

# METODOLOGIA DI ANALISI FRATTOGRAFICA DEI PARABREZZA E CARATTERIZZAZIONE DELLA COSTANTE DI SPECCHIO

Anselmi F.<sup>1</sup>, Merlo A.<sup>2</sup>, Brusco G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Dir. Ambiente e Pol. Industriali-Laboratori Centrali, Fiat Auto  
Corso Settembrini 40-Porta 8-10135 Torino*

<sup>2,3</sup> *Dir. Processi e Materiali-Vetri, Centro Ricerche Fiat  
Corso Torino 50 10043 Orbassano (TO)*

**SOMMARIO:** Allo scopo di disporre di una metodologia di valutazione delle cause che hanno portato alla rottura dei parabrezza, si è individuata una procedura per l'analisi dei vetri fratturati nella quale viene stimata la sollecitazione tramite analisi frattografica, grazie alla relazione tra la dimensione dello specchio di frattura e lo stress. Partendo dai dati riscontrati nella letteratura, si è proceduto alla caratterizzazione sperimentale della costante di specchio del vetro sodico-calcico, sottoponendo ad indagine frattografica un campione statisticamente significativo di provini piani, portati a rottura sia per flessione a tre punti, sia per torsione. La frattografia è stata usata per l'analisi di rotture su parabrezza rotti: esempi pratici di applicazione di tale metodo vengono presentati a titolo illustrativo. L'uso sistematico della frattografia consentirà sia di stimare la resistenza meccanica dei parabrezza, sia di correlare le informazioni acquisite con i diversi parametri del componente (spessore, molatura, stress residui, serigrafia ecc.), in modo da determinarne l'effettiva influenza.

**PAROLE CHIAVE:** Frattografia, Vetro, Parabrezza, Stress.

## INTRODUZIONE

Il presente lavoro deriva dall'esigenza dell'industria automobilistica di disporre di una metodologia di valutazione delle cause che hanno portato alla rottura dei parabrezza, nella fase di montaggio o durante il normale impiego dell'autoveicolo. Partendo da tale esigenza, si è individuata una procedura per l'analisi dettagliata di tutti i parametri più significativi per i parabrezza fratturati, allo scopo di disporre di tutti i necessari elementi per effettuare una diagnosi. In particolare, le informazioni che devono essere sistematicamente rilevate durante l'investigazione sulla rottura di un vetro sono:

- eventuali anomalie della scocca;
- condizioni di montaggio vetro-scocca;
- molatura e tensioni ai bordi del parabrezza.

La parte più innovativa di tale metodologia consiste nella applicazione della analisi frattografica al vetro, volta a determinare l'origine della frattura ed a stimare l'intensità

della sollecitazione di rottura, partendo dall'analisi microscopica dello "specchio" di frattura (vedi fig.1).

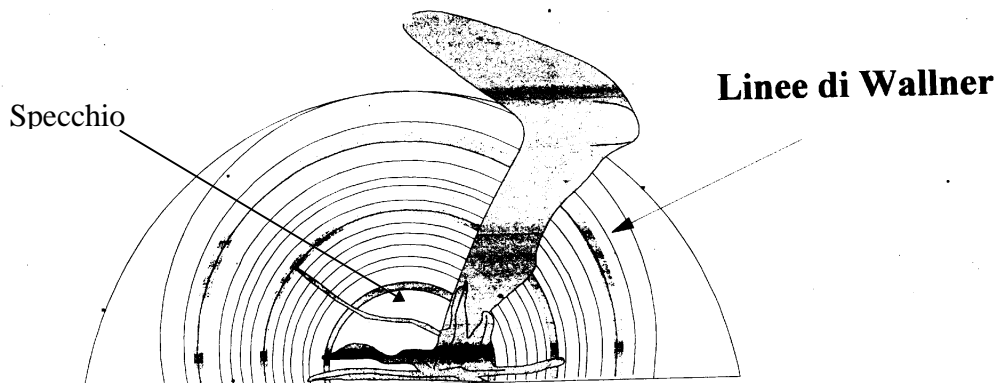


Figura 1 - Specchio di frattura del vetro

Il lavoro svolto a tale proposito risulta pertanto strutturato in due parti:

- Determinazione della relazione tra lo specchio di frattura e lo stress.  
Si tratta di stabilire, partendo dalla letteratura ed esaminando le rotture di provini di laboratorio, la migliore equazione che lega la dimensione dello specchio alla sollecitazione.
- Applicazione della metodologia sul componente.  
Previa separazione del vetro dal plastico interposto (PVB), è possibile compiere le medesime analisi effettuate sul vetro monolitico.  
L'applicazione sistematica dell'analisi frattografica permetterà sia di valutare la resistenza meccanica dei parabrezza sia di determinare i parametri più significativi che concorrono nel fenomeno della frattura del vetro.

