

CONSIDERAÇÕES SOBRE A EQUAÇÃO DE DESGASTE DE ARCHARD PARA APLICAÇÃO NA ETAPA DE POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

CONSIDERATIONS ON ARCHARD'S WEAR EQUATION FOR APPLICATION IN THE DIMENSION STONES POLISHING STAGE

Márcio Alves Rizzo Junior

Aluno de Graduação da Engenharia Mecânica, 7º período, IFES
Período PIBIC/CETEM: agosto de 2018 a julho de 2019
e-marcio@outlook.com

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Orientador, Geólogo, D.Sc.
leolysil@cetem.gov.br

RESUMO

Os processos industriais de polimento de rochas ornamentais atualmente são baseados, de forma geral, em métodos empíricos dependentes de resultados passados e experiências pessoais, que podem acarretar possíveis perdas energéticas e, conseqüentemente, trazerem prejuízos econômicos para a indústria de beneficiamento. Um estudo analítico ou numérico capaz de equacionar e prever os resultados de tais processos seria de grande interesse para o meio industrial e tecnológico de modo geral, visto que seria uma forma inovadora de aumentar a eficiência do beneficiamento de rochas ornamentais, e assim aumentando o lucro da indústria. A Tribologia, que é uma Ciência da área da engenharia metalomecânica, possui ferramentas capazes de analisar diferentes interações entre a superfície de dois ou mais materiais distintos de forma analítica. Este trabalho visa utilizar tais ferramentas para englobar o processo de polimento de rochas ornamentais, onde será necessário analisar, de forma teórica, cada componente da equação analítica para o contexto deste processo e propor possíveis adaptações.

Palavras chave: tribologia, polimento, rochas, ornamentais.

ABSTRACT

The industrial polishing processes for dimension stones are currently based, in general, on empirical methods dependent on past results and personal experiences, which can lead to possible energy losses and, consequently, bring economic prejudice to the beneficiation industry. An analytical or numerical study capable of equating and predicting the results of such processes would be of great interest to the industrial and technological environment in general, since it would be an innovative way of increasing the efficiency of dimension stone processing, thus increasing the industry's profit. Tribology, which is a science in the area of metal mechanical engineering, has tools capable of analyzing different interactions between the surfaces of two or more different materials in an analytical way. This work aims to use such tools to include the polishing process of dimension stones, where it will be necessary to analyze, in a theoretically manner, each component of the analytical equation for the context of this process and propose possible adaptations.

Keywords: tribology, plishing, dimension, stones.

1. INTRODUÇÃO

Os atuais processos de beneficiamento de rochas ornamentais ainda possuem um foco, de forma geral, empírico, que embora possua uma eficácia suficiente para a indústria, é um método que pode acarretar possíveis oportunidades para aprimoramento. Uma das formas de aumentar a eficiência de tais processos seria fazer um estudo analítico extensivo dos fenômenos ocorridos e das variáveis envolvidas.

A Tribologia, que é a Ciência das interações de superfícies em movimento relativo, possuem ferramentas matemáticas capazes de englobar os fenômenos de atrito e desgaste existentes em processos de polimento de rochas ornamentais. Alguns estudos já foram feitos com o objetivo de relacionar a Tribologia com os fenômenos físicos do beneficiamento de rochas ornamentais (SILVEIRA, 2008; CARVALHO, 2010; ALMEIDA, 2014; SILVEIRA et al., 2016; SILVEIRA et al., 2017; ALMEIDA, 2019).

O processo de polimento de rochas ornamentais está inserido num conceito denominado Tribossistema, onde o mesmo reflete as correlações entre as propriedades da rocha, do abrasivo e da máquina em um processo de polimento (SILVEIRA, *Op. Cit.*).

