**X CONFERENCIA INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA “COMEC 2019”**

**Avaliação do efeito do tamanho amostral na repetibilidade do fator fab**

***Evaluation of the effect of sample size on the fab factor repeatability***

**Elsio Junior Bonati Borges1, Guilherme Bernardes Rodrigues2, Joyce Antunes da Silva 3, Washington Martins da Silva Junior4, Rosenda Valdés Arencibia5**

1- Elsio Junior Bonati Borges. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. elsio.bonati@bol.com.br.

2- Guilherme Bernardes Rodrigues. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. guilhermebernardes@ufu.br.

3- Joyce Antunes da Silva. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. joyce\_antunes@outlook.com.

4- Washington Martins da Silva Junior. Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. washington.martins@ufu.br.

5- Rosenda Valdés Arencibia. Universidade Federal de Uberlândia. Brasil: rosenda.arencibia@ufu.br.

**Resumo:** No estudo dos mecanismos de desgaste, o fator fab se tornou uma importante ferramenta na quantificação da resposta do deslizamento de uma partícula sobre uma superfície quanto à capacidade de sulcar ou cortar. Entretanto, os valores de fab estão normalmente associados a uma baixa repetibilidade, tornando, em alguns casos, impossível de associá-los aos diferentes mecanismos de abrasão verificados ou até a invalidação dos mesmos. Uma prática frequentemente usada para diminuir os valores de desvio padrão de um mensurando consiste no aumento do número de medições. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo identificar a quantidade de medições necessárias para se obter o fator fab com melhor repetibilidade. Para tanto foram considerados seis tamanhos amostrais, quais sejam: 5, 10, 15, 20, 25 e 30. Os resultados obtidos mostraram que o tamanho amostral influenciou de forma significativa os valores médios e a repetibilidade dos valores de fab.

 ***Abstract:*** *In the study of the wear mechanisms, the fab factor became an important tool in the quantification of the slip response of a particle on a surface as to the ability to groove or cut. However, the fab values ​​are usually associated with a low repeatability, making it impossible in some cases to associate them with the different abrasion mechanisms verified or until their invalidation. One practice often used to decrease standard deviation values ​​is to increase the number of measurements. Thus, the present work aims to identify the number of measurements needed to obtain the fab factor with better repeatability. Six sample sizes were considered: 5, 10, 15, 20, 25 and 30. The results obtained showed that the sample size significantly influenced the mean values ​​and the repeatability of the fab values.*

**Palavras Chave:** Fator fab; Tamanho amostral; Repetibilidade.

***Keywords:*** *fab factor; Sample size; Repeatability.*

**1. Introdução**

O fator fab tem sido amplamente utilizado para quantificação da resposta do deslizamento de uma partícula sobre uma superfície quanto à capacidade de sulcar ou cortar. Este pode é calculado de acordo com a Eq. (1) (Mulhearn; Samuels, 1962; Zum Gahr, 1987).

(1)

Para o riscamento com resposta dúctil, um fab igual a zero significa que toda a área removida pelo indentador foi deformada para as laterais do sulco. O fab igual a um (1) representa o microcorte ideal. Qualquer valor intermediário representa o percentual de material removido durante o deslizamento (Mulhearn; Samuels, 1962; Zum Gahr, 1987). Por sua vez, no regime frágil, a remoção de material devido à propagação de trincas pode levar a obtenção de áreas maiores que aquela correspondente ao indentador, resultando em um fator fab maior do que um (1), por tal motivo o fator fab não é usual para análise do deslizamento no regime frágil (Mulhearn; Samuels, 1962; Barradas; Costa; De mello, 2001; Stachowiak; Batchelor, 2001).

O cálculo deste fator se baseia na análise das áreas de material removido/movimentado da seção transversal do evento formado, durante o processo de deslizamento. A Figura 1 mostra o esquema da seção transversal de um risco em um material dúctil.



Figura 1. Esquema da seção transversal de um risco com resposta dúctil (Zum Gahr, 1987).

