

# **Série**

# **Rochas e Minerais**

# **Industriais**

## **Polimento de Rochas Ornamentais- Aspectos Tribológicos**

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Thiago Motta Bolonini

# **SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS**

**Polimento de Rochas Ornamentais – Aspectos  
Tribológicos**

## **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

**Paulo Roberto Pertusi**

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

**Luiz Henrique da Silva Borda**

Coordenador-Geral das Unidades de Pesquisa e Organizações  
Sociais

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Fernando Antonio Freitas Lins**

Diretor

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais

**Claudio Luiz Schneider**

Coordenador de Processos Minerais

**Durval Costa Reis**

Coordenador de Administração

**Robson de Araújo D'Ávila**

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

**Francisco Wilson Hollanda Vidal**

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

**Andréa Camardella de Lima Rizzo**

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais

# **SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS**

ISSN 1518-9155

ISBN 978-85-8261-057-2

**SRMI - 18**

## **Polimento de Rochas Ornamentais – Aspectos Tribológicos**

### **Leonardo Luiz Lyrio da Silveira**

Geólogo, D.Sc. pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP em Geotecnologia, com ênfase em Rochas Ornamentais – Núcleo Regional do Espírito Santo CETEM/MCTIC.

### **Thiago Motta Bolonini**

Tecnólogo em Rochas Ornamentais, D.Sc. em Geologia Regional pela Universidade Estadual Paulista – UNESP Núcleo Regional do Espírito Santo – CETEM/MCTIC.

**CETEM/MCTIC**

2016

# **SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS**

**Silvia Cristina Alves França**

Editora

**Luiz Carlos Bertolino**

Subeditor

## **CONSELHO EDITORIAL**

Adão Benvindo da Luz (CETEM), Francisco Wilson Holanda Vidal (CETEM), Jurgen Schnellrath (CETEM), Artur 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

**Leonardo Luiz Lyrio da Silveira**

Revisão

---

Silveira, Leonardo Luiz Lyrio da  
Polimento de rochas ornamentais, aspectos tribológicos /  
Leonardo Luiz L. da Silveira, Thiago Motta Bolonini. \_\_Rio de  
Janeiro: CETEM/MCTIC, 2016.

52p.: il. (Série Rochas e Minerais Industriais, 18)

1. Rochas Ornamentais. 2. Tribologia. 3. Polimento. I. Centro de  
Tecnologia Mineral. II. Silveira, Leonardo Luiz Lyrio da. III. Bolonini,  
Thiago Motta. IV. Título. V. Série.

CDD – 621.89

---

# SUMÁRIO

RESUMO _____	7
ABSTRACT _____	8
1   INTRODUÇÃO _____	9
2   OBJETIVO _____	11
3   TRIBOSSISTEMA _____	12
3.1   Modelos Analíticos _____	17
3.2   As Rochas e o Processo de Desgaste _____	20
3.3   Máquinas e Abrasivos _____	39
4   CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	45
5   AGRADECIMENTOS _____	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	47



## **RESUMO**

O polimento de rochas ornamentais se caracteriza pela abrasão entre a superfície rochosa e rebolos abrasivos, sendo o elemento cortante, na maioria das vezes, composto por diamante ou, secundariamente, carbeto de silício (SiC). As interações entre as fases minerais e as características texturais e estruturais da rocha com as propriedades do abrasivo (dureza, forma, tamanho, etc.), juntamente com as variáveis operacionais da máquina de polir (tensão de carregamento, velocidade de avanço, vazão de água, tempo, etc.) configuram um sistema denominado tribossistema. A constatação de que diferentes características petrográficas irão responder de modo específico às mesmas solicitações de um determinado processo industrial, comprova que a rocha apresenta um caráter ativo na interação da mesma com as propriedades do abrasivo e as variáveis operacionais do equipamento de polir. Tal abordagem abre um campo de pesquisa que utiliza conceitos de Tribologia para uma melhor compreensão do processo de polimento de rochas ornamentais. O desenvolvimento de modelos analíticos capazes de prever taxas de desgaste do material rochoso com vista a determinar configurações de produção otimizadas, além de pesquisas em simuladores de polimento, da criação de insumos mais ecoeficientes e procedimentos que visem o controle da qualidade ao longo do processo industrial de polimento de rochas ornamentais são as principais linhas de pesquisa que poderão proporcionar uma efetiva contribuição para esse setor industrial. Esse documento visa mostrar as bases conceituais iniciais a esse campo de pesquisa desenvolvido pelo Núcleo Regional do Espírito Santo (NR-ES/CETEM).

### **Palavras-chave**

Polimento, rocha ornamental, tribologia.

## **ABSTRACT**

The polishing of dimension stones is featured by the abrasion between the stone's surface and abrasive sectors. In addition, the cutting means mostly consist of diamond or, secondarily, of Silicon Carbide (SiC). The interactions between the mineral phases, the textural and structural features of the stone and the abrasive properties (hardness, shape, size, etc.), along with the polishing machine operation variables (charging voltage, feed rate, water flow rate, time, etc.), constitute a system called tribosystem. The fact that different petrographic features specifically respond to the same requirements of a given industrial process proves that the rock has an active character in its interaction with the abrasive properties and with the operating variables of the polishing machine. Such approach opens up a research field, which uses Tribology concepts to better understand the polishing process of the dimension stone. The development of analytical models able to predict the material wear rates in order to determine optimum production configurations, as well as the research conducted in polishing simulators and the development of more eco-efficient inputs and procedures aimed at controlling quality throughout the polishing industrial process of dimension stones, are the main lines of research that could effectively contribute to such industry. The aim of the current study is to show the initial conceptual basis to this research field, which is developed by the Espirito Santo State Regional Center (NR-ES / CETEM).

