

Resistenza a frattura di contenitori in vetro utilizzati nella confezione di vino spumante

Leonardo Cont¹, Tullio Toninato², Francesco Boella² e Vincenzo M. Sglavo¹

¹*Dipartimento di Ingegneria dei Materiali, Università degli Studi di Trento, Mesiano, Trento*

²*Stazione Sperimentale del Vetro, Murano, Venezia*

Sommario

Oggetto del presente lavoro è la caratterizzazione di contenitori in vetro di peso diverso utilizzati nel confezionamento di vino spumante. Le prove eseguite hanno permesso di determinare la resistenza alla pressione interna e di valutare l'influenza dello stato superficiale dei contenitori. È stato inoltre effettuato uno studio, tramite metodo degli elementi finiti, dell'andamento delle tensioni tangenziali generate dalla pressione interna al fine di ricavare i valori di sforzo a rottura per via numerica. I risultati hanno dimostrato che l'aumento in peso non è corrisposto da un analogo aumento della resistenza e che i tre recipienti sono caratterizzati da un diverso tipo di difettosità superficiale, più gravosa al crescere del peso.

Abstract

Glass containers of different weight used in the production of 'vino spumante' were studied in this work. The internal pressure resistance was determined and the influence of the surface conditions on mechanical properties was evaluated. By a finite element method stresses generated by internal pressure and fracture strength were calculated. The experimental and numerical results showed that the increase in weight does not account for a corresponding increase in mechanical properties. In addition, surface flaws were shown to be different among various type of containers, the more critical being associated to the heaviest product.

Introduzione

Il contenitore in vetro costituisce un elemento fondamentale nel confezionamento del vino spumante. Spesso, durante il cui ciclo di lavorazione possono verificarsi delle rotture dovute alla pressione interna []. Nonostante il processo di fabbricazione di questo manufatto sia tradizionale e assodato, si è pertanto reputato interessante effettuare uno studio analitico sulla resistenza meccanica dei recipienti e sull'influenza dello stato superficiale sulla resistenza a rottura. Nel presente lavoro è stato preso in considerazione il contenitore in vetro UVAG (*Ultra Violet Adsorbing Glass*) attualmente utilizzato in Italia nel processo produttivo del vino spumante 'Metodo Classico', del peso di 925 g (contenitore A). Tale recipiente, prodotto con tecnologia soffio-soffio dalla Avir S.p.A., è stato comparato con altri due contenitori fabbricati dalla stessa ditta di uguale materiale e capacità, ma di peso inferiore: 750 g (contenitore B) e 470 g (contenitore C). Il contenitore da 750 g è stato recentemente commercializzato in Francia come alternativa al recipiente da 925 g.

Procedure sperimentali

La resistenza alla pressione interna dei contenitori è stata determinata secondo le specifiche della norma ASTM C 147-86 []. Le prove sono state effettuate mediante il *Ramp Pressure Tester*. Esso è composto da:

un supporto sul quale viene fissato il collo dei contenitori in modo tale che la bottiglia rimanga sospesa in aria;

un dispositivo di tenuta della pressione, formato da una leva meccanica che sigilla l'imboccatura mediante una guarnizione elastica;

un ugello da cui fuoriesce l'acqua che riempie completamente il recipiente;

uno sportello di protezione.

Una volta posto il contenitore nella sua sede, è sufficiente chiudere lo sportello di protezione e automaticamente il compressore idraulico aumenta la pressione interna gradatamente fino al valore limite, pari a 60 bar. È fondamentale sottolineare che il valore mostrato dal display dell'apparato menzionato non si riferisce al valore puntuale della pressione, ma rappresenta il valore di pressione equivalente all'applicazione di quella data pressione per 1 minuto, secondo la relazione:

$$p_R = \frac{1}{0.72} (p_{60} + 1.2) \quad (1)$$

dove p_R è la pressione effettiva e p_{60} è la pressione riferita a un test della durata di 1 minuto. In tal modo si tiene conto della componente dovuta alla fatica statica [].

I test sono stati eseguiti utilizzando un numero di campioni pari a 39 per il contenitore A, 29 per il B e 30 per il contenitore C. Essi sono stati foderati uno ad uno con nastro adesivo, in modo da non disperdere i frammenti di vetro all'atto dello scoppio. Questo accorgimento ha permesso di individuare il punto di partenza della frattura e recuperare, nella quasi totalità dei casi, l'origine della stessa.

