

CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO DE POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

STATISTICAL CONTROL OF DIMENSION STONE POLISHING PROCESS

Márcio Alves Rizzo Júnior

Aluno de Graduação da Engenharia Mecânica, 9º período, IFES
Período PIBITI/CETEM: agosto de 2019 a julho de 2020,
e-marcio@outlook.com

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

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

RESUMO

Os atuais processos de beneficiamento de rochas ornamentais possuem embasamento empírico formados ao longo do tempo por resultados passados e experiências pessoais. Tal fato, embora não comprometa a funcionalidade do setor, pode trazer problemas de ineficiência e gastos desnecessários. Este trabalho visa estudar a influência das variáveis de controle em máquinas de polimento (pressão, vazão d'água e tempo de polimento) através do controle estatístico da mesma, e possivelmente definir pontos de otimização destes processos. Para isso, serão feitas simulações de diferentes condições de polimentos de amostras de biotita monzogranito no simulador S-PRO e, posteriormente, a coleta de dados quanto a rugosidade superficial da mesma após o processo, utilizando o rugosímetro da *Talysurf*. Finalmente, será utilizado o *software Statistica* para gerar análises ANOVA e superfícies de respostas para determinar a influência de cada variável no processo. Utilizando conhecimentos de Tribologia, podemos prever que a vazão d'água não terá tanta influência devido aos mecanismos de lubrificação presente, em contrapartida da pressão e do tempo de polimento, que são previstos para terem uma grande influência, baseado na equação de taxa de desgaste de Archard.

Palavras-chave: Controle, estatístico, polimento, rocha, ornamental.

ABSTRACT

The current dimension stone beneficiation processes have an empirical basis shaped over time with past results and personal experiences. This fact, although it does not compromise the functionality of the sector, can cause problems of inefficiency and unnecessary expenses. This work aims to study the influence of the machine control variables (pressure, water flow and polishing time) through its statistical control, and to possibly define points of optimization of these processes. For that, simulations of different polishing conditions of biotite monzogranite will be made in the S-PRO simulator and, later, a collection of data on the surface roughness after processing, using the *Talysurf* rugosimeter. Finally, the *Statistica* software will be used to generate ANOVA analysis and response surfaces to determine the influence of each variable in the process. Using knowledge from Tribology, we can predict that water flow will not have as much influence due to the lubrication mechanisms present, as opposed to pressure and polishing time, which are expected to have a great influence, based on the Archard's wear rate equation.

Keywords: Control, statistic, polishing, dimension, stone.

1. INTRODUÇÃO

O processo de polimento de rochas ornamentais consiste em utilizar equipamentos denominados politrizes, onde chapas de rochas são dispostas numa esteira rolante e passam por uma sequência de cabeçotes com rebolos abrasivos acoplados, que possuem rotação em torno de seu próprio eixo, e exercem pressão sobre as rochas.

