

# **Pré-normatização do ensaio de polimento de rochas ornamentais no simulador de polimento S-PRO**

## **Pre-standardization of the dimension stone polishing test in the polishing simulator S-PRO**

**Victor Moza Ponciano**

Bolsista PCI, Eng. De Minas

**Leonardo Luiz Lyrio da Silveira**

Supervisor, Geólogo, D.Sc.

### **Resumo**

O desenvolvimento de pesquisas relacionadas à melhoria contínua das etapas de beneficiamento de rochas ornamentais é um processo muitas das vezes moroso e dispendioso, visto que as primeiras chapas produzidas terão que ser testadas em diferentes condições operacionais na fábrica para se chegar à melhor rotina para seu acabamento final. Tendo isso em vista, o CETEM desenvolveu o Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais S-PRO, um equipamento que permite simular em diferentes situações o polimento em escala laboratorial, esta pesquisa visa atender as indicações da norma NBR 17025/2017 e propor uma norma para o Ensaio de Polimento de Rochas. O equipamento foi primeiramente calibrado e então foram definidos os fatores de conversão das situações operacionais da indústria para a simulação e, por fim, foi desenvolvida uma metodologia adequada para medição dos resultados dos ensaios. Os resultados preliminares mostraram que os erros encontrados são aceitáveis de acordo com o critério de aceitação estipulado. O equacionamento dos fatores de conversão dos parâmetros foi definido assim como a metodologia para medição de brilho.

**Palavras chave:** rochas ornamentais, polimento, ensaio, simulação, norma.

### **Abstract**

The development of research related to the continuous improvement of the dimension stone processing may be a time consuming and expensive process, since the first slabs produced will have to be tested under different operational conditions in the factory to reach the best finishing routine. With this in mind, CETEM has developed the Dimension Stone Polishing Simulator S-PRO, an equipment that allows to simulate in different situations the polishing in laboratory scale, this survey aims to attend the indications of the standard NBR 17025/2017 and propose a standard for the Polishing Test of Dimension Stones. The equipment was first calibrated and then the conversion factors of the operating situations of the industry were defined for the simulation and, finally, an adequate methodology was developed to measure the test results. Preliminary results showed that the errors found are acceptable according to the stipulated acceptance criteria. The equation for the parameter's conversion was defined as well as the methodology for measuring brightness.

**Key words:** dimension stones, polishing, assay, simulation, standard.

## 1. Introdução

O beneficiamento de rochas ornamentais compreende uma sucessão de etapas de desgaste, que se inicia com a serragem dos blocos e vai até o polimento final das placas. Tais etapas estão embasadas no conceito de tribossistema, no qual as propriedades da rocha, do abrasivo e das variáveis operacionais da politriz são elementos ativos no processo. Como um sistema integrado, no tribossistema, características de uma variável influenciam os resultados das outras variáveis.

No caso do polimento de rocha, os constituintes minerais irão responder de modo diferente às solicitações impostas pelo abrasivo e pelas condições operacionais, gerando diferentes graus de rugosidade à superfície. É possível notar que não se pode evoluir tecnologicamente em relação ao polimento de rochas ornamentais sem dispor de uma máquina que permita estudar as variáveis que influenciam nesse processo.

Alguns estudos têm abordado a questão do polimento de rochas sob a ótica da melhoria continuada da eficiência, relacionando a influência das propriedades das rochas e das condições de operações no mecanismo de desgaste abrasivo na proposta de modelos de desgaste mais eficientes (SILVEIRA, 2007). Diante disto, o equipamento desenvolvido pelo CETEM Núcleo Regional do Espírito Santo (CETEM/NRES), denominado Simulador de Polimento de Rochas (SPRO), abre um leque importante para os estudos sobre o processo de polimento, que possibilita investigar as influências de cada elemento que se interagem nessa atividade, e de forma conjugada possibilita avaliar o peso de cada elemento e propor operações mais eficientes de processo. Contudo, uma eficiente calibração dos parâmetros trabalhados no equipamento e um controle estatístico do processo resultarão em uma maior confiabilidade e parametrização nos resultados obtidos pelos ensaios realizados nele.

Portanto, visa-se cumprir os requisitos mínimos para estar primeiramente em consonância com a norma NBR ISSO/IEC 17025 (ABNT, 2017) objetivando uma futura obtenção da acreditação do ensaio de polimento, reconhecimento formal de competência técnica e gerencial de um laboratório para executar ensaios, reforçando assim a criação de uma norma para o Ensaio de Polimento de Rochas Ornamentais, de forma que os materiais possam ser testados em escala laboratorial previamente para que cheguem às indústrias com as rotinas de processamento já definidas, evitando todo custo que tal desconhecimento poderia gerar na fábrica.