Per l'analisi dello sforzo di rottura è stata utilizzata la tecnica frattografica [,.]. L'osservazione al microscopio ottico della zona di partenza della frattura ha permesso di raccogliere le informazioni

necessarie per caratterizzare il materiale esaminato da un punto di vista quantitativo. La tipica morfologia della superficie di frattura attorno al punto di innesco è mostrata in Figura 1. Si osservano l'origine esatta della frattura e lo specchio di frattura (*mirror*).

Noti i parametri geometrici della zona di origine della frattura, si può determinare lo sforzo di rottura σ_R tramite la relazione:

$$\sigma_R \sqrt{R_M} = A_M \quad (2)$$

dove A_M è stato assunto pari a $60.8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ []. L'utilizzo di un unico valore per A_M porta ad un calcolo non rigoroso dato che la costante non può essere considerata a priori indipendente dallo spessore delle pareti dei contenitori. Tale parametro influenza innanzitutto la velocità di applicazione dello sforzo, legata alle caratteristiche geometriche del recipiente (tutti i contenitori sono stati infatti sottoposti allo stesso aumento di pressione). In secondo luogo, il fattore di intensità degli sforzi applicato alla fessura che si sta propagando può risentire del rapporto fra dimensione del difetto e spessore del vetro [].

L'analisi delle pressioni di rottura e degli sforzi a rottura è stata affrontata ricorrendo alla funzione di distribuzione di Weibull []. La probabilità di frattura P è stata calcolata come:

$$P = \frac{n}{N+1} \quad (3)$$

dove n rappresenta la posizione del campione di riferimento nella serie ordinata crescente e N il numero di campioni.

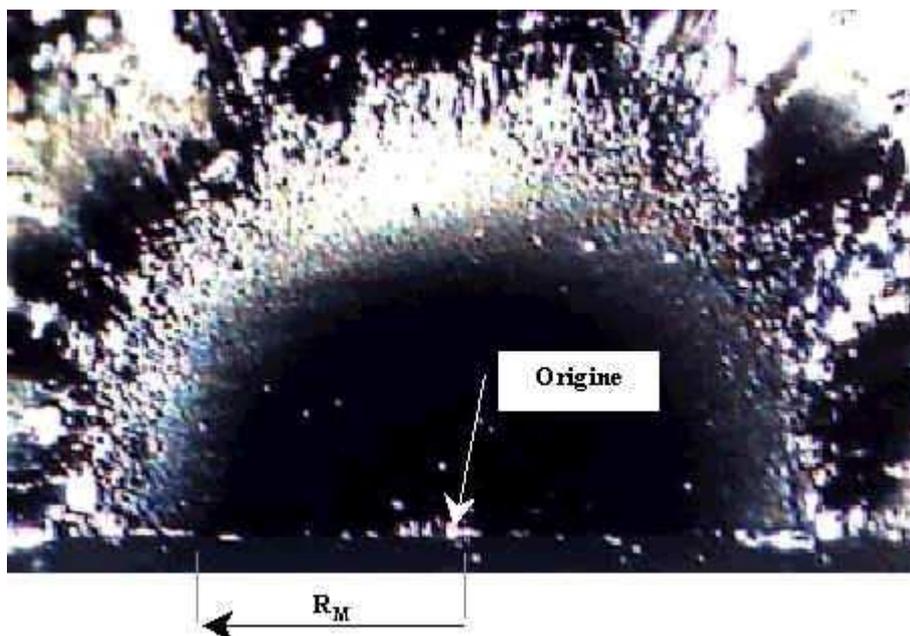


Figura 1. Zona di origine della frattura, con mirror e rispettivo raggio.

Risultati e discussione

I valori delle pressioni di rottura sono riportati in Tabella 1. Va detto che ai sei contenitori A non rotti a 60 bar (limite della macchina) è stato assegnato un valore di rottura arbitrario pari a 65 bar.

Tabella 1. Pressioni di rottura.

Contenitore	p_R [bar]
A	45.9±9.8
B	36.6±6.4
C	28.7±5.2

Appare immediato che un aumento di peso pari a quasi al doppio non comporta un identico rapporto nell'aumento della pressione di rottura: la pressione media di rottura cresce infatti solo del 60% circa. Andando ad esaminare i valori singoli, si nota come alcuni contenitori A si siano rotti a pressioni inferiori a quelle di alcuni C. Il comportamento dei contenitori B è relativamente analogo, con un aumento di pressione pari al 28% contro un aumento in peso del 60%.

