

## ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA CONTROLE DO PROCESSO DE POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

*STATISTICAL ANALYSIS FOR CONTROL OF DIMENSION STONES POLISHING PROCESS*

**Victor Moza PONCIANO<sup>1</sup>, Leonardo Luiz Lyrio da SILVEIRA<sup>2</sup>**

Centro de Tecnologia Mineral. Av. Pedro Calmon, 900 - Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: victor.moza@gmail.com, leolysil@cetem.gov.br

Introdução  
Materiais e Métodos  
Apresentação e Discussão dos Resultados  
Considerações Finais  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - O setor de rochas ornamentais experimenta uma fase de grande avanço tecnológico nos últimos anos e parte integrante desse processo é a pesquisa e desenvolvimento direcionadas à todas etapas da cadeia produtiva. O polimento das rochas é parte fundamental para a agregação de valor aos materiais, responsável por uma parcela considerável nos custos de produção e na carga ambiental da cadeia, características que ressaltam a necessidade de estudos mais aprofundados sobre rotinas de processamento otimizadas. Dessa forma, nota-se a possibilidade da aplicação de ferramentas estatísticas para o aprimoramento do controle dos processos. Tais ferramentas aqui utilizadas são largamente difundidas em setores com avançado nível tecnológico. Neste trabalho foram usadas as técnicas de Planejamento de Experimentos, Análise de Variância (ANOVA) e a Metodologia de Superfície de Respostas (MSR) para a determinação das influências de cada variável do equipamento politriz (Pressão dos cabeçotes, Tempo de polimento e Vazão d'água) no resultado de brilho da superfície polida e consumo de energia. Observou-se que a Pressão exerce grande influência no sistema, seguido do Tempo de polimento. Já a Vazão d'água mostrou-se menos influente nos resultados, o que permite a adoção de menores volumes sem comprometer a eficiência do processo.

**Palavras-Chave:** rocha ornamental, polimento, ferramentas estatísticas.

**ABSTRACT** - The dimension stone sector has experienced a phase of great technological advancement in recent years and part of this process is the research and development aimed at all stages of the production chain. The polishing of rocks is a fundamental part of the adding value to materials, responsible for a considerable share in production costs and the environmental burden of the chain, characteristics that highlight the need for further studies on optimized processing routines. Thus, it is noted the possibility of applying statistical tools to improve process control. Such tools used here are widely disseminated in sectors with high technological level. In this work, the techniques of Design of Experiments (DOE), Analysis of Variance (ANOVA) and the Response Surface Methodology (RSM) were used to determine the influences of each variable of the polishing equipment (Head pressure, Polishing time and Water flow rate) in the results of the polished surface brightness and electricity consumption. It was observed that the Pressure has a great influence on the system, followed by the Polishing time. The Water flow rate was less influential in the results, which allows the adoption of smaller volumes without compromising the efficiency of the process.

**Keywords:** dimension stone, polishing, statistical tools.

### INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca no cenário mundial na produção de rochas ornamentais como um dos maiores produtores do mundo. Dentro do país esse destaque fica para o estado do Espírito Santo, com uma fatia de mais de 79% do faturamento nacional (ABIROCHAS, 2019).

Já é conhecida a necessidade que o setor tem em desenvolver e aprimorar seu processo produtivo para suportar a competitividade de outros setores com materiais concorrentes, como a cerâmica.

O grau tecnológico do setor de rochas ainda é inferior a esses produtos e está baseado no empirismo desenvolvido ao longo de anos.

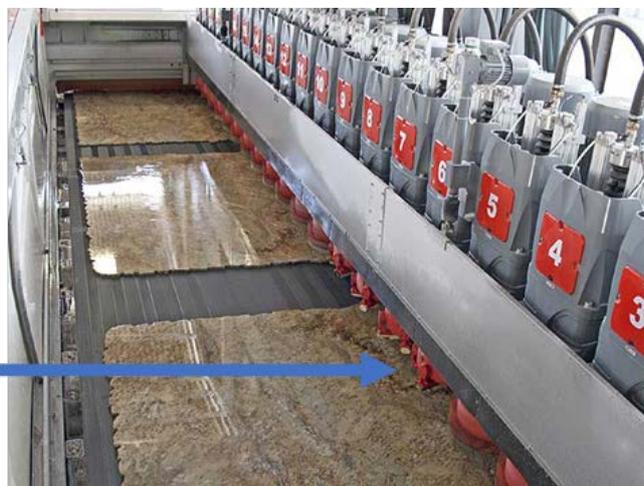
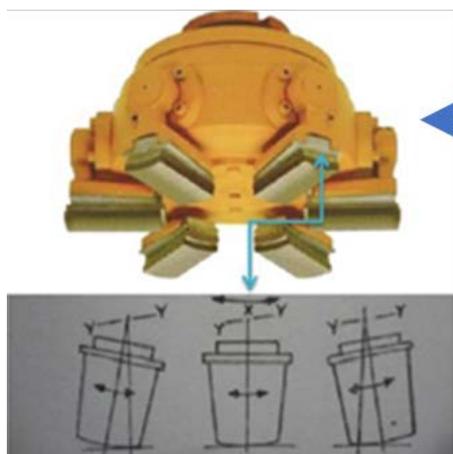
Dessa forma, o Centro de Tecnologia Mineral, Núcleo Regional do Espírito Santo

(CETEM/NRES) tem atuado na pesquisa, desenvolvimento e inovação, propondo a melhoria contínua dos processos produtivos e o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias sustentáveis para a indústria das rochas.

Uma dessas frentes de pesquisa do CETEM, que trata da melhoria contínua dos processos, está direcionada ao polimento das chapas de rochas. O polimento pode ser considerado uma segunda etapa do beneficiamento que sucede o processo de desdobramento do bloco em chapas. É o polimento que reduz a rugosidade da superfície das chapas e proporciona o brilho no material.

