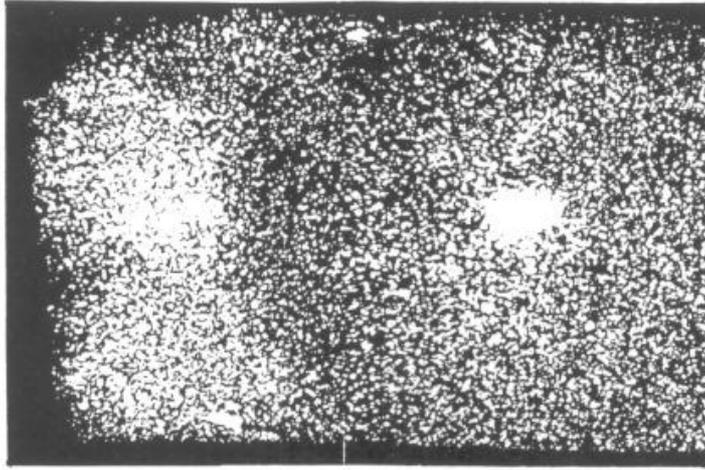


FIG.7 Provino KRC9: aspetto della superficie esterna dopo attacco chimico.

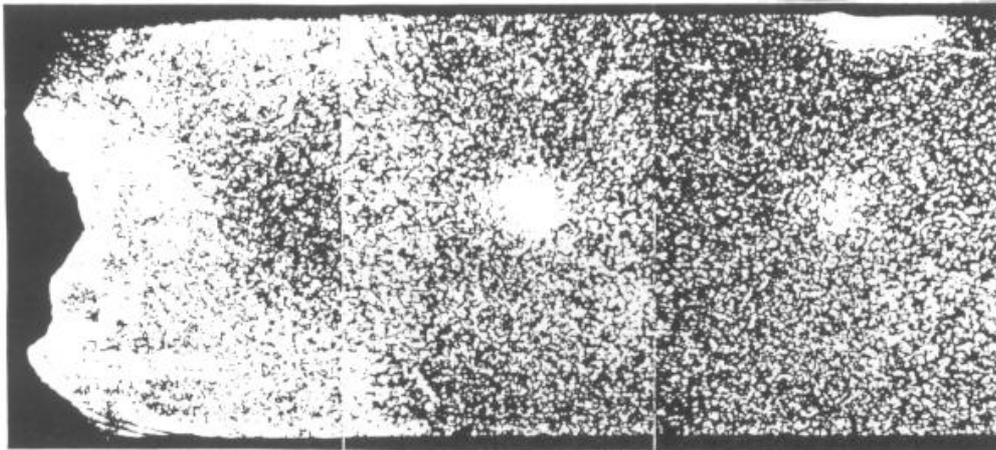


FIG.8 Provino KRC11: aspetto della superficie esterna dopo attacco chimico

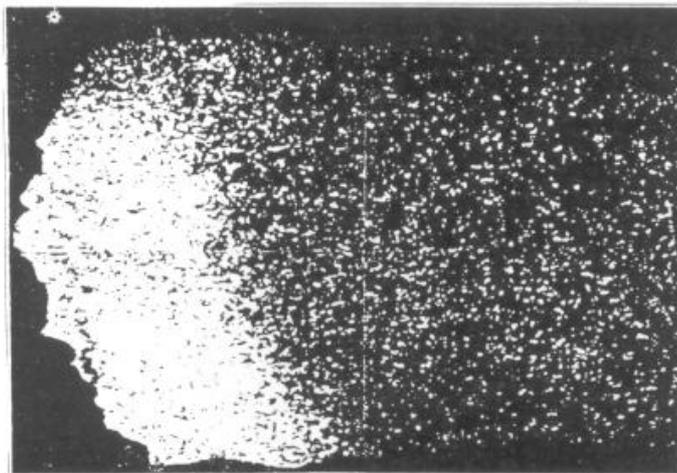
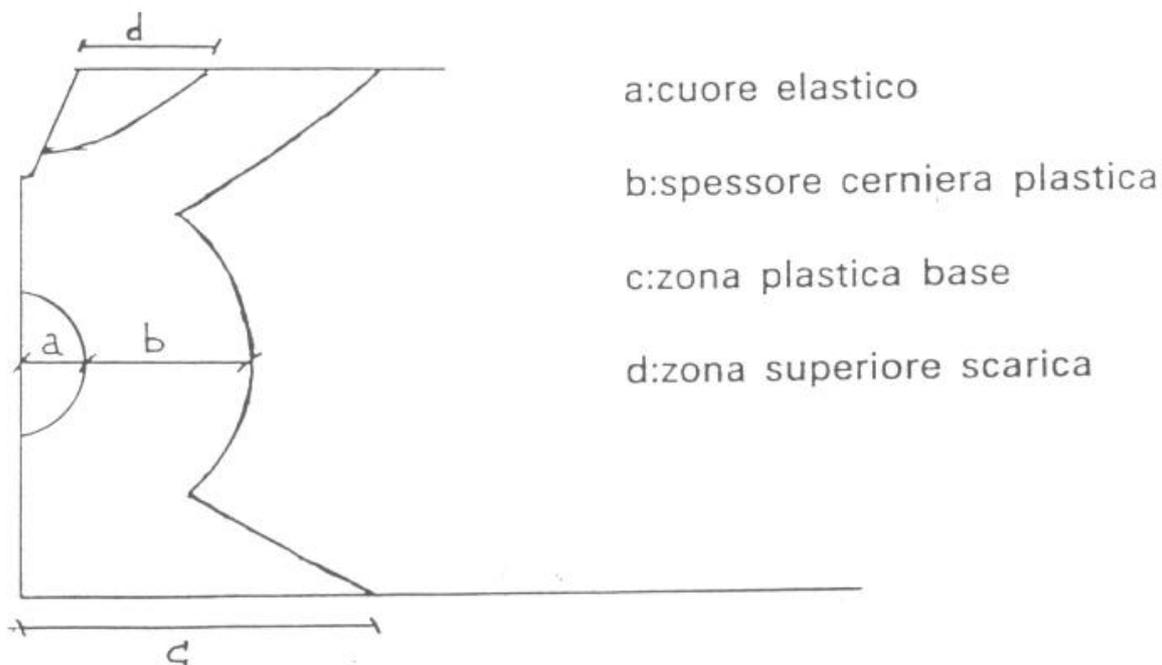


FIG.9 Provino KRC11: aspetto della superficie interna dopo attacco chimico.

	Zona Plastica Base	Cuore elastico (mm)	Spessore cerniera plastica (mm)	Zona superiore scarica (mm)
KRC9				
Def. Piana	7	2.16	2.24	2.5
Ten. Piana	6.5	0.6	3.7	1.8
Sperimentale	6.03	0.81	3.5	2.1
K20				
Def. Piana	6	2.1	1.4	2.53
Tens. Piana	5.7	0.7	3.63	2.6
Sperimentale	5.2	0.63	3.1	2.6



Tab.4 Confronto tra i risultati sperimentali e numerici delle dimensioni della zona plastica.