La Figura 2 mostra i diagrammi di Weibull per quanto concerne le pressioni di rottura. Il modulo m dei recipienti è più basso per i contenitori A rispetto ai recipienti più leggeri, mettendo in luce un aumento della dispersione dei valori di rottura.

Tutte le fratture hanno avuto origine da difetti presenti sulla superficie esterna. Essi sono stati attribuiti a fessure generate sia in fase di formatura che per usura o urto nelle successive lavorazioni. Inoltre, la frattografia ha permesso di stabilire che tutte le rotture sono state causate dalla tensione tangenziale, poiché lo specchio di frattura è stato ritrovato sempre orientato in direzione longitudinale rispetto all'asse del contenitore.

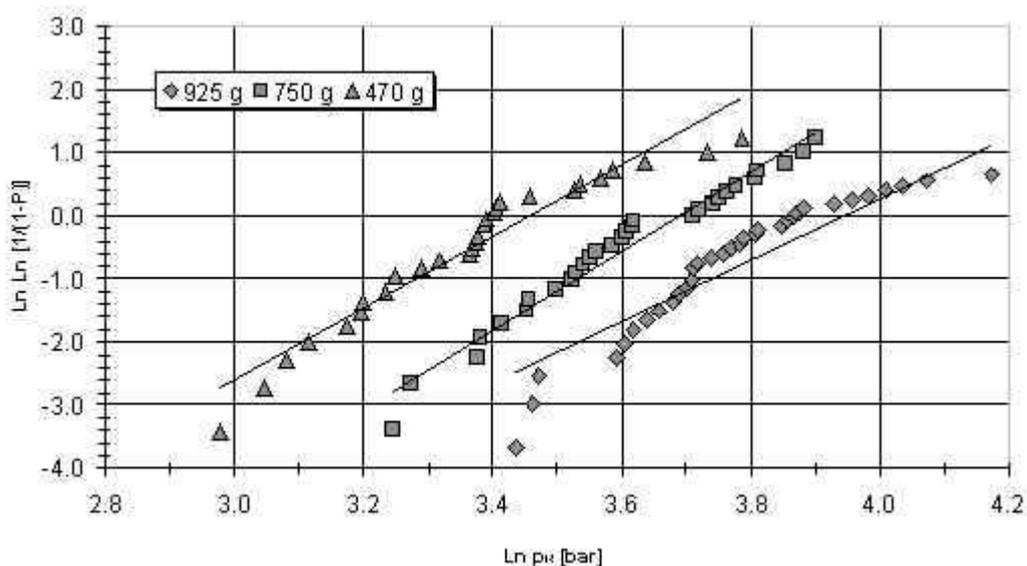


Figura 2. Distribuzione delle pressioni di rottura; m rappresenta il modulo di Weibull.

I risultati dell'analisi degli sforzi di rottura dei contenitori sono esposti nella Tabella 2. Si nota immediatamente come la resistenza a rottura diminuisca con il peso, assumendo proprio per il contenitore A il valore più basso.

Tabella 2. Sforzi di rottura ricavati dalla misurazione degli specchi di frattura.

Contenitore	σ_R [MPa]
A	39.6±7.3
B	45.8±9.8
C	51.4±10.2

L'esame del punto di rottura ha permesso di trarre ulteriori interessanti considerazioni sullo stato superficiale dei contenitori. Nella Tabella 3 sono riportate le percentuali di rottura in relazione a varie fasce di altezza dal fondo del contenitore. Si è scelto di suddividere il recipiente in fondo (sotto il centimetro), corpo centrale (da 1 a 10 centimetri), spalla (da 11 a 18 centimetri) e collo (da 19 centimetri fino all'imboccatura) per motivi legati alle variazioni di curvatura.

Nel caso dei contenitori A e B si osservano percentuali di rottura sul fondello intorno o superiori all'80%, mentre per il recipiente C si è avuto un andamento più regolare fra spalla e fondello con percentuali distribuite in modo più omogeneo. Questo porta ad affermare che esiste una distribuzione dei difetti differente nei tre tipi di recipienti ma anche in uno stesso contenitore. Nel contenitore A sembra che ci sia una difettosità diversa fra spalla e fondello, poiché le rotture sul fondello sono avvenute tutte a valori di σ_R piuttosto simili e bassi (intorno ai 30 MPa). In particolare, i difetti presenti in tale zona sembrano più critici rispetto a quelli sulla spalla in considerazione del minore σ_R . Il contenitore B ha manifestato un comportamento analogo all'A, per cui anche in questo caso si può parlare di difettosità più gravosa a livello di fondello. Per il contenitore C, invece, i valori di resistenza a rottura sono equamente suddivisi tra spalla, fondello e corpo centrale e fanno pensare a una distribuzione dei difetti sostanzialmente omogenea.

