

Proteção Contra o Desgaste – Por Que Usar Materiais Cerâmicos?

Rafael Vieira Camerini^{a,d*}, Rodrigo Buchfink de Souza^b,

Roberto Isoppo Rodrigues^{a,b}, Cláudio Soligo Camerini^c,

Naira Maria Balzaretto^b, Altair Soria Pereira^{d,b}

^aJomon Cerâmicas Avançadas, Viamão, RS, Brasil

^bLaboratório de Altas Pressões e Materiais Avançados – LAPMA, Instituto de Física – PGCIMAT, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

^cPetrobras S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil

^dPrograma de Pós-graduação em Ciência dos Materiais – PGCIMAT, Departamento de Materiais – DEMAT, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

*e-mail: rafael_camerini@hotmail.com; rafael@jomon.com.br

Resumo: Este trabalho apresenta resultados comparativos entre materiais cerâmicos de alta performance utilizados pela indústria brasileira em aplicações que requerem elevada resistência ao desgaste. A partir da análise dos resultados obtidos em testes de campo realizados em dispositivos de inspeção de dutos (PIG) da Petrobras e análises laboratoriais (resistência ao desgaste abrasivo, dureza e microscopia óptica), o desempenho de componentes de alumina (Al_2O_3) foi comparado com o de componentes de aço endurecido e também de quatro outras cerâmicas técnicas: Al_2O_3/MgO , Al_2O_3/ZrO_2 (ZTA), ZrO_2 e SiC. Os resultados mostraram que, em termos de resistência ao desgaste, o desempenho destes materiais cerâmicos podem ser até duas ordens de grandeza maior do que o desempenho do aço temperado testado. Entre os materiais cerâmicos analisados o ZTA (compósito de alumina - zircônia) foi o material que apresentou a maior resistência ao desgaste.

Palavras-chave: cerâmica técnica, al-zr, alumina, ZTA, desgaste, boquilha, pig.

1. Introdução

Elementos cerâmicos de proteção contra o desgaste encontram aplicação nas mais diversas áreas da engenharia e vêm ganhando espaço a cada dia no mercado mundial. No Brasil, o uso de insertos produzidos em materiais cerâmicos superabrasivos na forma de paletas, barras, hastes, olhais e ponteiros é comum em boquilhas para extrusão de tijolos e telhas, guias fios para a indústria têxtil, raspadores para a indústria de papel, cones de trefila, buchas, selos mecânicos, entre outras inúmeras aplicações¹⁻⁴.

Sobretudo na indústria de cerâmica vermelha, as cerâmicas técnicas de proteção contra o desgaste ganharam status de ferramenta indispensável no aumento de produtividade e qualidade. Insertos de materiais cerâmicos superabrasivos passaram a ser utilizados para aumentar a durabilidade de boquilhas de extrusão de tijolos e telhas, que são expostas à ação abrasiva das argilas.

Também na indústria brasileira do petróleo as cerâmicas técnicas vêm ganhando lugar de destaque, especialmente em aplicações de proteção contra o desgaste. Insertos cerâmicos superabrasivos vêm sendo produzidos para fazer a proteção de apalpadores utilizados em equipamentos de inspeção de dutos, conhecidos como PIG (Pipeline Inspection Gauge)².

Dentro deste cenário, o presente trabalho apresenta um estudo comparativo de propriedades de materiais cerâmicos de alto desempenho de interesse para aplicações que exijam alta resistência ao desgaste. Além de ensaios mecânicos laboratoriais (dureza, tenacidade e desgaste) realizados em cinco diferentes materiais cerâmicos de alto desempenho, ensaios de campo foram realizados em equipamentos da Petrobras para evidenciar os contrastes existentes entre os diferentes materiais normalmente utilizados em engenharia em soluções desse tipo. Neste ensaio de campo, uma cerâmica técnica muito utilizada em engenharia por apresentar excelente relação custo - benefício (Al_2O_3) foi comparada a componentes de

aço temperado. Os resultados dos ensaios de campo realizados em equipamentos da Petrobras e dos ensaios mecânicos laboratoriais foram analisados de modo a correlacionar as propriedades dos materiais ensaiados e o seu desempenho frente ao desgaste abrasivo.