Na Figura 1, a área *Av* corresponde ao material removido pela ação do penetrador e as áreas *A1* e *A2* representam o material deformado para as laterais do sulco.

Os valores das áreas *A1*, *A2* e *Av* são determinadas por meio de medições. Sabe-se, ainda, que nos processos de medição podem estar presentes diversos fatores ou fontes de erros que, em muitas situações práticas, conduzem à invalidação dos resultados de medição e consequentemente à formulação de conclusões errôneas.

Na literatura estudada foi reportada a baixa repetibilidade dos valores de fab. Barradas, *et al.* (2001) apresentaram uma metodologia que permitiu a determinação espacial do fator fab, a partir da caracterização topográfica 3D de riscos produzidos por ensaio esclerométrico. Utilizou-se interferometria a laser para determinar a topografia dos riscos produzidos, juntamente com o emprego de rotinas computacionais dedicadas, permitindo assim a discretização da superfície e o cálculo do fator fab nas diferentes seções dos riscos avaliados. Os autores observaram que os valores do fator fab variaram consideravelmente ao longo dos riscos efetuados em amostras de alumínio e de ferro fundido branco hipoeutético, como mostra a Fig. 2.



Figura 2. Valores do fator fab obtidos ao longo do comprimento do risco, para amostra de alumínio (a) e ferro fundido branco hipoeutético (b) (BARRADAS et al., 2001).

Franco (2015) desenvolveu um estudo visando obter maior entendimento dos mecanismos de desgaste relacionados com o sulcamento observado no par camisa/bloco em motores automotivos e identificar conjuntos de testes laboratoriais capazes de reproduzi-los sob condições controladas. Para tanto foram realizados seis riscos em cada condição avaliada, em tribômetros dotados de indentador cônico aplicando forças verticais constantes na faixa de 20 mN a 200 mN. As amostras de ferro fundido cinzento (ferro fundido cinzento) e de aço AISI 1070 possuíam acabamentos retificados e polidos. As medições topográficas foram realizadas com perfilômetro óptico 3D CCI-MP, do fabricante Taylor Hobson. Foi citado pelo autor, que todos os perfis médios foram sempre obtidos a partir de mais de 1000 perfis individuais. Apesar do número significativo de perfis utilizados, o autor observou que os valores de fab obtidos por perfilometria óptica apresentaram dispersão elevada, não sendo possível associá-los aos diferentes mecanismos de abrasão observados. Ainda, os valores de áreas apresentaram discrepâncias importantes entre as duas apurações, mostrando a baixa repetibilidade dos resultados obtidos e, consequentemente, dos valores do fab.

Franco e Sinatora (2017) concluíram que os valores de desvio padrão associados aos valores médios do fator fab foram significativos em várias das condições ensaiadas. E afirmaram que é possível determinar um valor médio de fab, a partir da análise das várias seções transversais obtidas de um risco, desde que se utilize uma sólida base estatística.

Jacobsson, *et al*. (1988), ao descreverem os fundamentos da deformação e desgaste dos materiais em testes de riscamento, mencionaram no trabalho o fator fab e citaram que a sua determinação por meio da medição de uma única seção transversal do risco, não é representativa da abrasão real atuante em todo o evento formado.

Pöhl, *et al.* (2016) calcularam o valor médio de fab e o desvio padrão considerando cinco posições ao longo de um risco realizado sob valores de força crescentes (3 mN a 603 mN), em amostras de ferro puro monofásico, de AISI1045 e de AISI3014L lixadas e polidas, visando à avaliação dos micro-mecanismos dominantes, Fig. 3. É possível observar na Fig. 3 que, para o ferro e o AISI1045, as barras de erros que representam o desvio padrão ultrapassam 50 % do valor médio de fab o que denota a baixa repetibilidade dos mesmos.



Figura 3. Média e desvio padrão dos valores de fab (Pöhl *et al.,* 2016).

