

# Caracterização da tenacidade à fratura de materiais de fricção e critérios de projetos

## *Characterization Of fracture toughness of friction materials and design approach*

Alexandre Casaril

Mestre em Engenharia de Materiais – Fras-le S.A.  
Caxias do Sul, RS [Brasil]  
alexandre.casaril@fras-le.com

Carlos Henrique Selle Pereira

Engenheiro de Materiais – Fras-le S.A.  
Caxias do Sul, RS [Brasil]  
carlos.pereira@fras-le.com

Carlos Pérez Bergmann

Doutor em Engenharia de Materiais, Laboratório de Materiais Cerâmicos; Departamento de Materiais; Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Porto Alegre, RS [Brasil]  
bergmann@ufrgs.br

Hazim Ali Al-Qureshi

Engenharia da Mobilidade, CEM – Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville UFSC.  
Joinville, SC [Brasil]  
alhazim@emc.ufsc.br

### Resumo

Este trabalho foi realizado com objetivo de caracterizar materiais de fricção atualmente utilizados em veículos pesados para linha de montagem e reposição. Cinco materiais de fricção foram analisados por meio de testes mecânicos realizados com base na norma ASTM D5045-99 (*Reapproved 2007*) – *Plane Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of plastic Materials*. Os resultados de  $K_{IC}$  (Tenacidade à Fratura Modo I – abertura) dos cinco materiais foram da ordem de  $1 \text{ MPa.m}^{1/2}$ , confirmando o esperado para materiais de matriz fenólica. Adicionalmente, os resultados de  $K_{IC}$  são representativos da fragilidade dos materiais de fricção. A análise estatística foi realizada utilizando a metodologia de Weibull, permitindo estabelecer probabilidades de ocorrência de  $K_{IC}$  menor do que um valor aleatoriamente escolhido. Dessa forma, do ponto de vista de projeto é possível estabelecer critérios de falha, evitando o investimento de recursos em protótipos que venham a falhar em campo.

**Palavras-chave:** Materiais de fricção. Projeto. Tenacidade à fratura. Weibull.

### Abstract

The purpose of this study was to characterize friction materials currently used in heavy vehicles for assembly lines and replacement parts. Five different friction materials were evaluated through mechanical tests based on the ASTM D5045-99 (Reapproved 2007) Standard – *Plane Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*. Results of  $K_{IC}$  for the five materials were on the order  $1 \text{ MPa.m}^{1/2}$ , corroborating values expected for phenolic matrix materials. In addition,  $K_{IC}$  results are representative of the fragility of friction materials. A statistical analysis was conducted using the Weibull methodology, allowing to establish occurrence probabilities of  $K_{IC}$  lower than a randomly chosen value. Consequently, from a design point of view, it is possible to establish failure criteria and avoid investing resources in prototypes that may come to fail in field tests.

**Key words:** Design. Fracture toughness. Friction materials. Weibull.

## 1 Introdução

O emprego de materiais compósitos como materiais de engenharia tem ganhado cada vez mais espaço em vários segmentos da indústria. Isso ocorre pelo fato de esses materiais possibilitarem uma boa sinergia na interação entre os diferentes componentes que o formam, dando como resultado uma gama de propriedades inerentes ao material, e atribuições – econômicas, ambientais, etc. – mais interessantes do que as dos componentes originais, conforme mencionam Al-Qureshi (1988) e Casaril (2004).

A indústria de materiais de fricção, de acordo com Nicholson (1995), tem nos compósitos (reforçados com partículas e fibras curtas) uma grande facilidade para reunir, em um material, uma gama enorme de propriedades, tais como resistência mecânica, condutividade e estabilidade térmica, coeficiente de atrito, condições otimizadas de NVH (*noise, vibration and harshness*), dentre outras, as quais seriam difíceis de ser alcançadas com algum outro material não compósito, a um custo viável.

Por tratar-se de um componente fundamental do sistema de freio do veículo, o material de fricção tem função primária na garantia da sua manobrabilidade segura. Dessa forma, é de fundamental importância que esse componente não quebre em serviço, o que levaria ao comprometimento da segurança do veículo e passageiros. Diante do exposto, o objetivo neste trabalho é caracterizar materiais de fricção atualmente utilizados em veículos pesados para linha de montagem e reposição.

