

Série

Rochas e Minerais Industriais

Contribuições para o Avanço Tecnológico da Fase de Polimento de Rochas Ornamentais

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Phillipe Fernandes de Almeida

Thiago Motta Bolonini

Marília Lopes de Souza

Luan Lamon Machado

Saionara Coelho Peixoto

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

**Contribuições para o Avanço Tecnológico da Fase de
Polimento de Rochas Ornamentais**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Michel Miguel Elias Temer Lulia

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

Gilberto Kassab

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Elton Santa Fé Zacarias

Secretário-Executivo

Luiz Henrique da Silva Borda

Diretor Substituto de Gestão das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais da Secretaria Executiva

Isabela Sbampato Batista Reis de Paula

Coordenadora-Geral Substituta das Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Fernando Antonio Freitas Lins

Diretor

Robson de Araújo D'Ávila

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Claudio Luiz Schneider

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Coordenador de Rochas Ornamentais e Minerais Industriais - COROM

José Antônio Pires de Mello

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

Durval Costa Reis

Coordenador de Administração - COADM

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

ISSN 1518-9155

ISBN 978-85-8261-080-0

SRMI - 22

Contribuições para o Avanço Tecnológico da Fase de Polimento de Rochas Ornamentais

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Geólogo, D.Sc. pela EESC/USP em Geotecnologia, com ênfase em Rochas Ornamentais – Núcleo Regional do Espírito Santo CETEM/MCTIC.

Phillipe Fernandes de Almeida

Tecnólogo em Rochas Ornamentais, M.Sc. em Geotecnologia pela EESC/USP. Doutorando pelo IAU/USP.

Thiago Motta Bolonini

Tecnólogo em Rochas Ornamentais, D.Sc. em Geologia Regional pela UNESP. Prof. do Departamento de Gemologia da UFES.

Marília Lopes de Souza

Geóloga, M.Sc. em Engenharia Civil pelo CTG/UFPE. Núcleo Regional do Espírito Santo CETEM/MCTIC.

Luan Lamon Machado

Depto. de Engenharia Mecânica - IFES. Cachoeiro de Itapemirim – ES, Brasil.

Saionara Coelho Peixoto

Depto. de Engenharia Mecânica - IFES. Cachoeiro de Itapemirim – ES, Brasil.

CETEM/MCTIC

2017

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

Sílvia Cristina Alves França

Editora

Luiz Carlos Bertolino

Subeditor

CONSELHO EDITORIAL

Adão Benvindo da Luz (CETEM), Francisco Wilson Hollanda Vidal (CETEM), Jurgen Schnellrath (CETEM), Arthur Pinto Chaves (USP), Luis Lopes (Universidade de Evora), Carlos Adolpho Magalhães Baltar (UFPE), Marsis Cabral Junior (IPT), José Yvan P. Leite (IFRN) e Renato Ciminelli (Consultor).

A Série Rochas e Minerais Industriais publica trabalhos na área minerometalúrgica, com ênfase na aplicação de minerais industriais e de rochas ornamentais. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes de projetos desenvolvidos no CETEM e em parceria com outras instituições de PD&I.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Valéria Cristina de Souza

Coordenação Editorial

Editoração Eletrônica

Silveira, Leonardo Luiz Lyrio

Contribuição para o avanço tecnológico da fase de polimento de rochas ornamentais / Leonardo Luiz Lyrio da Silveira [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2017.

70p.: il. (Série Rochas e Minerais Industriais, 22)

1. Polimento. 2. Ornamentais. 3. Desgaste. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Silveira, Leonardo Luiz Lyrio. III. Almeida, Phillipe Fernandes. IV. Bolonini, Thiago Mota. V. Souza, Marília Lopes. VI. Machado, Luan Lamon. VII. Peixoto, Saionara Coelho. VIII. Título.

SUMÁRIO

RESUMO _____	7
ABSTRACT _____	8
1 INTRODUÇÃO _____	9
2 OBJETIVO _____	11
3 CONTEXTUALIZAÇÃO _____	12
3.1 Máquinas de Polimento _____	12
3.2 Aspectos Relacionados aos Métodos de Avaliação do Processamento de Rochas Ornamentais _____	16
3.3 Considerações Essenciais para a Modelagem ____	23
4 SIMULADOR DE POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS _____	32
4.1 Ensaio de Polimento: Rochas Silicáticas _____	46
4.2 Ensaio de Polimento: Rochas Carbonáticas ____	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	64

RESUMO

O polimento industrial é uma importante atividade do beneficiamento das rochas. Pode ser compreendido como um processo de desgaste que ocorre na interação entre as rochas e os abrasivos sob condições operacionais realizadas por politrizes. Hoje em dia, as indústrias apresentam um alto grau de modernização de seus equipamentos, resultado da demanda por produtividade, como também pelo surgimento de ferramentas abrasivas com maior rendimento. Porém, ainda é evidenciada a falta de inovação tecnológica, por parte das empresas, no que se refere à visão da rocha como um elemento ativo no processo, que apresenta características físico-mecânicas que influenciam diretamente o mecanismo de desgaste abrasivo. Alguns estudos têm abordado a questão do polimento de rochas com enfoque na melhoria continuada da eficiência, relacionando a influência das rochas ao mecanismo de desgaste abrasivo. Diante disto, foi desenvolvido um equipamento pelo Núcleo Regional do Espírito Santo (NR-ES/CETEM) denominado Simulador de Polimento de Rochas SPRO, que abre um leque importante para os estudos sobre o processo de polimento, que possibilita investigar as influências de cada elemento que se interagem neste processo. Além disto, o equipamento permite a validação de modelos numéricos e experimentais de condições de polimento que não são praticadas pela indústria e testar a eficiência de novas ferramentas abrasivas. O presente trabalho apresenta um escopo geral do processo de polimento de rochas, com detalhamento da evolução dos estudos realizado com o SPRO, com vista a contribuir para a inovação tecnológica desta fase de beneficiamento das rochas ornamentais.

Palavras-chave

Polimento, Ornamentais, Desgaste, Abrasivo, Simulador.

ABSTRACT

The industrial polishing is an important activity of the dimension stones processing, which can be understood as a wear process that occurs in the interaction between stones and fickers, under operational conditions carried out by polishing machines. Nowadays, the industries of stone processing present a high level of modernization of their equipments, as a result of the demand for productivity, as well as the occurrence of abrasive tools with higher productivity. However, there is still a lack of technological innovation by companies regarding the view of the rock as an active element in this process, which presents physical and mechanical characteristics that directly influence the abrasive wear mechanism. In view of this, equipment developed by the Núcleo Regional do Espírito Santo (NR-ES/CETEM), named Rock Polishing Simulator - SPRO, opens an important range for studies of the polishing stone process, which allows investigating the influences of each element in the abrasive wear process. In addition, the equipment allows the validation of numerical and experimental models of polishing conditions that are not yet practiced by the industry, in addition to enabling the testing and efficiency of new abrasive tools. The present study shows a general scope of the dimension stone polishing process, detailing the evolution of the studies carried out with SPRO, aiming to a technological innovation of this ornamental stone processing phase.

Keywords

Polishing, Dimension stones, Wear, Abrasive, Simulator.

1 | INTRODUÇÃO

O polimento das rochas ornamentais é caracterizado como sendo um processo abrasivo que envolve a interação entre as rochas, as ferramentas abrasivas e as condições operacionais executadas pelos equipamentos. Na prática industrial não existe um acompanhamento mais técnico que preveja a importância de cada variável dentro do processo, relacionando a influência das propriedades de cada elemento na taxa de desgaste das rochas e dos abrasivos, ou na qualidade final da chapa polida.

Em nível experimental, alguns estudos tem sido conduzidos pela simulação do polimento, de forma sistêmica, para entender a relação entre as variáveis operacionais do processo, rochas e ferramentas abrasivas em cada operação de desgaste, com enfoque na otimização do processo e sob a ótica da Tribologia e na melhoria continuada das etapas de beneficiamento, podendo citar: Silveira, et al. (2004), Paraguassú, et al. (2004), Silveira, et al. (2005), Silveira (2007), Silveira (2008), Neves (2010), Carvalho (2010), Moro e Silveira (2012), Silveira, et. al (2012), Dorigo e Silveira (2012), Moro e Silveira (2013), Vettorazzi e Castro (2013), Camargo (2013); Almeida (2014) e Silveira, et al. (2017).

A equalização do mecanismo de desgaste superficial promovido pelo processo de polimento torna-se uma tarefa minuciosa, tendo em vista a variedade de tipos litológicos que são utilizados para fins ornamentais. Portanto, é de suma importância a caracterização das superfícies em contato, pois nesta etapa o controle da taxa de desgaste deve ser acompanhado pelo entendimento, tanto das características físico-mecânicas das rochas, como o efeito da velocidade de

rotação, pressão de corte, temperatura de operação, fluido lubrificante, formato da ferramenta, material e outros. Uma alternativa para a avaliação deste problema, de forma conjugada, é a utilização de análise numérica baseada no método de elementos finitos, contornando o fato da tentativa e erro presentes em estudos experimentais.

No âmbito do desenvolvimento de pesquisas experimentais sobre essa abordagem foi desenvolvido um simulador de polimento de rochas ornamentais S-PRO, pelo Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, visando propor uma rotina prática de polimento por meio de um ensaio de laboratório, o qual foi objeto de depósito de patente (INPI N° 1020150316933, de 17/12/2015), para que sejam analisadas algumas propriedades inerentes do insumo do processo de polimento, contribuindo assim para um maior entendimento do setor.

2 | OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar aspectos relacionados ao processo de polimento com enfoque em conceitos de Tribologia e visa ainda discutir, à luz da modelagem numérica, procedimentos adotados na definição das rotinas de ensaio de polimento no Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO).

3 | CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1 | Máquinas de Polimento

Desde o início da atividade de polimento das rochas as indústrias passaram por um processo de modernização das suas unidades de beneficiamento. Porém a técnica de polimento e lustro não acompanhou essa tendência, no que concerne ao mecanismo de desgaste, sob enfoque de eficiência de processo, em consideração às características inerentes às rochas e às condições operacionais de desgaste. A principal evolução do polimento industrial se deu no nível de automação das máquinas, resultado da demanda por produção e pelo surgimento de rebolos abrasivos formulados à base de diamante sintético.

Independente do tipo de politriz, o polimento é realizado pela ação de satélites rotativos, onde são acoplados os rebolos abrasivos, que são aplicados sob pressão e com velocidade constante para a realização do desgaste abrasivo. Os satélites para polimento de rochas silicáticas realizam o desgaste de forma oscilatória, em que o contato do abrasivo sobre a rocha se dá de forma linear. Já nos satélites para as rochas carbonáticas os abrasivos entram em contato de forma planar, devido a baixa dureza desse tipo de rocha, não permitindo uma pressão elevada.

Cada satélite utiliza, em media, uma quantidade aproximada de água de 30 litros/minuto. Embora boa parte desta água seja reaproveitada por filtragem e recirculação, um volume considerável de água é inserido diariamente neste sistema. A princípio, as sequências de abrasivos necessitam de

diferentes quantidades de água para realizar seu trabalho. Os primeiros rebolos, que tem a função de desgaste mais severo, para a retirada das irregularidades oriundas da serragem do bloco, necessitam de quantidade maior de água quando comparados com os últimos, haja vista que a função destes é apenas de ressaltar o lustro da rocha. Ressalta-se que essa variação da vazão de água não é praticada pela indústria.