Tabella 3. Percentuale di rottura per fasce di altezza.

h [cm]	A	B	C
0	6%	21%	43%
1-10	6%	0%	17%
11-18	88%	79%	40%
19-28	0%	0%	0%

In Figura 3 sono riportati i diagrammi di Weibull degli sforzi di rottura. Nel caso del contenitore C è stato possibile trattare tutti i dati congiuntamente in virtù della loro buona omogeneità tra le varie zone di rottura (il calcolo separato ha portato a due rette con modulo di Weibull praticamente uguale). Il modulo m ricavato per i vari recipienti ha fornito valori in linea quelli tipici dei materiali vetrosi [8]. In particolare, si nota immediatamente che esiste una certa uniformità nei valori per quanto riguarda le difettosità alla spalla (il modulo di Weibull aumenta al diminuire del peso). È stata poi ottenuta (Figura 3-a e Figura 3-b) una differenza sostanziale fra fondello e spalla per i contenitori A e B, a conferma del diverso stato superficiale delle due zone. In particolare, la superficie del fondello è risultata qualitativamente inferiore, con difetti più omogenei ma di più elevate dimensioni rispetto alla spalla.

Al fine di spiegare perché le rotture nel caso dei contenitori A e B siano avvenute più spesso in corrispondenza della spalla, dove dovrebbero esistere difetti meno critici che sul fondello, si è fatto ricorso all'analisi numerica con il metodo degli elementi finiti. L'applicazione della procedura è stata limitata al calcolo della tensione tangenziale (responsabile delle rotture), della quale si riporta in Figura 4 l'andamento nelle zone di trazione per i tre tipi di contenitori. I valori sono stati calcolati con una pressione interna di 20 bar. Dall'analisi dei diagrammi si è potuto osservare che nel contenitore A e, in misura minore, nel B, le tensioni tangenziali più alte si sviluppano principalmente in corrispondenza della spalla, mentre nel contenitore C si verifica una distribuzione più omogenea della tensione massima.

Dunque, si è potuto stabilire che nel contenitore A le rotture sono avvenute principalmente alla spalla perché nel fondello le massime tensioni tangenziali sono generate su un'area molto ristretta (sono anche sempre inferiori di quelle alla spalla). Pur avendo riscontrato che i difetti in tale zona sono più gravosi a causa dei bassi σ_R rilevati, le rotture sono più localizzate in prossimità della spalla proprio per come si sono sviluppati gli sforzi. Nel contenitore B si è verificata una situazione analoga per quanto riguarda la distribuzione dei difetti, ma un diverso andamento delle tensioni, con valori alti ed estesi anche sul fondello. La combinazione dei due fattori ha pertanto portato a un maggiore numero di rotture sul fondello, tutte a valori limitati. Infine, nel recipiente C le rotture sono risultate equamente distribuite sia per la più omogenea qualità dei difetti sia perché le tensioni assumono i valori puntuali massimi su un'area nettamente maggiore, comprendente non solo spalla e fondello, ma anche parte del corpo centrale.