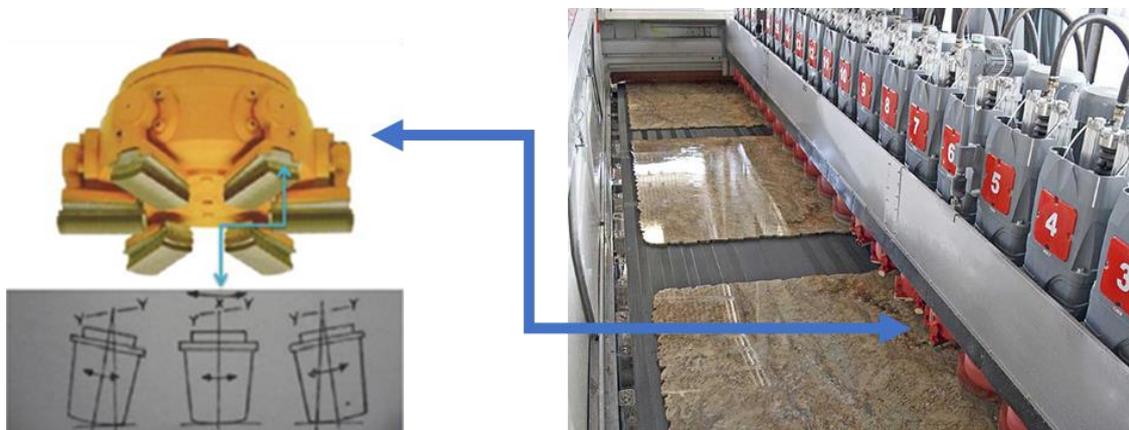


Figura 1: À esquerda, cabeçote de polimento com rebolos abrasivos acoplados; à direita, politriz industrial.

Atualmente, estes processos de beneficiamento de rochas ornamentais dependem, de forma geral, de conhecimentos empíricos adquiridos ao longo do tempo. Este aspecto indica oportunidades de aprimoramentos da eficiência destes processos, e que podem ser explorados exercendo estudos que analisam os fenômenos envolvidos.

Silveira (2008) propôs analisar os processos de polimentos de rochas ornamentais com um enfoque na Tribologia, que é a ciência das interações de superfícies em movimento relativo. Resumidamente, foi visto que o resultado final do polimento depende, dentre outras variáveis, do tempo de polimento, da vazão de água e da força normal que o cabeçote da politriz exerce sobre a rocha, além das propriedades intrínsecas da rocha a ser polida, bem como as características do rebolo abrasivo. Estas variáveis são o parâmetro de controle do simulador de polimento S-PRO presente no CETEM/NRES, que permite simular condições de polimento sobre amostras de rochas ornamentais. Contudo, a mesma possui um único cabeçote, em contraste da sequência que existe em politrizes industriais, e isso gera uma diferença no tempo de polimento e na região polida a ser comparada com a da indústria. Ponciano e Silveira (2019) exploram esta questão mais a fundo em seu trabalho.

Com o simulador S-PRO, é possível reproduzir as condições de polimento e analisar estatisticamente a influência de cada variável no polimento da rocha ornamental. Existem diversos parâmetros que podem ser avaliados para caracterizar a qualidade final do produto, porém, geralmente, o mais desejado é o brilho superficial, que garante maior valor estético.

Contudo, a rugosidade superficial da rocha ornamental após o polimento também é um parâmetro interessante a ser analisado. Esta variável trata da medida das variações de relevo de uma superfície, e se relaciona com o brilho devido aos fenômenos de reflexão da luz. Além disso, a rugosidade também permite analisar a textura final da rocha ornamental de forma precisa.

2. OBJETIVOS

Implementar o controle estatístico do processo de polimento de rochas ornamentais, a partir das simulações realizadas em amostras de um tipo de biotita monzogranito no simulador de polimento S-PRO e das medições feitas no rugosímetro da *Talysurf*, onde ambos equipamentos estão presentes no CETEM/NRES.

3. METODOLOGIA

Este trabalho utiliza conceitos e ferramentas estatísticas para a identificação do quanto cada variável operacional influência no resultado final de rugosidade após o polimento, tendo em vista a otimização do processo. As amostras utilizadas neste trabalho foram ladrilhos de um granito cinza chamado comercialmente como Cinza Corumbá, e classificado petrograficamente como biotita monzogranito. Sua escolha foi dada pelo fato de seu acabamento se tratar apenas do polimento direto (sem utilização de resinas), facilitando a aplicação de técnicas estatísticas.

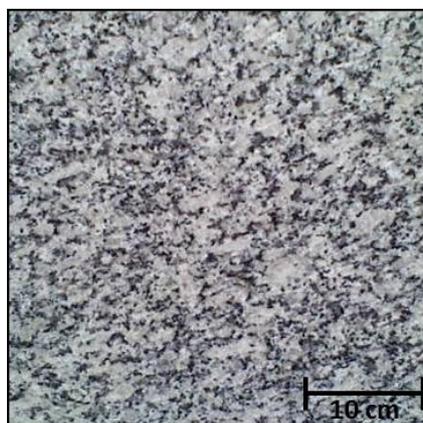


Figura 3: Amostra utilizada na pesquisa (Cinza Corumbá).