Existem atualmente dois tipos de equipamentos para a realização do polimento industrial, que são as politrizes semiautomáticas com bancadas fixas e as automáticas com esteira transportadora. Em nenhuma destas máquinas é possível variar a velocidade de rotação dos satélites, sendo esta característica um dos fatores limitantes dos equipamentos atualmente conhecidos. Essa variável é de suma importância para melhor se processar o polimento, considerando os diferentes tipos de rocha que são utilizados para fins ornamentais.

As politrizes de ponte móvel com bancada fixa (Figura 1) são equipamentos constituídos por um conjunto motorreductor que aciona um cabeçote de polimento conhecido com satélite, o qual é suportado por uma ponte que se desloca sobre trilhos que proporciona uma variedade de movimentos simultâneos sobre a superfície a ser polida, e ainda podendo imprimir pressão de trabalho uniforme, constante e mais elevada. Embora a concepção deste equipamento tenha promovido um avanço no processo de polimento de granitos, ele possui limitações em relação à produtividade, à qualidade e à uniformidade no acabamento, dentre as quais são citadas a necessidade de troca constante dos abrasivos dos cabeçotes de polimento (satélites); tempo de parada da máquina entre as

cargas e as descargas das chapas na bancada; dependência da sensibilidade do operador do momento ideal para troca do abrasivo mais grosso pelo mais fino, e a tendência do polimento não uniforme entre chapas de um mesmo material.



Fonte: Almeida, 2014.

Figura 1. Politriz semiautomática de 3 satélites.

Nas politrizes multicabeças com esteira (Figura 2), em que o polimento é realizado de forma sequencial, ou seja, em linha de produção (as chapas são colocadas sobre a esteira uma após a outra e ao final da linha as chapas saem polidas), os satélites têm dois tipos de acionamento: um por motor de indução, que o faz girar, permitindo assim o polimento das chapas; e outro por meio de um cilindro pneumático. Este permite a cabeça polidora fazer movimentos na vertical de subida quando a esteira transportadora carrega a chapa para fora de sua linha de ataque, ou descida, quando a chapa entra em sua linha de ataque. Enquanto a esteira rolante carrega a chapa, a estrutura (ponte) onde os satélites são acoplados realiza o movimento transversal, permitindo que os mesmos realizem o polimento em toda a extensão da chapa.



Fonte: Almeida, 2014.

Figura 2. Exemplos de politrizes automáticas com esteiras transportadoras.

Os equipamentos mais modernos oferecem a possibilidade de variação de alguns parâmetros que ajudam a dar um acabamento melhor com menor gasto de energia, como: a variação da pressão do satélite sobre a chapa, que varia de 1,5 a 2,5 kgf/cm²; a variação de velocidade do avanço longitudinal da esteira transportadora, que varia de 80 a 100 m/h, com uma produção média de 13/14 chapas/hora e; a velocidade de movimentação transversal da ponte, que sustenta os satélites, que vai de 40 a 60 translações por minuto.

A velocidade de rotação dos satélites em politrizes semi-automáticas e automáticas é constante, sendo em média 500 RPM. Outra variável utilizada no polimento das rochas é a carga aplicada pelo satélite sobre a chapa. Geralmente se usa 1 ou 2 kgf/cm², dependendo da dureza que a rocha apresenta, do tipo e sequência de abrasivos e as características da politriz.

É importante definir a pressão a ser aplicada em cada tipo de material, pois o aumento excessivo desta pode acrescer o consumo de abrasivos ou desgastar de forma irregular a chapa, inviabilizando o processo e a comercialização.

A quantidade de satélites por politriz varia de 12 a 24 cabeças/máquina. Geralmente se utiliza uma mesma condição de distribuição de abrasivos para vários tipos de rochas. A diferença de uma politriz com 12 cabeças para uma de 24 cabeças é que as granas dos abrasivos são repetidas em mais de uma cabeça, dando a possibilidade de se aumentar a velocidade de avanço da esteira transportadora e do movimento da ponte que sustenta os cabeçotes.

3.2 | Aspectos Relacionados aos Métodos de Avaliação do Processamento de Rochas Ornamentais

O polimento de rochas ornamentais consiste numa tarefa multidisciplinar. Enquanto a ciência mineral se preocupa em investigar os fenômenos associados à rocha, a Engenharia Mecânica objetiva propor medidas e/ou ferramentas destinadas a determinados fins.

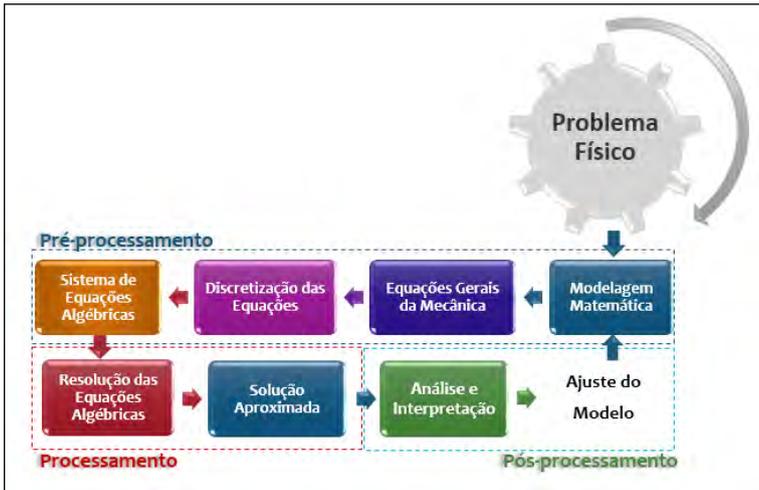
Para alcançar tais objetivos, é usualmente comum propor um dos métodos de avaliação do problema: o método analítico, numérico ou experimental. Cada método possui suas particularidades, entretanto pode-se afirmar que os mesmos são complementares e quando aplicados juntamente permite compreender melhor um fenômeno real (ANDERSON, 2000).

O método analítico abrange técnicas de solução mais gerais e fórmulas fechadas (RITT, 1969), sendo restrita a geometrias e processos físicos simples e geralmente é restrito a problemas lineares.

O método experimental possui resultados mais realísticos, entretanto existem certas desvantagens relacionadas ao equipamento exigido, problemas de escala, dificuldades de medição e custo operacional (OLIVEIRA, 2000). O mesmo autor ainda enfatiza que o método numérico não há restrição a linearidade, geometrias e processos complicados, porém, pode haver erros de truncamentos, prescrição das condições de contorno apropriadas e custos computacionais.

Quando comparado os métodos, destaca-se a importância de analisar um projeto numericamente, já que este apresenta o menor custo (dispensa protótipos, recusa mão de obra e matéria-prima), e na grande maioria das situações reduz significativamente o tempo de obtenção dos resultados preliminares, além de permitir simulações de risco, tais como àquelas que envolvem explosões, radiação e poluição.

Embora seja uma ferramenta extremamente útil, ela requer atenção em suas etapas de implantação, verificação e posteriormente, a validação do modelo numérico, visando sempre controlar as variáveis que podem facilmente promover erros numéricos. A Figura 3 mostra o fluxo de trabalho para obtenção de uma solução de um problema de engenharia, a partir de três etapas distintas e essenciais: pré-processamento, processamento e pós-processamento.



Fonte: Fernandes, 2012, Adaptado por Machado e Peixoto, 2017.

Figura 3. Etapas para obtenção de uma solução numérica para um problema de engenharia.

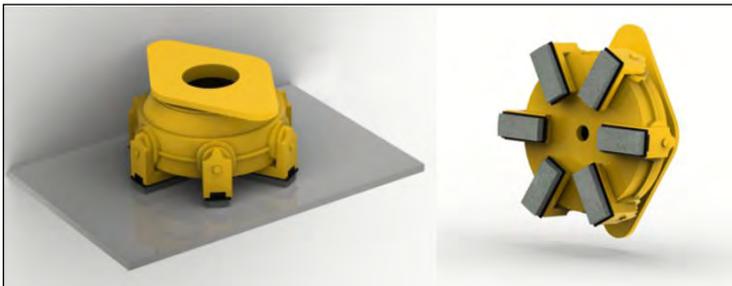
As etapas podem ser descritas como:

- **Etapa de pré-processamento:** Início da concepção física do problema, por meio de equacionamento e modelagem geométrica;
- **Etapa de processamento:** As equações que regem o problema são resolvidas através de métodos numéricos, neste caso o Método dos Elementos Finitos – MEF;
- **Etapa de pós-processamento:** Consiste na análise dos resultados obtidos a fim de verificar a qualidade da simulação numérica e propor ajustes na modelagem.

No presente estudo a etapa de pré-processamento inicia-se pela concepção do termo comum conhecido como polimento, usado em distintas áreas do conhecimento com a conotação de conferir brilho a uma dada superfície.

Tecnicamente, o polimento consiste em um processo de usinagem com o objetivo de conferir acabamento superficial por meio de pouquíssimas remoções de materiais provenientes entre o contato da chapa de rocha com o rebolo abrasivo (ferramenta de remoção de material) (WEINGAERTNER, et al., 1994).

Como exemplo, foi realizada a reprodução de um modelo tridimensional de um satélite de polir com capacidade para seis rebolos abrasivos que estarão em contato direto com a superfície do material a ser polido, com o auxílio do *Solid Edge* (Siemens, 2014) (Figura 4).



Fonte: Autores.

Figura 4. Modelo tridimensional real do satélite.

Finalizado a geometria, o arquivo CAD obtido foi exportado para uma plataforma capaz de simular numericamente o problema. Em meio a uma afluência de *softwares*, delimitou-se

este trabalho na utilização da licença acadêmica do ANSYS (2017) por se tratar de uma ferramenta eficiente e de fácil adaptabilidade.

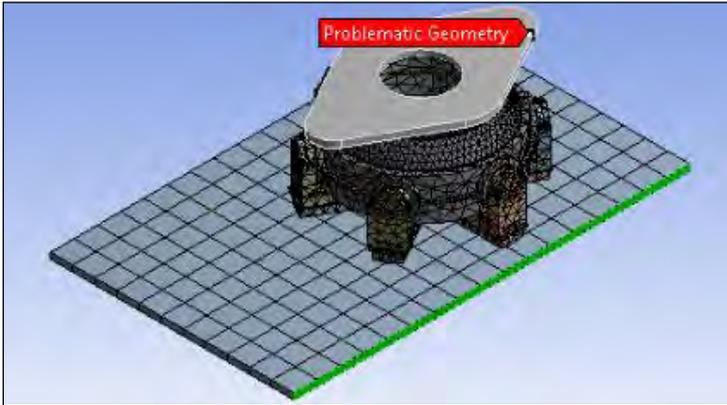
Após a familiaridade com o *software*, foi realizada minuciosa análise onde ficou constatada uma dificuldade em simular numericamente o modelo proposto, consequência de a geometria apresentar muitas regiões de contornos. Decorrente deste fato, uma inviabilidade tornou-se presente, pois mesmo que sido sanado os problemas iniciais associados à modelagem, outro problema se fez presente, isto é, a limitação referente a capacidade de processamento computacional. A partir disso uma decisão foi tomada, simplificar o modelo tridimensional (Figura 5).



Fonte: Autores.

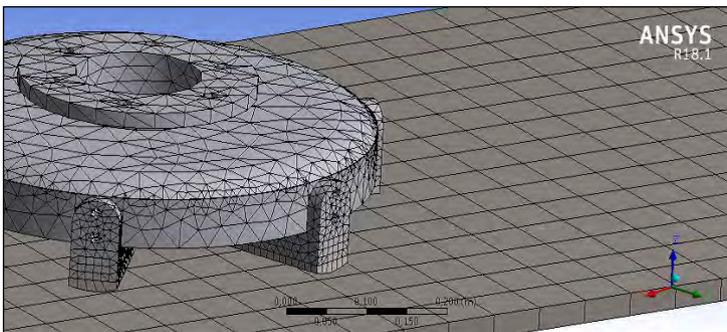
Figura 5. Modelo simplificado empregado na simulação.