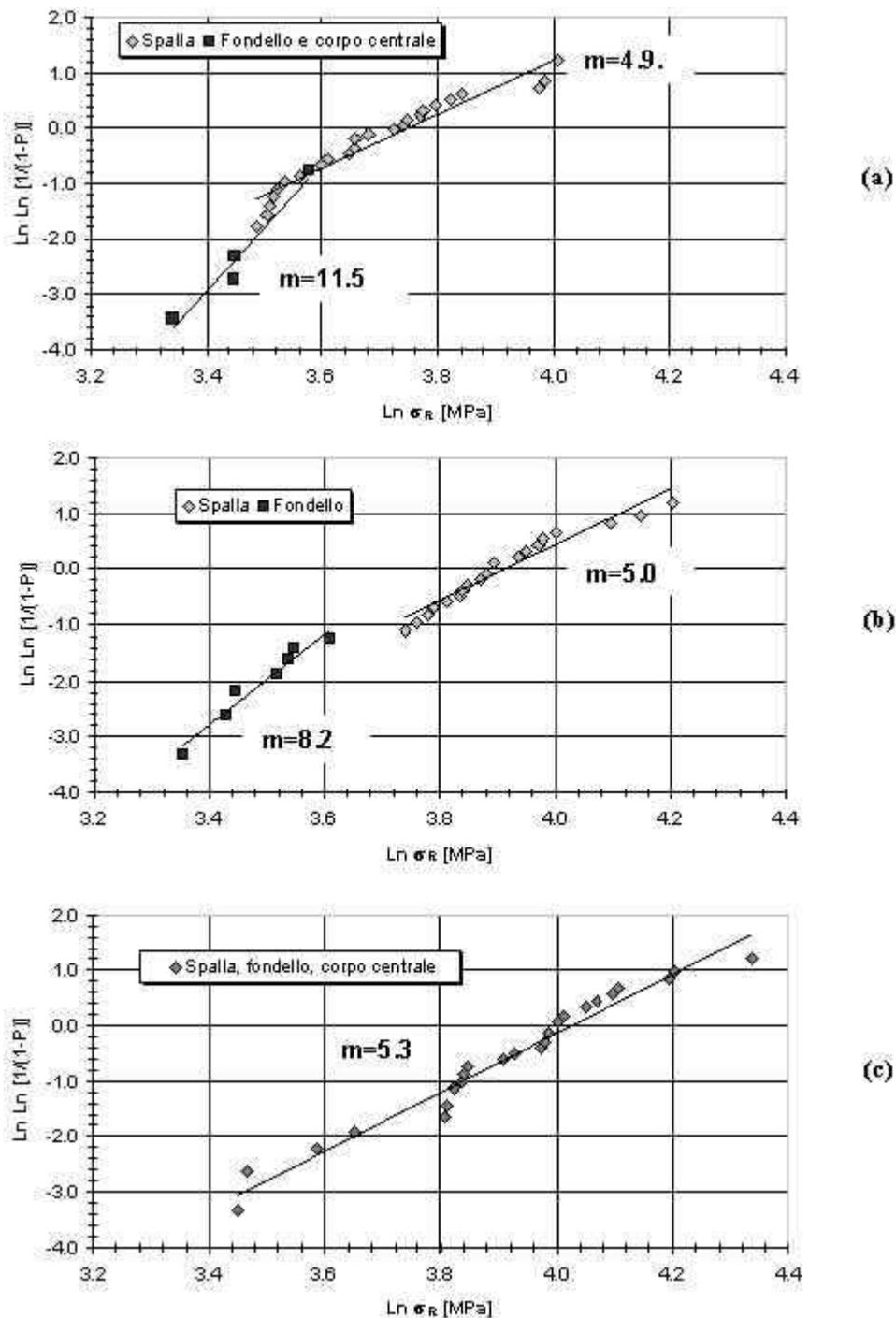


Figura 3. Diagramma di Weibull per il contenitore A (a), B (b) e C (c).

L'analisi agli elementi finiti è servita per verificare la bontà del calcolo degli sforzi di rottura. Infatti, poiché l'aumento di tensione è lineare con la pressione [], per ogni contenitore è stato possibile ricavare le resistenze a rottura. Il calcolo è stato eseguito considerando l'altezza in corrispondenza della quale era partita la frattura e calcolando la tensione sviluppatasi in quel punto (pari allo sforzo di rottura) secondo una semplice relazione di proporzione definita da:

$$\sigma_R^* = \frac{\sigma_{20} P_R}{20} \quad (4)$$

dove p_R è la pressione di rottura reale del contenitore (si veda l'Eq. (1)), σ_{20} è la tensione letta sul diagramma fornito dal calcolo agli elementi finiti per una pressione interna di 20 bar e σ_R^* lo sforzo di rottura ottenuto dall'analisi numerica. Si nota (Tabella 4) un buon accordo con i valori ottenuti dalla misurazione degli specchi di frattura; in particolare è stata confermata la tendenza dei valori sperimentali.