## 2. Objetivo

O objetivo do projeto é propor um método de ensaio para o polimento de rochas ornamentais silicáticas, buscando fornecer uma estrutura básica para a formulação de uma norma específica para esse processo. A princípio, visa um controle estatístico inicial dos parâmetros variáveis do S-PRO, permitindo assim que o equipamento de simulação proposto atenda às necessidades para ser tomado com um instrumento de ensaio. Para isso, o cálculo das incertezas inerentes às variáveis de operação (pressão do cabeçote, velocidade de giro e vazão de água) será executado assim como a definição da sistemática do ensaio e a metodologia para medição do resultado.

### 3. Materiais e Métodos

A metodologia deste trabalho se inicia com a calibração do simulador através do cálculo de incerteza das três principais variáveis: a pressão exercida pelo cabeçote, a velocidade de giro do satélite e a vazão de água do processo. Em outra etapa, foi realizada uma avaliação e comparação da cinemática do processo industrial com a simulação, a partir do equacionamento de dois principais parâmetros que regem esse fenômeno: tempo de exposição ao polimento e velocidade de riscamento. Além disso, a determinação da metodologia para a medição de brilho nos ladrilhos foi definida.

### 4. Resultados e Discussões

Para análise das interações do sistema de pressão, foi criado o Gráfico 1 que contém a interpolação dos resultados medidos. A média resultante de cada interação foi baseada nos primeiros 60 segundos de contato, que está próximo ao tempo suficiente para efetuação do polimento na simulação.

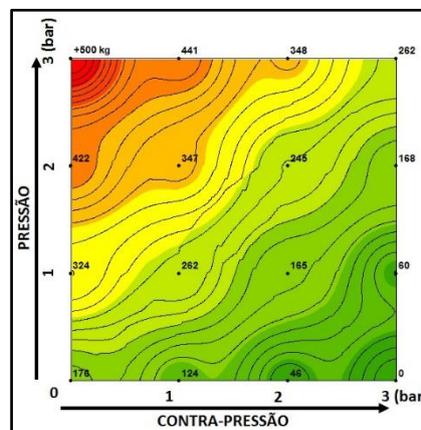


Gráfico 1. Mapa das interações entre pressões e o peso resultante executado pelo eixo.

A execução dessa análise sistemática das interações existentes no sistema de pressão do S-PRO possibilita uma seleção mais detalhada das condições de pressão que podem ser adotadas no simulador. O mapa gerado no Gráfico 1 permite selecionar uma interação entre outras que tenham amplitudes de peso semelhantes. As cores do mapa resultantes da interpolação dos resultados mostram que diferentes combinações permitem semelhante aplicação de força sobre a superfície da chapa. O uso correto desse sistema pode implicar em um consumo energético mais eficiente.

#### 4.1. Cálculo de incerteza do eixo de pressão

Foi colocado uma balança, com capacidade máxima de 500kg (resolução de 0,5 kg), abaixo do cabeçote de polimento para aferição do peso que este exerce sobre a superfície da chapa. Primeiramente, foram definidas as faixas de pressões e contrapressões que resultassem em pesos aproximados aos que se usam nas indústrias. As variações de 0 a 3 bar ( $\sim$ kg/cm<sup>2</sup>) de pressão e contrapressão são suficientes para geração de 16 interações que podem ser interpoladas e, assim, estabelecer outras combinações em outras faixas de peso.

A metodologia adotada para a checagem do peso real que o S-PRO exerce sobre a superfície das chapas resumiu-se à aplicação das 16 interações e à leitura do peso resultante na balança. Contudo, percebeu-se que o eixo desse sistema aplica a força de forma gradativa, porém rápida, até atingir um valor máximo e regride de forma lenta até uma considerável estabilização do sistema, ou seja, uma variação da pressão em função do tempo de aplicação. Dessa forma, decidiu-se acompanhar essa variação até que se encontrasse o tempo em que o peso estabilizasse. Para isso, inicialmente foi adotado um tempo de 2 minutos e 40 segundos onde se registrou o peso a cada 20 segundos. Todas as 16 interações foram analisadas por esse período de tempo e medidas por 3 vezes cada. Notou-se que nos primeiros 60 segundos a pressão tem uma queda considerável, perdendo em média 7% do peso máximo (dp= 2,4%), após esse tempo, o peso estabiliza e só perde em média 1% do peso em relação à pressão máxima (dp= 0,6%). Percebeu-se também que a interação com pressão 3 bar e contrapressão 0 bar excedeu os limites de pressão admissíveis (+500 kg) e a interação de 0 bar de pressão e 3 bar de contrapressão não permitiu que o cabeçote descesse e entrasse em contato com a chapa.