Com o modelo definido, se delimitou os esforços na divisão da geometria em pequenos elementos de malha, os quais passam a representar o domínio contínuo do problema (Figuras 6 e 7) (REDDY, 2006).



Fonte: Autores.

Figura 6. Modelo tridimensional em não conformidade.



Fonte: Autores.

Figura 7. Malha empregada.

De acordo com Maliska (1994) a divisão da geometria em pequenos elementos permite resolver um problema complexo, de forma simplificada já que a partir dessa divisão pode-se substituir um número infinito de variáveis desconhecidas por

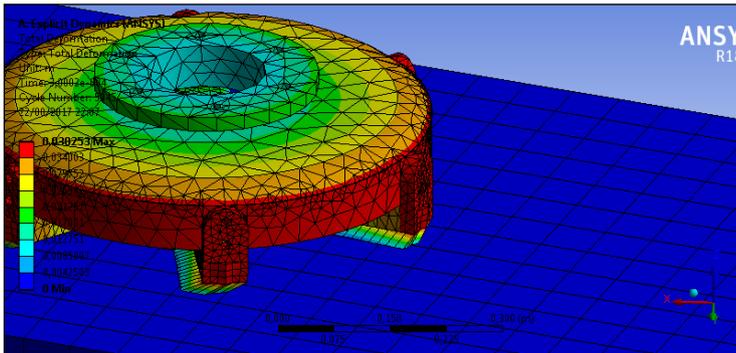
um número limitado de elementos com comportamento bem definido. Tal procedimento foi realizado com vista a redobrar a atenção em algumas métricas responsáveis pela qualidade da malha, as principais são: ortogonalidade, razão de aspecto e *skewness* (desvio entre dois elementos da malha).

Garantido que os requisitos de qualidade foram atendidos passou-se ao emprego dos materiais utilizados, bem como a fixação das condições de contorno que descrevem o funcionamento do dispositivo, neste caso o conjunto satélite, rebolo e chapa a ser polida.

Em se tratando dos materiais empregados na simulação, tem-se a utilização do aço na politriz, o epóxi no rebolo, enquanto a chapa de rocha foi admitida como quartzito, pois sua quase total homogeneidade dispensa a necessidade de analisar diversas “fases” minerais. Já as condições de contorno foram:

- rotação do satélite fixado em 500 RPM;
- carregamento de 2 kgf/cm² aplicado sobre a chapa.

Após inúmeras interações e um longo tempo de processamento, foi obtido um resultado que divergiu daquele que era esperado. De fato, o resultado não condiz com a física do problema. Não seria necessário o emprego da equação da mecânica para verificar na Figura 8, que tanto o rebolo quanto o satélite sofreram uma deformação excessiva; ao mesmo tempo, nenhuma variação ocorreu na chapa em decorrência de erros propagados na modelagem por meio da difusão numérica ou divergência caracterizada pela não conformação da malha.



Fonte: Autores.

Figura 8. Resultado obtido inicialmente, descartado por ineficiência.

3.3 | Considerações Essenciais para a Modelagem

Além do conhecimento de uma ampla quantidade de classes e parâmetros tribológico (Tabela 1), a compreensão do processo requer o conhecimento acentuado dos mecanismos de desgaste envolvidos, sendo estes brevemente classificados por Zum Gahr (1987) em cinco importantes categorias: Abrasivo, erosivo, adesivo, fadiga e desgaste corrosivo.

Tabela 1. Classificação dos diferentes modos de desgaste e mecanismos de contato.

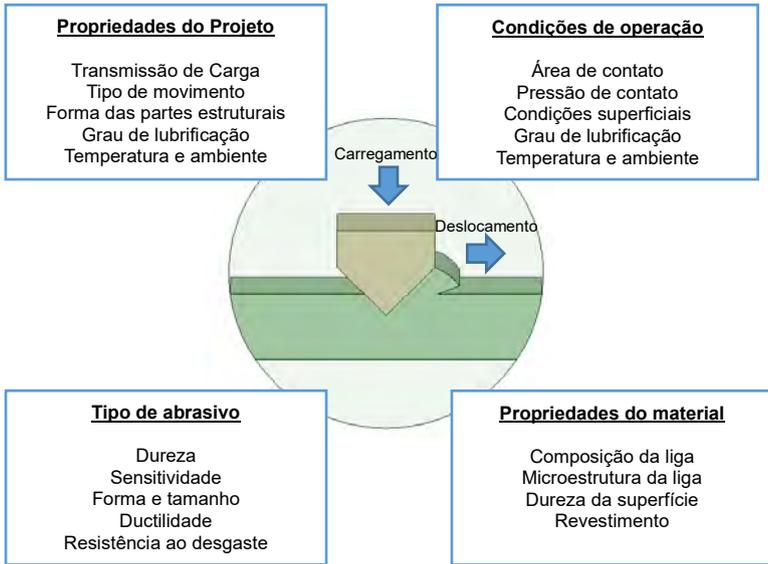
Classe	Parâmetro					
	Mecânico			Químico		Térmico
Tipo de desgaste						
Modo de desgaste	Abrasivo	Adesivo	Fluxo	Fadiga	Corrosão	Fundição / Difusão
Processo de desgaste	Fratura	Fluxo plástico	Fluxo fundido	Dissolução	Oxidação	Evaporação
Sistema dinâmico	Vibração vertical	Vibração horizontal		Vibração auto excitada	Vibração harmônica	Movimento <i>Stick-Slip</i>
Física e Química no desgaste	Absorção física, absorção química, ativação triboquímica e formação do tribofilme, oxidação e delaminação, oxidação e dissolução, oxidação e formação de gás, fase de transição, recristalização, nucleação e propagação da trinca, transferência e retransferência adesiva					
Unidade de desgaste	Escala mm		Escala µm		Escala nm	
Liberdade da partícula	Livre		Presas		Embebida	
Estrutura da partícula de desgaste	Original		Misturada mecanicamente		Formada triboquimicamente	
Fase do desgaste	Sólido	Líquido	Gás		Átomo	Íon
Distância de contato	Curta		Média		Alta	
Ciclo de contato	Baixo (único)		Médio		Alto	
Meio ambiente	Vácuo		Gás		Líquido	Lama
Material de contato	O mesmo	Mais duro	Mais mole		Compatível	Incompatível
Temperatura do <i>flash</i>	Baixa		Média		Alta	
Velocidade de deslizamento	Baixa		Média		Alta	
Nível de pressão de contato	Elástico		Elástico-Plástico		Plástico	
Forma de contato	Esfera/ Esfera	Cilindro/ Cilindro	Superfície/ Superfície	Esfera/ Superfície	Cilindro/ Superfície	Punção/ Superfície
Tipo de fricção	Rolagem	Rolagem-Deslizamento	Deslizamento		<i>Fretting</i>	Impacto

Fonte: ASM Metals Handbook, 1996.

Entende-se o desgaste como a deterioração da superfície que ocorre em nível topográfico e microestrutural, com perda ou ganho de material na camada superficial, ou apenas quando ocorre deformação plástica resultando na mudança de forma (ZUM GAHR, 1987). Em se tratando do processo de polimento de rochas ornamentais o mecanismo predominante é o desgaste abrasivo, embora outros modos estejam presentes.

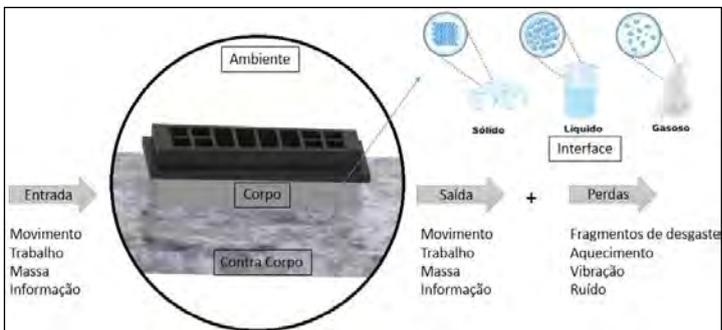
O desgaste abrasivo é definido como o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias com alta ou elevada dureza, entre ou incorporado em uma ou ambas as superfícies em movimento relativo (ASM,1996). Neste tipo de desgaste diferentes processos físicos estarão envolvidos, havendo uma dependência do material de desgaste e as condições de operação em que o material será submetido (ZUM GAHR, 1987). A Figura 9 ilustra tais aspectos.

Independente do mecanismo de desgastes, todos requerem a delimitação de uma fronteira que contenha no mínimo duas superfícies em contato (corpo e contra-corpo) sob o efeito do movimento relativo entre si, em um determinado meio. Como na prática a maioria dos processos que envolvem desgaste ocorre na ausência do vácuo, torna-se necessário um quarto elemento para compor um tribossistema (Horst Czichos, 1978), neste caso o meio interfacial, lubrificantes sólidos, líquidos ou o ar local (Figura 10).



Fonte: Adaptado de Zum Gahr, 1987.

Figura 9. Propriedades que influenciam o desgaste abrasivo.



Fonte: Autores, adaptado de Horst Czichos, 1978.

Figura 10. Representação do tribossistema verificado no processo de polimento de rochas ornamentais.

Ao admitir tal fronteira espera-se que os princípios básicos de conservação: da massa, da energia, e da quantidade de movimento sejam atendidos. Por exemplo, caso na entrada do sistema sejam aplicados movimentos, força, velocidade, entre outras variáveis, na saída será possível observar o movimento resultante, este por sua vez, associado às perdas por desgaste, calor, vibrações, ruídos, dentre outros.

Compreender os parâmetros de entrada e saída incluindo as características do projeto, condições de operação, tipo de abrasivos e propriedades do material são extremamente importante, pois a partir desse conhecimento será possível descrever os mecanismos e a taxa de desgaste envolvida em diversos processos sejam estes, o polimento de rochas ornamentais ou não. O fato é que diferentes elementos estarão sujeitos a diferentes mecanismos, tal que a resistência ao desgaste dependerá da grande quantidade de parâmetros que influenciam no sistema tribológico. Tal motivo resulta na complexidade do tema, o que dificulta a compreensão dos mecanismos de desgaste. Foi visando contornar esse problema aparente que alguns autores propuseram modelos analíticos que simplificassem a física do problema.

Um dos pioneiros foi Heinrich Hertz, que no século XIX investigou problemas da mecânica de contato visando solucionar a deformação elástica existente entre o contato de superfícies. A partir do seu estudo Hertz (1881) *apud* Zum-Gahr (1987) desenvolveu modelos para calcular tensões elásticas para sistemas como: esfera em superfícies planas, cilindros cruzados, e cilindro em superfícies planas.

Posteriormente, Greenwood e Williamson (1966) *apud* Zum-Gahr (*op. cit.*) predispostos a entender como as asperezas de superfícies em contato se comportam sob a variação de carga, assumem que todos os contatos são devidos a asperezas de forma esférica e com mesmo raio R que se deformam elasticamente sob ação de uma carga de acordo com as equações propostas por Hertz.

Os mesmos autores ao tratar as asperezas como mecanicamente independentes, isto é, a carga que elas suportam depende de sua altura e não da carga suportada pelas asperezas vizinhas, constataram que o leve contato entre duas superfícies nominalmente planas e paralelas ocorre inicialmente em poucos pontos, e à medida que a força normal as superfícies são aumentadas, as asperezas mais altas se deformam, resultando no aumento da área total de contato.