A baixa repetibilidade dos valores de fab pode estar associada à definição da linha de base (linha zero) Kobrick, *et al.,* 2014, à correta definição do ponto de transição entre a área deformada pelo indentador e a superfície original Franco (2015). Das constatações de Kobrick, *et al.,* 2014 e Franco 2015 se conclui que, apesar dos sistemas de medição utilizados para determinação das áreas necessárias para o cálculo do fab serem modernos e sofisticados, pode haver uma fonte de erro relacionada ao operador. Desta forma, dificilmente, operadores diferentes reproduzirão os resultados da medição.

A partir do exposto se conclui que são diversas as fontes de erro que podem contribuir para a baixa repetibilidade dos valores do fator fab. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do tamanho amostral na repetibilidade dos valores do fator fab em ensaios de esclerometria retilínea

**2. Metodologia**

Ensaios de esclerometria retilínea foram realizados em uma amostra de aço ferramenta, utilizando o esclerômetro retilíneo, Fig. 4. Este equipamento proporciona movimentação controlada do indentador nos planos horizontal e vertical, possuindo também um translador piezelétrico (PZT), responsável pela aplicação da força na superfície da amostra. Para gerenciamento das tarefas foi utilizado um *software* especialmente desenvolvido na plataforma LabView®.



Figura 4. Esclerômetro retilíneo.

Para avaliar o efeito do tamanho amostral nos valores médios do fator fab foram feitos 3 riscos (riscos 4, 5 e 6) aplicando uma força de 3 N com um indentador Vickers em uma amostra de aço ferramenta.

Para a determinação dos perfis transversais dos riscos foi utilizada a técnica de perfilometria mecânica com contato, com a utilização do equipamento Form Talysurf Intra 2. Em cada um dos riscos produzidos efetuaram-se 0 medições distanciadas a 100 µm uma da outra, totalizando 90 medições. A velocidade de medição foi de 0,25 mm/s.

Para determinação das áreas de interesse (*Av, A1 e A2*) foi utilizado o programa computacional Mountains Map Universal 3.1.9. Este foi previamente calibrado. A incerteza associada à calibração foi de 0,2 mm2 para uma probabilidade de abrangência de 95 %.

Em seguida, a média e o desvio padrão para uma confiabilidade de 68,27 % foram estimados considerando diferentes tamanhos amostrais, a saber: 5, 10, 15, 20, 25 e 30. Ainda, foi determinado o coeficiente de variação do desvio padrão em relação ao valor médio de fab, em porcentagem.

Duas avaliações foram efetuadas. Na primeira, a escolha dos perfis foi obtida aleatoriamente, por sorteio sem reposição. Na segunda avaliação a escolha dos perfis não foi efetuada aleatoriamente, e sim utilizando o critério da ordem de medição do perfil ou ordem temporal.

**3. Resultados e discussões**

**3.1 Resultados obtidos quando os perfis foram escolhidos de forma aleatória**

A Figura 5a mostra os valores médios de fab obtidos para cada condição avaliada quando a escolha dos perfis foi obtida aleatoriamente por sorteio. Por sua vez a Figura 5b mostra os valores de desvio padrão amostral obtidos em cada caso. Por último a Figura 5c traz a porcentagem que os valores de desvio padrão representam do valor médio de fab em questão.

A partir da Fig. 5 se conclui que o tamanho amostral influenciou de forma significativa os valores médios de fab e o desvio padrão associado. Ambas as estatísticas tenderam à estabilização na medida em que o tamanho amostral aumentou, alcançando a estabilização em 25 medições. Observa-se na Fig. 5a que para cinco medições a dispersão associada á medição representa 23 % do valor médio de fab, enquanto que para 25 medições a dispersão é praticamente igual a zero. Um resultado similar foi observado para o desvio padrão amostral.







Figura 5. Valores médios de fab obtidos para condição avaliada quando a escolha dos perfis foi obtida aleatoriamente por sorteio (a), valores de desvio padrão amostral (b) e porcentagem dos valores de desvio padrão (c) (Elaboração própria).

**3.2 Resultados obtidos quando os perfis não foram escolhidos de forma aleatória**

A Figura 6a mostra os valores médios de fab obtidos para condição avaliada quando a escolha dos perfis foi obtida na ordem temporal e não por sorteio. A Figura 6b mostra os valores de desvio padrão amostral obtidos em cada caso e a Figura 6c apresenta a porcentagem.