### **Keywords**

Polishing, stone, dimension, tribology.

## 1 | INTRODUÇÃO

Desde a década de 1930, quando se iniciou o processo de polimento de mármore e similares, no início com uso de potêia (óxido de estanho) e posteriormente com carbetto de silício (SiC), até o final dos anos sessenta, a técnica de polimento e lustro de rochas ornamentais pouco evoluiu. Em relação aos abrasivos utilizados nesse período, eles eram “povilhados” sobre a superfície da rocha configurando um desgaste abrasivos a três corpos.

O ganho tecnológico ocorrido na década de 1970 quando este setor mudou o sistema de desgaste de três para dois corpos, com o advento do rebolo abrasivo magnésiano, foi um marco evolutivo. No início dos anos 2000 foi desenvolvido o que até hoje em dia é considerado o que há de mais avançado em relação aos insumos para polimento de rochas ornamentais, o abrasivo resinóide. Esta ferramenta consiste de rebolo que possui diamante como elemento de corte e resina epoxídica como matriz, o que permitiu, juntamente com as máquinas de polir automáticas, aumentar a produção a níveis não antes imagináveis.

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, inevitavelmente, será superficial.

O beneficiamento de rochas ornamentais pode ser analisado sob a ótica da Tribologia (Ciência e tecnologia de superfícies que se interagem em movimento relativo ao das práticas a elas relacionadas), pois compreende uma sucessão de etapas de

desgaste, que se inicia com a serragem dos blocos e vai até o polimento final das placas. O desgaste está embasado no tribossistema, no qual as propriedades da rocha, do abrasivo e das variáveis operacionais são elementos ativos no processo. Como um sistema integrado, no tribossistema as características de uma variável influenciam nos resultados das outras variáveis. As propriedades dos materiais pétreos respondem de maneiras distintas às velocidades de corte e aos tipos de abrasivos aos quais estão sendo submetidas.

Na Tribologia original, voltada para o estudo de materiais metálicos, as variáveis relacionadas ao abrasivo utilizado na usinagem da peça (composição química, estrutura, dureza, angularidade, angulosidade, etc.) e as variáveis do processo industrial (velocidade de rotação, ângulo de ataque, etc.) têm exclusiva responsabilidade no registro do sulco na superfície da peça, sendo a amplitude do sulco função de suas propriedades físicas.

No caso do polimento de rocha, os constituintes minerais irão responder de modo diferente às solicitações impostas pelo abrasivo e pelas condições operacionais, gerando diferentes graus de rugosidade à superfície. Sendo assim, deve-se considerar, no caso das rochas, suas características petrográficas como fator de fundamental importância para o resultado final. É possível notar que não se pode evoluir tecnologicamente em relação ao polimento de rochas ornamentais sem, primeiramente, estudar tal processo à luz da Tribologia, bem como sem dispor de uma máquina que permita estudar o maior número de variáveis influentes neste tribossistema, nem procurar desenvolver insumos em consonância com os preceitos da sustentabilidade.

## **2 | OBJETIVO**

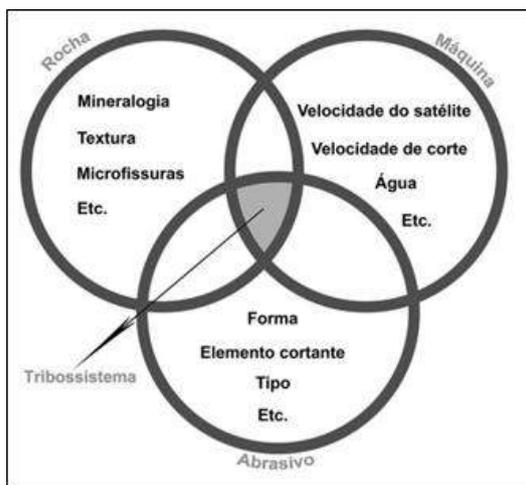
O objetivo desse trabalho é exemplificar as possíveis aplicações dos conceitos tribológicos para um melhor entendimento do processo industrial de polimento de rochas ornamentais.

### 3 | TRIBOSSISTEMA

A Tribologia é a “Ciência e tecnologia de superfícies que se interagem em movimento relativo das práticas a elas relacionadas” (ZUM-GAHR, 1987). Estuda a ocorrência de atrito e desgaste como resultado das propriedades operacionais de um dado processo.

Alguns estudos foram realizados aplicando a Tribologia à compreensão de fenômenos físicos no beneficiamento de rochas ornamentais (RIBEIRO *et al.*, 2004; RIBEIRO *et al.*, 2005; COIMBRA FILHO, 2006; SILVEIRA, 2008; NEVES, 2010; CARVALHO, 2010; CAMARGO, 2013, ALMEIDA, 2014). Como um sistema integrado, no tribossistema as características de uma variável influenciam os resultados das outras variáveis. As propriedades dos materiais pétreos respondem de maneiras distintas às velocidades de corte às quais estão sendo submetidas.