Outros autores propuseram modelos para compreensão do mecanismo de desgaste, com destaque a Archard (1959) *apud* Silveira e Bolonini (2016).

No tocante a influência do rebolo abrasivo epoxídico, principal ferramenta utilizada no polimento de rochas ornamentais, no mecanismo de desgaste verificado nesse tribossistema, alguns autores desenvolveram equações válidas para polímeros e compósitos, conforme apresentados a seguir.

Estimativa da Força de Atrito

A partir de Tabor (1982) *apud* Abdelbary (2015) tem-se as respectivas Eqs.(1), (2) e (3) para o cálculo da força de adesão (F_a), força de deformação (F_d) e a força resultante (F):

$$F_a = \tau_s \cdot A_{r1} \quad [1]$$

$$F_d = \sigma_y \cdot A_{r2} \quad [2]$$

$$F = F_a + F_d \quad [3]$$

Onde:

τ_s - Tensão cisalhante necessária para produzir deslizamento entre as superfícies;

σ_y - Tensão normal aplicada sobre o polímero;

A_{r1} - Área de contato real nas junções;

A_{r2} - Área dos sulcos ou ranhuras.

Cálculo do Coeficiente de Atrito

Para o cálculo do coeficiente de atrito há a necessidade de conhecer o regime de deformação, caso elástico é valido a Eq.(4), por outro lado se o regime for plástico assume-se a Eq.(5).

$$\mu = \frac{\tau_s}{p} \quad [4]$$

$$\mu = K \frac{\tau_s}{E} \cdot L^{x-1} \quad [5]$$

Onde E é o modelo de elasticidade, enquanto K e x são parâmetros de superfície.

Ângulo de Inclinação

Segundo Halliday (1955) *Apud* Abdelbary (2015) um fator importante na análise tribológica é o ângulo máximo (θ) de inclinação de uma aspereza, quando achatada em uma superfície plana e rígida, dado pela Eq. (6):

$$\tan \theta_{lim} = K \frac{H}{E} (1 - \nu^2) \quad [6]$$

Tal que H é a dureza de endentação, ν o coeficiente de Poisson e K uma constante.

Temperatura da Interface no Deslizamento

Problemas envolvendo a elevação da temperatura em uma situação de deslizamento foram estudados, tanto analítica, quanto experimentalmente. A primeira contribuição importante foi introduzida por Blok (1937) e posteriormente Jaeger (1942) *Apud* A. Abdelbary (2015).

Modelo de Blok:

$$\Delta T_{max} = 9,16 \times 10^{-4} \mu p \sqrt{2l} \quad [7]$$

Modelo de Jaeger:

$$\Delta T_{max} = 4,2 \times 10^{-4} \frac{\mu F_N \sqrt{v}}{b \sqrt{l}} \quad [8]$$

Onde:

μ Coeficiente de atrito;

P Pressão de contato (MPa);

F_N Carga normal (N);

v Velocidade de deslizamento (m/s);

l Comprimento do corpo deslizante paralelo ao sentido de deslizamento;

b Largura do corpo deslizante perpendicular à direção deslizante;

Temperatura Momentânea “Flash Temperature”

Como consequência do deslizamento, uma parcela de energia cinética é convertida em calor fazendo com que alguns pontos de contato tenham momentaneamente uma temperatura muito superior aos pontos vizinhos. Como estimativa Samyn *et al.* (2007) propõem a Eq.(9):

$$T^* = T_{env} + A \frac{\mu p v l}{K_s} + 4,2 \times 10^{-4} \frac{\mu F_N \sqrt{v}}{b \sqrt{l}} \quad [9]$$

O grande desafio da ciência é consolidar a teoria do desgaste para os diversos materiais, de tal forma que seja possível prever o comportamento tribológico de cada elemento a partir de equações empíricas que satisfaçam a física do problema com eficácia e acurácia. Na prática, tais equações foram verificadas para o contato interfacial entre polímeros ou compósitos com outra superfície metálica. A grande questão consiste em compreender através do estudo numérico e experimental se tais equações satisfazem o contato entre polímeros com rochas dos mais variados tipos, já que atualmente são raros estudos destinados a esse fim.

4 | SIMULADOR DE POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (S-PRO)

O processo de polimento de rochas ornamentais, sob a ótica da Tribologia, apresenta aspectos ainda pouco considerados pela indústria de beneficiamento. Silveira et al. (2017) demonstraram, por exemplo, a importância da velocidade de corte para o processo, além de confirmarem a influência das variáveis petrográficas na qualidade do polimento. Este trabalho teve como propósito demonstrar a importância da velocidade de corte para o processo, em oposição à ideia de que quanto maior for essa variável, melhor será o brilho final das chapas, bem como confirmar a influência das variáveis petrográficas no processo de polimento.

Nesse contexto, três rochas ornamentais brasileiras, conhecidas comercialmente como Verde Labrador, Cinza Castelo e Preto Indiano, foram submetidas a diferentes situações de desgaste, visando aperfeiçoar esta etapa levando em consideração as características intrínsecas dos materiais pétreos (Tabela 2). Para esta pesquisa foram definidas 24 situações operacionais distintas, variando pressão de carregamento (1 e 2 kgf/cm²), velocidade de rotação de satélite (300, 400, 500 e 600 RPM) e tempo de exposição do satélite sobre a rocha definidas pelo número de passadas (1, 2 e 3). Para isso, foi instalado um inversor de frequência em uma politriz semi-automática que possibilitou a variação da velocidade de rotação de satélite para realização dos experimentos (Figura 11).

Para conhecer os materiais pétreos foi realizada a caracterização petrográfica e tecnológica dos mesmos. Assim, foram realizados os testes de polimento, sendo cada rocha submetida a 10 sequências de rebolos abrasivos do tipo magnésiano, com os elementos de corte nas seguintes

granulometrias (em mesh): 24, 36, 60, 120, 220, 400, 600, 800, 1200 e lustro, totalizando 720 amostras. Para cada amostra, foi quantificada a perda de massa de abrasivo em cada etapa do processo e medido o brilho obtido com intuito de aferir a qualidade do polimento. Foram realizadas 30 medições por amostra, totalizando 7200 para cada tipo de rocha e gerados mapas de brilho de cada rocha estudada (Figuras 12, 13 e 14).

Os resultados mostraram que no sistema tribológico existente no polimento de rochas ornamentais a variável rocha atua como elemento ativo, desgastando mais ou menos abrasivo e apresentando brilho de acordo com as propriedades petrográficas e em função da solicitação imposta. Notou-se que, de maneira geral, os maiores valores de brilho foram alcançados quando conjugada a maior pressão do satélite (2 kgf/cm^2) com o tempo de exposição máximo testado. Com velocidade de rotação de satélite de 400 RPM, na maior parte dos casos, foram obtidos os melhores resultados de brilho.



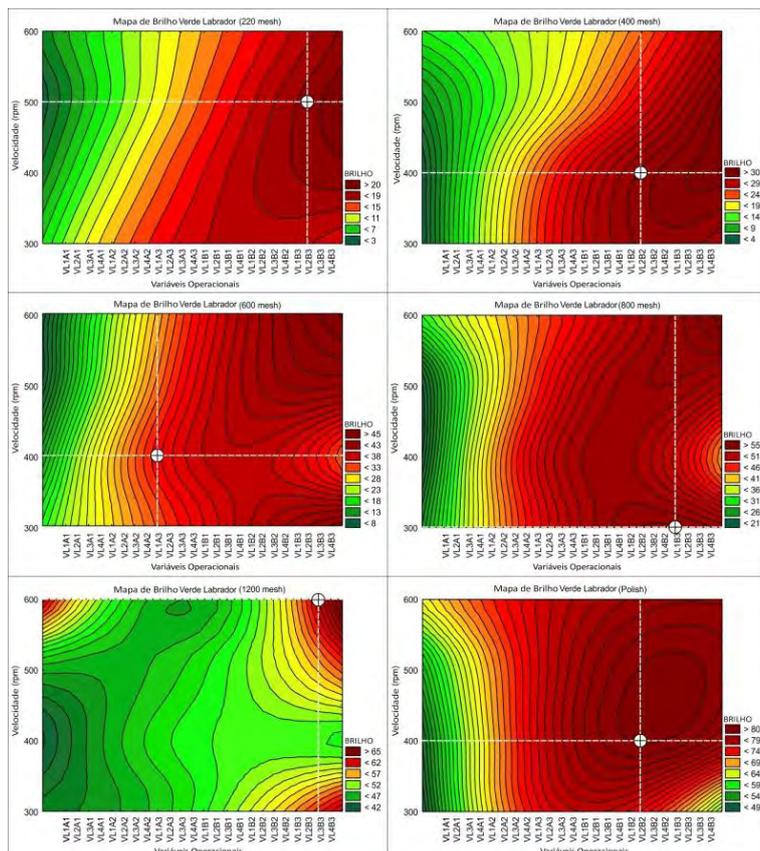
Fonte: Silveira et al., 2017.

Figura 11. Politriz semi automática utilizada na pesquisa: (1) Inversor de frequência instalado; (2) - painel elétrico original.

Tabela 2. Descrição petrográfica sucinta das rochas ornamentais estudada.