Para a realização de tal processo utiliza-se

equipamentos denominados politrizes, onde, nas mais modernas, as chapas são dispostas em uma esteira rolante que passa por uma sequência de cabeçotes (onde estão acoplados os rebolos abrasivos em ordem decrescente de granulometria, Figura 1) exercendo pressão na superfície dessas chapas, com velocidade de rotação aproximada de 500 rpm, fazendo com que através do atrito dos rebolos com a rocha haja uma redução progressiva da rugosidade,



**Figura 1** - Cabeçote de polimento acoplado aos cabeçotes de uma politriz industrial.

A metodologia empregada no processo é determinada de acordo com o profissional responsável pela operação e baseada no conhecimento prático adquirido e desenvolvido através da “tentativa e erro”. A receita usada (combinação das variáveis do processo) sofre alterações de acordo com a qualidade da chapa antes de entrar no processo e pelo “*modus operandi*” de cada operador.

Tal constatação revela a fragilidade das operações industriais devido ao baixo controle estatístico do processo, o que resulta numa maior quantidade de problemas relacionados à qualidade e um controle de custos pouco detalhado.

Neste trabalho, foi analisada uma abordagem específica de acabamento de superfície muito utilizado nos materiais mais comuns do setor, denominado de Polimento Direto. Nessa rotina, os materiais saem da etapa de serragem e vão direto para as politrizes, dispensando qualquer tratamento com resina. É um dos tratamentos mais simples e apresenta grande possibilidade nas aplicações de ferramentas estatísticas, uma vez que apenas o brilho das superfícies se mostra suficiente para ser tomado como um parâmetro resposta de qualidade na análise do resultado.

A evolução desse processo se deu a partir do

resultando em uma superfície lisa e espelhada. Há a adição de água em grande volume ao processo para resfriamento e carreamento de partículas finas, produto desse atrito.

Os principais parâmetros variáveis em tal processo são: Velocidade de esteira, Velocidade de trave, Pressão nos cabeçotes, Vazão de água, a própria Rocha e os Abrasivos. A interação desses parâmetros determinará o grau de qualidade do processo.

surgimento de máquinas automáticas e de abrasivos tecnicamente mais eficientes. Porém, pouco se evoluiu nos estudos técnicos sobre o fenômeno de interação que acontece em tal processo. Autores já vêm mostrando a influência que as diferentes variáveis têm no processo, entre eles, Silveira (2007) que propôs a análise do processo de polimento sob a ótica da Tribologia, que é a Ciência e tecnologia de superfícies que se interagem em contato e movimento resultando no desgaste das peças por meio do atrito.

Tal enfoque permite compreender que o desgaste que ocorre no processo de polimento, com o contato dos rebolos abrasivos, sob pressão e velocidades rotacionais e vetoriais, está embasado no tribossistema, o qual compreende as propriedades da rocha, do abrasivo e das variáveis operacionais da máquina utilizada. Ou seja, a qualidade do polimento da rocha é resposta das interações das  $n$  variáveis compreendidas nesse sistema.

As propriedades das rochas (composição mineralógica, textura e estrutura, porosidade, grau de microfissuramento e grau de alteração, e.g.) respondem de maneira distinta ao tipo de abrasivo (composição química, estrutura, dureza, morfologia e granulometria de partículas de corte e.g.) e às características operacionais do

equipamento (velocidade de esteira e trave, pressão do cabeçote e vazão d'água).

A realização de testes de novas rotinas e métodos de polimento de rochas ornamentais é uma tarefa dispendiosa para ser realizada no chão de fábrica, uma vez que as empresas dispõem de pouco tempo para realização de ensaios, além do fato de isso resultar em custos elevados com matéria-prima e insumos. Dessa forma, o CETEM desenvolveu um equipamento capaz de reproduzir as condições industriais em escala laboratorial, o Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais S-PRO (Figura 2).

O simulador serve de base para a realização de testes e o desenvolvimento de linhas de pesquisa nessa área. Com este equipamento é possível

variar os diferentes parâmetros operacionais e abrir um leque para investigação de outras condições não aplicadas pela indústria, utilizando tamanhos reduzidos de amostras (chapas com 60 x 60cm). Com o simulador já foi possível o desenvolvimento de trabalhos que já mostraram a influência das variáveis no resultado do polimento (Silveira et al., 2017; Bolonini & Silveira, 2016).

Uma análise mais aprofundada sobre a parametrização da simulação com o processo industrial de polimento foi realizada. A calibração dos parâmetros do equipamento mostrou erros com pequena amplitude e uma precisão satisfatória para o objetivo a qual se propõe (Ponciano & Silveira, 2019).



**Figura 2** - Representação esquemática do equipamento S-PRO e imagem real.

Os principais parâmetros de controle do simulador são:

*-Pressão do cabeçote:* O simulador possui um sistema pneumático de pressão e contrapressão. Esse sistema de pressão duplo permite uma maior seleção de faixas de peso que o cabeçote exercerá sobre a chapa de rocha.

*-Vazão d'água:* Com uma bomba d'água e um medidor de vazão acoplados, é possível variar o volume de água que o processo recebe (de 1 L/min à 24 L/min).

*-Frequência transversal:* É velocidade com que o cabeçote cobre a amplitude transversal de 17 cm do simulador, ela dita a velocidade de riscamento que as partículas abrasivas terão no atrito com a rocha.

*-Tempo de polimento:* Devido às características cinemáticas diferentes nos

equipamentos industriais e no simulador, um estudo já foi realizado para se parametrizar as duas condições distintas. Dessa forma, os parâmetros industriais Velocidade de esteira (que não está presente na cinemática laboratorial) e Velocidade de trave são parametrizadas com o Tempo de Polimento, detalhado em Ponciano & Silveira (2019).

Para a análise da influência dos diversos fatores que envolvem um sistema, diversas ferramentas estatísticas de análise de dados são largamente difundidas em indústrias com avançado nível tecnológico. Tais ferramentas podem, a partir de simulações experimentais e desenvolvimento de modelos matemáticos para o fenômeno, auxiliar na análise da influência de cada variável existente no sistema e definir padrões de otimização.