Segundo Altoé & Silveira (2014), o beneficiamento de rochas ornamentais pode ser analisado sobre a ótica da Tribologia, pois compreende uma sucessão de etapas de desgaste abrasivo, que se inicia com a serragem dos blocos e vai até o polimento final das placas. O desgaste está embasado no tribossistema, no qual as propriedades intrínsecas da rocha, do abrasivo e das variáveis operacionais são elementos ativos no processo (Figura 1).



Fonte: Altoé e Silveira (2014).

**Figura 1.** Tribossistema encontrado no polimento de rochas ornamentais.

Em muitos setores das atividades industriais o desgaste é um processo indesejável, pois o mesmo pode causar diminuição da vida útil de algum componente, perda de desempenho, etc. No caso do polimento de rochas ornamentais, entretanto, é o desgaste da superfície rochosa que imprime o brilho e a beleza a esses materiais. Logo, é de suma importância a compreensão dos mecanismos de desgaste envolvidos neste processo industrial.

Sob a óptica da Tribologia, a rocha representa um grupo de variáveis, que interage com os outros grupos de variáveis do tribossistema, no qual, dependendo de suas propriedades petrográficas, irão responder de modo peculiar às solicitações impostas pelas variáveis referentes à máquina e aos rebolos abrasivos.

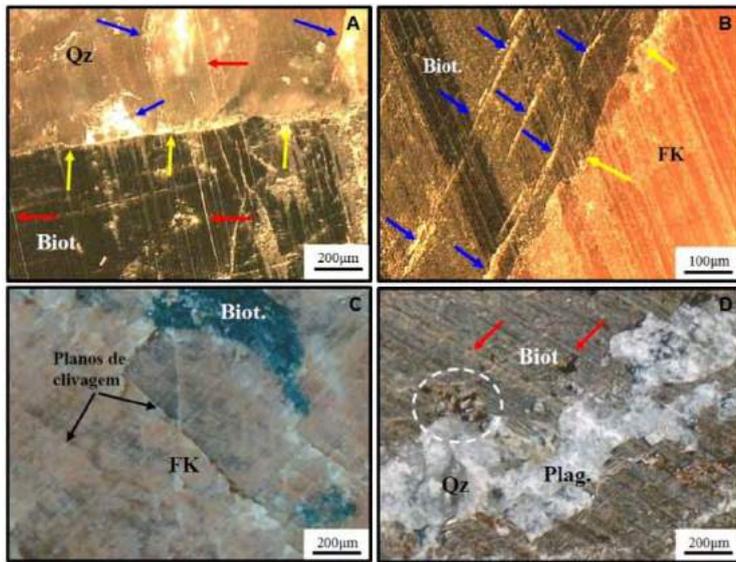
Alguns exemplos podem ser observados nas figuras a seguir: a Figura 2A apresenta o comportamento diferenciado de minerais com diferentes durezas quando riscados por uma partícula abrasiva de carbeto de silício (SiC). Embora este abrasivo tenha dureza maior do que os dois minerais mostrados na Figura 2A (cristais de biotita e quartzo – risco ou sulco de cor branca na biotita), a tensão de carregamento desempenha papel fundamental na impressão do sulco em uma superfície. O mineral preto (biotita) tem uma dureza menor do que o mineral cinza (quartzo) e é possível notar que o risco foi registrado apenas no mineral de menor dureza.

A Figura 2B mostra o desenvolvimento de microdescontinuidades, denominadas de trincas de alívio, no mineral biotita, que apresenta maior plasticidade. Tal situação demonstra que a rocha foi submetida a esforços de pressão acima dos quais seriam assimilados por este mineral.

Planos de clivagem, descontinuidades naturais que ocorrem em certos minerais, podem atenuar a reflexão da luz e com isso diminuir a intensidade do brilho da superfície (Figura 2C).

A Figura 2D mostra uma superfície rochosa com porções arrancadas (tracejado branco), possivelmente devido à má combinação de carga aplicada e velocidade de corte.

Dentre os aspectos mais importantes que podem resultar da interação entre propriedades petrográficas, cargas aplicadas nos satélites e rebolos abrasivos, pode-se citar qualidade final do polimento, consumo energético, desgaste do rebole abrasivo, consumo de água, produção diária de chapas, entre outros.



Fonte: Silveira, 2008.

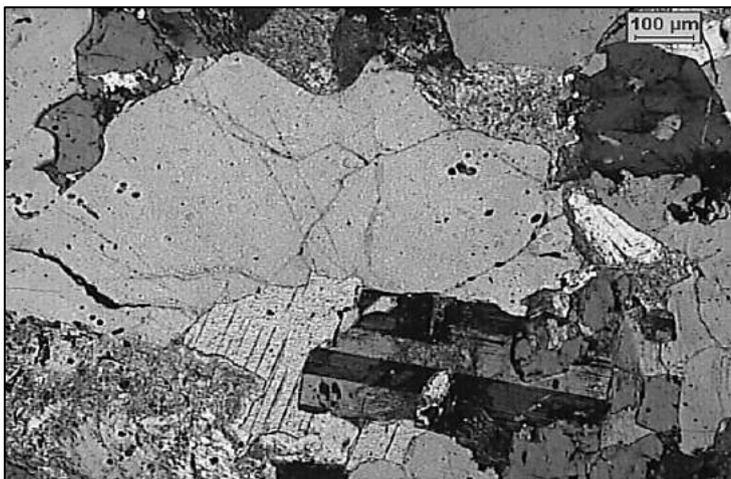
**Figura 2.** Diferentes feições oriundas da interação abrasivo – rocha.