2. Referencial Teórico

Os principais mecanismos atuantes no desgaste abrasivo são desgaste por deformação plástica e desgaste por fratura frágil².

O desgaste por deformação plástica pode ser descrito pela equação de Archard:

$$Q = \frac{k \cdot W}{H} \quad (1)$$

onde Q é o volume de material removido pela distância de deslizamento relativo entre as superfícies, W é a carga aplicada, k é uma constante e H é a dureza. Desta forma, segundo a Equação de Archard, o desgaste é inversamente proporcional à dureza.

O desgaste por fratura frágil pode ser descrito através da equação:

$$F = \alpha_5 \frac{\frac{5}{A^{1/4}} \cdot \frac{1}{K_c^{3/4}} \cdot d^2}{H^{1/2}} \quad (2)$$

onde α_5 é uma constante, W é a carga aplicada, d é a dimensão linear das partículas, A é a área aparente de contato, K_c é a tenacidade à fratura e H é a dureza. A equação mostra que a tenacidade tem influência ainda maior do que a própria dureza no desgaste por fratura frágil.

Dessa forma, o critério de seleção de materiais para aplicações que exijam alta resistência ao desgaste leva às seguintes premissas iniciais:

- [i] Se considerarmos que as cerâmicas são, de forma geral, mais duras do que materiais de outras classes, a seleção de um material superabrasivo com base na Equação de Archard leva à escolha de uma cerâmica de alto desempenho*;
- [ii] Considerando que os materiais cerâmicos apresentam deformação plástica desprezível à temperatura ambiente, a equação (2) nos leva, então, a considerar a tenacidade como um fator chave na escolha de componentes especiais de proteção contra o desgaste.

De fato, um bom material superabrasivo é aquele que apresenta um balanço adequado entre dureza e tenacidade.

Utilizaremos um exemplo prático para analisar a premissa [i]: o problema do desgaste em sensores de contato (apalpadores) de sistemas de inspeção de dutos (pig) da Petrobras. Depois, com base em ensaios de dureza, micro-abrasão esférica e análise da tenacidade de cinco materiais cerâmicos de alto desempenho, a premissa [ii] será analisada.

3. Resultados e Discussão

3.1. Estudo de caso – PIG palito

Pig é um equipamento que percorre o interior dos dutos de petróleo e derivados com a finalidade de transmitir informações do estado de deterioração do duto. A obtenção dessa informação pode ser feita de várias maneiras, o que determina o tipo de pig a ser utilizado. Um dos equipamentos de inspeção utilizados pela Petrobras é o pig de perfilagem, também conhecido como pig palito⁴.

O pig palito funciona com módulos que possuem centenas de hastes metálicas radiais, perpendiculares às paredes do duto, que varrem o interior da tubulação em contato direto com as paredes (Figura 1). Qualquer deformação (buracos, crostas, etc.) no duto é medida via um pulso elétrico produzido através de sensores de movimento, gerando um mapa topográfico do duto.

No pig palito, a haste que fica em contato com o duto é, normalmente, de aço temperado. Com o contínuo atrito entre a haste e a parede do duto este componente sofre desgaste severo, o que leva a ações frequentes de inspeção e troca para garantir as condições adequadas de operação do equipamento. Isso implica em um aumento de custo importante no gerenciamento de sistemas com milhares de quilômetros de extensão, distribuídos em regiões com geografia e infraestrutura de acesso extremamente variadas.

Para reduzir o desgaste dos apalpadores (hastes de aço temperado) do pig palito, a Jomon Cerâmicas Avançadas desenvolveu em 2008, em parceria com a Petrobras, insertos de alumina de alta pureza (Al_2O_3) para serem fixados na extremidade das hastes metálicas. Foram realizados testes *in situ* comparando hastes com e sem insertos de alumina em pigs submetidos a corridas dentro de dutos, em condições reais de uso. As corridas duraram cerca de 60, 70 e 130 horas, com distâncias percorridas de 215, 250 e 470 km, respectivamente. Os insertos cerâmicos foram colados com cola estrutural nas hastes de pigs para dutos de 16 e 24 polegadas de diâmetro, que foram utilizados em inspeção de 470 km de distância (Figura 2).