Como base para os procedimentos de cálculo dessas incertezas foi utilizado o Guia para Expressão de Incerteza de Medição – GUM 2008 (INMETRO, 2012) que contém as etapas a serem seguidas na determinação das fontes de incerteza de medição e sua quantificação. Os cálculos de incerteza obedeceram às seguintes equações, a começar pela determinação da média ( $\bar{x}$ ) e do desvio padrão experimental (s). O método de avaliação "tipo A" é caracterizado pela realização de repetidas medições e pelo cálculo do desvio padrão experimental. A incerteza padrão  $u(x)$  relacionada a esse método ("tipo A") foi calculada como mostra a Equação 1.

$$u(x) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

O método do "tipo B" foi determinado através de uma única fonte de incerteza, a resolução da balança utilizada (0,5 kg). Essa incerteza de resolução foi tomada como a incerteza expandida ( $U_p$ ) da balança e transformada em incerteza padrão  $u(x_i)$  através da divisão  $U_p/k$ , onde  $k$  representa o fator de abrangência usado como multiplicador da incerteza padrão, de modo a obter uma incerteza expandida. O fator de abrangência utilizado foi de  $k=2$ , considerando uma distribuição normal, que representa um nível de confiança de aproximadamente 95,45%.

Finalmente, as duas incertezas foram combinadas (Equação 2) para se calcular a incerteza expandida  $U$  (Equação 3) aplicando um fator de abrangência  $k=2,255$  para um nível de 95,45% de confiança e um grau de liberdade respectivo ao número  $n=12$  de medições (tabela t-Student).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)} \quad (2)$$

$$U = k \times u_c \quad (3)$$

#### 4.2. Cálculo de incerteza da velocidade de rotação do satélite e vazão de água

Para o cálculo da incerteza da velocidade exercida pelo satélite na superfície da chapa foi utilizado um fototacômetro 461893 da *Extech* com resolução 0,1. A incerteza “tipo B” foi obtida no manual do equipamento, sendo o fator de abrangência utilizado  $k=2$  e o número  $n$  de medições foi 5 para cada faixa de variação da velocidade medida (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 e 600 rpm). Para o cálculo da incerteza da bomba d’água, utilizou-se um cronômetro e um recipiente milimetrado para a obtenção da relação volume/tempo ( $n=15$ ).

A calibração do equipamento foi realizada e os resultados dos erros e incertezas da medição estão exibidos na Tabela 1, pressão, velocidade de rotação e vazão de água, respectivamente.

Tabela 1. Resultados das incertezas para cada parâmetro variável do simulador

Valor Nominal (kg)	Valor Referência	Erro Encontrado	Incerteza da Medição	Fator de Abrangência (k)	Grau de Liberdade Efetivo (Veff)
45,6	46,8	1,2	3,1	2,25	12
232,5	245,1	12,6	8,2	2,25	11
430,7	441,9	11,2	6,6	2,25	11
Valor Nominal (rpm)	Valor Referência	Erro Encontrado	Incerteza da Medição	Fator de Abrangência (k)	Grau de Liberdade Efetivo (Veff)
50	48,2	1,8	0,4	2,40	8
350	354,2	4,2	0,4	2,40	7
600	608,8	8,8	0,3	2,40	7
Valor Nominal (L/min)	Valor Referência	Erro Encontrado	Incerteza da Medição	Fator de Abrangência (k)	Grau de Liberdade Efetivo (Veff)
24	24,1	0,1	0,9	2,52	7
16	14,7	1,3	0,5	2,52	6
8	8,4	0,4	0,7	2,43	8

Os resultados acima indicam o quanto os valores nominais do equipamento se aproximam dos reais. O cálculo de incerteza permite a determinação de uma faixa de variação do valor real com uma confiabilidade de 95,45%. Tendo em vista a robustez do ensaio de polimento, consideram-se aceitáveis as variações registradas acima, onde, por exemplo, a pressão exercida pelo sistema varia no máximo em 3,5% no valor de referência, a velocidade em no máximo 0,8% e a vazão de água em 3,7%. Resultados que indicam, a partir do Critério de Aceitação adotado (erros abaixo de 5%), que o equipamento tem a precisão necessária para execução de ensaios de polimento.