Primeiramente, foi necessário analisar e traduzir as condições de polimento industriais para o S-PRO do CETEM/NRES, visto que as duas não operam da mesma forma. Para tanto, utilizou-se, como referência, uma politriz Breton modelo KG 4000 Plus.

A politriz industrial possui 18 cabeçotes operantes no polimento da rocha ornamental estudada. Contudo, o S-PRO possui apenas um cabeçote. Logo, seria necessário realizar 18 passadas em cada amostra, a fim de caracterizar cada cabeçote da politriz industrial. Para isso, seria utilizada a seguinte sequência (em *mesh*) de abrasivos, na seguinte ordem: 24, 24, 36, 36, 60, 120, 220, 220, 320, 320, 400, 600, 800, 800, 1200, 1200, lustro e lustro. A pressão também é alterada nos cabeçotes 9 e 11, algo que também foi englobado no ensaio.

Desta forma, foi utilizado o planejamento fatorial 3^3 , com ponto central e uma repetição do mesmo. Para definir a matriz experimental de tal planejamento, seria necessário definir três faixas de investigação para as três variáveis a serem investigadas: pressão, vazão e tempo.

Tabela 1: Faixas de investigação.

Fatores	Faixa -1	Faixa 0	Faixa 1
Pressão (faixa)	-1	0	1
Vazão d'água (L/min)	12	18	24
Tempo (s)	7	8	9

Para a vazão, as faixas seriam de 12, 18 e 24 L/min, enquanto que para o tempo, as faixas seriam de 7, 8 e 9 segundos. Já para a pressão, como a mesma varia dependendo do cabeçote, foi necessário definir faixas de operação, onde a faixa 0 corresponde a sequência utilizada na indústria, e as faixas 1 e -1 correspondem a 20% a mais e a menos, respectivamente, de tal sequência (com exceção da pressão utilizada nos cabeçotes 9 e 10, que se mantiveram 142 kg).

Tabela 2: Faixas de pressão.

Cabeçotes	Faixa -1 (kg)	Faixa 0 (kg)	Faixa 1 (kg)
1 a 8	151	188	226
9 e 10	142	142	142
11 a 18	157	196	235

Com o auxílio do software *Statistica*, foi definida uma matriz experimental que caracteriza as 16 condições necessárias para gerar uma superfície de resposta e uma análise de variância satisfatórias. As combinações seriam, então, realizadas nas amostras de biotita monzogranito com o auxílio do S-PRO. A matriz experimental definida segue abaixo, onde as combinações 15 e 16 são os pontos centrais do planejamento fatorial:

Tabela 3: Matriz experimental.

n	Pressão (faixa)	Vazão (L/min)	Tempo (s)
1	-1	12	7
2	-1	12	9
3	-1	24	7
4	-1	24	9
5	1	12	7
6	1	12	9
7	1	24	7
8	1	24	9
9	-1	18	8
10	1	18	8
11	0	12	8
12	0	24	8
13	0	18	7
14	0	18	9
15 (C)	0	18	8
16 (C)	0	18	8

Em um próximo passo, após a secagem das amostras, as mesmas seriam levadas para o rugosímetro da *Talysurf*, para analisar a variação da rugosidade superficial de cada amostra. A mesma funciona fazendo um traço em linha reta e analisando as nivelações da superfície.

Como visto em produções anteriores (PONCIANO & SILVEIRA, 2019), amostras que são polidas no S-PRO não representam o polimento industrial completamente. Ao invés disso, as mesmas possuirão uma região específica, de 6x10 cm, que irá caracterizar o processo industrial de forma correta.

Sabendo disto, a metodologia para a coleta da rugosidade superficial das amostras englobaria exercer diferentes traços nesta região e utilizar a média dos valores obtidos.