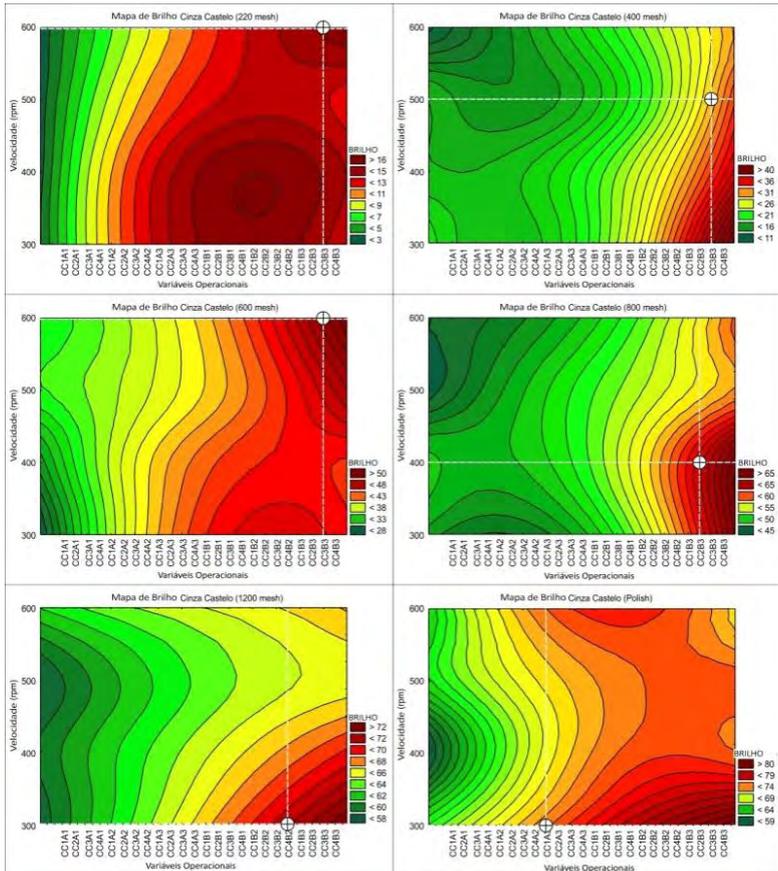
Nome Comercial	Verde Labrador	Cinza Castelo	Preto Indiano			
			Paleossoma	Leucossoma	*Média	
Mineralogia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
Quartzo	28	32	27	32	28,0	
Microclínio	-	35	4	28	8,8	
Ortoclásio	40	-	-	-	-	
Oligoclásio	-	22	-	36	7,2	
Oligoclásio/Andesina)	20	-	40	-	32,0	
Biotita	4,5	5,5	20	3,5	16,7	
Homblanda	1,5	-	-	-	-	
Diopsídio	2,5	-	-	-	-	
Hiperstênio	1,5	-	-	-	-	
Granada	-	-	1	0,5	0,9	
Opacos	1,5	1	1	tr	0,8	
Apatita	tr	0,2	tr	tr	tr	
Titanita	-	0,2	-	-	-	
Zircão	tr	tr	tr	tr	tr	
Allanita	-	0,1	-	-	-	
Sillimanita	-	-	5	-	4	
Clorita	tr	0,5	tr	tr	tr	
Muscovita	-	1	2	tr	1,6	
Sericita	0,5	2,5	tr	tr	tr	
Carbonatos	tr	tr	tr	tr	tr	
Epidoto	tr	tr	tr	tr	tr	
Óxidos/Hidróxidos de ferro	tr	tr	tr	tr	tr	
Trans formação Mineral	incipiente	incipiente	incipiente			
Classificação (QAP)	chamoquito	mzogranito	migmatito gnaissificado			
Estrutura	levemente orientada	nítidamente orientada	gnáissica			
Textura	fanerítica inequigranular	fanerítica equigranular	granoblástica a granolepidoblástica			
Quartzo + Fedspatos	88	89	71	96	76	
Minerais máficos e demais pesados	12	11	29	4	24	
Granulação (mm)	Varição	0,3 a 3,0	0,1 a 5,0	0,3 a 4,5	0,5 a 10,0	0,3 a 10,0
	Predominância	0,5 a 1,5	0,7 a 2,0	1,5 a 4,0	2,0 a 4,0	1,5 a 4,0
Microfisuras/mm ²		3,40	0,74	0,87	1,65	1,0
Microfisuras (%)	Intragraos vazias	31	13	27	20	25,6
	Intragraos preenchidas	58	79	55	60	56,0
	Intergraos vazias	3,5	2,5	6	5	5,8
	Intergraos preenchidas	7,5	5,5	12	15	12,6
Contato Mineral (%)	Côncavo-conveço	74,0	81,5	63,5	76,5	66,1
	Serrilhado	2,0	3,5	7,5	4,5	6,9
	Plano	24,0	15,0	29,0	19,0	27,0

Fonte: Silveira et al., 2017.



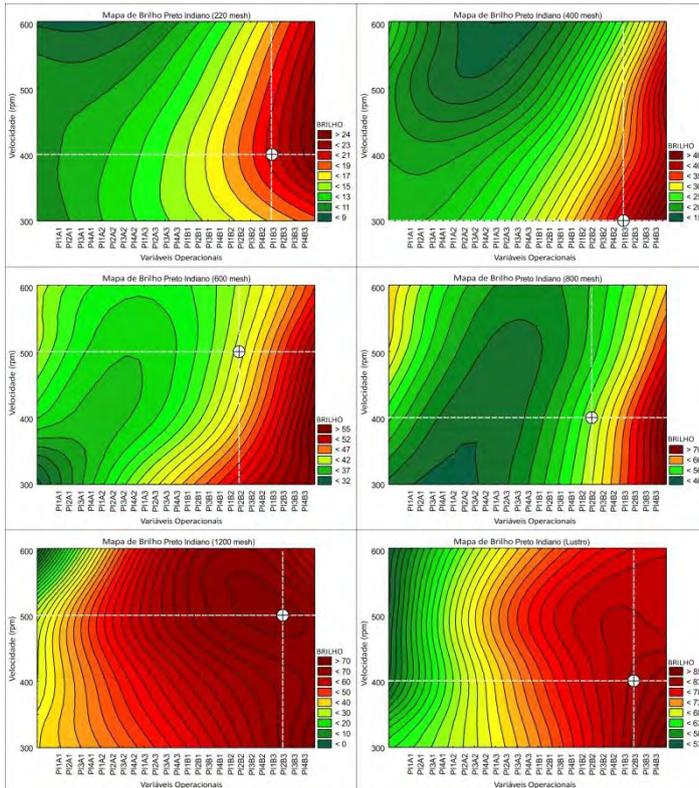
Fonte: Silveira et al., 2017.

Figura 12. Mapas de brilho da rocha Verde Labrador desgastada pelos abrasivos 220, 400, 600, 800, 1200 e lustro.



Fonte: Silveira et al., 2017.

Figura 13. Mapas de brilho da rocha Cinza Castelo desgastada pelos abrasivos 220, 400, 600, 800, 1200 e lustro.



Fonte: Silveira et al., 2017.

Figura 14. Mapas de brilho da rocha Preto Indiano desgastada pelos abrasivos 220, 400, 600, 800, 1200 e lustro.

É possível notar que as características petrográficas das rochas (mineralogia, dureza dos minerais, textura, estrutura, e.g.) influenciam diretamente no consumo de abrasivo e na obtenção do brilho. Portanto, pode se dizer que o aumento da velocidade com que o abrasivo passa sobre a superfície da rocha pode não refletir em aumento do brilho superficial.

Logo, fez-se necessário o desenvolvimento de um equipamento que pudesse testar a resposta das diferentes rochas utilizadas para fins ornamentais frente às solicitações impostas pela máquina de polir e o rebolo abrasivo.

O equipamento ora apresentado visa contribuir para proporcionar um melhor entendimento do processo de polimento de rochas ornamentais a partir de uma visão mais completa dos fenômenos de interação entre o tipo rochoso e o rebolo abrasivo juntamente com a influência das variáveis operacionais da máquina. Esta nova máquina permite a medição de novos parâmetros, que são de suma importância para delineação das condições de contorno do sistema de desgaste encontrado neste processo industrial.

O simulador de polimento de rochas ornamentais (S-PRO) permite compreender melhor a interação de variáveis importantes no processo de polimento, as quais são descritas a seguir.

Velocidade de corte

A velocidade de rotação do satélite, nos equipamentos atuais, é invariável, o que implica em velocidade de corte constante. No entanto, tendo em vista a variedade de tipos litológicos utilizados para fins ornamentais, a possibilidade de alterar a velocidade com que o rebolo abrasivo passa sobre a superfície da chapa de rocha pode permitir a otimização deste processo.

Vazão da água

A água tem como função a refrigeração durante o processo de polimento, para reduzir a temperatura de atrito entre rebolo abrasivo e a rocha, além de remover os fragmentos de rocha e

abrasivo. Não existem estudos que mensurem a quantidade de água necessária para o polimento de rochas ornamentais o que é de grande importância, tendo em vista a necessidade de reduzir o desperdício desse insumo. O equipamento para simulação ora proposto possui um medidor de vazão que possibilitará medir a quantidade de água utilizada nas diferentes etapas de polimento, que será diferente também em função do tipo de rocha que será submetida ao ensaio.

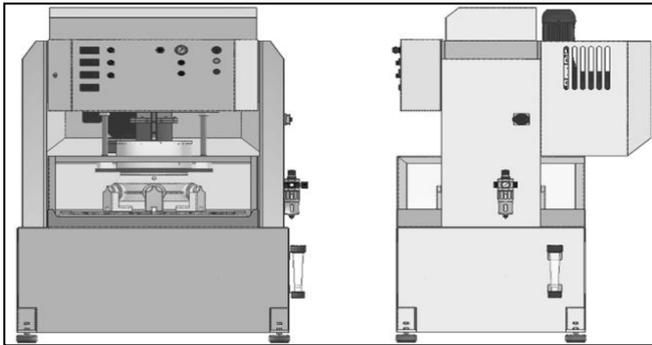
Temperatura da água

Devido ao fato de os minerais apresentarem diferentes coeficientes de dilatação térmica, o aumento da temperatura da água pode, devido à criação de tensões residuais intercrystalinas, facilitar a destacabilidade dos mesmos. O S-PRO dispõe de um aquecedor e de uma caixa de gelo, que permitem fornecer a água de refrigeração em diferentes temperaturas, controlada através de um sensor de temperatura. Além disso, um termopar mede a liberação de calor dada pelo atrito que ocorre no instante em que o abrasivo passa sobre a placa de rocha, o que permitirá indicar em qual temperatura e vazão da água de refrigeração ocorre a otimização do processo, considerando qualidade da superfície polida e consumo de abrasivo.

Tempo de exposição

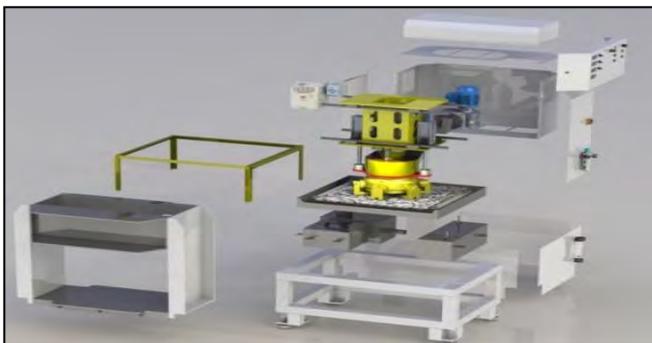
Reflete na otimização do processo, uma vez que o menor tempo de exposição resulta em redução no consumo de energia, água e abrasivos, bem como no aumento da produtividade. Tanto em relação à máquina utilizada, ao tipo de rebolo abrasivo quanto às propriedades intrínsecas à rocha (mineralogia, textura, estrutura, etc.), uma análise que não leve

em conta as interações entre estes três componentes que existem no processo de polimento será, inevitavelmente, superficial. A seguir serão apresentados o projeto construtivo (Figura 15) e os principais componentes do S-PRO (Figuras 16 e 17).



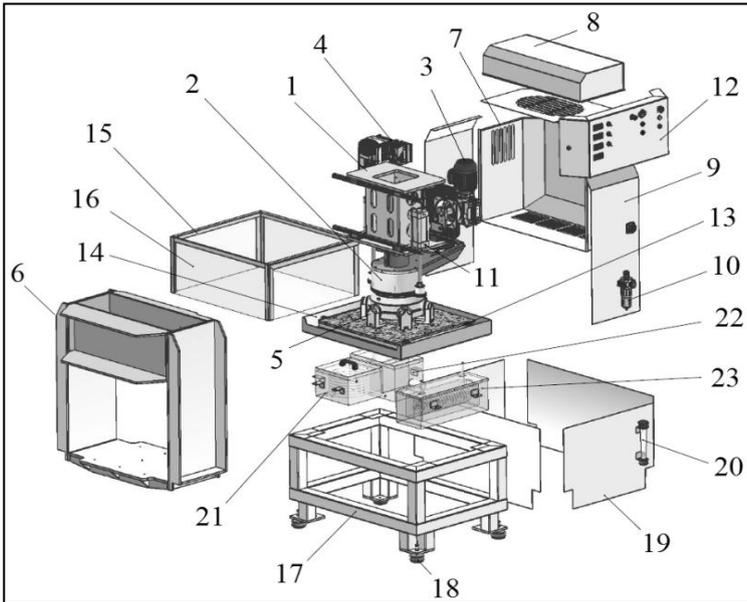
Fonte: Autores.

Figura 15. Representação esquemática dianteira e lateral do equipamento S-PRO.



Fonte: Autores.

Figura 16. Projeto construtivo do Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO).