Nas Figuras 6a e 6b se observa que o aumento do tamanho amostral de 5 para 25 afetou de forma significativa os valores médios de fab e o desvio padrão amostral. A estabilização de ambos foi alcançada em 25 medições. A dispersão dos valores obtidos foi significativamente menor na medida em que o tamanho amostral aumentou.

**3.2 Comparação dos resultados obtidos**

Comparando os resultados mostrados nas Figuras 5 e 6 se conclui que o tamanho amostral adequado deve ser escolhido por meio de um estudo cuidadosamente efetuado. Entretanto, não basta apenas definir o tamanho amostral, uma vez que a aleatoriedade na condução das medições também afetou os resultados obtidos e a repetibilidade associada a estes. Quando a análise foi feita respeitando a ordem temporal das medições se supõe que prevaleceu o efeito de outras fontes de erros que podem estar relacionadas à análise de regiões específicas ou à estabilidade dos equipamentos utilizados para efetuar os riscos ou para medição destes.

Com relação aos mecanismos de desgaste, a análise do valor do fator fab pressupõe tendência de microsulcamento aos riscos efetuados, pois os valores obtidos se concentraram abaixo de 0,50.







Figura 6. Valores médios de fab obtidos para condição avaliada quando a escolha dos perfis foi obtida na ordem temporal e não por sorteio (a), valores de desvio padrão amostral (b) e porcentagem que os valores que o desvio padrão representam do valor médios fab (c) (Elaboração própria).

**4. Conclusões**

Pode-se concluir que o tamanho amostral (número de medições) influenciou significativamente os valores médios e a repetibilidade dos valores de fab obtidos em amostras de aço ferramenta. Assim sendo, recomenda-se efetuar 25 medições em cada risco visando diminuir o efeito desta variável de influência.

Para trabalhos futuros propõe-se estudar o efeito de outras fontes de erros na determinação do fator fab, visando diminuir seus efeitos e aumentar a repetibilidade dos resultados. Isto porque o desvio padrão continua elevado, representando aproximadamente 34 % do valor médio.

**5. Referências bibliográficas**

Barradas, H. A.; Costa H. L.; De mello J. D. B. “O uso da topografia de superfícies 3D para determinar o fator fab em ensaios esclerométricos”. *XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM*, Tribologia, volume 3, anais do XVI COBEM. 2001, Uberlândia-MG. Brasil.

JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology). 2008a. “Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”. *JCGM 100: 2008*. 134 p.

Franco, L. A., 2015. *Abrasão de ferro fundido cinzento: aplicação a motores automotivos.* Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Franco, L. A.; Sinatora, A.,2017. “Material removal factor (fab): A critical assessment of its role in theoretical and practical approaches to abrasive wear of ductile materials”. *Wear*, volume 382 – 383, pp 51 – 61.

Jacobsson, S.; Olsson, M.; Hedenqvist, P.; Vingsbo, O., 1988. “Scratch Testing”. ASM Metals Handbook, volume 18, 1988, ASM International.

Kobrick, R. L.; Klaus, D. M; Street, K. W., 2014. “Standardization of a volumetric displacement measurement for two-body abrasion scratch test data analysis”*.* *Wear*, volume 270, pp 120 – 126, 2014.

Mulhearn, T. O.; Samuels L. E., 1962. “The Abrasion of Metals: A Model of the Process”. *Wear*, volume 5, pp 478 – 498.

Pöhl, F.; Hardes, C.; Theisen, W., 2016. “Scratch behavior of soft metallic materials”*.* *AIMS*, volume 3, pp 390 – 403.

Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W., 2001. “Engineering Tribology, Butterworth – Heinemann.” *Woburn*, 2ª ed.*,* MA, USA, ISBN 0750673044, 744 p.

Zum Gahr, K. H., 1987. “Microstructure and Wear o Materials”. *Elsevier*, Amsterdam, 560 p.