

## EFEITO DO DISPOSITIVO DE ENSAIO NA ESTATÍSTICA DE FRATURA FRÁGIL

A. R. MIGLIORE JR., E. D. ZANOTTO, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, SP.

Tem sido relatado que idênticas amostras cerâmicas quando submetidas a ensaios de flexão em laboratórios diferentes apresentam significativas variações no valor da resistência média à fratura e no módulo de Weibull.

Baratta [1] analisou diversas fontes de erro na realização de ensaios de flexão e estimou a magnitude destes erros. Hoagland et al. [2] verificaram que grande parte das tensões parasitas na flexão podem ser eliminadas simplesmente com a utilização de dispositivos de flexão que permitam compensar eventuais pequenos desalinhamentos.

Para avaliar a magnitude do erro experimental cometido ao se utilizar diferentes dispositivos de aplicação de carga em ensaios de flexão, foram ensaiados dois conjuntos de amostras cilíndricas de vidro PIREX 7740, com diâmetro de 4mm, em flexão a 4 pontos com vão entre as cargas externas de 50mm. Os ensaios foram realizados em ambiente de laboratório em máquina universal Instron modelo 1127 com velocidade de deslocamento do travessão de 5mm/min.

Um conjunto de 55 réplicas foi ensaiado em um dispositivo convencional largamente utilizado em laboratórios, conforme a Fig. 1. Este dispositivo consiste basicamente de roletes de aço duro que se encaixam em chanfros que servem de gabarito para a aplicação das cargas. Para o arranjo utilizado, a distância entre as cargas internas foi de 20mm.

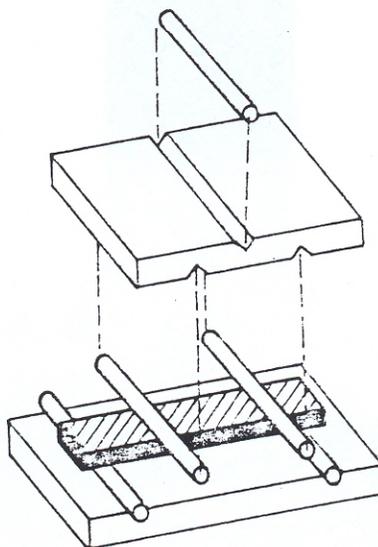


Fig. 1 - Dispositivo convencional para ensaio de flexão.

Outro conjunto de 49 réplicas foi ensaiado em um dispositivo de flexão aqui denominado de compensado e construído conforme sugerido por Hoagland et al. A Fig. 2 apresenta uma perspectiva desse dispositivo, onde a amostra A é carregada através dos roletes de aço duro B e a carga é aplicada de modo uniforme através dos roletes D e dos blocos C e E. A posição relativa das cargas é ajustada pelos parafusos F e os elementos do dispositivo são man-

tidos juntos antes do ensaio por anéis elásticos colocados nas cavidades G. Para este ensaio, o vão entre as cargas internas foi de 25mm.

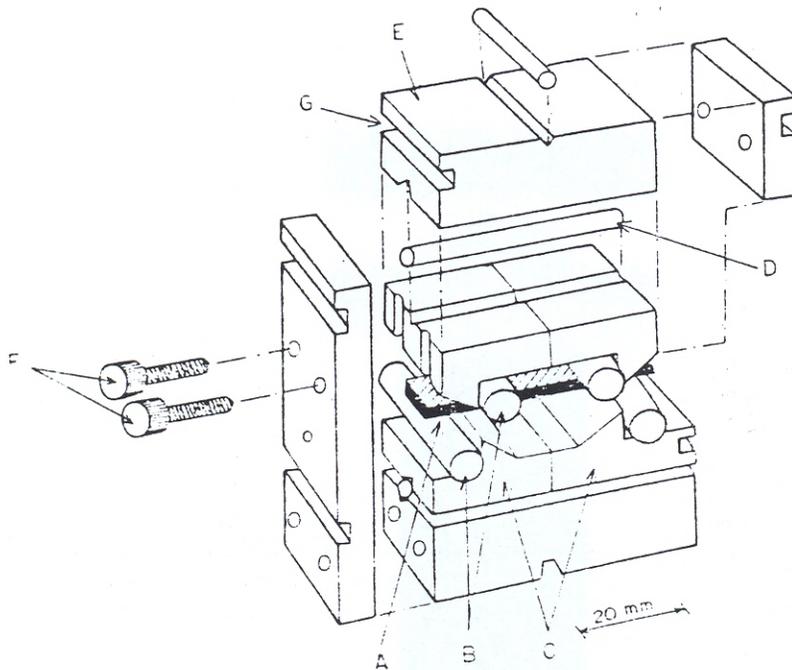


Fig. 2 - Dispositivo compensado para ensaio de flexão.