Por fim, os resultados de rugosidade obtidos seriam então preenchidos na matriz experimental e, com a ajuda do *software Statistica*, poderia ser observado o quanto cada variável influencia no valor da rugosidade final das superfícies das amostras através dos gráficos de superfície de respostas e análises ANOVA.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embora o processo experimental não tenha sido concluído, é possível utilizar os conceitos de Tribologia da Engenharia Mecânica para tentar prever os resultados que serão obtidos nessa pesquisa. Por exemplo, uma análise preliminar do processo definiria que a água presente no polimento atua como um lubrificante entre os rebolos abrasivos e a superfície da rocha ornamental, diminuindo o coeficiente de atrito entre os mesmos e consequentemente variando a taxa de desgaste do material.

Contudo, quando se leva em consideração a alta velocidade de rotação dos cabeçotes, pode-se perceber que a água não possui tempo suficiente para se estabilizar e formar uma camada espessa o suficiente, caracterizando um tipo de lubrificação chamada limítrofe, onde existe apenas um filme lubrificante molecular separando as duas superfícies, e que possui um coeficiente de atrito que independe da variação de espessura média do filme.

Então, para o escopo desta pesquisa, e considerando apenas a influência isolada da vazão d'água no resultado final, é possível prever que não existirá grandes influências da mesma na rugosidade final da rocha ornamental. Este fenômeno de lubrificação pode não ocorrer para valores muito baixos de vazão d'água, onde o contato entre o abrasivo e a rocha será maior e mais severo. Porém, para as faixas utilizadas neste trabalho (de 12 a 24 L/min), a água atua apenas na remoção de detritos e no resfriamento das superfícies durante o polimento.

Já a pressão e o tempo são previstos de terem grandes influências no resultado final do polimento. Da Tribologia, a equação de Archard, usada para prever taxas de desgaste abrasivo, é diretamente proporcional a força normal, e conseqüentemente a pressão que o material abrasivo aplica sobre o material a ser desgastado. Além disso, o tempo de exposição também irá ditar quantas vezes os pontos de contatos passaram sobre a rocha ornamental, algo que também é previsto pela equação através do deslocamento de um único ponto de contato.

5. CONCLUSÕES

Embora o processo experimental não tenha sido concluído, pode-se utilizar os conceitos de Tribologia da Engenharia Mecânica para tentar prever o resultado que seria obtido neste trabalho.

Tais análises prévias devem ser confirmadas com a metodologia experimental propostas, e é esperado que os resultados obtidos possam trazer aprimoramentos nos atuais processos de beneficiamento de rochas ornamentais, tais como reduzir tempo de polimento e a carga aplicada, ambos trazendo economia de energia e custos.

Como existe uma variação das propriedades intrínsecas entre diferentes corpos rochosos, e até mesmo entre amostras de mesma classificação petrográfica, também é necessário averiguar quais parâmetro de rugosidade propostos pela norma melhor classificam a qualidade superficial do material após o polimento. Futuros trabalhos podem ser feitos, tanto para relacionar e averiguar as relações entre os parâmetros de rugosidade com o brilho, tanto para verificar se os parâmetros analisados neste trabalho possuem as mesmas influências no polimento de outros tipos de rochas ornamentais diferentes do biotita monzogranito utilizado nesta pesquisa.

6. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica concedida (Proc.: 136274/2019-6), ao meu orientador Dr. Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, aos professores do IFES e colegas de curso e do CETEM pelo apoio e conhecimentos compartilhados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro, p. 18. 2002.

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

MONTGOMERY, D. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 3.ed. USA. 2002. 706p.

PONCIANO, V. M. & SILVEIRA, L.L.L. **Estudos pré-normativos para o ensaio de polimento de rochas ornamentais**. Jornada do Programa de Capacitação Institucional, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Rio de Janeiro, Resumo Expandido, 2019.

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

SILVEIRA, Z. C. & CAVALCA, K. L. **Análise Estatística e Otimização de Parâmetros de Projeto em Componentes de Sistemas Mecânicos**. Campinas - SP. 2003. 205p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.