### ANALISI FRATTOGRAFICA DEL VETRO

L'analisi della frattura viene impiegata con successo nell'industria vetraria già da molti anni, in tutte quelle circostanze in cui si rende necessario stabilire con una sufficiente precisione le modalità e cause della rottura di un qualche manufatto in vetro, sia che si tratti di stabilire una specifica responsabilità di prodotto, sia che si tratti di fornire utili indicazioni alla ricerca nel campo delle tecnologie di produzione al fine di migliorare la resistenza meccanica del prodotto finito.

La morfologia dei diversi segni distintivi della dinamica del processo di frattura e la loro interpretazione sono state esaurientemente descritte da numerosi autori (Fréchette, 1972, Abdel-Latif et al., 1977, Mecholsky e al., 1978, Mecholsky, 1985, Fréchette, 1991, Varner, 19??)

In particolare l'analisi frattografica permette di identificare e localizzare l'origine della frattura e di ricostruirne la traiettoria e la sequenza del processo di propagazione. Soprattutto, è possibile trarre significative conclusioni sullo stato di sollecitazione e sull'intensità dello stress applicato al momento della rottura, dalla ben nota relazione:

$$\sigma = A/R^{1/2} \quad (1)$$

dove  $\sigma$  è lo stress a frattura,  $R$  è il raggio dello specchio, definito come la distanza dall'origine di frattura e la regione opaca nota nella letteratura anglosassone come "mist", misurata lungo la superficie libera del campione (vedi fig.1).  $A$  è un parametro il cui valore è stato determinato sperimentalmente per diversi materiali fragili.

Abdel- Latif et al. (1977) hanno presentato la stima sperimentale del parametro  $A$  ottenuta per il vetro sodico calcico da numerosi autori precedenti, in diverse condizioni di carico (trazione e flessione su 3 e 4 punti).

I valori riportati cadono tutti nell'intervallo compreso tra 1.82 e 2.97 MPa\*m<sup>1/2</sup>. Gli autori stessi ottengono per  $A$  stime variabili tra 1.72 e 3.15 MPa\* m<sup>1/2</sup> e ne concludono che il parametro  $A$ , pur dipendendo in generale dalla composizione del materiale non può esserne considerato una caratteristica costante, in quanto sarebbe dimostrata un'altrettanto significativa dipendenza dallo stato macroscopico di stress cui è sottoposto il campione di frattura.

Alle stesse conclusioni giungono anche Kirchner e Kirchner che attribuiscono alla non uniformità del campo di stress sulla superficie di frattura la diversa geometria dello specchio, riscontrabile nelle fratture per flessione, rispetto alle fratture per trazione pura.

Marshall et al. osservano come la relazione (1) sia applicabile anche nel caso della presenza di stress residui, purchè se ne tenga conto sostituendo a  $\sigma$  la somma algebrica degli stress applicati e degli stress residui  $\sigma_a + \sigma_r$ , come dimostrato sperimentalmente anche da Mecholsky e Drexhage.

La 1) diventerebbe così:

$$\sigma_a + \sigma_r = A/R^{1/2} \quad (2)$$

Poiché la maggior parte dei prodotti dell'industria vetraria sono affetti da stress residui di processo, e poiché le stesse microcricche che sono all'origine della frattura nei materiali fragili sono sempre associate a stress residui conseguenti alla deformazione plastica del materiale circostante, il problema riveste un concreto significato nella pratica dell'analisi di laboratorio. Si pone quindi l'esigenza dello sviluppo di una metodologia semplice e affidabile per la misura degli stress residui nel vetro. Mecholsky et al.<sup>3</sup> hanno messo in rilievo come scostamenti nella stima sperimentale dell'esponente nella relazione (1) dal valore indicato, pari a -1/2, si possono attribuire alla presenza di stress residui, sostenendo la possibilità di stimarne l'intensità mediante l'analisi di un campione significativo di fratture.

Mecholsky et al. hanno dimostrato sperimentalmente che il valore del parametro  $A$  non dipende dalla rapidità di propagazione della frattura, pertanto la stima della sollecitazione a frattura secondo la relazione (1) è applicabile anche nel caso di propagazione subcritica della cricca.

Shi et al. (1989) hanno riportato la prova sperimentale della sostanziale invarianza del parametro  $A$  nell'intervallo di temperatura compreso tra - 150 °C e 85°C.