Os modelos gerados, em caso de hipótese nula rejeitada, servem como base para a previsão estatística dos resultados que podem ser obtidos com a variação dos parâmetros operacionais, permitindo assim a formulação de modelos preditivos que antecipem os resultados que uma rotina operacional terá. Os fatores de controle são variáveis cujos níveis podem ser alterados pelo operador do processo. Esses são as variáveis já citadas que regulam a operação e ditam a resposta do processo (Montgomery, 2017).

Atualmente, poucos recursos estatísticos são usados nas etapas do processamento das chapas de rochas ornamentais, principalmente ferramentas para otimização de rotinas. A Engenharia de Processos permite a análise do sistema de produção sob o ponto de vista técnico dando suporte a equipe de qualidade nas determinações dos modelos de produção mais eficientes para a empresa. Isso se torna possível quando uma equipe multidisciplinar de analista de dados e engenheiros emprega conceitos e ferramentas já desenvolvidos para a experimentação e, a partir de simulações e controle estatístico do processo, conseguem modelar matematicamente o fenômeno abordado. Dado o devido refino, tal modelo serve de base na predição de resultados a partir da combinação dos fatores envolvidos (Montgomery, 2017).

Em Barros Neto et al. (2001), é dito que a atividade estatística mais importante não é a análise de dados e sim o planejamento dos experimentos no qual os dados serão obtidos, uma vez que um planejamento não satisfatório resultará em um grande volume de dados que podem não ter significância estatística. Diversos autores enfatizam no trabalho que a Estatística aplicada à engenharia atua como uma ferramenta poderosa no levantamento de dados e análise de diversos problemas de projeto e processo.

A área da qualidade é outro exemplo que aplica conceitos estatísticos para análise do desempenho do sistema ou produto. É interessante ressaltar a importância que a Estatística tem em auxiliar os estudos experimentais sobre diferentes projetos no setor de rochas ornamentais e muitos dos problemas relacionados com o controle estatístico da qualidade devem ser estudados em conjunto com técnicas de otimização (Carlyle et al., 2000).

O Planejamento de Experimentos é uma forma eficiente de se analisar a variabilidade e

identificar a influência dos fatores analisados, assegurando que o experimento forneça informações precisas sobre as respostas de interesse.

A primeira etapa de um planejamento e a determinação de quais são os fatores e as respostas de interesse para o sistema em estudo.

Os fatores de entrada e os parâmetros de controle podem ter origem qualitativa (como por exemplo, características geológicas dos materiais tratados, tipos de abrasivos usados) ou quantitativa (como por exemplo, pressão do cabeçote de polimento sobre a superfície da chapa, quantidade de água no sistema, velocidades de giro e deslocamento), podendo haver mais de uma resposta de interesse. É necessário que sejam definidos os objetivos e o escopo do experimento para que se escolha um planejamento adequado (Silveira & Cavalca, 2003).

A utilização do projeto experimental na engenharia contribui para o desenvolvimento do produto, ganho em produtividade, melhoria em sua fabricação, melhoria de desempenho e confiabilidade, e reduções de custos. Essa ferramenta garante que as informações sejam confiáveis e que os recursos disponíveis para experimentação sejam bem utilizados (Galdámez & Carpinetti, 2002).

Outra ferramenta para avaliar o desempenho dos produtos é a Análise de Variância (ANOVA), que permite a representação gráfica dos graus de influência dos fatores com relação à propriedade que está sendo avaliada. A partir do conjunto de dados, executa-se a ANOVA de forma a obter os valores dos fatores de controle que otimizam as mesmas. A ANOVA consiste em uma técnica estatística que decompõe origens que justificam a variação total. Ela é utilizada para a rejeição ou não da hipótese nula ( $H_0$ ) do experimento, mostrando se os modelos gerados na experimentação têm relação ou não com a realidade (Montgomery, 2017).

Outra técnica utilizada em conjunto ao planejamento de experimentos e a análise de variância é a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR), que segundo Tay & Butler (1999), é usada na modelagem matemática de respostas. Esse equacionamento matemático do fenômeno permite a identificação dos pontos otimizados do sistema através da variação das respostas em função da variação dos níveis dos fatores. Para isso, polinômios algébricos são

usados para a aproximação do modelo em determinado grau. Muitos fenômenos podem ser bem descritos a partir de uma regressão linear, outros já necessitam serem modelados em grau superior para identificação de possíveis curvaturas, resultando numa melhor determinação dos pontos ótimos.

Box & Hunter (1957, segundo Galdámez & Carpinetti, 2002) classificam os principais aspectos identificados com o estudo do fenômeno a partir da utilização da MSR, que são: a determinação dos pontos ótimos do sistema; a previsão da resposta de acordo com a seleção dos níveis dos fatores; a identificação do relacionamento dos parâmetros e as respostas.

### MATERIAIS E MÉTODOS

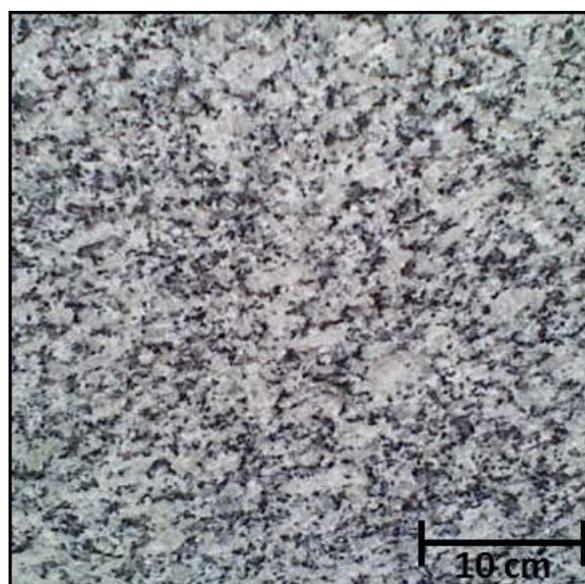
A rocha ornamental utilizada nessa pesquisa é um granito cinza denominado comercialmente como Cinza Corumbá, que, de acordo com o Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo é classificado petrograficamente como um Biotita Monzogranito (Figura 3).