A Tribologia, apesar de ter sido originalmente concebida tendo como objetos de estudo materiais metálicos e cerâmicos, considera vários aspectos que também podem ser encontrados nas rochas. As fases metálicas de uma determinada liga apresentam relações de textura, estrutura e tamanho, sendo que tais aspectos irão influenciar no comportamento desse material. Da mesma forma, as rochas apresentam fases minerais que também serão responsáveis pelo comportamento físico-mecânico do material rochoso. As figuras, a seguir, mostram as similaridades, em escala microscópica, entre uma amostra metálica e outra rochosa. A figura 3 representa uma imagem metalográfica de aço carbono com inclusão de sulfeto enquanto que a figura 4 representa uma lâmina petrográfica de um granito.



Fonte: Tork, 2016.

**Figura 3.** Metalografia de um aço carbono com inclusão de sulfeto.



Fonte: Silveira, 2008.

**Figura 4.** Lâmina petrográfica de um granito.

### 3.1 | Modelos Analíticos

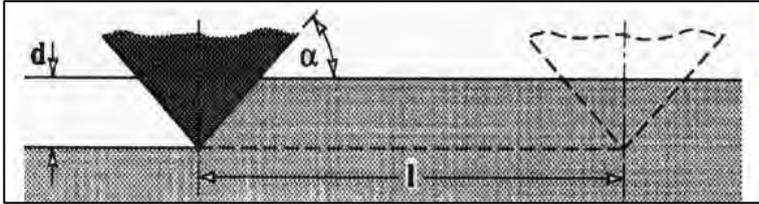
Existem alguns trabalhos voltados ao desenvolvimento de modelos analíticos que estudam a dinâmica do contato entre partículas abrasivas e superfícies de materiais, visando, principalmente, a quantificação das taxas de desgaste.

Um dos primeiros modelos criados para a compreensão do mecanismo de desgaste foi o elaborado por Archard (1959) *apud* Tylczak (1992). Tal modelo tenta quantificar o desgaste volumétrico ( $W$ ), devido a passagem de uma partícula abrasiva sobre uma superfície com uma carga normal ( $F_N$ ), uma distância percorrida ( $S$ ) e a dureza da superfície desgastada ( $H$ ). Tal modelo ficou conhecido como a Lei de desgaste de Archard e pode ser expressa pela seguinte equação [1]:

$$W = K \cdot F_N \cdot S / H \quad [1]$$

O  $K$  desta equação é conhecido como “coeficiente de desgaste” e é função da forma, tamanho, tipo e distribuição das asperidades. Esta equação foi formulada para desgaste por adesão, porém, pode ser utilizado para o desgaste abrasivo a dois corpos.

Rabinowicz (1965) *apud* Stachowaiak e Batchelor (1993) considerou uma única partícula abrasiva, de forma cônica, sendo arrastada sobre uma superfície, produzindo uma ranhura uniforme (Figura 5). De acordo com este modelo, o volume de material removido ( $W$ ) é o produto entre a área da seção transversal do sulco produzido ( $d^2 \cdot \cot \alpha$ ) e a distância percorrida pelo indentador cônico ( $l$ ).



Fonte: Rabinowicz (1965) *apud* Stachowiak e Batchelor (1993).

**Figura 5.** Modelo de desgaste abrasivo causado por uma única partícula.

$$W = d^2 \cdot \cot\alpha \cdot S \quad [2]$$

Onde:

$W$  – volume de material removido;

$d$  – Profundidade da indentação;

$\alpha$  - ângulo do cone;

$S$  – distância percorrida pelo indentador c nico.

A carga exercida pelo abrasivo ( $F_N$ ) sobre o material é o produto entre a área produzida por uma indentação e o limite de escoamento do material sobre a indentação (dureza,  $H$ ), conforme equações [3] e [4]:

$$F_N = 0,5 \pi (d \cdot \cot\alpha)^2 \cdot H \quad [3]$$

$$d = \{F_N / 0,5 \pi \cdot H\}^{1/2} / \cot\alpha \quad [4]$$

Onde:

$F_N$  – carga individual da partícula abrasiva;

$H$  – limite de escoamento do material sobre a indentação.

Substituindo  $d$  da equação [2] na equação [4] é obtida a perda volumétrica de material em função da carga, da forma do abrasivo e da distância percorrida por ele [5]:

$$W = (2 \cdot S \cdot \text{tg} \alpha / \pi \cdot H) \cdot F_N \quad [5]$$

O desgaste total do material pode ser então determinado a partir da soma das perdas volumétricas de massa causadas por cada uma das partículas abrasivas:

$$W_{tot} = \Sigma W = (2 \cdot \text{tg} \alpha / \pi \cdot H) \Sigma F_N \quad [6]$$

Para a aplicação de um modelo analítico visando a previsão das taxas de desgaste em material rochoso, a tentativa da troca do limite de escoamento ( $H$ ), exclusivo de materiais metálicos, pela microdureza *Knoop* ou pela resistência à compressão uniaxial, pode ser uma opção. De modo abrangente, o desgaste abrasivo verificado no polimento de rochas ornamentais pode ser representado como sendo função de:

$$W = \int H, \delta, Ga, c \quad [7]$$

Onde:

$W$  – volume de material rochoso retirado;

$H$  – dureza da rocha (*knoop*);

$\delta$  - grau de anisotropia da rocha (textura/estrutura);

$Ga$  – granulometria do abrasivo;

$c$  – condições operacionais.