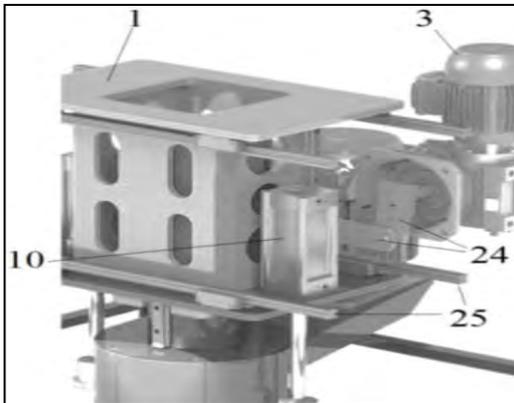


Fonte: Autores.

Figura 17. Principais componentes do Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO).

De acordo com a Figura 17, o S-PRO é constituído por uma coluna (1) conjunto eixo-árvore (2), motor elétrico (3), inversor (4), satélite de polimento (5), coluna instalada em pórtico (6), com fechamentos (7 e 8), e proteções laterais (9), regulador de pressão (10) atuadores pneumáticos (11), painel de controle (12), mesa (13), cuba de proteção (14), circunscrito por armação (15), placas de policarbonato (16), a qual se apoia na base (17), pés anti-vibratórios (18), placas de proteção (19), medidor de vazão (20), aquecedor (21), caixa de gelo (22), recipiente para decantação de partículas (23); o motor elétrico (3) aciona também mecanismo para deslocamento

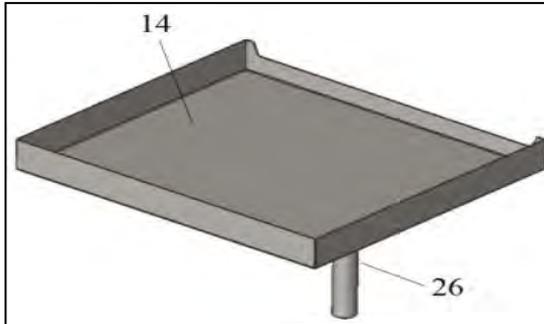
lateral da coluna (24), trilhos (25); cuba (14) tubo inferior (26) por onde escoa a água de refrigeração e o material desagregado do polimento, sendo este conectado ao tubo superior (27) previsto na tampa (28) do recipiente de decantação (23), o qual possui divisórias internas (29) e tubo (30) de descarga lateral, aquecedor (21), fechado por tampa superior (31) tendo no seu interior serpentina (32) fundida em bloco de alumínio (33), com entrada e saída na tampa superior, ou resfriada, através da caixa de gelo (22), fechada por tampa superior (34) tendo no seu interior serpentina (35), dreno inferior (36) e um sensor de temperatura (37). O mecanismo de deslocamento lateral pode ser mais bem observado na Figura 18.



Fonte: Autores.

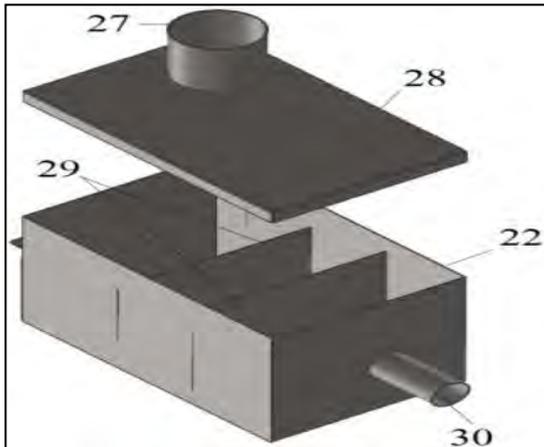
Figura 18. Vista parcial evidenciando o mecanismo de deslocamento lateral alternado da coluna do S-PRO, constituído por coluna (1) na qual se fixa o conjunto eixo-árvore, motor elétrico (3), regulador de pressão (10), mecanismo (24) que promove o deslocamento lateral alternado da coluna, através de trilhos (25).

As Figuras 19, 20, 21A e 21B mostram detalhes do sistema de captação da água com resíduos, caixa de decantação, caixa de resfriamento de água e sistema de aquecimento de água, respectivamente.



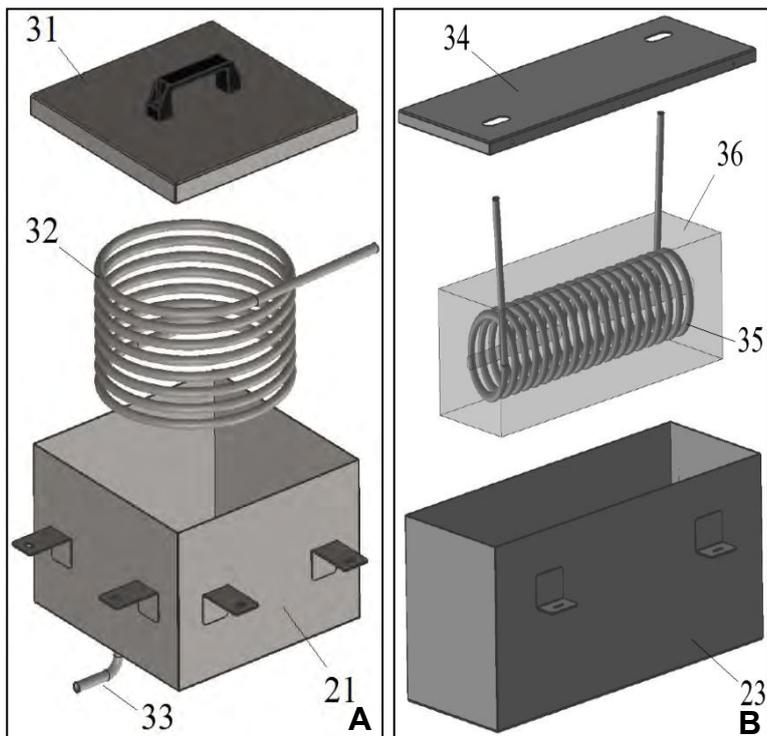
Fonte: Autores.

Figura 19. Cuba coletora (14) e saída de escoamento da água com resíduos (26) do S-PRO.



Fonte: Autores.

Figura 20. Caixa de decantação do S-PRO.



Fonte: Autores.

Figura 21. Sistemas para mudança da temperatura da água do S-PRO: (A) Água fria e (B) Água quente.

A Figura 22 mostra o Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO) instalado na usina piloto do Núcleo Regional do Cetem no Espírito Santo (NR-ES).



Fonte: Autores.

Figura 22. Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais (S-PRO).

4.1 | Ensaio de Polimento: Rochas Silicáticas

Apesar do movimento de abertura comercial, ocorrido a partir dos anos 1990, ter proporcionado uma maior absorção de máquinas, equipamentos e insumos com maior grau tecnológico, o que não significa dizer desenvolvimento local de inovação, a escala de produção das empresas brasileiras é menor do que as estrangeiras que produzem pesquisas e investem em novas técnicas e tecnologias.

Diante disso, faz-se necessário desenvolver produtos e serviços inovadores associados a processos que considerem aspectos de sustentabilidade nas etapas de beneficiamento de rochas ornamentais, principalmente no que diz respeito à economia no consumo de energia e água, bem como a utilização de técnicas mais eficientes.

O procedimento de ensaio aqui apresentado traz a possibilidade de testar diversas situações operacionais praticadas na indústria e permite comparar os resultados com aqueles industriais com base em diversas publicações como ABNT (2002, 2013), VIM (2012), Vetorazzi (2010), Neves (2010), ASTM (2014), Altoé e Silveira (2014), Bolonini et al. (2013), Bolonini e Silveira (2016). Esse procedimento tem como objetivo determinar com base em variações nos parâmetros inerentes ao processo de polimento de rochas em equipamento específico para este fim, as configurações que definem as melhores condições de acabamento para suas superfícies em função do brilho.

O ensaio se aplica à determinação das configurações a serem adotadas durante o processo de polimento de rochas ornamentais silicáticas para a obtenção dos melhores valores de brilho para suas superfícies.

O procedimento de ensaio para rochas silicáticas deve ser diferente do realizado para rochas carbonáticas, pois as rochas possuem características petrográficas e físico-químicas diferentes.

Logo, os insumos e acessórios acoplados ao maquinário (abrasivos e satélites, *e.g.*), utilizados para polir estes dois litotipos são, pelos mesmos motivos, também diferentes.

Os próximos itens desse trabalho tratam da descrição dos materiais utilizados e do método de ensaio de polimento desenvolvido para as rochas silicáticas.

4.1.1 | Equipamentos, instrumentos e acessórios

Como o ensaio visa simular as características industriais do polimento de rochas silicáticas, alguns materiais se fazem necessários para tornar tal tarefa passível de execução:

- Simulador de Polimento de Rochas Ornamentais S-PRO para a execução do ensaio.
- *Glossmeter* para obtenção dos dados de brilho a partir das superfícies polidas.
- Tanque ou local adequado para lavagem dos corpos de prova.
- Câmera fotográfica para registro de feições específicas identificadas.

- Caixa d'água ou tanque com capacidade mínima de 3.000 Litros para descarte dos resíduos produzidos no ensaio.
- Acessórios utilizados no ensaio de polimento de rochas ornamentais:
- Espaçadores (cunhas) em tamanho e quantidade suficiente para impedir o contato entre os corpos de prova quando dispostos em fila para secagem;
- Gabarito para medição do brilho (com 50 pontos de medição na área central do corpo de prova, polígono de 15 x 15 cm);
- Pincel atômico com tinta à base de álcool para identificação dos corpos de prova;
- Água destilada ou deionizada e papel absorvente ou pano para limpeza que antecede a medição do brilho;
- Marreta de borracha para auxiliar na troca de rebolos abrasivos; e
- Trena para conferência das dimensões dos corpos de prova.

4.1.2 | Corpos de prova

São utilizados 10 corpos de prova (ladrilhos), um para cada configuração operacional (carga exercida pelo satélite, velocidade de rotação do satélite e tempo de contato rocha/abrasivo) a ser realizada no S-PRO.

Vale ressaltar que cada corpo de prova é submetido a uma sequência granulométrica de abrasivos que partirá do desbaste inicial e chegará ao lustro.

O formato dos corpos de prova é de prisma quadrangular, com dimensões das arestas das faces quadradas medindo 600 mm (± 10 mm) e com a espessura mínima de 20 mm (± 2 mm) e máxima de 30 mm (± 2 mm), observando a premissa de que os ângulos formados entre duas faces consecutivas devem ter 90° ($\pm 0,5^\circ$).

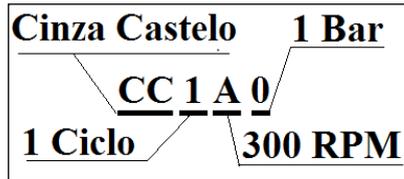
4.1.3 | Procedimento do ensaio

A partir do recebimento das amostras, os procedimentos de limpeza e identificação são importantes para definir a sequência das atividades, conforme os controles laboratoriais adotados.

É necessário, também, verificar a integridade física dos corpos de prova. Corpos de prova com trincas ou em não conformidade com as dimensões requeridas devem ser descartados.

Os corpos de prova devem então passar pelo processo de lavagem com período de secagem à temperatura ambiente por, no mínimo, 24 horas.