As rochas de coloração cinza associam-se a magmas de composição monzonítica e no sul do Estado estão relacionadas à Suíte Intrusiva Santa Angélica, pertencente ao estágio pós-orogênico do Orógeno Araçuaí, constituindo rochas graníticas do tipo I em maciços formados por intrusões aproximadamente circulares. Nesses maciços são produzidas as variedades conhecidas comercialmente como Cinza Corumbá, Corumbazinho, Cinza Andorinha, Cinza Nobre, Cinza Castelo, Cinza Ocre e Cinza Prata. O Cinza

Portanto, este trabalho se apresenta como uma introdução de conceitos estatísticos e de Engenharia de Processos mais aprimorados ao polimento de rochas ornamentais. Pretende-se utilizar as ferramentas de Planejamento de Experimentos, ANOVA e a Metodologia da Superfície de Resposta para o equacionamento do fenômeno que seja capaz de estimar e prever as faixas de valores dos parâmetros mais críticos do sistema dentro do espaço experimental estudado. Dessa forma, visa-se definir um modelo ajustado das condições operacionais do processo, para um tipo litológico, que permita imprimir qualidade com baixo gasto energético às chapas de rocha produzidas.

Corumbá é oriundo do Maciço de Castelo, cuja composição varia entre sieno e monzogranito. No geral, constituem rochas de cor cinza a cinza claro, porfiríticas e compostas por 33% de microclina micropertítica, 30% plagioclásio, 20% quartzo, 12% biotita e 5% acessórios (allanita e titanita) (Sardou Filho et al., 2013).

A escolha dessa rocha se deu pelas características isotrópicas que permitem uma maior homogeneidade nos resultados de brilho, por ser um material que seu processo de acabamento é o polimento direto, o que facilita o uso das técnicas estatísticas pois tem um número menor de variáveis que influenciam nos resultados de qualidade e consumo, assim como pelo fato desse material ser considerado de uso amplo e consagrado no setor da construção civil.



**Figura 3** - Biotita Monzogranito (Cinza Corumbá) pertencente ao Maciço de Castelo associadas à Suíte Intrusiva Santa Angélica.

Primeiramente, foi definido um escopo para a análise da influência das diferentes variáveis do

processo de polimento de rochas ornamentais. Para isso, com base nos conceitos tribológicos do processo, que envolve a interação da rocha, do abrasivo e da máquina, foram mantidos como constante no processo, a rocha e os abrasivos utilizados, restando apenas as variáveis do equipamento politriz para serem combinadas.

A metodologia empregada iniciou-se com visitas as indústrias de beneficiamento de rochas

ornamentais para o acompanhamento dos trabalhos de acabamento da rocha estudada. Nesses trabalhos de campo, foram coletados todos os dados que são inseridos na máquina politriz para serem reproduzidos no simulador S-PRO. O equipamento usado na empresa visitada é uma politriz Breton KG 4000 plus com 19 cabeçotes, sendo 18 operantes no polimento do material estudado (Figura 4).



**Figura 4** - Politriz Breton KG 4000 plus.

Para o polimento estudado, a granulometria dos abrasivos usados nos 18 cabeçotes foi: 24, 24, 36, 36, 60, 120, 220, 220, 320, 320, 400, 600, 800, 800, 1200, e 1200 *mesh*, com mais dois cabeçotes com abrasivos de lustro no final. Uma vez que as informações sobre o modo de operações foram coletadas e tratadas para as características adotadas na simulação, definiu-se os fatores e seus níveis a serem analisados nos experimentos (Tabela 1). Seguiu-se o Planejamento Fatorial (com 3 fatores em 3 níveis) com uma repetição no ponto médio para a investigação da influência de cada variável no resultado do polimento (Montgomery, 2017).

**Tabela 1** - Variáveis e níveis testados.

Fatores	Níveis		
Pressão (faixa)	-1	0	1
Vazão d'água (L/min)	-1	0	1
Tempo (s)	-1	0	1

Na indústria, a sequência dos cabeçotes da politriz (cabeçotes 1 ao 18) a pressão é alterada em dois momentos, nos cabeçotes 9 e 11. A pressão industrial foi definida como a Faixa 0 do experimento, com adição de 20% de carga na Faixa 1 e redução de 20% na Faixa -1 (Tabela 2). Para a Vazão d'água os níveis eram 12, 18 e 24 L/min e

para o Tempo, 7, 8 e 9 s.

**Tabela 2** - Três níveis do fator Pressão.

Sequência de 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

Os *Softwares Statistica 10.0* (Statsoft, 2010) e *Microsoft Excel* (Microsoft, 2016) foram utilizados na definição do planejamento experimental (Tabela 3), para análise de variância e geração dos gráficos de superfície de resposta.

Uma vez definida as combinações, que no caso resultaram em 16 amostras, as rochas foram submetidas ao polimento no S-PRO (Figura 5). O polimento se resume no posicionamento do ladrilho (chapas com dimensões de 60 x 60 x 2 cm) no interior do equipamento e os ajustes de configuração de acordo com a combinação desejada.

Para a otimização do processo do ponto de vista econômico e da qualidade, dois parâmetros respostas foram analisados nos experimentos: a amperagem do motor principal do simulador (visando a determinação do consumo energético) e

o brilho resultante na superfície do ladrilho polido (visando a qualidade), pretendendo-se assim, a identificação das melhores condições de polimento da rocha estudada.

Tabela 3 - Matriz experimental.

n	Vazão d'água	Pressão	Tempo
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	1
3	1	-1	-1
4	1	-1	1
5	-1	1	-1
6	-1	1	1
7	1	1	-1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	-1	0
12	0	1	0
13	-1	0	0
14	1	0	0
15	0	0	-1
16	0	0	1

Para a correlação dessas duas variáveis, onde se deseja o maior brilho para uma menor amperagem média, foi adaptado a Soma Quadrática de Respostas (SQ) de Taguchi (1993, segundo

Galdámez & Carpinetti, 2002) para a raiz da Diferença Quadrática de Resposta (índice DQ, Equação I).

$$DQ = \sqrt{B^2 - A^2} \quad (\text{Equação I}).$$

Onde B é o brilho médio da amostra e A, a amperagem média do motor principal do cabeçote de polimento, que foi coletada durante o exercício do simulador e para tal foi usado um amperímetro digital do tipo alicate (Figura 6A).