Tais parâmetros devem ser estudados em conjunto, o que configura um tribossistema, sendo que para a obtenção de um modelo analítico que corresponda à realidade operacional na indústria, se faz necessário o melhor desenvolvimento deste

modelo de modo contínuo, com vista à obtenção de um banco de dados onde seja possível tratar tais informações e assim definir, com mais segurança, as situações ideais de desgaste em função de cada tipo rochoso.

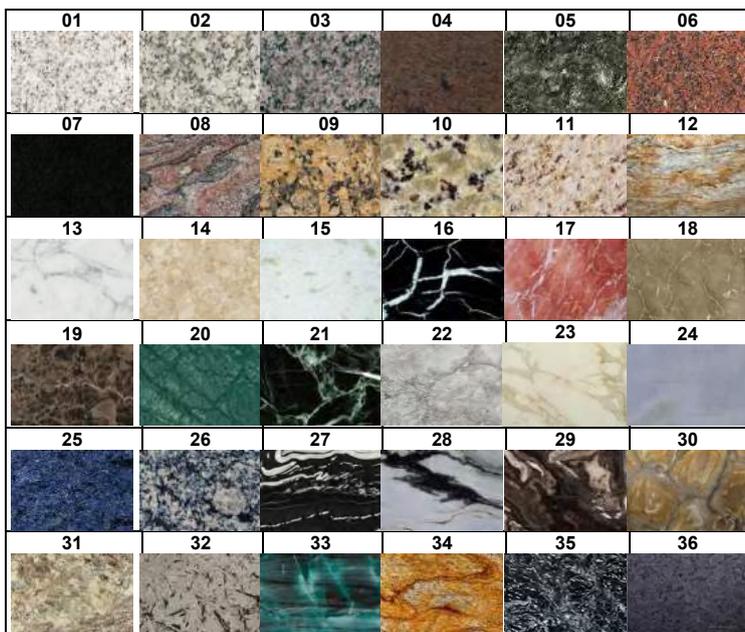
### 3.2 | As Rochas e o Processo de Desgaste

As propriedades da rocha são influenciadas pela composição mineralógica, textura (tamanho e forma), *fabric* (arranjo mineral e vazio) e grau de alteração. Especificamente em granitos, as variáveis que mais influem nas propriedades mecânicas são: tamanho e forma dos grãos, grau de imbricamento, tipo de contato e composição mineralógica (IRFAN, 1996 *apud* TUGRUL e ZARIF, 1999).

As características que agregam valor e conferem beleza às rochas quando polidas são, além da cor e do brilho (grandeza inversamente proporcional à rugosidade), a textura e a estrutura, que juntas correspondem ao coloquialmente denominado “desenho” ou “movimento” da rocha. Algumas delas, como os padrões texturais e estruturais, não podem ser modificadas pelo processo de beneficiamento. Cabe frisar que operações relacionadas às orientações dos cortes na lavra podem fornecer perspectivas diferentes para uma mesma estrutura e/ou textura, mas, deixa-se claro, sem modificar as propriedades texturais ou estruturais das rochas.

O brilho de uma superfície polida pode ser produzido através do controle da influência que cada um dos componentes do desgaste abrasivo (abrasivos, rochas, equipamentos) exerce sobre o processo, pois a interação dos componentes no tribossistema determinará a rugosidade da superfície acabada.

Com relação à cor é possível, em alguns litotipos e com o uso de produtos químicos específicos, intensificá-la (rochas verdes e pretas) ou removê-la (manchas de oxidação). A Figura 6 mostra alguns litotipos comercializados como rochas ornamentais e para revestimento e ilustra a variabilidade das cores e dos padrões estéticos, texturais e estruturais que elas podem assumir.



Fonte: autores.

**Figura 6.** Ilustração da variabilidade estética, textural e estrutural de algumas rochas comercializadas.

Na Figura 6, as rochas ornamentais mostradas são conhecidas comercialmente como: 01) Branco Dallas, 02) Cinza Corumbá, 03) Ocre Itabira, 04) Chocolate, 05) Verde

Ubatuba, 06) Vermelho Brasília, 07) Preto São Gabriel, 08) *Kinawa*, 9) Fiorito, 10) *Butterfly Beige*, 11) Amarelo Ornamental, 12) *Yellow River*, 13) Branco Carrara, 14) Bege Bahia, 15) Pinta Verde, 16) Nero Marquina, 17) Vermelho Alicante, 18) *Emperador Light*, 19) Marrom Imperial, 20) Verde Gallery, 21) Verde Olomont, 22) Arabescato, 23) Calacatta, 24) *Royal Blue*, 25) Azul Bahia, 26) Azul Fantástico, 27) Copacabana, 28) *Scandalous*, 29) *Paleon*, 30) *Palomino*, 31) *Bordeaux River*, 32) *Delicattus White*, 33) *Botanic Green*, 34) *Twister*, 35) *Blue Night*, 36) Cosmic.

Devido à grande variedade de rochas comercializadas, a abordagem do tema sobre resistência oferecida ao desgaste abrasivo é feita em função das propriedades como mineralogia, textura, estrutura, dureza relativa e graus de alteração e abrasividade das rochas e como elas podem afetar o processo de obtenção do brilho, à luz da Tribologia.

### 3.2.1| Rugosidade e brilho: grandezas inversamente proporcionais

Piratelli Filho (2011) define a rugosidade como um conjunto de desvios microgeométricos caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície.