Già Nichols (1989) aveva proposto una procedura di analisi della frattura del parabrezza, basata prevalentemente sull'osservazione della traiettoria della frattura, in cui era fatto cenno alla relazione empirica (1) per la stima della sollecitazione critica.

Sulla base di queste esperienze si è ritenuto utile stabilire una metodologia sistematica per la determinazione delle cause della frattura dei parabrezza nelle fasi di

sperimentazione su strada e in clientela, unitamente alla valutazione della resistenza del componente.

Per stabilire un adeguato riferimento quantitativo di tale stima si è voluto procedere alla determinazione sperimentale del valore del parametro A, sottoponendo a prova di frattura un adeguato numero di campioni di vetro sodico calcico.

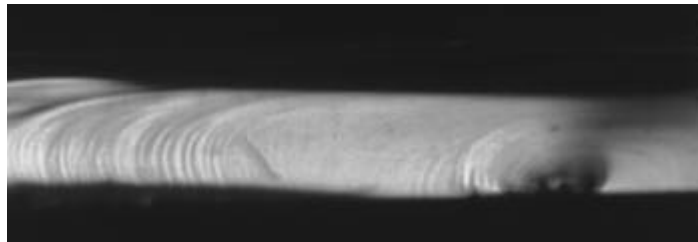
### CARATTERIZZAZIONE DELLA COSTANTE DI SPECCHIO

La determinazione sperimentale della relazione tra lo stress a rottura  $\sigma$  ed il raggio dello specchio R è stata effettuata stimando il coefficiente A di regressione lineare nella equazione1).

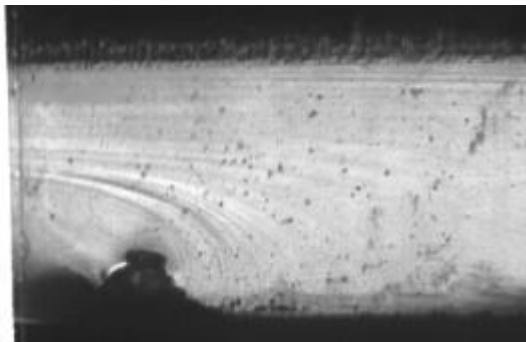
Sono stati a tale proposito fratturati campioni di vetro monolitico rettangolari, di dimensioni 38X250 mm e spessore 2,4 mm, mediante flessione a tre punti e torsione: la distanza tra i punti di appoggio era di 200 mm per la prova a flessione e di 150 mm per quella a torsione.

Per ognuno dei due test considerati, sono stati rotti 15 campioni di vetro.

Un esempio delle zone di origine delle rotture, con in evidenza lo specchio, viene riportato nelle figure 2 e 3.



*Figura 2 - Specchio di provino rotto a flessione*



*Figura 3 - Specchio di provino rotto a torsione*

I risultati delle suddette prove, con le rette di regressione, sono mostrati nelle figg. 4 e 5:

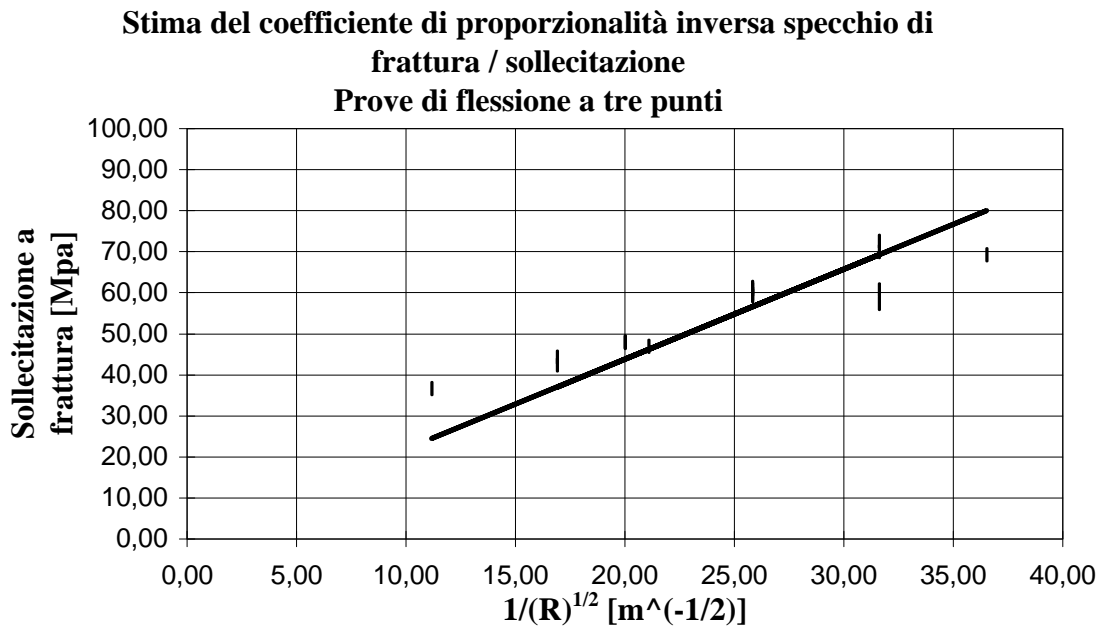


Figura 4

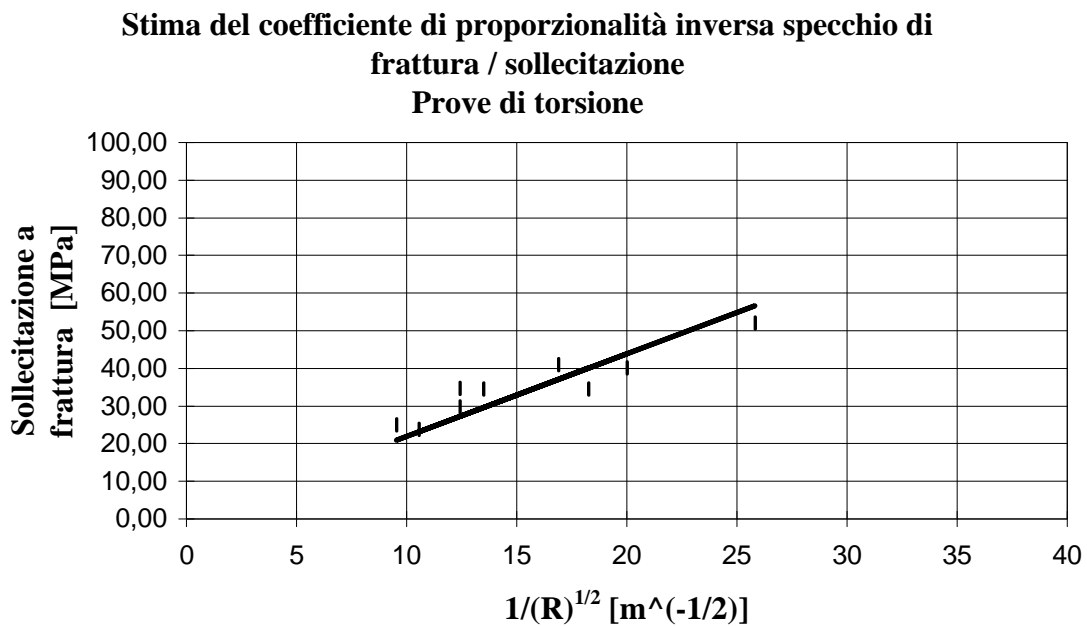


Figura 5

La stima del coefficiente A è risultata la seguente:

$A=2,19\pm 0,27 [Mpa \cdot m^{1/2}]$  dalla prova di flessione a tre punti;

$A=2,20\pm 0,35 [Mpa \cdot m^{1/2}]$  dalla prova di torsione.

Questo risultato mostra, ancora una volta, la sostanziale indipendenza del coefficiente A dalla tipologia di sollecitazione.

## **APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA ALL'ANALISI DEI PARABREZZA**

Una volta determinata la migliore relazione tra lo specchio di frattura e lo stress, l'analisi frattografica è stata inserita nella procedura generale di analisi dei parabrezza rotti durante il normale uso.

E' bene sottolineare che non sempre risulta possibile stimare la dimensione dello specchio a causa dell'eccessivo danneggiamento nella zona di rottura, che può avvenire sia in seguito alla fase di estrazione del provino dal parabrezza (carotatura) sia durante la separazione del vetro dal PVB, attualmente effettuata in via termica.

Dalle informazioni contenute nella letteratura e dal confronto con alcuni centri di ricerca dei costruttori di vetro per auto, si sono stabiliti i seguenti intervalli di valutazione della resistenza meccanica del componente:

$\sigma \geq 30 \text{ MPa}$  → il vetro presenta una resistenza meccanica soddisfacente;

$20 \text{ MPa} \leq \sigma \leq 30 \text{ MPa}$  → il vetro presenta una resistenza meccanica bassa;

$\sigma \leq 20 \text{ MPa}$  → il vetro presenta una resistenza meccanica assolutamente insufficiente.