Ao final das etapas de polimento, as amostras secaram por 1 dia para que a segunda resposta, referente a qualidade, fosse coletada. Para isso, utilizou-se um medidor de brilho *Glossmeter micro-TRI-gloss* da marca BYK-Gardner (Figura 6B), que combina medições em três ângulos diferentes (20°, 60° e 85°) em um só aparelho. A unidade de medição de brilho é o *Gloss Unit* (GU) e para esse trabalho foram usados os resultados da incidência em 20° com base nas diretrizes da norma ASTM D523-14. A metodologia da captura do brilho segue as instruções já indicadas em trabalhos anteriores (Ponciano & Silveira, 2019) e conta com a coleta de 30 pontos de brilho para cada amostra, em uma área da superfície do ladrilho com 10 x 6 cm, como visto na figura 6C.



Figura 5 – Ensaio no S-PRO.

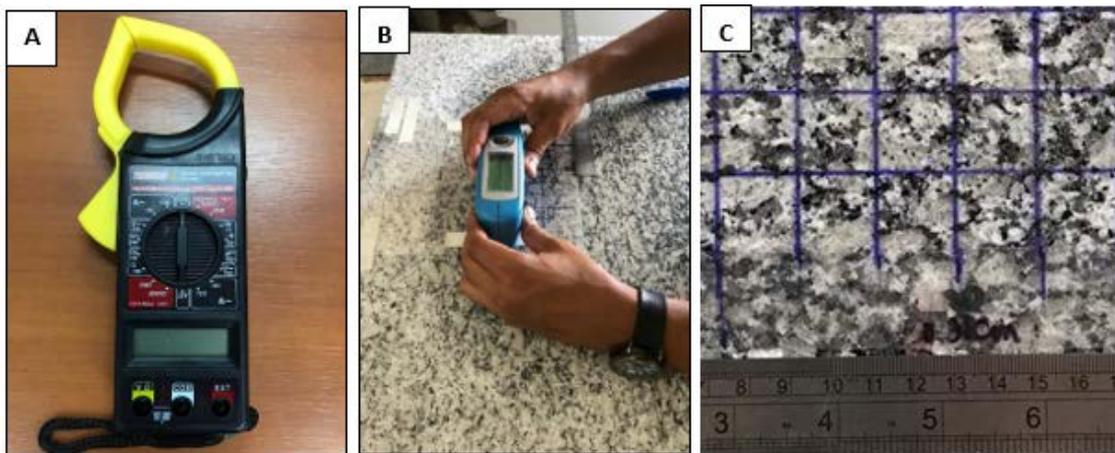


Figura 6 – A) Amperímetro B) Medidor de brilho (*Glossmeter*) e C) Gabarito da medição de brilho.

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

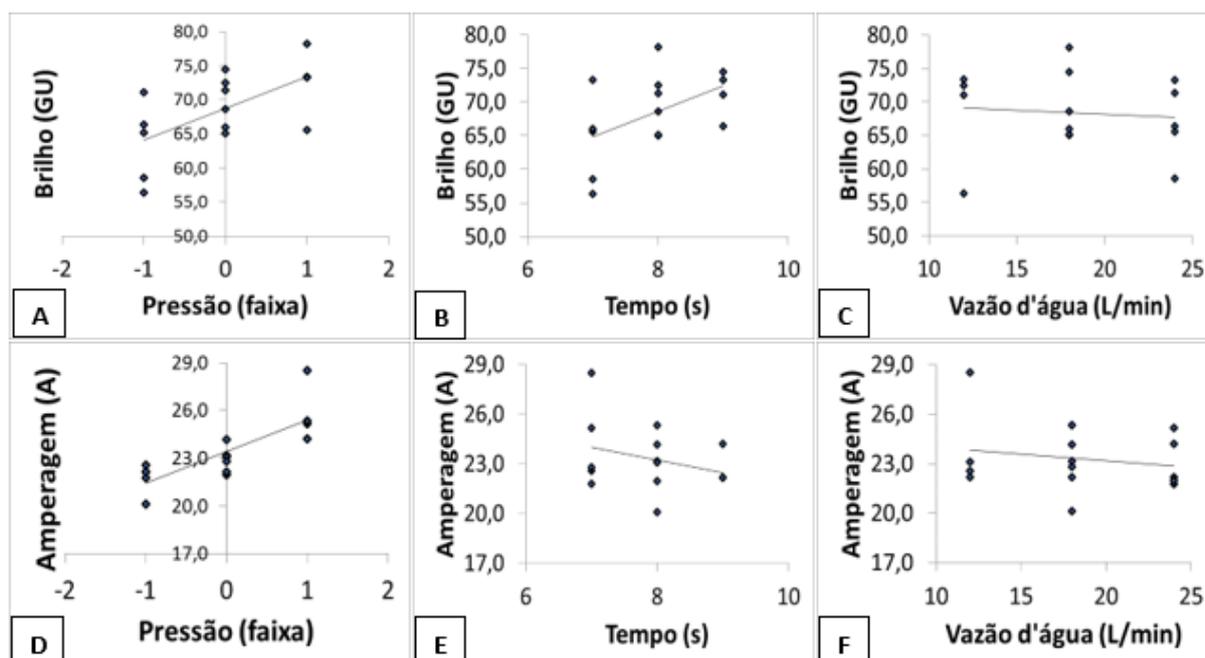
A análise dos resultados se inicia com o preenchimento dos resultados dos ensaios de polimento na matriz experimental para a análise estatística com uso de software (Tabela 4). Em seguida, numa primeira abordagem usou-se os gráficos de efeitos principais (Figura 7) para analisar a influência direta das variáveis no experimento. Percebe-se que dos 3 efeitos analisados, a Vazão d'água pouco interfere nos resultados isolados de brilho e amperagem (Figuras 7C e 7F). Tal constatação fica mais evidente e embasada estatisticamente quando se analisa a ANOVA para tais fatores (Tabela 5). Na análise de variância para o brilho, para um nível

de significância de 90% ( $\alpha = 0,1$ ), nota-se que a Vazão d'água tem pouca significância estatística nos resultados, denotado pelo alto valor p da tabela, reforçando que a Pressão e o Tempo são os mais influenciadores nessa resposta.