A Figura 3 mostra o desgaste nas hastes de aço temperado após a retirada do pig de dentro do duto ao término da corrida. Na Figura 3, (a) é mostrada uma haste como referência, que não foi submetida ao desgaste; em (b) é mostrada a haste que percorreu aproximadamente 215 km (60 horas) sem a proteção do inserto cerâmico; e em (c) uma haste que percorreu a distância de cerca de 250 km (70 horas) sem proteção do inserto cerâmico.

*Não foram considerados compósitos cerâmica-metal, ou outros tipos de materiais compósitos.

É notória a redução do comprimento das hastes de aço após as inspeções nos dutos. Porém, com o uso do inserto de alumina, a haste protegida percorreu uma distância aproximada de 470 km (130 horas) e apresentou desgaste desprezível, como mostra a Figura 4, o que mantém a medida confiável durante todo o processo e permite o uso em mais de uma corrida, se necessário.

De fato, a diferença entre o coeficiente de desgaste desses dois materiais (alumina e aço temperado) é de aproximadamente uma ordem de grandeza⁴.

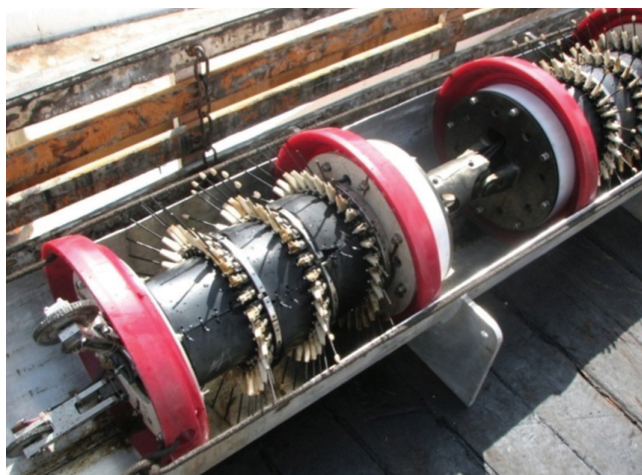


Figura 1. Pig para duto de 16 polegadas usado em inspeções de dutos da Petrobras.



Figura 2. Pig palito sendo retirado do oleoduto após teste com insertos de alumina (mostrados em detalhe fixados às hastes de aço).



Figura 3. Resultados dos testes realizados *in situ*, sem os insertos cerâmicos de proteção contra o desgaste.



Figura 4. Resultado dos testes realizados in situ, com o inserto colado à haste metálica.

A dureza medida para as hastes de aço temperado foi de 890 HV, enquanto que a dureza medida para os insertos de alumina foi de 1820 HV. Analisando a premissa [i], se considerarmos como opção de projeto materiais metálicos e cerâmicos, a seleção de um material resistente ao desgaste utilizando como critério a Equação de Archard nos leva à escolha de uma cerâmica de alto desempenho, devido à sua dureza.

3.2. Ensaios mecânicos

Para analisar a premissa [ii], que diz que a tenacidade é um fator chave na escolha de componentes cerâmicos especiais de proteção contra o desgaste, vamos analisar os resultados de ensaios de desgaste micro-abrasivo, dureza e análise qualitativa de tenacidade à fratura realizados em amostras de cerâmicas de alto desempenho largamente utilizadas em engenharia. Os materiais cerâmicos escolhidos para serem testados foram:

- Alumina de alta pureza (Al_2O_3)** – material utilizado em larga escala para produção de componentes de cerâmicas técnicas⁴;
- Alumina/MgO² – o uso de óxido de magnésio como aditivo na alumina permite a redução da temperatura de sinterização e da porosidade, o que pode levar a um aumento de tenacidade à fratura do material⁴. São utilizados normalmente teores entre 0,5% e 1,5% do aditivo;
- ZTA² – *zirconia toughened alumina* é um composto de alumina e zircônia, no qual a zircônia parcialmente estabilizada é utilizada para aumentar a tenacidade do material⁵;
- Zircônia³ – a zircônia parcialmente estabilizada é muito utilizada em aplicações estruturais por apresentar alta tenacidade e baixo coeficiente de atrito⁶;
- SiC*** – o carbeto de silício é um material cerâmico de alta dureza e é utilizado em aplicações estruturais, elétricas e térmicas.