### 1.1 Design Approach

Os materiais compósitos de fricção, como concebidos para fabricação de lonas de freio que equipam veículos pesados, por exemplo, apresentam comportamento tipicamente frágil. Os materiais frágeis, de acordo com Richerson (1992),

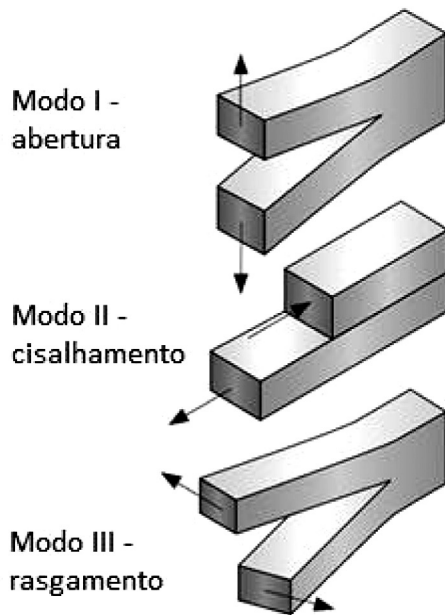
Callister (1999), Hertzberg (1996), podem ser definidos a partir de uma abordagem relacionada à sua capacidade de deformação quando submetidos ao carregamento. De forma geral, quando submetidos a um carregamento, esses materiais exibem uma curva “tensão x deformação” de caráter completamente elástico até a fratura. Pode-se ainda admitir certo grau de deformação plástica, inferior a 4% antes da falha.

Como demonstrado na literatura por Richerson (1992) e Callister (1999), o *approach* determinístico é perfeitamente aceitável para o *design* de componentes a serem fabricados com materiais de natureza dúctil e tenaz, como os metais. Entretanto, a fabricação de componentes a partir de materiais de natureza frágil demanda um *approach* probabilístico, em razão de esses materiais, ao ser caracterizados em termos de resistência mecânica, apresentarem uma larga faixa de valores. Essa característica dos materiais frágeis está associada ao fato de os mesmos não terem a capacidade de tenacificação de defeitos de raio e orientação críticos. Assim, a caracterização de sua resistência, considerando a distribuição de defeitos no volume do componente, é de extrema importância do ponto de vista do projeto.

### 1.2 Análise de tensão em trincas

A análise da distribuição de tensões na vizinhança da trinca permite determinar a intensidade da tensão em qualquer ponto próximo a ela. Três modos fundamentais para propagar a trinca são mostrados na Figura 1, a saber: Modo I (abertura), Modo II (cisalhamento) e Modo III (rasgamento).

O desenvolvimento das correlações para determinação das tensões na vizinhança da trinca leva a estabelecer o parâmetro fator de intensidade de tensão  $K$  ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), o qual não é equivalente ao fator de concentração de tensão  $K_t$  ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).



**Figura 1: Modos fundamentais de propagação de trincas**

Fonte: <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Graphics/Mechanical/FractureModes.jpg>>.

O fator de intensidade de tensão é relacionado à tensão externa aplicada  $\sigma$  (MPa) e ao tamanho da trinca  $2a$  (m) através da seguinte relação:

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$Y$  é um parâmetro adimensional que depende do tamanho e da geometria tanto da trinca quanto da peça, assim como do modo de aplicação da tensão.

### 1.3 Tenacidade à fratura

A mecânica da fratura sugere um tratamento diferenciado do ponto de vista do projeto para prevenção de falha. Ao invés de focar na prevenção da nucleação de defeitos, admite-se que sempre haverá defeitos no material de um componente. A abordagem sugerida é que seja conduzido o projeto a partir de uma das duas relações a seguir:

- Dada uma determinada tensão de projeto, qual é o tamanho crítico do defeito admissível ao material?

- Dado um determinado tamanho crítico da população de defeitos do material, qual a máxima tensão de serviço admissível?

Cabe ressaltar que se entende por defeito não apenas trincas, mas qualquer descontinuidade, inclusão, fases dispersas no material, etc., que possa atuar como concentrador de tensões. Em materiais compósitos, por exemplo, fases dispersas podem atuar como concentradores de tensão para matrizes frágeis quando a adesão entre matriz e fase dispersa é fraca.