O brilho de uma superfície é percebido através do seu comportamento de reflexão. Mesmo que aqui se faça uso da nitidez do reflexo de objetos a olho nu, o brilho é essencialmente uma questão da reflexão da luz. Consoante ao ângulo de visão, a percepção do brilho poderá alterar-se significativamente (ERICHSEN, 2015).

A intensidade do brilho que determinada superfície apresenta é função das propriedades refletivas dos minerais que compõem a rocha, sendo também inversamente proporcional à rugosidade da superfície. Logo, o brilho e o lustro de uma rocha ornamental são conseguidos pela eliminação destas rugosidades herdadas na etapa de beneficiamento primário (serragem) e pelo “fechamento dos poros” entre os diferentes minerais que formam a rocha. Isto se dá pela ação de elementos abrasivos que, conduzidos em movimentos de atrito sobre o material, vão desbastando-o até atingir o grau de polimento desejado, através do uso de abrasivos com granulometria decrescente (KASCHNER, 1996).

Algumas propriedades intrínsecas às rochas possuem papéis relevantes, no sistema tribológico, no tocante ao consumo das ferramentas abrasivas, ao fechamento das superfícies e ao brilho obtido através do processo de polimento (SILVEIRA *et al.*, 2014a).

## MINERALOGIA

Minerais diferentes apresentam propriedades físicas diferentes e respondem de formas diferentes ao desgaste abrasivo. Na geologia, utiliza-se o conhecimento sobre a composição química e o arranjo cristalino dos minerais para entender as origens das rochas e classificá-las.

No contexto do polimento, tais propriedades podem ser determinantes para a obtenção do acabamento pretendido ao passo que possuem ligação direta com as resistências oferecidas ao desgaste abrasivo. Para ilustrar tal afirmação, Erdogan (2000) cita que rochas constituídas essencialmente por apenas um mineral, por exemplo, mármore e calcários,

mostram aumento nos valores de brilho com a diminuição da granulação, enquanto que rochas magmáticas com alto conteúdo em micas e com granulação grossa apresenta uma diminuição nesta propriedade.

As composições dos cristais e a forma com que seus elementos químicos se organizam formando sua estrutura cristalina, definem outras propriedades dos minerais que também são importantes para a obtenção do brilho através do polimento de uma superfície pétrea. Dessa forma, é preciso conhecê-las para entender como afetam o processo.

**Diafaneidade:** Os minerais podem variar de transparentes a opacos e qualquer mineral translúcido pode, em circunstâncias ideais, ser quase ou totalmente transparente. Minerais silicáticos de cor preta podem, em lascas suficientemente finas, apresentar alguma transmissão de luz (e.g. biotita). Minerais completamente opacos, geralmente, englobam sulfetos, óxidos e silicatos de cor preta (POUGH, 1996). O grau de transparência ou opacidade que um mineral possui definirá a quantidade de luz que atravessará sua estrutura. Em um determinado mineral, parte da luz incidente sobre sua superfície poderá sofrer refração e difração e parte dela poderá ser refletida dando a percepção do brilho, ou seja, quanto maior a quantidade de luz refletida, maior será o brilho percebido. Em outras palavras, a capacidade de refletir a luz não está ligada apenas à rugosidade da superfície acabada e, ao analisar a qualidade dessa superfície a partir do brilho, a diafaneidade deve ser também considerada para justificar o maior ou menor valor desta propriedade em um determinado mineral.

**Dureza:** A dureza é a resistência que a superfície de um mineral oferece ao risco. Em 1822, Friedrich Mohs, elaborou uma escala com base na facilidade com que um mineral mais duro risca um mineral menos duro. A escala é dividida em dez minerais, em ordem crescente de dureza, a saber: 1 - talco; 2 - gipsita; 3 - calcita; 4 - fluorita; 5 - apatita; 6 - ortoclásio; 7 - quartzo; 8 - topázio; 9 - coríndon e; 10 - diamante. Em outras palavras, se pudermos arranhar algo com o quartzo, mas não com feldspato e, se esse algo, arranhar o feldspato (e, naturalmente, não arranhar o quartzo), dizemos que possui valor de dureza 6.

Pough (1996) enfatiza que, mesmo não sendo precisa, a escala é utilizada até hoje por ser prática. Entretanto, reconhece que não existe uma relação matemática exata para justificar as diferenças de dureza. Por exemplo: a dureza 10 é muito maior que a 9; a 9 é um pouco maior que a 8 e assim por diante. Existem instrumentos, utilizados para definir precisamente as durezas dos minerais, que indicam: se o diamante possui valor 1000 numa escala de leitura de 0 a 1000, o coríndon possui cerca de 250 e o topázio possui 160. Por essa razão, a escala de dureza é apenas uma determinação aproximada.

Esta propriedade pode afetar diretamente o processo de desgaste da rocha, uma vez que as diferenças de dureza dos minerais podem representar maior consumo das ferramentas abrasivas para se obter o brilho desejado por oferecerem diferentes resistências ao desgaste abrasivo.

**Fratura:** Fraturas são produzidas quando a tensão local excede a resistência local em um determinado litotipo. Tal tensão pode ser aumentada por interações entre bandas de deformação e por concentrações de tensão nas bordas dos grãos e ao redor das cavidades intracristalinas (KRANZ, 1983). Existem dois grandes grupos de fraturas: o irregular e o conchoidal. A maioria das substâncias apresenta um ou o outro como uma propriedade constante, com a maioria dos minerais vítreos possuindo fratura conchoidal (POUGH, 1996).