Já a Amperagem tem influência significativa da Pressão, pouca influência da Vazão d'água e uma insignificante influência do Tempo. Ressalta-se que o Tempo influencia no consumo energético e a produtividade do processo, porém, o consumo foi baseado na média da amperagem de cada cabeçote e não no consumo total em função do tempo, por isso ele não influencia nessa abordagem.

**Tabela 4** - Respostas do planejamento experimental.

n	Variáveis independentes			Variáveis dependentes		
	Vazão d'água (L/min)	Pressão (faixa)	Tempo (s)	Brilho (GU)	Amperagem média (A)	Diferença dos quadrados - DQ
1	12	-1	7	56,4	22,5	51,6
2	12	-1	9	71,1	22,1	67,5
3	24	-1	7	58,5	21,8	54,3
4	24	-1	9	66,4	22,1	62,6
5	12	1	7	73,3	28,5	67,5
7	24	1	7	65,6	25,2	60,5
8	24	1	9	73,3	24,2	69,1
9	18	0	8	65,0	24,1	60,3
10	18	0	8	68,6	23,1	64,5
11	18	-1	8	65,1	20,1	61,9
12	18	1	8	78,2	25,3	73,9
13	12	0	8	72,5	23,1	68,7
14	24	0	8	71,3	21,9	67,9
15	18	0	7	65,9	22,8	61,9
16	18	0	9	74,4	22,1	71,1



**Figura 7** - Gráfico dos efeitos principais dos fatores.

**Tabela 5 - Análise de variância (ANOVA) para o brilho e amperagem.**

Brilho					
	Soma dos quadrados	g.l.	Quadrado médio	F	Valor p
Pressão	233,608	1	233,608	22,906	0,000
Vazão d'água	18,604	1	18,604	1,824	0,202
Tempo	167,238	1	167,238	16,398	0,002
Erro	122,384	12	10,199		
Total	541,834	15			
Amperagem					
	Soma dos quadrados	g.l.	Quadrado médio	F	Valor p
Pressão	43,356	1	43,356	37,146	0,000
Vazão d'água	5,509	1	5,509	4,720	0,051
Tempo	1,415	1	1,415	1,212	0,293
Erro	14,006	12	1,167		
Total	64,286	15			

Uma ANOVA com os valores de DQ foi efetuada para a análise da significância dos fatores estudados na combinação das duas variáveis respostas (Tabela 6).

Mais uma vez a Vazão d'água se mostrou pouco significativa no modelo, o que pode ser melhor compreendido através do gráfico de Pareto na figura 8. Porém, mesmo pouco significativa, é possível ver uma tendência de perda de eficiência com um grande volume de água nas Superfícies de Respostas da figura 9. A Equação II resume o modelo linear descrito na tabela 7, usando, P para a Pressão do cabeçote, t para o Tempo de polimento e V para a Vazão d'água. Duas importantes informações na análise dos dados são o Coeficiente de regressão ( $R^2$ ) de 73,39% e o grau de dispersão no gráfico dos valores observados e preditos (Figura 10). O

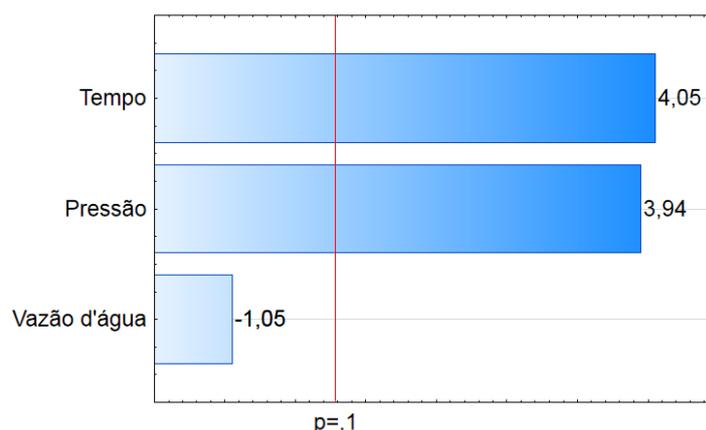
valor do  $R^2$  reflete a homogênea dispersão em torno da reta no gráfico da figura 10, ressaltando o bom ajuste do modelo.

$$DQ = 32,1 + 4,4P + 4,5t - 0,2V \text{ (Equação II)}$$

Após essa etapa, analisou-se a interação entre os dois principais fatores influenciadores do processo de polimento, a Pressão dos cabeçotes e o Tempo de polimento (Figura 11). O modelo linear gerado mostra o aumento do índice DQ de acordo com o aumento dos dois fatores. Porém, é sabido que o processo de polimento tende a uma estabilização da taxa de desgaste ao decorrer do tempo, fazendo com que longos períodos de desgaste não atinjam significativos ganhos de brilho. Sabendo disso, ajustou-se o modelo na forma quadrática para a percepção desse fenômeno na curvatura no modelo (Figura 12).

**Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) para DQ.**

	Soma dos quadrados	g. l.	Quadrado médio	F	Valor p
Pressão	192,714	1	192,714	15,574	0,002
Vazão d'água	13,673	1	13,673	1,105	0,314
Tempo	203,137	1	203,137	16,416	0,002
Erro	148,488	12	12,374		
Total	558,012	15			



**Figura 8 - Gráfico de Pareto.**

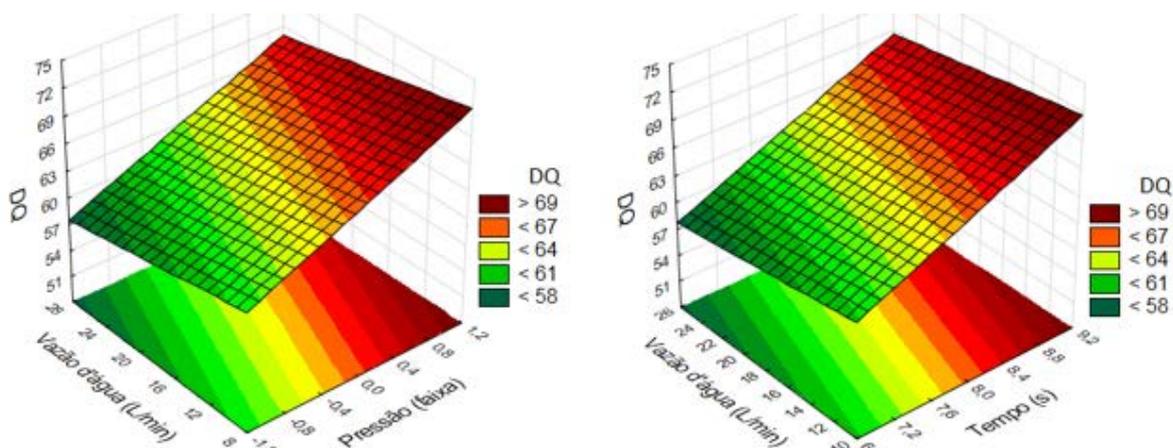


Figura 9 - Gráfico de Superfície de Resposta: Pressão vs Vazão d'água (A) e Tempo x Vazão d'água (B).

Tabela 7 - Coeficientes de regressão do modelo.

	Coeficientes de Regressão	Erro Padrão	Stat (t)	Valor (p)
Interseção	32,125	9,545	3,366	0,006
Pressão	4,390	1,112	3,946	0,002
Vazão d'água	-0,195	0,185	-1,051	0,314
Tempo	4,507	1,112	4,052	0,002

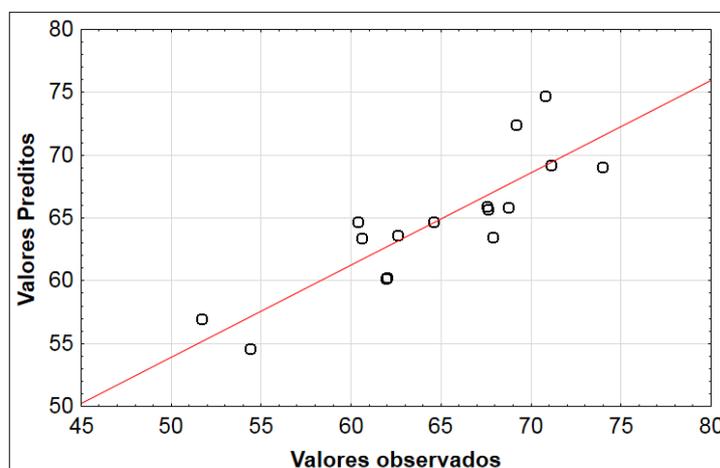


Figura 10 - Gráfico de dispersão dos valores observados x preditos.

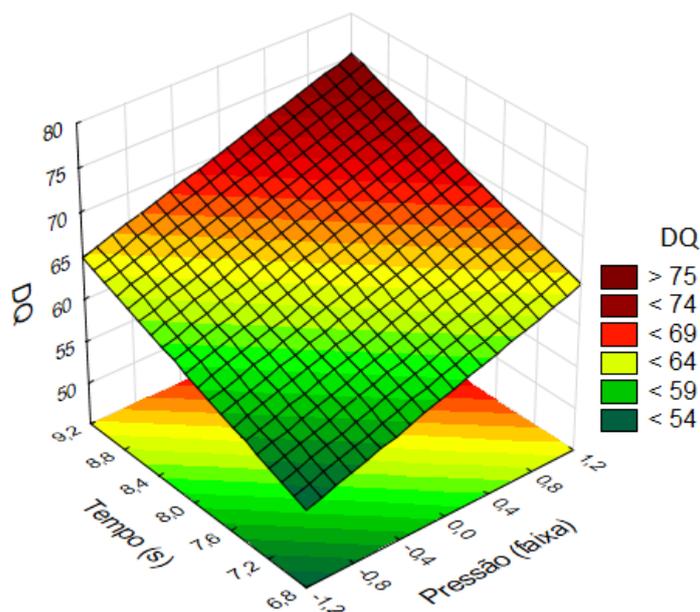
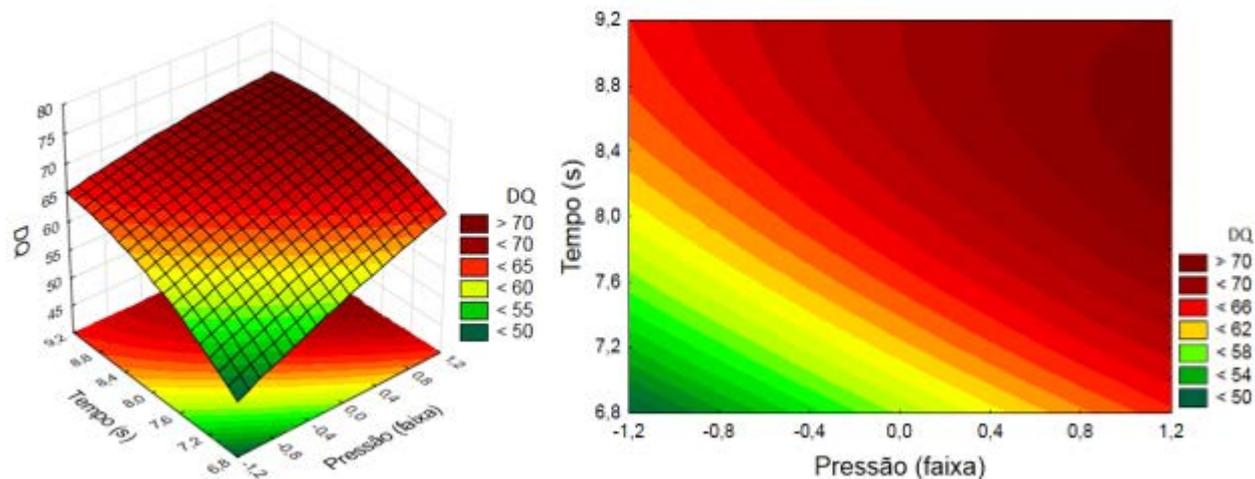


Figura 11 - Gráfico de superfície de resposta linear: Pressão vs Tempo.