Dessa forma, o conceito de tenacidade à fratura, de acordo com Hertzberg (1996), Richerson (1992) e Barsoum (1997), demonstra que a tensão na vizinhança da trinca ou defeito pode ser determinada pelo fator de intensidade de tensão  $K$ , e um valor crítico do fator de intensidade de tensão  $K_c$  pode ser utilizado para especificar a combinação de tensão e geometria da trinca/peça a fim de garantir que o componente não irá falhar:

$$K_c = Y (a/W) \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Nota-se que o fator  $Y$  é uma função do comprimento da trinca  $2a$  e da largura do componente que contém a trinca  $W$ . Para componentes com valor de  $a/W$ , próximo de zero, os valores de  $Y$  tendem à unidade.

Para componentes com espessura fina (estado de tensão plana), o valor de  $K_c$  depende da espessura e diminui com o aumento dela até um valor crítico de espessura, a partir do qual o componente passa a exibir um estado de deformação plana, e o valor de  $K_c$  passa a ser constante, independente da espessura do componente. O valor da constante  $K_c$  para componentes espessos é conhecido como tenacidade à fratura Modo I para deformação plana,  $K_{Ic}$ :

$$K_{Ic} = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

## 2 Materiais e métodos

Foram avaliados cinco materiais de fricção atualmente fornecidos para os mercados de *original equipment manufacturer* (OEM) e de reposição nos Estados Unidos, Brasil e restante da América Latina.

Devido ao critério de confidencialidade e restrição de informações associado a esses materiais, suas composições exatas não serão explicitadas. No entanto, na Tabela 1 estão apontadas as principais matérias-primas que os compõem, bem como os componentes que influenciam mais fortemente na susceptibilidade do material em si em relação à presença de trincas no componente (tenacificadores).

**Tabela 1: Descrição dos cinco materiais avaliados**

Material A	Pós: resina fenólica (fenol-formaldeído), grafite natural, coque de petróleo, sulfato de bário, alumino silicato de potássio, óxidos. Tenacificadores ( $v_{\text{total}} \approx 15\%$ ): fibra de vidro, compostos de pneumáticos granulados.
Material B	Pós: resina fenólica (fenol-formaldeído), grafite natural, coque de petróleo, sulfato de bário, alumino silicato de potássio, óxidos. Tenacificadores ( $v_{\text{total}} \approx 26\%$ ): fibra de vidro, compostos de pneumáticos granulados, Pó de caju.
Material C	Pós: resina fenólica (fenol-formaldeído), grafite natural, coque de petróleo, sulfato de bário, óxidos. Tenacificadores ( $v_{\text{total}} \approx 24\%$ ): fibra de vidro, borracha nitrílica granulada.
Material D	Pós: resina fenólica (fenol-formaldeído), grafite natural, óxidos. Tenacificadores ( $v_{\text{total}} \approx 62\%$ ): fibra de vidro, borracha nitrílica granulada, Alumino-silicato expandido, limalha de aço ASTM 1010, Polpa de aramida, poros internos, Pó de caju.
Material E	Pós: resina fenólica (fenol-formaldeído), grafite natural, óxidos, carbonato de cálcio. Tenacificadores ( $v_{\text{total}} \approx 47,5\%$ ): fibra de vidro, compostos de pneumáticos granulados, composto a base de elastômero granulado, pó de caju.

As matérias-primas em pó, empregadas na fabricação dos materiais referidos na Tabela 1, tem granulometria menor do que 100  $\mu\text{m}$ . A fibra de vidro picada, na forma de feixes de 200 fila-

mentos e comprimento da ordem de 3 mm e tem função de reforço estrutural. As matérias-primas referidas como “tenacificadores”, com exceção da fibra de vidro, são granuladas e tem tamanho de grão da ordem de 0,5 a 1,5 mm.

Para avaliação da tenacidade à fratura dos materiais, foi utilizado o teste de flexão a três pontos, adequado à determinação do  $K_{IC}$ . A opção por esse método está de acordo com as indicações da literatura apresentadas por Richerson (1992), Hertzberg (1996) e Barsoum (1997), pois permite imprimir uma sollicitação de tração ao material de forma que os parâmetros como alinhamento e rigidez da máquina de ensaio não sejam tão críticos como no caso do teste de tração propriamente dito.