As fraturas afetam o processo de obtenção do brilho pois, dependendo do tipo e da frequência com que ocorrem em um litotipo, podem oferecer maior dificuldade relacionada ao fechamento da superfície durante o polimento. Tal afirmação se justifica pela necessidade de compensar essas “falhas” na superfície com a utilização das resinas para polimento.

**Clivagem:** A tendência que um mineral possui de se quebrar em planos é conhecida como clivagem e é uma propriedade fundamental de um mineral, uma vez que está relacionada com o arranjo atômico do cristal e também com os eixos de simetria do mineral: um mineral cúbico, tal como esfalerita ou fluorita, pode ter clivagem dodecaédrica (12 lados) ou octaédrica (8 lados), enquanto que um cristal monoclinico ou triclinico, provavelmente, terá um (pinacoidal) ou dois (clivagem prismática) planos de fratura. A clivagem é uma das propriedades mais importantes para a identificação de minerais (POUGH, 1996).

Assim como as fraturas, os planos de clivagem são descontinuidades presentes nas rochas e podem, como tal e se seus planos estiverem abertos, oferecer maior dificuldade relacionada ao fechamento da superfície a partir do polimento.

Além disso, também como as fraturas, podem aumentar o grau de abrasividade de uma determinada rocha podendo implicar em maior desgaste das ferramentas abrasivas.

**Micro e macroporos:** Certa quantidade da luz incidente na superfície da chapa é absorvida por micro e macrodescontinuidades presentes na rocha. Limites entre os minerais juntamente com planos de clivagem e microfeições herdadas na gênese do material, são as principais fontes de descontinuidades (ERDOGAN, 2000). Esses poros em rochas são constituintes fundamentais por que eles têm tamanho, forma e volume como os constituintes sólidos. Vazios incluem vesículas em lavas, cavidades miarolíticas em granitos, espaços porosos primários em rochas clásticas, espaços abertos em brechas e cavidades originadas por dissolução em rochas carbonáticas (HIBBARD, 1995).

Estas feições englobam desde as inclusões fluidas até as fraturas visíveis a olho nu e o grau de interconectividade entre elas pode potencializar a ocorrência de problemas inerentes ao fechamento das superfícies (descontinuidades interconectadas e com densidade de ocorrência considerável na rocha) ou pode proporcionar um aumento na eficiência do processo por necessitar de menos recursos técnicos para o beneficiamento da rocha que as contém (com densidade de ocorrência incipiente e baixa interconectividade).

**Tamanho e forma dos cristais:** O tamanho de um cristal pode ser expresso por seu diâmetro médio ou máximo em milímetros e a indicação do tamanho de um grão é feita, tipicamente, com base na sua dimensão mais longa. Os cristais podem ter formatos equidimensionais, tabulares, aciculares, lamelares e prismáticos. Estes sólidos podem ocorrer como cristais

individuais ou como agregados de cristais. Rochas magmáticas e rochas recristalizadas pelo metamorfismo, por exemplo, podem possuir cristais com tamanhos milimétricos a centimétricos (HIBBARD, 1995).

Ao tratar do tamanho dos cristais, o autor cita que para cristais individuais, as divisões milimétricas que seguem na Tabela 1 são adotadas com base em três premissas: a generalização do tamanho do grão é necessária para facilitar observações petrográficas, mesmo que existam dispositivos automáticos que prometam refinar estas observações; o estabelecimento de intervalos de tamanhos é necessário para que os dados obtidos a partir das rochas sejam comparados e permitam classifica-las e; os limites que definem esses grupos podem ser estabelecidos para acomodar certas considerações visuais e ocorrências naturais nas rochas.

**Tabela 1.** Classificação da granulação mineral para rochas.

Classificação	Granulação (mm)			
Muito grossa	> 50			
Grossa	> 05	até	< 50	
Média	> 01	até	< 05	
Fina	> 0,1	até	< 1	
Muito fina	> 0,01	até	< 0,1	(10-100µm)
Vítrea	vidro	até	< 0,01	(<10 µm)

Fonte: Hibbard (1995).

Para agregados de cristais a classificação da granulação é relativa às dimensões dos cristais que formam as rochas. Para agregados onde todos os eixos de maiores dimensões dos minerais estão dentro de um dos limites que definem um dos

grupos de tamanho estabelecidos na Tabela 1 a rocha é classificada como equigranular e, quando os eixos maiores dos minerais contemplam mais de um grupo dos estabelecidos na tabela 1, classifica-se a rocha como inequigranular.

Quando a forma de um cristal reflete a sua estrutura, ou seja, suas faces são os seus limites, ele é classificado como euédrico. Quando um cristal é limitado, em parte, por suas próprias faces e também, em parte, pelos cristais vizinhos, ele é classificado como subédrico. Quando sua forma não reflete sua estrutura, ou seja, está completamente determinada pelos cristais vizinhos, o mineral é classificado como anédrico (SIAL e MCREATH, 1984).

A forma dos minerais tem ligação direta com o imbricamento mineral ou grau de entrelaçamento dos mesmos na estrutura da rocha. As relações de contato entre os minerais estão relacionadas às tenacidades das diferentes rochas e aos seus graus de abrasividade, uma vez que contatos serrilhados, por exemplo, tendem, naturalmente, a imprimir maior rugosidade à superfície a ser acabada do que contatos lobulados e sinuosos, dependendo da escala.