Todas as amostras apresentaram densidade maior que 95% da sua densidade teórica, portanto os materiais utilizados são cerâmicas com alto percentual de densificação (baixa porosidade). A Tabela 1 mostra a dureza das amostras cerâmicas analisadas. As amostras de alumina aditivadas com MgO apresentaram redução no tamanho de

**Foram utilizadas amostras de componentes comerciais produzidos pela Jomon Cerâmicas Avançadas.

***Foram utilizadas amostras de componentes comerciais normalmente utilizadas na proteção contra o desgaste de boquilhas de tijolos.

Tabela 1. Dureza Vickers medida para as amostras cerâmicas avaliadas.

Material	Dureza Vickers
Carbeto de silício (SiC)	2220
Alumina/MgO	1950
Alumina (Al_2O_3)	1820
ZTA	1700
Zircônia (ZrO_2)	1180

Tabela 2. Coeficiente de desgaste das amostras cerâmicas medido em ensaio de desgaste micro-abrasivo.

Material	Coef. de desgaste, k [$m^3/N.m$]
Alumina (Al_2O_3)	$12,2 \times 10^{-12}$
Alumina/MgO	$6,7 \times 10^{-12}$
Zircônia (ZrO_2)	$4,6 \times 10^{-12}$
Carbeto de silício (SiC)	$1,9 \times 10^{-12}$
ZTA	$1,1 \times 10^{-12}$

grão e aumento da densidade final do corpo sinterizado, o que leva ao aumento da dureza⁷. Já a adição de zircônia parcialmente estabilizada na matriz de alumina levou a uma pequena redução da dureza, uma vez que a zircônia apresenta dureza consideravelmente menor que a alumina. O carbeto de silício apresentou a maior dureza entre os materiais investigados.

As imagens de microscopia óptica das impressões de dureza mostradas na Figura 5 indicam que, de maneira geral, a alumina apresentou baixa tenacidade quando comparada à zircônia, e mesmo ao ZTA. A amostra que apresentou menor tenacidade foi a de carbeto de silício (SiC) e a que apresentou maior tenacidade foi a de zircônia.

Por fim, foram realizados ensaios de desgaste micro-abrasivo nas amostras cerâmicas. O princípio deste ensaio consiste na rotação de uma esfera de raio R em contato com uma amostra polida sob a ação de uma força normal (N) enquanto uma suspensão abrasiva é gotejada entre a esfera e a amostra⁸. O volume de material removido é calculado****. O coeficiente de desgaste é medido a partir da equação:

$$k = \frac{V}{S \cdot N} \quad (3)$$

onde k é o coeficiente de desgaste, V é o volume de material removido, S é a distância virtualmente percorrida pela esfera e N é a força normal à superfície da amostra. Descrições mais detalhadas do método e suas equações podem ser encontradas nas referências^{9,10}.

As cinco amostras cerâmicas foram ensaiadas com distâncias máximas de deslizamento da esfera de aproximadamente 1500 metros. A Tabela 2 mostra o coeficiente de desgaste medido para cada material. A alumina foi o material cerâmico que mais sofreu desgaste, tendo apresentado coeficiente de desgaste cerca de uma ordem de grandeza maior do que o composto de alumina – zircônia (ZTA). É importante ressaltar que a alumina apresenta desgaste cerca de uma ordem de grandeza menor do que as hastes de aço temperado utilizadas nos PIGs, conforme mencionado anteriormente.