Foram produzidas placas planas com os cinco materiais em avaliação, seguindo seu processo de fabricação padrão de linha de produção (moldagem a quente). Os principais parâmetros do processo de moldagem são apresentados na seqüência:

- Pressão: 15-20 N/mm<sup>2</sup>;
- Temperatura: 140°C;
- Tempo de prensagem: 16 min;
- Tratamento térmico: 6 horas a 155°C.

Foi escolhida a norma *ASTM D5045-99 (Reapproved 2007) – Plane Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of plastic Materials* – como guia para a realização dos testes, uma vez que os materiais propostos para caracterização se enquadram perfeitamente no escopo dessa norma.

A Figura 2 apresenta o arranjo dimensional que foi obedecido na confecção do corpo-de-prova destinado ao teste de flexão a 3 pontos.

Conforme orientação, as dimensões foram definidas como sendo  $W = 14$  mm,  $B = 7$  mm,  $a = 7,2$  mm.

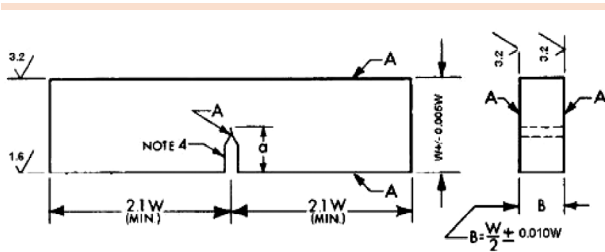


Figura 2: Corpo-de-prova para teste de flexão a 3 pontos [ASTM D5045-99]

Os corpos-de-prova foram extraídos das placas de acordo com a Figura 3.

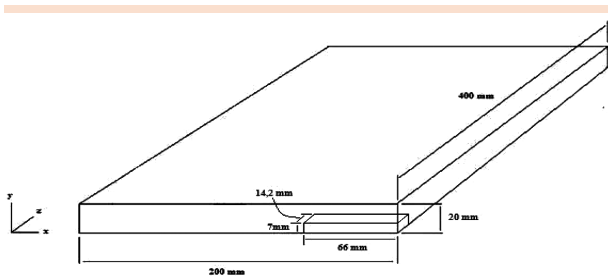


Figura 3: Esquema da extração do corpo-de-prova para teste de flexão a 3 pontos, no plano perpendicular (xz) à direção de compactação (y)

Para garantir que a trinca feita no corpo-de-prova tivesse o aspecto de criticidade necessário, a ponta da trinca foi complementada com uma lâmina de corte. Assim, foi possível imprimir a essa ponta o aspecto, conforme pode ser visualizado na Figura 4.



Figura 4: Corpo-de-prova do Material B para teste de flexão a 3 pontos

Para cada um dos materiais, 30 corpos-de-prova foram produzidos e ensaiados, utilizando uma máquina universal de ensaios Instron modelo 5569, com célula de carga de 50 kN (resolução de  $\pm 0,1$  N). Os ensaios foram realizados em ambiente controlado, com temperatura de  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade de  $50 \pm 5\%$ .

A estimativa do  $K_{IC}$  é realizada a partir dos parâmetros do corpo-de-prova e da carga de ruptura, por meio da seguinte relação:

$$K_{IC} = \left( \frac{P}{BW^{1/2}} \right) f(x) \quad (4)$$

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1,99 - x(1-x)(2,15 - 3,93x + 2,7x^2)]}{(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (5)$$

Em que  $P$  é a carga de ruptura do corpo-de-prova (kN). Conforme Figura 3,  $B$  é a espessura do corpo-de-prova (cm),  $W$  é a altura do corpo-de-prova (cm),  $a$  é o comprimento da trinca e  $x = a/W$ .

### 3 Resultados e discussões

Uma visão geral dos resultados (média e desvio-padrão) do  $K_{IC}$  de cada um dos cinco materiais avaliados, obtido experimentalmente, pode ser verificada na Tabela 2.

Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que o comportamento de tenacidade à fratura dos cinco materiais de fricção avaliados confirma o esperado para materiais de matriz fenólica, tendo  $K_{IC}$  da ordem de  $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , conforme já demonstrado por Ashby (2005), pela Figura 5, reproduzida a partir da página 72 de sua obra, a qual relaciona a Tenacidade a Fratura ( $K_{IC} - \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) no eixo das ordenadas e o limite elástico ( $\sigma - \text{MPa}$ ) para várias materiais, incluindo resina fenólica.