**Figura 12** - Gráfico de superfície de resposta quadrático: Pressão vs Tempo.

Como visto na figura 12, há uma curvatura considerável no gráfico, mostrando a tendência de estabilização do índice DQ para altas pressões e grande períodos de tempo, o que dá indícios de uma a fadiga do sistema de desgaste quando os

abrasivos já não conseguem mais retirar quantidades significativas de material rochoso e estabiliza o rendimento do processo, fenômeno que faz com que os níveis máximos de Tempo e Pressão não resultem em condições ótimas.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor de rochas ornamentais necessita do desenvolvimento de pesquisa e inovação para continuar competitivo nos cenários nacional e internacional. O avanço tecnológico das práticas envolvidas no tratamento dos materiais rochosos está baseado no estudo das interações das inúmeras variáveis do processo. Garantir o controle estatístico dessas práticas trará melhores resultados nas operações de manufatura dos materiais acabados, permitindo que o setor produza com alta qualidade e baixo custo.

No trabalho desenvolvido, foi possível perceber o suporte que as ferramentas estatísticas podem dar na criação de modelos de produção eficientes. A otimização do processo passa por uma análise dos dados resultantes dos experimentos laboratoriais, que possibilita a investigação das inúmeras interações de um sistema.

As ferramentas utilizadas permitiram, de

antemão, a redução do número de amostras necessárias para os estudos das interações dos níveis dos fatores abordados. Posteriormente, com o uso dos *softwares* para a modelagem das respostas, se determinou quais variáveis mais influenciavam no sistema e o quanto era o efeito disso. Uma vez constatado o ajuste do modelo, inferências sobre os resultados podem ser tomadas facilmente a partir da análise das superfícies de respostas geradas.

Como sugestão para trabalhos futuros, outros subsistemas tribológicos podem ser investigados, como por exemplo, a influência das características petrográficas no processo. Sabe-se que a heterogeneidade e a variedade dos materiais dificultam na criação de modelos matemáticos com alta confiabilidade, porém, existe uma vasta quantidade de materiais com níveis isotrópicos que satisfazem as condições mínimas para um confiável ajuste.

### AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concedida (Processo 301592/2020-9) e as empresas Mameri Rochas e Luarte Comércio de Pedras.

### REFERÊNCIAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais-**Balanco de exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento em 2018.** Informe 01/2019. Disp. em: [https://www.abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2018/06/Infornes/Informe\\_01\\_2019\\_Balanco\\_2018.pdf](https://www.abirochas.com.br/wpcontent/uploads/2018/06/Infornes/Informe_01_2019_Balanco_2018.pdf). Acessado em: 20 jan 2020.

ASTM – American Society for Testing and Materials D523-14, **Standard Test Method for Specular Gloss**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.  
BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S. BRUNS, R.E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento da Ciência e na Indústria.** Campinas – SP, Editora da Unicamp, 2 ed., 2001.

- BOLONINI, T.M. & SILVEIRA, L.L.L. Desenvolvimento metodológico do ensaio de polimento para rochas ornamentais silicáticas. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INSTITUCIONAL, CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM. Rio de Janeiro. **Resumo Expandido**... Rio de Janeiro: CETEM, 2016.
- BOX, G.E.P. & HUNTER, J.S. Experimental design for the exploration and exploitation of response surfaces. In: CHEW, V. **Experimental design in industry**. New York: John Wiley & Sons, 1957. p. 138-190.
- CARLYLE, W.M.; MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. Optimization problems and methods in quality control and improvement. **Journal of quality technology**. v. 32, n. 1, p.1–17, 2000.
- GALDÁMEZ, E.V.C. & CARPINETTI, L.C.R. **Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de Fabricação de Produtos Plásticos**. São Carlos, 2002. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MICROSOFT, **Excel para Office 365 MSO. Versão 2001**: Microsoft Corporation, 2016.
- MONTGOMERY, D.C. **Controle estatístico da qualidade. Tradução e revisão técnica Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- PONCIANO, V.M. & SILVEIRA, L.L.L. **Estudos pré-normativos para o ensaio de polimento de rochas ornamentais**. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INSTITUCIONAL. Centro de Tecnologia Mineral–CETEM. Rio de Janeiro, 2019. **Resumo Expandido**...Rio de Janeiro: CETEM, 2019.
- SARDOU FILHO, R.; MATOS, G.M.M.; MENDES, V.A.; IZA, E.R.H.F. **Atlas de Rochas Ornamentais do Espírito Santo**. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Espírito Santo. Escala 1:400.000. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil, CPRM: Brasília-DF. 2013.
- SILVEIRA, L.L.L. **Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo**. São Carlos, 2007. 205 p. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- SILVEIRA, L.L.L.; ALMEIDA, P.F.; BOLONINI, T.M.; SOUZA, M.L.; MACHADO, L.L.; PEIXOTO, S.C. Contribuições para o avanço tecnológico da fase de polimento de rochas ornamentais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017. (**Série Rochas e Minerais Industriais, 22**). 66 p.
- SILVEIRA, Z.C. & CAVALCA, K.L. **Análise Estatística e Otimização de Parâmetros de Projeto em Componentes de Sistemas Mecânicos**. Campinas, 2003. 205p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas.
- STATSOFT, **Inc. Statistica (software de análise de dados), versão 10. 2010**. www.statsoft.com.
- TAGUCHI, G. **Taguchi on robust technology development: bringing quality upstream**. New York: American Society of Mechanical Engineers, ASME, 1993.
- TAY, K.M. & BUTLER, C. Methodologies for experimental design: A survey, comparison and future predictions. **Quality Engineering**, v. 11, n. 3, p. 343-356, 1999.

*Submetido em 4 de março de 2020*

*Aceito para publicação em 11 de agosto de 2020*