Como mostrado na Tabela 1, a alumina tem dureza superior ao ZTA e, sobretudo à zircônia. Porém, como mostra a Figura 5, a alumina apresenta baixa tenacidade quando comparada a esses materiais. A alumina aditivada com MgO apresentou desgaste

****Neste estudo o volume de material removido (V) foi calculado através da equação $V = m/\rho$, a partir da perda de massa durante o ensaio (m) e da massa específica (ρ) medida para cada amostra.

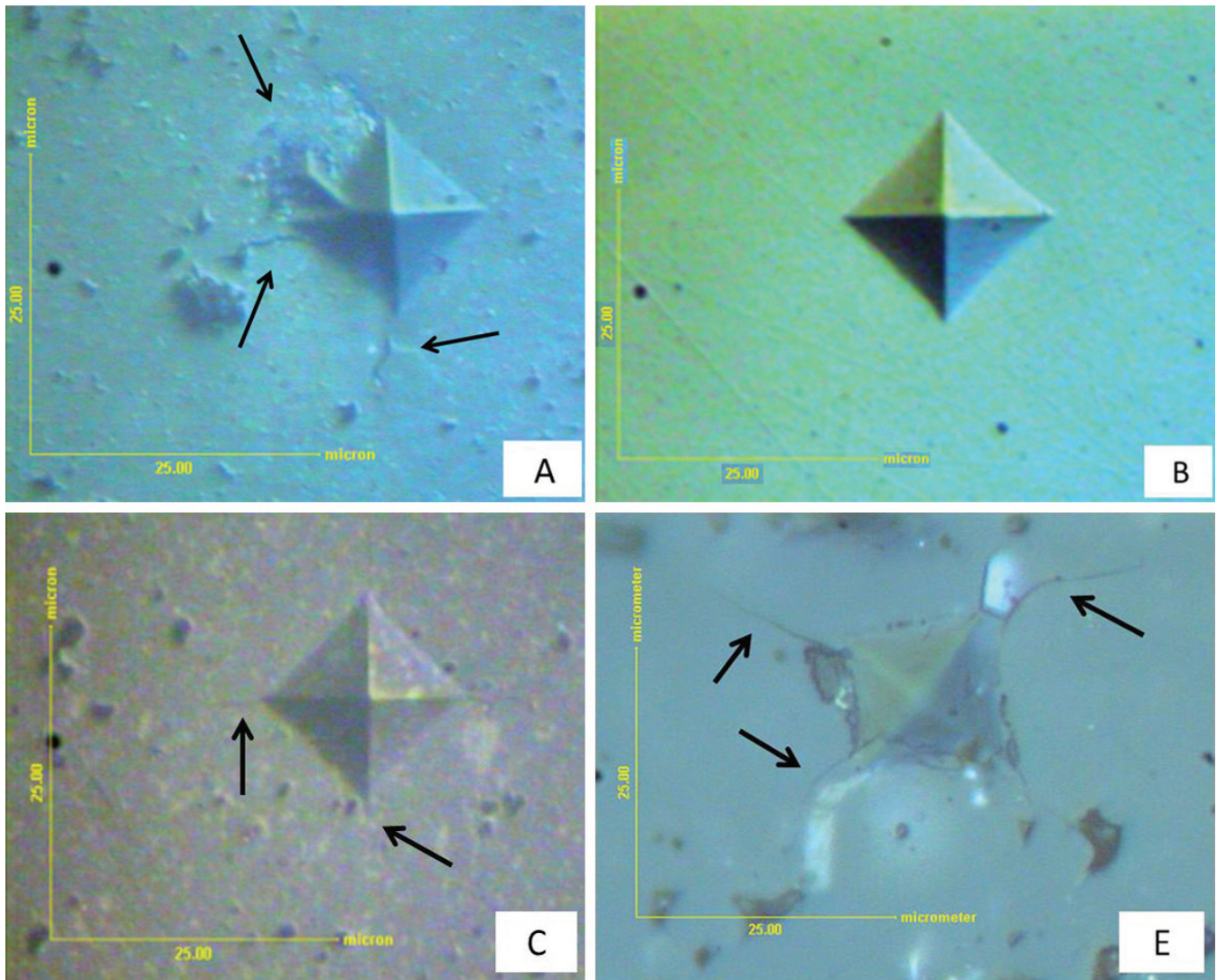


Figura 5. Imagens de microscopia óptica de impressões de dureza Vickers realizadas nas amostras (A) de alumina; (B) de zircônia; (C) de ZTA; (D) de SiC; (E) de alumina/MgO. As setas identificam os locais onde aparecem as principais falhas em torno das impressões, exceto na amostra de carbetto de silício (SiC), na qual aparecem diversas trincas.