**Tabela 2: Resultados de  $K_{IC}$  medidos dos cinco materiais avaliados**

Material A (MPa.m <sup>1/2</sup> )	Material B (MPa.m <sup>1/2</sup> )	Material C (MPa.m <sup>1/2</sup> )	Material D (MPa.m <sup>1/2</sup> )	Material E (MPa.m <sup>1/2</sup> )	
1,61	2,06	1,74	1,44	1,09	
1,41	2,15	2,25	1,26	0,95	
2,00	2,43	1,99	1,45	0,67	
1,46	2,04	1,83	1,34	0,59	
1,79	1,84	1,74	1,33	0,62	
1,73	2,08	1,91	1,58	0,98	
1,62	3,08	2,42	1,36	1,15	
1,56	2,86	1,93	1,34	0,81	
1,49	2,14	1,41	1,51	1,28	
1,58	1,36	2,21	1,80	0,97	
1,53	2,45	2,65	1,27	0,85	
1,69	2,03	1,04	1,54	1,02	
1,74	1,84	2,44	1,54	0,90	
1,78	2,33	2,00	1,48	1,00	
1,50	2,20	1,91	1,22	1,06	
2,05	2,15	2,22	1,51	1,03	
1,85	1,86	2,10	1,51	0,89	
1,65	2,16	2,39	1,10	1,03	
1,80	2,09	1,75	1,44	1,04	
1,81	2,01	2,42	1,54	0,84	
1,69	2,16	2,29	1,60	1,02	
1,67	1,84	1,66	1,56	0,95	
1,54	2,40	1,90	1,70	0,91	
1,68	1,59	1,88	1,25	1,03	
1,77	2,17	1,59	1,18	1,21	
1,47	1,94	1,57	1,71	0,81	
1,91	2,02	2,12	1,25	0,93	
1,56	1,46	2,95	1,59	0,97	
1,34	2,13	1,88	1,42	0,92	
1,84	1,63	1,73	1,47	1,13	
<b>Média</b>	<b>1,67</b>	<b>2,08</b>	<b>2,00</b>	<b>1,44</b>	<b>0,95</b>
<b>Desvio-padrão</b>	<b>0,17</b>	<b>0,36</b>	<b>0,39</b>	<b>0,17</b>	<b>0,16</b>

Foi utilizada a abordagem estatística baseada na metodologia proposta por Weibull, pois ela permite correlacionar um valor de  $K_{IC}$  arbitrariamente previsto em projeto à probabilidade de que ele não seja atendido e o componente falhe em serviço.

A distribuição de probabilidade pode ser analisada pelo gráfico da Figura 6.

Como o objetivo do projeto do componente produzido a partir do material de fricção (seja lona de freio ou pastilha de freio) é evitar a falha desse componente em serviço, interessa estabelecer um requisito que relacione qual a probabilidade admitida de que um material de fricção tenha como característica a tenacidade, isto é, que seja resistente a fratura menor do que o valor definido em projeto. Dessa forma, assumindo que a probabilidade admitida deva ser estabelecida próxima de zero, apenas o quadrante esquerdo inferior do gráfico da Figura 6 é de interesse para o projeto de materiais de fricção, o qual pode ser mais bem analisado pela Figura 7.

Do ponto de vista de projeto de componentes utilizando materiais de fricção, a determinação do valor de  $K_{IC}$  a ser considerado em projeto pode ser feito a partir do estabelecimento de critérios de falha admitidos.

Tomando dois valores de probabilidade de falha admitida tipicamente utilizados em projetos de juntas rebatadas na união de lonas e sapatas de freio (5% e 10%), pode-se verificar que o valor de  $K_{IC}$  a ser considerado em projeto, para cada um dos cinco materiais analisados pode ser tomado a partir do gráfico da Figura 7, sendo mais bem expressos no gráfico da Figura 8.

Essencialmente, a correta leitura do gráfico da Figura 8 mostra que se, ao projetar um componente utilizando um dos cinco materiais de fricção analisados, a probabilidade de cada um dos materiais analisados apresentar, em serviço, um  $K_{IC}$  menor do que o seu valor correspondente indicado pela série de dados em azul é de 5%. A mesma interpretação se aplica para o critério de 10% de probabilidade de falha admitida (série de dados em vermelho).