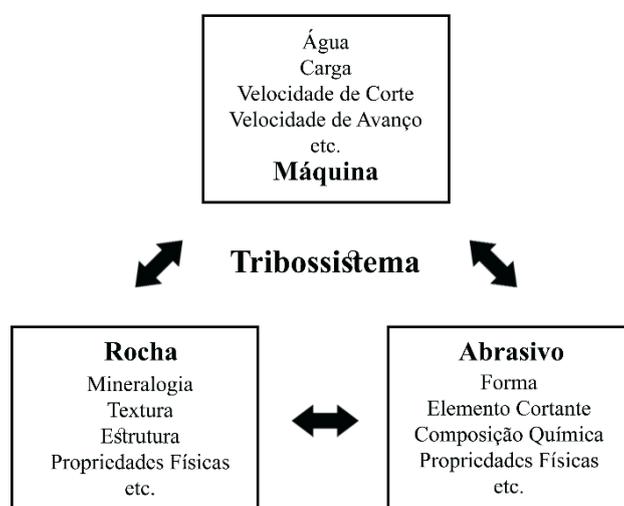


Figura 1: Tribossistema de um Processo de Polimento de Rochas Ornamentais.

Dentro da Tribologia existe o conceito de desgaste que, segundo Bhushan (2013), ocorre quando uma superfície rugosa e dura, ou partículas duras, deslizam sobre a superfície de outro material com menor dureza, provocando danos a interface por meio de deformação plástica ou por fratura. Archard (1959, *apud* SILVEIRA, 2008) propôs um modelo analítico para determinar a taxa de desgaste abrasivo, como descrito na Equação 1, a seguir:

$$V = K \times \frac{F_n \times x}{H} \quad (1)$$

Onde é calculado o volume de material retirado por desgaste abrasivo (V), através da força normal aplicada ao material (F_n), a distância percorrida (x) e a dureza da superfície (H), adjunto de um coeficiente de desgaste (K).

Contudo, tal equação foi modelada com um enfoque para interações envolvendo materiais metálicos, que possuem dureza H constante, além de comportamento dúctil, e possivelmente um único ponto de contato com distância percorrida x durante suas interações. Este não é o caso do processo de polimento de rochas ornamentais, que requer um estudo extensivo sobre as variáveis da Equação 1 com relação a rocha, englobando desde sua dureza não linear, devido a variação mineralógica, até aos múltiplos pontos de contato durante sua abrasão.

2. OBJETIVOS

Identificar como as propriedades intrínsecas das rochas utilizadas para fins ornamentais influenciam no processo de polimento e fazer uma análise crítica sobre as variáveis da equação de Archard para o contexto deste processo.

3. METODOLOGIA

Foi utilizada uma abordagem puramente teórica neste trabalho, a fim de alcançar os objetivos definidos. Para a modelagem da distância percorrida pelo ponto de contato, que será discutido a frente, foi utilizado o *software* matemático gratuito *SciLab*, que permitiu a simulação do movimento geral referente a um único ponto, onde tal movimento utilizou dos conceitos de cinemática para sua modelagem, baseados em Beer (2012).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, será feita a análise crítica sobre como cada variável da equação de Archard devem ser interpretadas para o contexto de um processo de polimento de rocha ornamental.

4.1. Quanto a Dureza H

Devido a estrutura variada das rochas ornamentais, definir um valor numérico de dureza que caracterize todas as rochas de uma determinada classe pode-se mostrar uma tarefa difícil.

Uma das soluções propostas segue da pesquisa exercida por Quitete (2002), onde ele utiliza um teste de dureza de microimpressão *Knoop* em pontos pré-determinados da superfície da rocha e, em seguida, analisa a possível relação entre médias das durezas calculadas com a caracterização real da rocha, com o objetivo de definir uma dureza H específica que caracterize todo o corpo rochoso.

4.2. Quanto ao Coeficiente de Desgaste K

O coeficiente de desgaste K funciona como um método de correção da equação, englobando variáveis implícitas como geometria do abrasivo, atrito, expansão térmica, entre outros.

Visto que diferentes características influenciam o coeficiente de desgaste, ele deve ser definido a partir de experimentos empíricos para os diferentes tipos de rochas ornamentais, levando em consideração a influência de diferentes cabeçotes de polimento (devido aos diferentes pontos de contato e geometrias do abrasivo), da quantidade de água (devido à expansão térmica e atrito), etc. Caso determinada a força normal aplicada pelo cabeçote na superfície e a distância percorrida pelos pontos de contato através da superfície, é possível definir um valor para K analisando a diferença de volume da rocha entre antes e depois do processo de polimento.