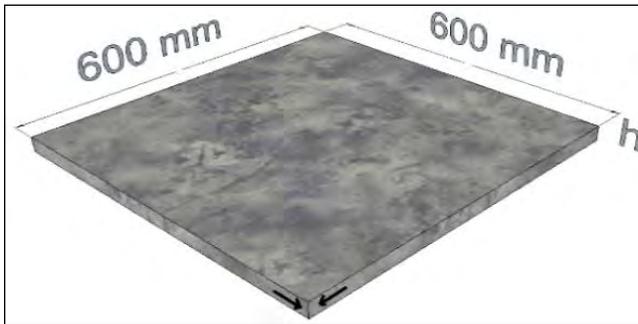
A identificação é feita com uma numeração de controle e com um código alfanumérico que indica as configurações operacionais utilizadas para os testes, conforme o exemplo da Figura 23, em uma das laterais de cada corpo de prova.



Fonte: Bolonini e Silveira (2016).

Figura 23. Representação alfanumérica das configurações utilizadas para o ensaio no S-PRO.

Um par de setas direcionadas para uma das arestas, conforme demonstrado na Figura 24, também deve ser demarcado para orientação do corpo de prova durante a realização do ensaio e a medição do brilho.



Fonte: Bolonini e Silveira (2016).

Figura 24. Setas para orientação do corpo de prova durante o ensaio e a medição do brilho.

Os corpos de prova são medidos para garantir que tenham as dimensões mínimas requeridas para o ensaio.

Obs.: Em caso de necessidade de aquisição de dados de temperatura na interface rocha/abrasivo será necessário que os corpos de prova sejam perfurados para inserção do termopar disponível no S-PRO.

4.1.4 | Execução do ensaio

Concluída a identificação dos corpos de prova a próxima tarefa a ser executada é a configuração do S-PRO, com base na instrução de operação do equipamento, em função das configurações pré-definidas com a codificação alfanumérica.

Em seguida são acoplados ao satélite os abrasivos e à mesa do S-PRO o corpo de prova, destinados ao(s) teste(s), observando o posicionamento dos corpos de prova e garantindo que os rebolos abrasivos estejam bem fixados e com a granulometria correta para o ensaio. Os rebolos abrasivos são do tipo setor acoplados em um satélite de polimento, diferente dos Frankfurt acoplados à pratos e utilizados para mármore.

A sequência granulométrica dos abrasivos contém, além das granulometrias 24 *mesh*, 36 *mesh* e 60 *mesh* (para levigamento ou desbaste inicial de preparação para o polimento), as granulometrias (em *mesh*) 120, 220, 400, 600, 800, 1200 e o abrasivo de lustro.

No ensaio, toda a sequência granulométrica dos abrasivos é utilizada para que seja garantida a execução das etapas fundamentais do polimento.

O brilho é então medido 50 vezes na superfície de cada corpo de prova antes e após cada etapa de polimento (número definido em função da área de polimento efetivo do corpo de prova: 225 cm², ou seja, polígono medindo 15 cm x 15 cm).

4.1.5| Expressão dos resultados

Os dados obtidos a partir das medições de brilho são utilizados para calcular as médias de brilho (\bar{b}) alcançadas após cada teste no S-PRO. Para tanto, calculam-se separadamente, as médias dos valores de brilho obtidas após o ensaio para cada situação operacional. Na sequência, calcula-se o desvio-padrão amostral (S), em função das médias de brilho (\bar{b}) em cada situação operacional e a média calculada a partir destas (\bar{B}), para cada granulometria de abrasivo conforme a Eq. (2).

Nota: Valores de desvio-padrão muito baixos indicam que a dispersão dos valores de brilho é muito baixa e que alterações nas situações operacionais são menos significativas. Por outro lado, valores de desvio-padrão muito altos indicam que as modificações são importantes e que aquelas que forneceram os maiores valores de brilho devem ser as consideradas ideais.

Com todos os resultados calculados, são definidos os valores de brilho (médias) máximo e mínimo (a partir de \bar{b}) para cada granulometria de abrasivo indicando suas respectivas configurações operacionais.

O laudo resultante da realização deste ensaio contém as seguintes informações:

- Nome e endereço do laboratório responsável pelo ensaio;
- Número do relatório;
- Nome e endereço do cliente;
- Indicação, informada pelo cliente, da procedência da amostra (estado, cidade, etc.) e designação comercial da rocha (se já existente);
- Tipo petrográfico, conforme ABNT NBR 15012;
- Quantidade, forma, dimensões dos corpos de prova ensaiados.
- As variações totais do parâmetro brilho para todas as situações operacionais, organizadas em função da sequência granulométrica dos abrasivos com os valores mínimos e máximos obtidos para o parâmetro.
- Os valores de desvio-padrão e coeficiente de variação para todas as situações operacionais, organizadas em função da sequência granulométrica dos abrasivos.

4.2 | Ensaio de Polimento: Rochas Carbonáticas

Para a utilização do S-PRO em testes de polimento de rochas carbonáticas foram necessárias, portanto algumas adaptações, buscando comparar os parâmetros de atuação do equipamento aos utilizados em fábrica no polimento deste tipo de material, levando em consideração os elementos do tribossistema: a

rocha, a máquina e o abrasivo. Foi feito o acompanhamento do polimento em fábrica de uma rocha carbonática utilizado politriz semi-automática. A partir dos dados obtidos foram determinadas algumas condições de operação do S-PRO para seu uso com rochas carbonáticas.

4.2.1 | Adaptações no S-PRO

Os primeiros trabalhos realizados pelo CETEM utilizando o S-PRO foram desenvolvidos buscando desenvolver uma metodologia de polimento de rochas silicáticas, como o granito, composto predominantemente por quartzo e feldspato, que apresentam dureza na escala *Mohs* entre 6 e 7. Os mármore, por sua vez, são rochas carbonáticas, compostas predominantemente por calcita e/ou dolomita, que possuem dureza entre 3 e 4, ou seja bem mais brandas, e apresentam menos resistência ao corte em relação às rochas silicáticas. Essa propriedade exige esforços diferentes no processo de polimento, e por isso o beneficiamento de mármore e granitos é feito de maneira distinta pela indústria.

- Máquina

No S-PRO é possível trabalhar com diferentes variáveis operacionais referentes a tempo, temperatura, velocidade de corte, velocidade de deslocamento, pressão, vazão de água. Entretanto, para que as condições de operação referentes à vazão de água e pressão pudessem ser equiparáveis às condições utilizadas em fábrica foram necessárias algumas adaptações no equipamento.

Foi instalada uma bomba na entrada de água, que fez com que a vazão de máxima a entrar no circuito passasse de 14l/min para 26 l/min, um valor mais próximo do aplicado pela indústria. (Figura 25 A).

Foi instalado, também, um sistema de contrapressão, que permite o uso do equipamento utilizando cargas com uma extensão maior de valores, variando entre 10 a 500 kg (Figura 25 B).



Fonte: Souza e Silveira, 2017.

Figura 25. Adaptações no S-PRO: (A) Bomba de água; (B) Sistema de contrapressão.

A partir das modificações feitas no equipamento de simulação de polimento foi possível determinar as diferentes variáveis das condições de operação e compará-las com as condições aplicadas em fábrica (Tabela 3). É possível notar que foi necessária uma correção no cálculo da velocidade de rotação do satélite para que fosse possível correlacionar a velocidade de corte do S-PRO possui um satélite com 6 reboles, com a da fábrica, cuja máquina possui 8 reboles.

Tabela 3. Comparativo entre as condições de operação da politriz em fábrica e do S-PRO.

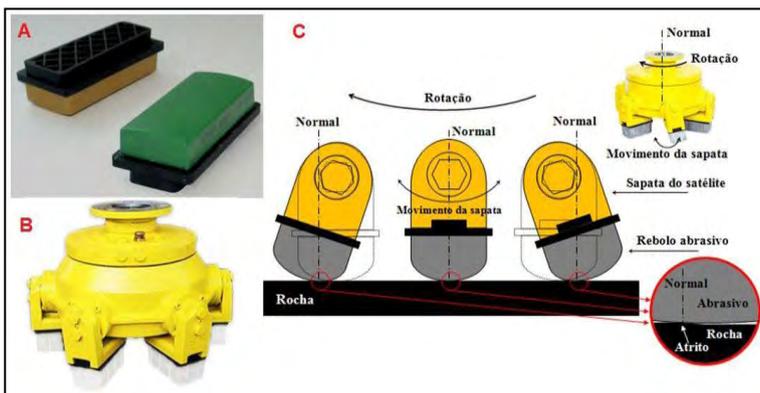
Parâmetro	Fábrica	S-PRO
Vazão (L/min)	30	0 a 26
Carga (kg)	26 a 320	16 a 500
Tempo	Indeterminado	Até 10 minutos ininterruptos
Velocidade de rotação (RPM)	430* (Prato com 8 rebolos)	50 a 880 (prato com 6 rebolos)*
Temperatura da água	Invariável	Sistema de aquecimento e resfriamento
Termômetro	Não possui	Possui

*Equivalente à velocidade de corte de 573 RPM em um prato com 6 rebolos.

Fonte: Souza e Silveira, 2017.

- Abrasivo

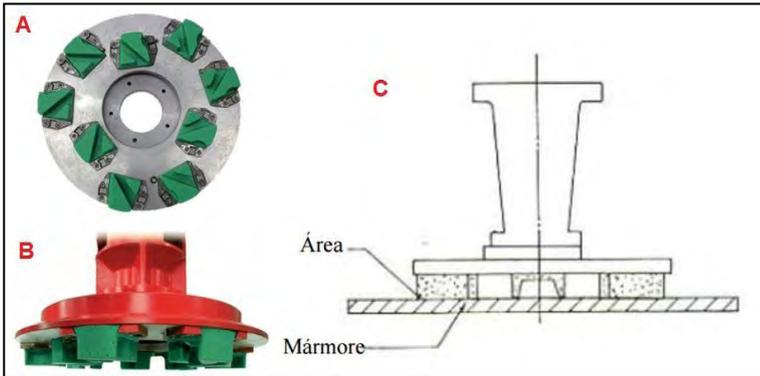
Os rebolos abrasivos utilizados no polimento de granito são do tipo *Fickert*, que garantem um movimento oscilatório de forma que o contato entre o rebolo e a chapa seja linear, exercendo assim maior pressão (Figura 26).



Fonte: Silveira & Bolonini, 2016.

Figura 26. Equipamento para polimento de granitos. (A) Abrasivos espatulantes; (B) Cabeça do satélite; (C) Esquema ilustrativo sobre a Interação entre rebolo e rocha.

Já os abrasivos utilizados no polimento de mármore são do tipo *Frankfurt*, acoplados em um prato de maneira fixa, em que o contato entre o abrasivo e a chapa é planar, garantindo assim maior área de atuação e conseqüentemente menor pressão (Figura 27). Foi realizada, portanto a instalação de um prato no satélite do S-PRO, permitindo a utilização de rebolos do tipo *Frankfurt*, comumente utilizado em mármore (Figura 28).



Fonte: Paço, 2008.

Figura 27. Equipamento para polimento de mármore. (A) Abrasivos do tipo Frankfurt; (B) Prato de fixação dos rebolos; (C) Interação entre rebole e rocha.



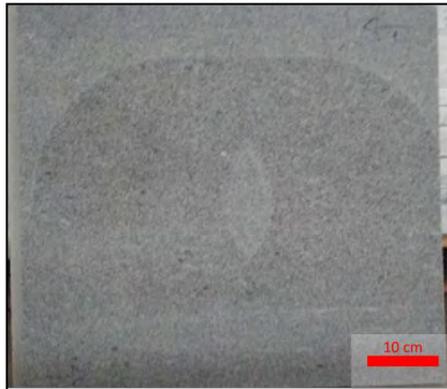
Fonte: Souza e Silveira, 2017.

Figura 28. Prato para instalação de rebolos tipo Frankfurt.