Essa metodologia de análise dos dados pode ser essencial do ponto de vista de projeto, caso seja possível determinar a distribuição de tensões

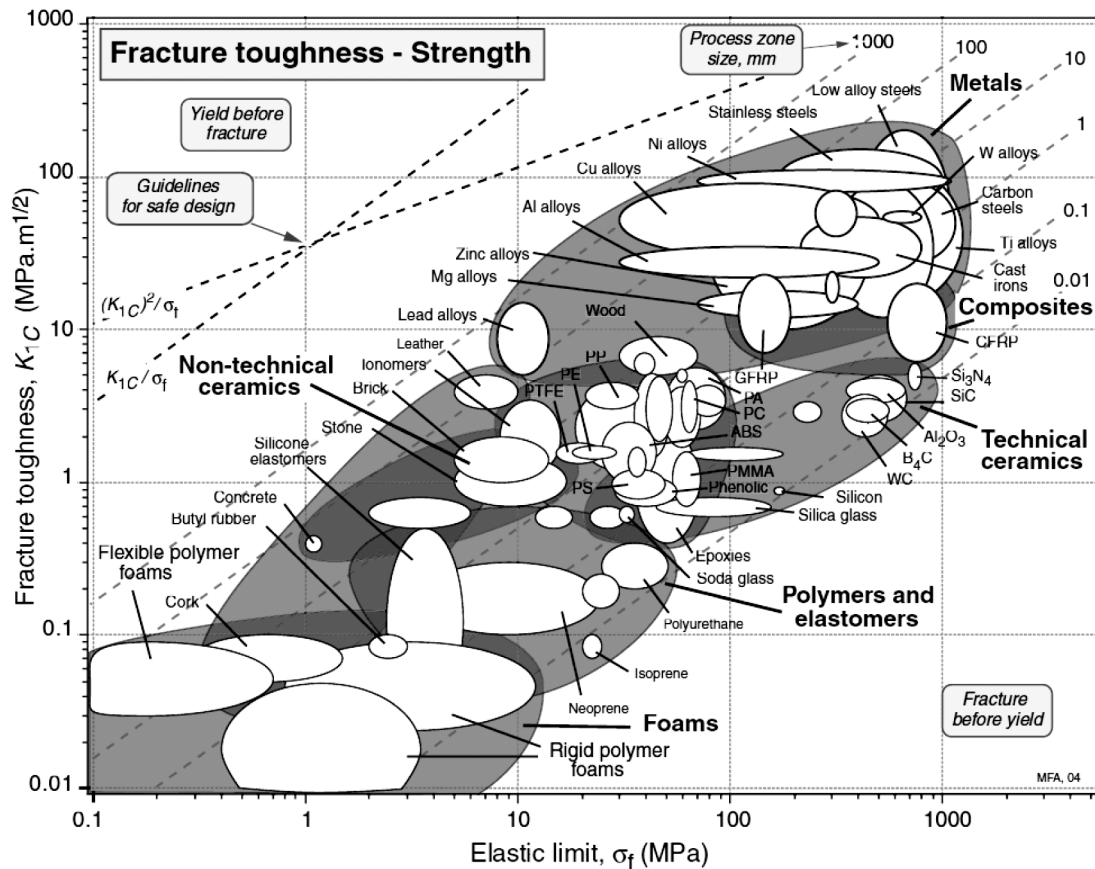


Figura 5: Valores típicos de tenacidade à fratura para materiais de engenharia

Fonte: Ashby (2005, p. 72).

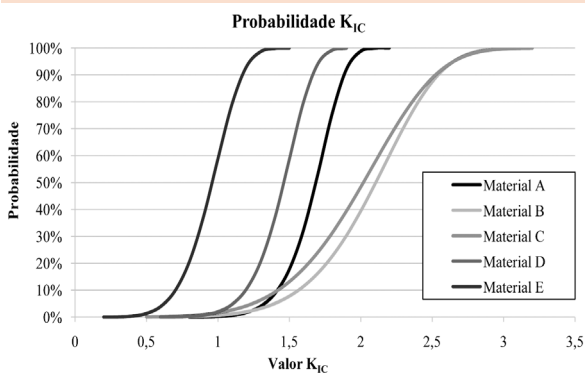


Figura 6: Distribuição da probabilidade de que o valor de  $K_{1C}$ , de cada um dos cinco materiais testados, seja menor do que um valor arbitrariamente considerado

nos componentes em serviço, associadas às suas características dimensionais críticas, como cantos vivos. Esse critério de projeto, se utilizado na fase de desenvolvimento inicial, pode contribuir enor-