Considerando a dureza da rocha constante, é possível ainda utilizar uma nova constante K_i que englobe a dureza do material, e determinar seu valor através de experimentos empíricos utilizando a Equação 2, a seguir:

$$K_i = \frac{V}{F_n \times x} \quad (2)$$

4.3. Quanto a força normal F_n

Caso seja necessário, pode-se substituir a força normal presente na equação de Archard pelos conceitos físicos de atrito dinâmico, como descrito na Equação 3, a seguir:

$$F_t = \mu_k \times F_n \therefore F_n = F_t / \mu_k \quad (3)$$

Onde F_n é a força normal, F_t é a força tangencial e μ_k é o coeficiente de atrito cinético. Uma das vantagens de tal substituição seria diminuir o empirismo presente no coeficiente de desgaste K da equação proposta por Archard, neste caso definindo a contribuição do atrito ao processo. Contudo, definir o coeficiente de atrito cinético μ_k para um processo de polimento de rochas ornamentais pode-se mostrar tão complexo quanto encontrar um valor para o coeficiente de desgaste K que engloba todas as variáveis implícitas do processo, portanto tal substituição teria utilidade apenas em estudos analíticos da equação.

4.4. Quanto a Distância Percorrida x

Utilizando os conhecimentos de movimento de plano geral da cinemática, ou seja, movimento que possui tanto translação quanto rotação, podemos encontrar, analiticamente, um vetor que define a posição instantânea de um único ponto de contato do cabeçote de polimento como mostrado na Equação 4.

$$\vec{R}_b = [Vt + r \sin(\omega t)]\hat{i} + r \cos(\omega t)\hat{j} \quad (4)$$

Onde r é a distância radial entre o ponto de contato referente e o centro do cabeçote de polimento, t é o tempo do processo, e V e ω se referem a velocidade linear e angular, respectivamente, do cabeçote de polimento. Vale ressaltar que a análise feita caracteriza um processo de polimento que percorre um segmento reto sobre a rocha, desprezando possíveis oscilações laterais. Com a ajuda do software matemático gratuito *SciLab*, foi simulado o movimento de um único ponto de contato de um cabeçote de polimento sobre uma superfície rochosa, com distância do centro de $r=0.5$ m, durante um tempo de $t=1$ s, e com as seguintes velocidades normalmente usadas pela indústria:

Tabela 1: Parâmetros Convencionais de Velocidades de Cabeçotes de Polimentos.

Variável	Unidades Convencionais	Unidades S.I.
Velocidade Linear (V)	1.7 cm/s	0.017 m/s
Velocidade Angular (ω)	500 RPM	52.35987756 rad/s

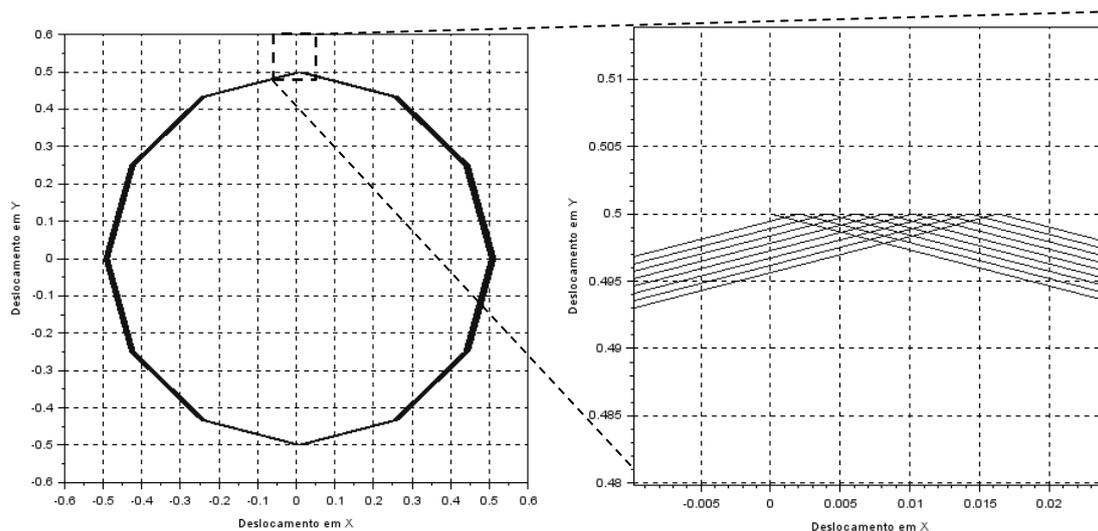


Figura 2: Simulação do movimento de um ponto de contato durante 1 s sobre uma superfície (à esquerda, o movimento completo; à direita, um detalhamento).