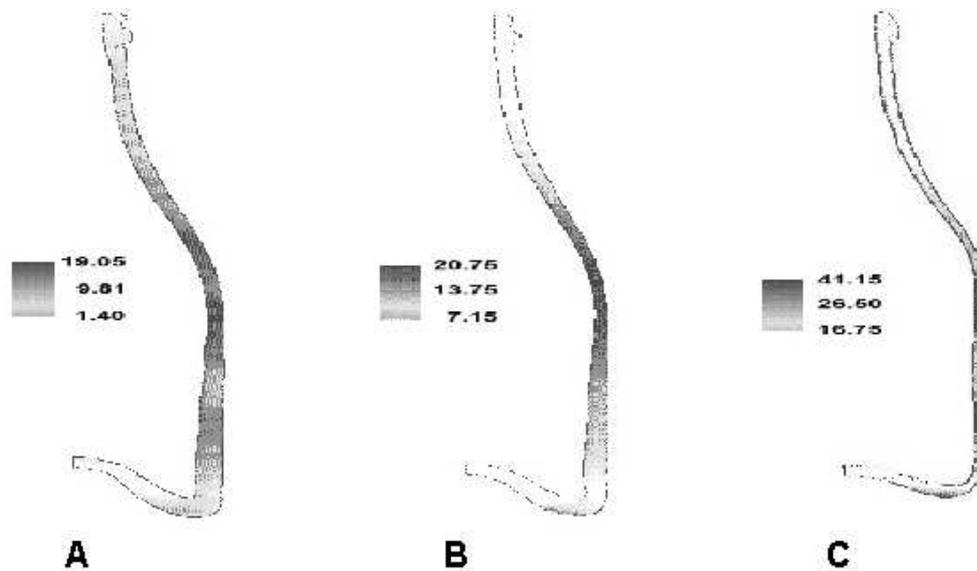


Figura 4. Andamento della tensione tangenziale di trazione (MPa) nei contenitori sottoposti a pressione interna uniforme di 20 bar. Le sezioni sono state deformate secondo un rapporto altezza-larghezza=1:2 per maggiore chiarezza.

Tabella 4. Comparazione degli sforzi di rottura calcolate in diversi modi.

Contenitore	Sforzo di rottura medio [MPa]	
	σ_R^*	σ_R
A	43.8±8.6	39.6±7.3
B	46.6±10.6	45.8±9.8
C	59.9±11.6	51.4±10.2

I contenitori utilizzati nel confezionamento di vino spumante da 925 g (A) e, recentemente, da 750 g (B), presentano una resistenza alla pressione interna più che adeguata con riferimento alle esigenze del ciclo di produzione del vino spumante che prevede una pressione massima di 7 bar []. A fronte di tale osservazione, si è però constatato un aumento della pressione di rottura appena sufficiente in relazione all'aumento di peso e una maggiore dispersione dei valori rispetto a un contenitore più leggero, da 470 g (C). Nelle approssimazioni fatte, la qualità superficiale è risultata peggiore al crescere del peso. Tale aspetto si è tradotto in uno sforzo di rottura mediamente più basso nei contenitori A e B rispetto al recipiente C: con riferimento ai valori medi misurati sperimentalmente, rispettivamente il 30% e il 12% in meno. I difetti più gravosi sono stati riscontrati soprattutto in corrispondenza del fondello, dove le rotture sono avvenute con sforzi simili e limitati a 30÷35 MPa.

Bibliografia

1. *Il parametro 'materiali' nella produzione di vino spumante*, Leonardo Cont, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Trento, Anno Accademico 1996-'97.
2. Standard Test Method for Internal Pressure Strength of Glass Containers, ASTM C 147-86, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 15.02, American Society for Testing Materials, 1995.
3. V.M. Sglavo, D.J. Green, *Eng. Fract. Mech.*, 55 [1], 35-46, 1996.
4. *Fractography of Glass*, Edited by R.C. Bradt & R.E. Tressler, Plenum Press, New York, 1994.
5. *Fractography of Glasses and Ceramics II*, Ceramic Transactions, Vol. 17, The American Ceramic Society, USA, 1991.
6. T.A. Michalske, V.D. Frechette, *J. Am. Ceram. Soc.*, 63 [11-12], 603-609, 1980.
7. B.R. Lawn, T. Wilshaw, *Fracture of Brittle Solids*, Cambridge University Press, London, 1975.
8. G.J. DeSalvo, *Theory and Structural Design Applications of Weibull Statistics*, Westinghouse Electric Corporation, Astronuclear Laboratory, Pittsburgh, 1970.
9. S.P. Timoshenko, J.N. Godier, *Theory of Elasticity*, International Student Edition, Mc-Graw Hill Book Company, Singapore, 1982.
10. *Bouchage de tirage et d'expédition pour vins mousseux de qualité produits dans des régions déterminées*, Guide n°3, DOC INE 93/006, 1994.

Atti del convegno

[[Precedente](#)] [[Successiva](#)]