#### 4.3. Definição matemática do tempo de polimento e frequência transversal para o S-PRO

Tendo em vista as diferenças técnicas/cinemáticas existentes entre uma politriz industrial e o simulador desenvolvido pelo CETEM (S-PRO), fez-se necessário uma análise crítica do processo a fim de se reproduzir as mesmas condições de polimento industrial na simulação. Para isso, deve-se analisar todas as variáveis do

processo a fim de repetir seus efeitos na escala laboratorial. Arcanjo (2019) contempla em seu estudo uma análise crítica do processo de polimento de rochas se atentando aos aspectos cinemáticos e de desgaste ocorrentes no sistema. Os resultados desse estudo ajudam no entendimento, principalmente, de como a cinemática dita o tempo que a área a ser polida fica exposta ao desgaste e o quanto isso influencia na qualidade final do processo, servindo assim como base para a adaptação do ensaio de polimento no simulador. Dessa forma, uma análise lógica do processo foi realizada objetivando a representação das condições industriais na simulação, tendo em vista que o tempo de exposição ao desgaste e a velocidade de riscamento devem permanecer iguais.

Para o cálculo do tempo médio em que uma porção de área da chapa fica exposta ao desgaste em um processo industrial, toma-se em conta os fatores cinemáticos acima mencionados. Portanto, conforme a Figura 1, foram traçadas duas retas, sendo que uma está paralela ao movimento transversal da trave (linha amarela) e a outra paralela ao movimento de esteira (linha branca). Essas linhas servem como referência para os cálculos, pois com a análise da mecânica do processo, pode-se chegar a um tempo médio que uma porção da rocha fica exposta ao cisalhamento da peça abrasiva.

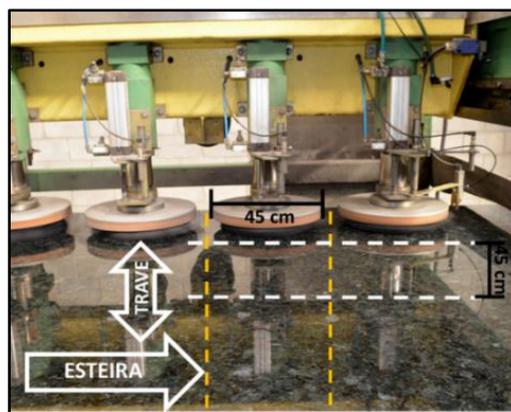


Figura 1. Esquema da cinemática do processo industrial.

Analisando a Figura 1, é possível inferir que a linha amarela ficará exposta ao desgaste o tempo necessário para que um satélite com diâmetro efetivo de 42 cm passe por ela. Assim, é válido considerar que dependendo da velocidade da esteira (com o sentido mostrado na figura) e da frequência da trave (transversal ao movimento da esteira) é possível saber qual o número de passadas que o satélite realizará sobre essa linha.

O comprimento da chapa ( $C_c$ , em metros) dividido pela velocidade da esteira ( $V_e$ , em metros por minuto) indica o tempo que a chapa é polida e, sabendo o tempo médio de polimento da chapa, pode-se obter o tempo que o satélite leva para cobrir a linha amarela da Figura 1, ou seja, em quantos segundos o satélite tomará para passar completamente sobre essa linha. Considerando também a frequência da trave ( $F_{ti}$ , em ciclos por minuto) que é o movimento transversal do satélite de polimento, chega-se ao número de passadas que o satélite executa nessa linha (Equação 4). Assim temos que:

$$\text{Número de passadas} = \frac{C_c}{V_e} \times 60 \times \frac{0,42}{C_c} \times \frac{F_{ti}}{60} \quad (4)$$

Esse “número de passadas” foi denominado de Fator Velocidade Esteira (FVE) e pode ser resumido de acordo com a Equação 5, a seguir:

$$FVE = \frac{0,84}{Ve} \times Ft \quad (5)$$

Deve-se analisar ainda o movimento transversal do satélite. De forma análoga ao movimento de esteira, deseja-se saber quanto tempo o satélite leva para cobrir uma linha transversal ao movimento de esteira, mostrado pela linha tracejada branca na Figura 1. Logo, deve-se saber quanto tempo o satélite leva para efetuar uma passada sobre a linha amarela. Este cálculo é feito com base na  $Ft$  e na largura da chapa ( $Lc$ , em metros). Essa parte da análise resulta em outro fator, chamado aqui de Fator Velocidade Trave (FVT). A amplitude transversal do movimento da trave é sempre, aproximadamente, 30 cm menor, isso é devido ao cuidado que se deve ter para que o satélite não saia dos limites da chapa e prejudique o processo. Logo, esse fator se resume para a Equação 6:

$$FVT = \frac{12,6}{Ft \times (Lc - 0,3)} \quad (6)$$

O Tempo Médio de Exposição ao Desgaste ( $T_{med}$ ), em segundos, é resultado do produto dos dois fatores FVE e FVT:  $T_{med} = FVE \times FVT$ , que fica melhor resumida na forma da Equação 7:

$$T_{med} = \frac{10,6}{Ve \times (Lc - 0,3)} \quad (7)$$

Outra análise é feita para definir a frequência transversal que o simulador deverá efetuar para atender à condição de mesma velocidade de riscamento, abreviada aqui por  $Fts$  (ciclos por minuto). Os cálculos se resumem na Equação 8:

$$Fts = 2,45Lc \times Ft \quad (8)$$

#### 4.4. Definição da metodologia para medição de brilho

Como já visto, as características cinemáticas são diferentes no simulador de polimento. Dessa forma, seguindo os princípios da Análise do Sistema de Medição se faz necessária a padronização da medição da variável resposta, o brilho, para que os dados possam ser representativos para o processo. A Figura 2 mostra um ladrilho 60x60 cm polido no simulador.

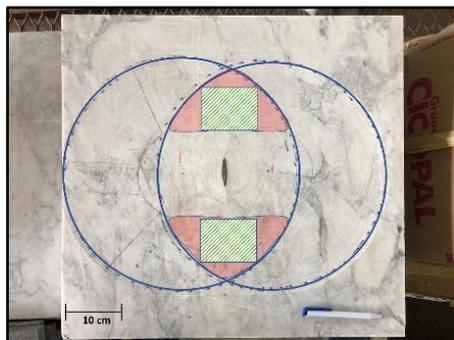


Figura 2. Esquema da cinemática do processo industrial.

Nota-se que o polimento acontece formando uma espécie de elipsoide na amostra, com uma área de cobertura de 0,218 m<sup>2</sup> aproximadamente com uma amplitude de movimento transversal de 0,41 m. Devido as características do equipamento, o tempo de exposição ao desgaste não é uniforme na elipsoide, variando de acordo com cada região. A área em vermelho é um local onde o contato acontece de maneira ininterrupta durante todo processo. Uma vez que o tempo é um *input* a ser inserido no equipamento no início do polimento, essa região é a única que se pode inferir um tempo de polimento uniforme e compatível com o tempo médio industrial. Portanto, a área do quadrado verde (6x10 cm) dentro da região vermelha é definida como o local mais indicado para a medição do brilho. A sistemática de medição estipulada é a partir da subdivisão dessa área em 15 quadrados de 4cm<sup>2</sup> com 5 medições de brilho cada., totalizando 75 pontos de brilho analisados.

## 5. Conclusão

O controle estatístico do polimento tem uma fundamental importância no entendimento da relação existente entre as diferentes variáveis do processo. A elucidação do mecanismo de interação permite a avaliação dos parâmetros de forma a apontar aqueles que têm mais influência nos resultados do polimento. As faixas de incerteza dão maior confiabilidade nos resultados, pois com a compilação de todas as fontes pode-se apontar as faixas de variação que implicam na alteração substancial do brilho impresso na chapa. Como já demonstrado em outros trabalhos, a frequência transversal é a principal responsável pelo volume desgastado no polimento. Tal constatação mostra a aplicabilidade da simulação realizada no S-PRO que apesar de não possuir as mesmas características cinemáticas de uma politriz industrial (não envolve velocidade de esteira), consegue representar as condições de tempo de exposição ao desgaste e velocidade de riscamento muito similares ao fenômeno industrial.

## 6. Agradecimentos

Agradeço ao CETEM e sua equipe técnica por toda colaboração e ao CNPq pela bolsa concedida (Processo 300188/2019-6).

## 7. Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR ISO/IEC 17025:2017**. Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, Errata 2, publicada em 19/12/2017.

ARCANJO, Rodrigo L. **Estudo da cinemática e dos aspectos tribológicos do processo de polimento de rochas ornamentais**. Trabalho de conclusão de curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Cachoeiro de Itapemirim. 2019.

INMETRO - Instituto Nacional De Metrologia, Qualidade E Tecnologia, Avaliação de dados de medição: **Guia para expressão de incerteza de medição - GUM 2008**, Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIM, 2012, 141 p.

SILVEIRA, L.L.L. **Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. 205p., 2007.