Através da figura, podemos notar que o movimento caracteriza a forma de uma elipse, embora o término de um ciclo esteja levemente deslocada do ponto inicial deste mesmo ciclo, não completando o formato de elipse. Contudo, visto que esse deslocamento é pequeno quando comparado ao resto do deslocamento, podemos aproximar o movimento para o formato de uma elipse, e, finalmente, definirmos uma equação para o deslocamento de um ponto de contato, como mostrado na Equação 5 a seguir.

$$x = \omega t * \sqrt{r^2 - \frac{v\pi r}{2\omega} + \frac{v^2\pi^2}{8\omega^2}} \quad (5)$$

5. CONCLUSÕES

Existem obstáculos ainda a serem ultrapassados antes que um método analítico possa ser implementado a fim de diminuir o empirismo verificado no processo de polimento de rochas ornamentais. A dureza de uma rocha ornamental pode variar bruscamente dependendo do ponto de contato, devido as suas mais variadas fases minerais. Embora futuras pesquisas possam ser realizadas com o objetivo de melhor definir a dureza de rochas ornamentais para fins de aplicação em modelos analíticos, uma alternativa promissora seria englobar a dureza no coeficiente de desgaste K da equação de Archard. Contudo, um problema é acarretado, referente a definir tal coeficiente para cada processo de polimento. Seria necessário definir um valor que caracterize todos os diferentes tipos de polimentos, dependendo do tipo de rocha a ser polida, as variáveis referentes ao fluido de limpeza e arrefecimento (água), a possível interferência de pontos de contatos relativamente próximos, etc. Uma possível solução para este problema seria expandir este coeficiente, a fim de englobar, de forma analítica, cada possível fenômeno ocorrente num processo de polimento de rocha.

Finalmente, as equações de deslocamento definidas são para casos específicos. Possíveis oscilações laterais podem ocorrer durante um processo de polimento, tanto acidentalmente quanto propositalmente com o objetivo de englobar uma maior área a ser polida. Além disso, a equação se refere a um único ponto de contato. Para caracterizar todo o volume perdido como a equação de Archard propõe, deve ser feito um cálculo integrativo, a fim de englobar todos os possíveis pontos de contato de forma dinâmica.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaria de Agradecer ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida (Proc.: 166179/2018-3), ao meu orientador Dr. Leonardo Luiz Lyrio da Silveira pelo apoio e conhecimentos compartilhados, e aos meus familiares e colegas de curso da Engenharia Mecânica do IFES Campus Cachoeiro de Itapemirim pela amizade e suporte moral e intelectual.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P.F. **Estudo Comparativo do Polimento de “Granitos” com diferentes tipos de abrasivos**. 2014. 121p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (Brasil).

ALMEIDA, P.F. **Análise tribológica do sistema de polimento com abrasivos à base de resina de mamona para acabamento superficial de rochas de revestimentos**. 2019. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (Brasil).

BEER, F.P. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Cinemática e Dinâmica**. 9ª edição, São Paulo: Makron Books, 2012, 779p.

BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. 2.ed. Columbus, Ohio, USA, 2013. 711p.

CARVALHO, D.L.S. **Determinação de Parâmetros do Polimento, em Três Tipos de Rochas Graníticas.** 2010. 130p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (Brasil).

QUITETE, E.B.; KAHN, H. **Dureza knoop em rochas para revestimento:** correlação com desgaste abrasivo. Anais. Recife: UFPE/CETEM, 2002.

SILVEIRA, L.L.L. **Polimento de Rochas Ornamentais: Um enfoque Tribológico ao Processo.** 2008. 203p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (Brasil).

SILVEIRA, L.L.L. et. al. **Contribuição para o Avanço Tecnológico da Fase de Polimento de Rochas Ornamentais.** 2017. 70p.

SILVEIRA, L.L.L.; BOLONINI, T.M. **Polimento de Rochas Ornamentais – Aspectos Tribológicos.** 2016. 52p.