Para determinar a tensão média de fratura e o módulo de Weibull, os resultados dos ensaios foram arranjados em classes de tensão conforme descrito por Migliore Jr. e Zanotto [3], onde cada classe de tensão corresponde a uma faixa de amplitude de um décimo da diferença entre as tensões máxima e mínima observadas. A probabilidade acumulada de fratura foi obtida pela totalização do número de amostras, cujas tensões de fratura situaram-se em cada classe de tensão, agrupando-se na classe imediatamente superior aquelas com menos do que 5 resultados experimentais. As Tabelas 1 e 2 resumem as tensões e probabilidades obtidas com este procedimento para cada dispositivo de ensaio.

Tabela 1 - Tensão e probabilidade acumulada de fratura para cada classe de tensão obtidas com o dispositivo convencional.

classe de tensão	Tensão de fratura $\sigma_f$ (MPa)	Probabilidade $P_F$
3	66,04	$\leq 0,11$
4	70,49	$\leq 0,38$
5	74,94	$\leq 0,55$
7	83,84	$\leq 0,69$
8	88,29	$\leq 0,85$
10	97,19	$\leq 1,00$

Tabela 2 - Tensão e probabilidade acumulada de fratura para cada classe de tensão obtidas com o dispositivo compensado.

classe de tensão	Tensão de fratura $\sigma_f$ (MPa)	Probabilidade $P_F$
2	74,55	$\leq 0,14$
3	78,89	$\leq 0,29$
5	87,58	$\leq 0,55$
6	91,92	$\leq 0,69$
7	96,26	$\leq 0,84$
10	109,29	$\leq 1,00$

Para a determinação dos parâmetros da estatística de Weibull admitiu-se que a distribuição de defeitos segue a relação para a probabilidade acumulada de fratura  $P_F$  dada por

$$P_F = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_f}{\sigma_o} \right)^m \frac{V_e}{V_o} \right] \quad (1)$$

onde  $\sigma_f$  é a tensão de fratura de cada classe,  $m$  e  $\sigma_o$  são os parâmetros de Weibull característicos do material,  $V_e$  é o volume efetivo e  $V_o$  é o volume unitário (no caso,  $1 \text{ cm}^3$ ).

A partir da Eq. (1) foram efetuadas regressões não lineares para os dados das Tabelas 1 e 2 com ajuste por procedimento numérico de acordo com o método dos mínimos quadrados [4], cujos resultados estão apresentados na Tabela 3. A Fig. 3 apresenta as curvas correspondentes à Eq. (1) para os ensaios realizados, bem como os resultados experimentais.

Tabela 3 - Resultados das regressões efetuadas

parâmetro estatístico	dispositivo	
	convencional	compensado
$m$	7,2	9,4
$\sigma_o$ (MPa)	41,6	52,9
$V_e$ ( $\text{mm}^3$ )	9,3	7,7
$\sigma_{50\%}$ (MPa)	75,7	85,5
$\sigma_{5\%}$ (MPa)	52,7	64,8
$\sigma_{1\%}$ (MPa)	42,0	54,5

Como pode ser observado na Tabela 3, o dispositivo compensado conduziu a uma tensão média de fratura 13% superior à tensão média obtida com o dispositivo convencional e a um módulo de Weibull  $m$  31% superior. Além disso, as superfícies de fratura observadas em ambos ensaios foram diferentes, sendo mais planas e posicionadas

em seção mais central no caso do dispositivo compensado do que no dispositivo convencional.