consideravelmente menor em comparação com a alumina pura, o que pode ser explicado pelo aumento de dureza****. A zircônia, material de maior tenacidade e menor dureza entre as cerâmicas de alto desempenho investigadas, apresentou menor desgaste do que as amostras de alumina com e sem MgO (materiais de alta dureza). O carbetto de silício (SiC), embora tenha apresentado baixa tenacidade, tem a maior dureza entre os materiais investigados, o que pode ajudar a explicar o seu baixo coeficiente de desgaste. Porém, o compósito alumina-zircônia (ZTA), material com dureza superior apenas à zircônia, sendo significativamente menos duro do que o SiC, apresentou a maior resistência ao desgaste. É importante destacar que o ZTA apresenta elevada tenacidade. Esses resultados estão em concordância com a premissa [ii], que diz que a tenacidade

****Embora a literatura cite o aumento de tenacidade da alumina com a adição de MgO, a análise qualitativa realizada com base nas impressões de dureza das amostras não permite concluir a respeito desse comportamento.

é um fator chave na escolha de componentes cerâmicos especiais de proteção contra o desgaste.

4. Conclusões

A partir do estudo de caso do desgaste nas hastes de pig palito da Petrobras e dos ensaios mecânicos realizados nesse trabalho, foi mostrado que:

- Os materiais cerâmicos de alto desempenho testados apresentam alta resistência ao desgaste, especialmente quando comparados a materiais metálicos;
- Além da dureza, a tenacidade é um fator chave na escolha de componentes cerâmicos especiais de proteção contra o desgaste. Dessa forma, materiais superabrasivos devem apresentar um balanço adequado entre dureza e tenacidade;
- O ZTA (alumina – zircônia), que entre os materiais ensaiados é o que apresenta melhor equilíbrio entre dureza e tenacidade, teve o menor coeficiente de desgaste, sendo o material com melhor desempenho.

Referências

1. SALOMÃO, R. et al. Ceramic in Brazil: opportunities and challenges for education and research. **Interceram**, v. 60, p. 3352-360, 2011.
2. OKAMOTO JUNIOR, J. et al. Autonomous system for oil pipelines inspection. **Mechatronics**, v. 9, p. 731-743, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158\(99\)00031-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158(99)00031-8)
3. HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. CRC Press, 1992. p. 273.
4. DE SOUZA, R. B. **Desenvolvimento de elementos cerâmicos para uso em dispositivos de inspeção de dutos (PIGs)**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
5. RITTIDECH, A.; PORTIA, L.; BONGKARN, T. The relationship between microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 -Mgo Ceramics. **Materials Science and Engineering**, v. 438-440, p. 395-398, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.176>
6. PABST, W. et al. Effective Elastic Properties of Alumina-Zirconia Composite Ceramics Part 5. Tensile Modulus Of Alumina-Zirconia Composite Ceramics. **Ceramics – Silikáty**, v. 49 p. 77-85, 2005.
7. CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 3rd ed. Canadá: John Wiley & Sons, 1994.
8. CAMERINI, R. V. et al. Ball cratering test on ductile materials. **Wear**, v. 271, p. 770-774, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.03.013>
9. RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems. **Surface and Coatings Technology**, v. 79, p. 231-239, 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02461-1](http://dx.doi.org/10.1016/0257-8972(95)02461-1)
10. ALLSOPP, D. N.; TREZONA, R. I.; HUTCHINGS, I. M. The effects of ball surface condition in the micro-scale abrasive. **Tribology Letters**, v. 5, p. 259-264, 1998. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1019178716408>