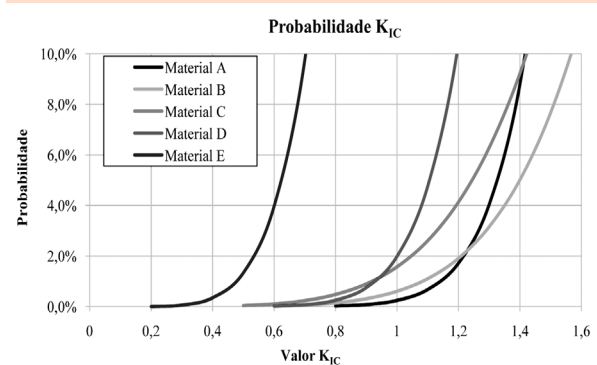
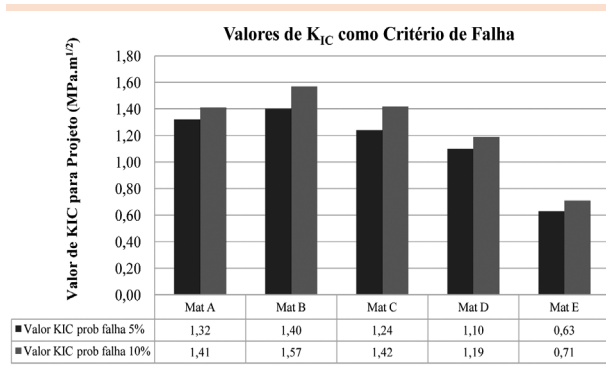


Figura 7: Distribuição da probabilidade do valor de  $K_{1C}$ , de cada um dos cinco materiais testados, ser menor do que o valor arbitrariamente definido

mamente a fim de evitar investimento de recursos e longos testes de campo com protótipos que essencialmente não estão adequados para resistir às magnitudes das cargas aplicadas em serviço.



**Figura 8:** Valores de  $K_{IC}$  de cada um dos cinco materiais analisados, considerando critérios de probabilidade de falha admitida de 5% e 10%

## 4 Conclusões

Foram analisados cinco materiais de fricção, os quais tiveram sua tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) caracterizada por meio da norma ASTM recomendada.

Os resultados mostraram que os cinco materiais analisados apresentam valores de tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ), característicos de materiais de matriz fenólica, da ordem de 1 MPa.m<sup>1/2</sup>. Essa verificação indica que o projeto dos componentes a serem fabricados com esses materiais deve prezar por características dimensionais que evitem a concentração de tensões, tais como rasgos e cantos vivos.

A utilização da metodologia probabilística de análise de falha proposta por Weibull na análise

de resultados permite associar a probabilidade do valor de  $K_{IC}$  do material ser menor do que um valor aleatoriamente escolhido.

## Referências

- AL-QURESHI, H. A. *Composite materials: fabrication and analysis*. 3. ed. Instituto Tecnológico de Aeronáutica; São José dos Campos; 1988.
- ASHBY, M. F. *Materials selection in mechanical design*. 3<sup>rd</sup> ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- BARSOUM, M. *Fundamentals of ceramics*. 1<sup>st</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1997.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D. *Materials science and engineering: an introduction*. 5<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1999, c2000.
- CASARIL, A. *Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas*. 2004. Trabalho de Graduação (Curso de Graduação em Engenharia de Materiais)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- HERTZBERG, R. W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996. José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1988.
- NICHOLSON, G. *Facts about friction: 100 years of brake linings & clutch facings*; 1<sup>st</sup> ed. Croydon, PA: P&W Prince Enterprises, Inc., 1995.
- RICHERSON, D. W. *Modern ceramic engineering*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1992.

Recebido em 31 jul. 2011 / aprovado em 21 set. 2011

### Para referenciar este texto

CASARIL, A. et al. Caracterização da tenacidade à fratura de materiais de fricção e critérios de projetos. *Exacta*, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 301-308, 2011.