4.2.2 | Testes

Os testes iniciais do S-PRO consistiram no desgaste inicial dos rebolos. Nessa etapa, o tempo de ensaio foi superdimensionado, sendo interrompido apenas quando cada conjunto de rebolo estivesse com o elemento abrasivo aflorante em toda a superfície.

Nos rebolos convencionais foi utilizada uma chapa de uma rocha silicática buscando, assim, acelerar o processo, uma vez que este tipo de material apresenta maior dureza em relação à rocha carbonática. Foi possível notar que, apesar do equipamento realizar o deslocamento horizontal do satélite sobre a chapa, o polimento não foi realizado em toda extensão (Figura 29), uma vez que o S-PRO foi dimensionado a princípio para testes em rochas silicáticas, e os rebolos do tipo Frankfurt são menores que os rebolos para o polimento de rochas graníticas.



Fonte: Souza e Silveira, 2017.

Figura 29. Chapa de rocha silicática aplicada no procedimento de desgaste dos rebolos convencionais.

O desnível gerado entre a área de atuação do rebolo e a área inalterada favorece o impacto na borda do rebolo abrasivo conforme ocorre o deslocamento horizontal do satélite, acarretando em perda de materiais que ficou ainda mais intensa ao se utilizar os rebolos resinoides (Figura 30), que apresentam dimensão ligeiramente menor que o rebolo convencional.



Fonte: Souza e Silveira, 2017.

Figura 30. Rebolos fraturados e com desgaste.

O desgaste dos rebolos abrasivos resinoides, de granulometria mais fina, foi realizado utilizando a rocha carbonática e, para evitar impactos e perda de material abrasivo, o procedimento foi realizado sem o deslocamento horizontal do satélite (Figura 31 A). Apesar da diminuição do impacto, notou-se que o desgaste dos rebolos ocorreu de forma desigual, e os mesmos ficaram sulcados devido ao movimento circular repetitivo sempre na mesma área de atuação (Figura 31 B).



Fonte: Souza e Silveira, 2017.

Figura 31. (A) Chapa de mármore aplicada no procedimento de desgaste dos rebolos resinóides. (B) Detalhe dos sulcos no rebolo.

4.2.3 | Aplicação do S-PRO em rochas carbonáticas

As melhorias no equipamento em relação à pressão e à vazão de água garantem uma melhora aplicação do equipamento para os testes de polimento, uma vez que é possível fazer uma correlação direta entre as condições de operação do equipamento em laboratório com as condições de operação na indústria.

Entretanto, os primeiros testes realizados utilizando o equipamento para o polimento de rocha carbonática apresentaram alguns pontos desfavoráveis, como o a presença de área sem polimento e formação de desnível ou sulcos na rocha e nos rebolos abrasivos. A ocorrência de áreas sem polimento indica que o S-PRO não está dimensionado para a utilização com rebolos do tipo Frankfurt.

Para que os ensaios de polimento de rocha carbonática realizados pelo S-PRO apresentem os mesmos resultados satisfatórios que os apresentados com a utilização de rocha silicática, será necessário ampliar o deslocamento do satélite no eixo horizontal de forma a permitir o corte na região central da chapa, mesmo com a utilização de rebolos do tipo Frankfurt. Para que isso seja possível será necessária uma mudança na estrutura do equipamento, tanto na ampliação do trilho de deslocamento horizontal satélite como na ampliação da mesa de suporte para os corpos de prova, que passarão a apresentar uma maior área.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, a procura por produtos inovadores associados a processos que considerem aspectos de sustentabilidade tornou-se vital para a sobrevivência das indústrias em um mercado globalizado e competitivo. Nas etapas de beneficiamento de rochas ornamentais, tal enfoque se refere principalmente no que diz respeito à economia nos consumos de energia e água, bem como na utilização de insumos mais ecoeficientes.

Em relação ao processo de polimento de rochas ornamentais, as inovações tecnológicas decorrentes dessa pesquisa, principalmente no que concerne à otimização dos processos envolvidos em sua cadeia produtiva, estão alinhadas com essa temática.

O incremento da ecoeficiência do setor conferirá um aumento da competitividade da rocha ornamental brasileira, devido à criação de um diferencial mercadológico das rochas ornamentais nacionais, frente aos concorrentes estrangeiros nos aspectos relacionados à sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELBAR, A. Wear of polymers and composites. Woodhead Publishing, 256 p, 2015.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15012, Rochas para revestimento de edificações – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023, Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.
- ALMEIDA, P. F. Estudo comparativo do polimento de “granitos” com diferentes tipos de abrasivos. 2014. 120f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- ALTOÉ, T.; SILVEIRA, L. L. L. Tribologia aplicada ao desenvolvimento metodológico de ensaio para rochas ornamentais. In: XXII Jornada de Iniciação Científica do CETEM, 2014.
- ANDERSON JR, JOHN DAVID. Fundamentals of aerodynamics. Tata McGraw-Hill Education, 2000.
- ASM METALS HANDBOOK. Friction, lubrication, and wear technology. ASM International, vol. 18, 1996.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. D523-14, Standard test method for specular gloss, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ANSYS, Inc. "ANSYS® Academic Research." (2017).
- BOLONINI, T. M.; LEITÃO, V. M. F.; SILVEIRA, L. L. L. Inspeção por líquidos penetrantes em placas polidas de rochas para revestimento: detecção de descontinuidades. In: XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere on Mineral Technology, Goiânia - GO, 2013.

- BOLONINI, T. M.; SILVEIRA, L. L. L. Desenvolvimento metodológico do ensaio de polimento para rochas ornamentais silicáticas. In: V Jornada do Programa de Capacitação Institucional – CETEM, Rio de Janeiro – RJ, 8p, 2016.
- CAMARGO, J. L. Influência das propriedades petrográficas na qualidade do polimento de rochas ornamentais. 2013. 201f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2013.
- CARVALHO, D. L. S. Determinação de parâmetros do polimento em três tipos de rochas graníticas. Dissertação de Mestrado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. 130p. 2010.
- DORIGO, W. SILVEIRA, L. L. L. Determinação do brilho de rochas ornamentais submetidas a diferentes situações de desgaste. In: XX Jornada de Iniciação Científica, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- FERNANDES, L. M. Estudo computacional de configurações de resfriamento por filme em turbinas a gás. Notas de aula, 2012.
- HORST, C. Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear. Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.
- MACHADO, L. L.; PEIXOTO, S. C. Simulação numérica de escoamento em bocais convergentes e divergentes. Trabalho de conclusão de curso apresentado na coordenadoria de Eng. Mecânica do IFES *Campus* de Cachoeiro de Itapemirim, 91 p., 2017.
- MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas. Livros Técnicos e Científicos, 1994.

MORO, V. F. L. & SILVEIRA, L. L. L. Desempenho da aplicação da resina vegetal na confecção de rebolo abrasivo utilizando diamante sintético como elemento abrasivo. IV Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais. Campina Grande - PB. p. 176 – 182. 2012.

MORO, V. F. L. & SILVEIRA, L. L. L. Ecoabrasivo: uma nova perspectiva para o setor de rochas ornamentais. In: XXI Jornada de Iniciação Científica – CETEM, Rio de Janeiro, Brasil. 2013.

NEVES, M. C. Estudo experimental do polimento de diferentes “granitos” e as relações com a mineralogia. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo (Brasil). 115p. 2010.

OLIVEIRA A. F. Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações. Edusp, 2000.

PAÇO, J. L. G. Desenvolvimento de um sistema automático de estagiamento de moldes vazados com material abrasivo. Porto, Portugal. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto (Dissertação de Mestrado). 2008.

PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E.; RIBEIRO, R. P.; SILVEIRA, L. L. L. Considerações sobre o desgaste abrasivo no beneficiamento de rochas ornamentais. In: XLII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Araxá, Minas Gerais (Brasil). 2004.

REDDY, J. An introduction to the finite element method (3ª ed.). Mc Graw Hill, 2006.

RITT, J. The problem of integration in finite terms. Columbia University Press, New York. 1969.

SAMYN, P.; DE BAETS, P.; SCHOUKENS, G.; VAN DRIESSCHE, I. Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales. Wear 2007; 262: 1433–1449.

SIEMENS, P. L. M. "Software Solid Edge." (2014).

- SILVEIRA, L. L. L.; BOLONINI, T. M. Polimento de rochas ornamentais – Aspectos Tribológicos. Série Rochas e Minerais Industriais 18 Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016.
- SILVEIRA, L. L. L.; CAMARGO, J. L.; ARTUR, A. C.; DORIGO, W. Analisi dell'influenza della velocità tangenziale di taglio sulla qualità di lucidatura delle pietre ornamentali, Revista Diamante A&T, 8 p., 2017.
- SILVEIRA, L. L. L.; RODRIGUES, J. E.; ARTUR, A. C. Integrated analysis of the mineralogical, geotechnical and operational variables on the polishing of dimension stones. In: XXXII INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, Firenze (Italy). 2004.
- SILVEIRA, L. L. L.; RODRIGUES, J.E.; PARAGUASSÚ, A.B. Estudo do desgaste de dois granitos ornamentais brasileiros em simulador de polimento. In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Florianópolis . pp. 2290-2301. 2005.
- SILVEIRA, L. L. L. Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. Tese de Doutorado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. 205p. 2007.
- SILVEIRA, L. L. L. Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. Livro, 1 ed. Curitiba-Paraná, Editora Pós-Escrito, 203p. 2008.
- SILVEIRA, L. L. L.; ARTUR, A. C.; CAMARGO, J. L.; DORIGO, W. F. G. Determinação do brilho de rochas ornamentais brasileiras submetidas a diferentes situações de desgaste. In: 46 Congresso Brasileiro de Geologia, 2012, Santos. 46º Congresso Brasileiro de Geologia, 2012.
- SOUZA, M. L.; SILVEIRA, L. L. L. Levantamento dos principais aspectos relacionados ao processo de polimento de rochas ornamentais carbonáticas. In: XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belém, Pará. 7p., 2017.

68 Silveira, L. L. L.; Bolonini, T.M.; Almeida, P.F.; Sousa, M.L.; Machado, L.L.; Peixoto, S.C.

VETORAZZI, H. S.; CASTRO, N. F. Influência da textura anisotrópica de rocha polimento de rochas ornamentais. In: XXI – Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 4 p., 2013.

VIM. Vocabulário Internacional de Metrologia, 1ª edição luso-brasileira, 2012. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf. Acesso em: 08 de novembro de 2017.

WEINGAERTNER, W.; SCHROETER, R.; BARBA JUNIOR D.; KISH, M. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. Máquinas e Metais, p. 82–89, 1994

ZUM GAHR. K. H. Microstructure and wear of materials. Amsterdam: Tribology series-Elsevier, vol.10, 560 p., 1987.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2016, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 300 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

Últimos números da Série Rochas e Minerais Industriais

SRMI-21 – Caracterização Tecnológica da Rocha do Prédio Principal e Argamassa do Parque Lage – Rio de Janeiro - RJ. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Rosana Elisa Coppedê da Silva e Maria Inez de Moura Sarquis, 2017.

SRMI-20 - Areia de Fraturamento Hidráulico: usos, características, mercado e perspectivas. Paulo Fernando Almeida Braga, Francisco Mariano R. de Souza Lima, José Mário Coelho e Caroline da Costa Gonçalves, 2017.

SRMI-19 - Caracterização Tecnológica das Rochas de Monumentos e Prédios Históricos da Terra a Noel - Vila Isabel, Rio de Janeiro, RJ. Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Kátia Leite Mansur e Diego Peixoto Vieira, 2016.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: biblioteca@cetem.gov.br

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTIC, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 39 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.