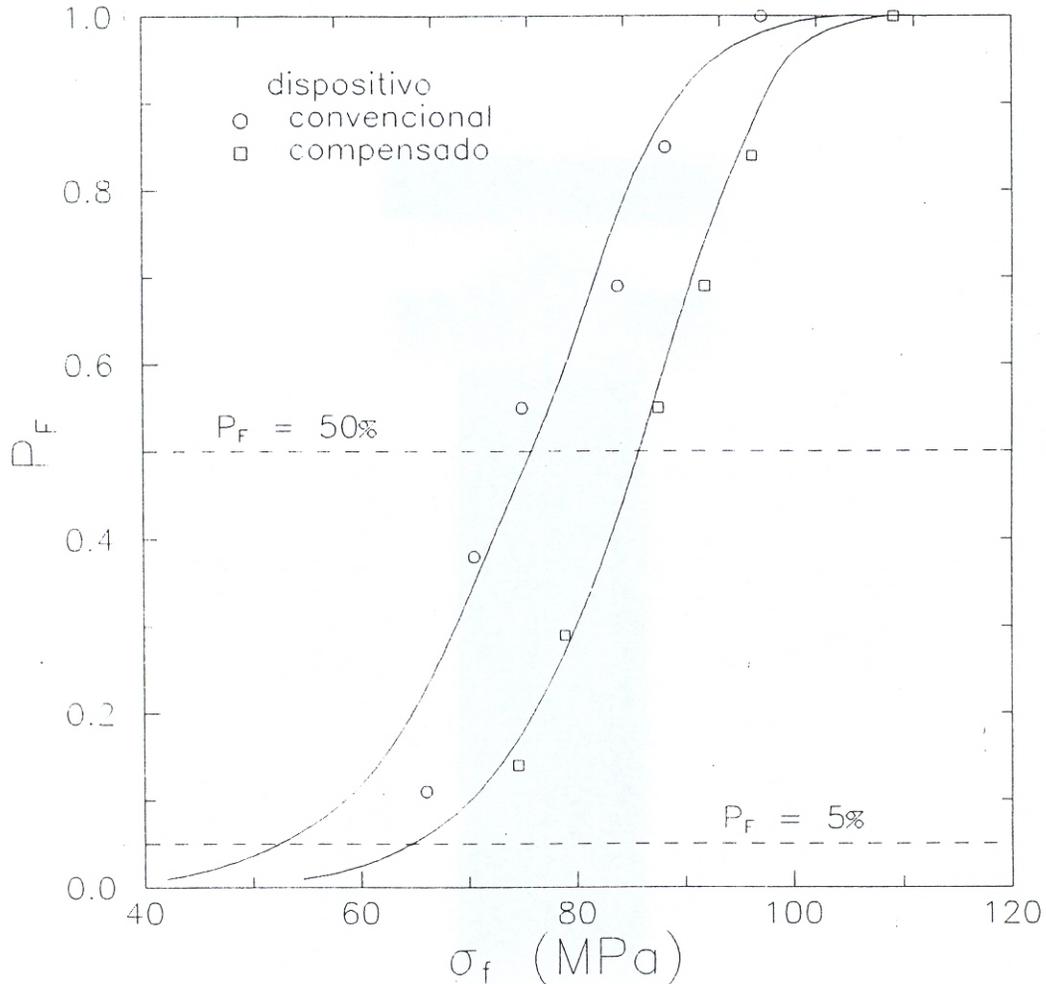


Fig. 3 - Probabilidades acumuladas de fratura em função da tensão de fratura e do dispositivo de ensaio.

Outra observação que pode ser feita é que, como os volumes efetivos de ensaio foram diferentes (em decorrência dos vãos entre cargas serem diferentes), teoricamente dever-se-ia ter uma tensão média de fratura  $\sigma_A$  no dispositivo convencional diferente da tensão  $\sigma_B$  obtida com o dispositivo compensado. Com efeito, a partir da Eq. (1) pode-se demonstrar que a previsão teórica entre as tensões médias de fratura é dada pela relação entre os volumes efetivos tal que

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_B} = 8,3 \sqrt{\frac{7,7}{9,3}} = 0,98 \quad (2)$$

onde foi assumindo para o módulo de Weibull a média dos valores da Tabela 3. O resultado teórico da Eq. (2) indica influência desprezível do volume efetivo sobre a relação entre as tensões de fratura para os ensaios realizados.

As diferenças observadas na Tabela 3 entre as tensões de fratura e o módulo de Weibull indicam significativa influência do

dispositivo de ensaio sobre os resultados obtidos. Por outro lado, ao invés da tensão média de fratura, o projeto de produtos cerâmicos e vítreos deve considerar a tensão correspondente a uma determinada probabilidade acumulada de fratura como referência para a resistência mecânica. Como exemplo, caso sejam consideradas as tensões correspondentes às probabilidades acumuladas de fratura de 5% ou 1%, os resultados apresentados na Tabela 3 e na Fig. 3 mostram diferenças de 23% e 30%, respectivamente, para as tensões calculadas com base em cada ensaio realizado.

Considerando agora a hipotética situação de desenvolvimento de um determinado produto que deveria resistir a tensões normais da ordem de 50 MPa com probabilidade de fratura inferior a 1%, o material aqui considerado seria rejeitado caso suas características mecânicas tivessem sido avaliadas através do ensaio com o dispositivo convencional. Por outro lado, este mesmo material poderia ser aceito caso tivesse sido utilizado o dispositivo compensado. Portanto, a otimização do projeto de um produto cerâmico ou vítreo pode ser realizada com uma determinação experimental mais precisa da estatística de fratura frágil.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Carborundum do Brasil Ltda. pelo suporte financeiro e também ao Eng<sup>o</sup> Gerson Ferreira, da mesma empresa, e à engenheiranda Sandra Balan, da UFSCar, pela colaboração na execução da parte experimental deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- 1- BARATTA, F. I. - Requirements for flexure testing of brittle materials. In: *Methods for assessing the structural reliability of brittle materials*, ASTM STP 844. Ed. by S.W. Freidman and C. M. Hudson, Philadelphia, ASTM, 1984. pp.194-222.
- 2- HOAGLAND, R.G.; MARSCHALL, C.W.; DUCKWORTH, W.H. - Reduction of erros in ceramic bend tests. *J. Am. Ceram. Soc.*, 59(5-6):189-92, 1976.
- 3- MIGLIORE JR., A.R.; ZANOTTO, E.D. - Sobre a determinação dos parâmetros de Weibull. *Cerâmica*, 38(253):7-11, 1992.
- 4- MIGLIORE JR.; A.R. - Procedimento numérico para determinação dos parâmetros da estatística de Weibull. (aceito para publicação na Revista *Cerâmica*, 1992).