A titolo di esempio, vengono illustrati di seguito due casi particolarmente significativi di analisi frattografica, in cui quest'ultima ha avvalorato le ipotesi delineate in prima istanza a riguardo delle cause dell'anomalia.

Il primo parabrezza considerato mostrava un sollecitazione a rottura dell'ordine di 46 Mpa, quindi estremamente elevata: l'origine della frattura era a 20 mm dal bordo, sulla lamina esterna.

L'unica anomalia riscontrata, durante le analisi effettuate su tale campione, riguardava uno spessore esiguo (1-2 mm) del cordolo di adesivo di giunzione scocca-vetro.

Questo fatto, unito alla considerazione che il modello considerato era il meno rigido dal punto di vista torsionale tra quelli commercializzati da Fiat Auto, spiega l'entità dello stress ricevuto dal vetro e dimostra l'importanza dell'adesivo come smorzante delle sollecitazioni trasmesse dalla scocca.

Il secondo vetro, prelevato da una vettura di preserie, mostrava al contrario una sollecitazione a rottura molto bassa, dell'ordine dei 20 MPa: l'origine della frattura era a 18 mm dal bordo, sulla lamina esterna.

La spiegazione di tale comportamento viene fatta risalire alla presenza di una vite, interposta tra vetro e scocca in zona rottura, fungente sia da concentratore di sforzi sia da agente abrasivo nei confronti della superficie del vetro, abbassandone così la resistenza meccanica.

## **CONCLUSIONI**

L'applicazione sistematica dell'analisi frattografica ai casi di rottura dei parabrezza durante il loro normale uso permetterà di costruire un data base di estrema importanza ai fini della determinazione dei più importanti parametri connessi alla resistenza meccanica del vetro.

L'esame delle prime analisi effettuate con questa metodologia sembra mostrare i seguenti fatti:

1. Vetri senza rilevanti danneggiamenti (scheggiature) e con stati tensionali normali mostrano una resistenza a rottura non inferiore a 30 MPa;
2. I parabrezza si rompono sempre sulla lamina esterna, con l'eccezione di alcuni casi che mostrano danneggiamenti dovuti ad impatti con corpi rigidi sulla lamina interna. Questo porterebbe ad escludere ogni influenza significativa della serigrafia sulla resistenza meccanica del componente in esercizio.
3. Sempre con l'eccezione di casi aventi significativi danneggiamenti sul bordo, tutti le rotture partono ad una distanza compresa tra 10 e 40 mm dal bordo, ossia nella zona in cui sono presenti le trazioni, interne al vetro, derivanti dal processo di formatura del parabrezza.

Nella continuazione dell'opera di raccolta dati ed affinamento della metodologia, si rende quindi necessario legare le informazioni provenienti dalla frattografia con una dettagliata analisi degli stati tensionali interni parabrezza, sia quelli distribuiti nello spessore che quelli misurati sulla sola superficie.

### **RINGRAZIAMENTI**

Si ringrazia il Sig. R. Grimaldi del Centro Ricerche Fiat per la fattiva collaborazione prestata durante la sperimentazione sui campioni di vetro monolitico.

### **BIBLIOGRAFIA**

- Abdel-Latif, A.I.A., e al., 1977, Int. J. of Frac., Vol. 13, n. 3, p.349.
- Marshall, D.B., et al., J. of the Am. Ceramic Soc., vol. 63 n. 5-6 p. 358.
- Kirchner, H.P., e Kirchner, J W., J. of the Am. Ceramic Soc., vol. 62 n. 3-4 p. 198.
- Mecholsky, J.J., et al., 1978, "Fractography in Failure Analysis", ASTM STP 645, p. 363.
- Mecholsky, J.J., et al., J. of the Am. Ceramic Soc., vol. 62 n. 11-12 p. 577.
- Mecholsky, J.J., e Drexhage, M.G., J. of the Am. Ceramic Soc., vol. 63 n. 5-6 ,p. 347
- Mecholsky, J.J., 1985, "Strength of Inorganic Glass", Plenum Press New York, p. 569.
- Varner, J.R., "Engineered Materials Handbook vol. 4: Ceramics and Glass ", ASMI
- Shi, P., et al., 1989, "Physics and Chemistry of Glasses, vol.30 n.1, p. 34.
- Nichols, T., 1989, Glass Digest n.15 1989 p.56
- Fréchette, V.D., 1991, Conference Proceedings of the International Conference and Exhibits on Failure Analysis, 8 - 11 July, Montreal, p. 263
- Fréchette, V.D., 1972, "Introduction to glass science", Plenum Press New York, p. 433