## TENACIDADE

Massas cristalinas possuem diferentes resistências ao fraturamento e vários termos vem sendo aplicados para descrever este fenômeno (POUGH, 1996).

**Rocha compacta:** se uma massa é muito resistente à separação, ela é chamada de compacta. Um exemplo extremo disso é o quartzito, onde a cimentação entre os cristais é tal que, ao quebrar, na verdade, a fratura divide os grãos de areia ao invés de se conduzir ao redor de suas superfícies. Em um

granito, a fratura se dá sempre através dos grãos, pois estes são tão firmemente ligados que não podem ser facilmente separados. Outras rochas granulares (xisto, e. g.) podem desintegrar-se mais facilmente. Massas minerais maciças com cristais alongados ou achatados podem ser frágeis, rompendo-se facilmente em uma pilha de lascas ou placas.

**Rocha séctil:** séctil é o termo utilizado para descrever a tenacidade de vários dos materiais mais macios; refere-se à capacidade de ser cortado, sem deixar resíduos.

## TEXTURA

O tamanho, o formato e as relações entre os cristais constituem a textura de uma rocha (CROSS *et al.*, 1906 *apud* HIBBARD, 1995).

Press *et al.* (2006) exemplificam que, em rochas ígneas, uma granulação grossa, como a de um granito, tem cristais individuais que são facilmente visualizados a olho nu (textura fanerítica). Em contraposição, os cristais de rochas de granulação fina (textura afanítica), como o basalto, são pequenos demais para serem vistos a olho nu, ou mesmo com a ajuda de uma lente de aumento. Este fenômeno está ligado ao tempo de resfriamento que as diferentes rochas tiveram para serem formadas, ou seja, quanto maior a granulação, mais tempo a rocha teve para resfriar e ser gerada.

Em rochas metamórficas, por sua vez, além das dimensões dos cristais, suas formas e arranjos também são importantes para a classificação da textura.

A feição mais relevante no metamorfismo é a foliação, um conjunto de superfícies paralelas, planas ou onduladas, produzidas pela deformação cujos planos de foliação podem cortar o acamamento em qualquer ângulo ou ser paralelos a ele.

A foliação é reflexo da modificação da textura nas rochas metamórficas e, em função dela, as mesmas são classificadas com base em quatro critérios: o tamanho dos cristais; a natureza da foliação; a intensidade com que os minerais estão agregados em bandas mais claras e mais escuras e; seu grau metamórfico. De maneira geral, o aumento da intensidade do metamorfismo implica no aumento do tamanho dos cristais e da espessura da foliação.

Os autores mostram, ainda, que a presença de minerais placóides (e.g. micas) é a principal causa da foliação. Tais minerais são alinhados segundo uma orientação preferencial que é paralela à foliação. Minerais alongados tendem a assumir uma orientação preferencial durante o metamorfismo e, geralmente, alinham-se paralelamente ao plano da foliação.

Características texturais como a dispersão dos minerais, suas granulações relativas, suas relações de contato, suas formas e posicionamentos em relação à superfície a ser acabada são fatores que podem favorecer ou dificultar seu desgaste, dependendo do(s) tipo(s) de mineral(is) presente(s) na(s) rocha(s) e suas propriedades (dureza, tenacidade, grau de alteração, etc.).

## ESTRUTURA

Conhecer a estrutura de uma rocha é fundamental para compreender como os mecanismos de desgaste atuarão em

sua superfície. Para tanto, se faz necessário entender alguns conceitos como a isotropia e a anisotropia e avaliar a orientação dos minerais em relação às superfícies a serem acabadas.

**Isotropia:** orientação aleatória no espaço de elementos que compõem uma rocha (MCGRAW-HILL, 2003). Condição de constância de propriedades físicas de um corpo rochoso ou mineral segundo todas as direções como, por exemplo, a luz propagando-se com igual velocidade em todas as direções dentro de um mineral isotrópico como a granada (CRÓSTA *et al.*, 2016).

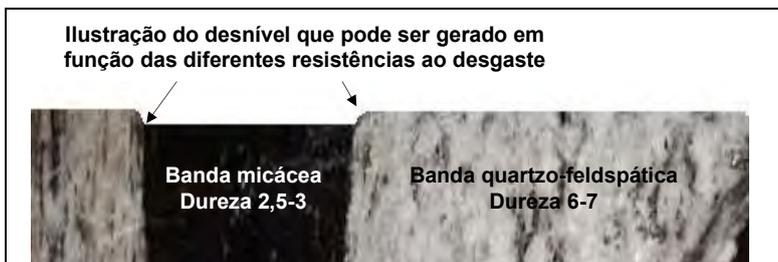
**Anisotropia:** condição de variabilidade de propriedades físicas de um corpo rochoso ou mineral, segundo direções diferentes, como, por exemplo, a variação da velocidade de propagação da luz (birrefringência) em minerais anisotrópicos; a variação de propagação de ondas sísmicas em massas rochosas estratificadas segundo diferentes direções (CRÓSTA *et al.*, 2016).

Em escala macroscópica, as estruturas tidas como anisotrópicas possuem influência na resistência mecânica dos materiais pétreos e espera-se, então, que exerça papel importante na abrasão durante o processo de polimento (VETORAZZI e CASTRO, 2013).

**Orientação dos minerais em relação à superfície a ser polida:** a dureza de um mineral é, muitas vezes, diferente em diferentes direções de um cristal. Pough (1996) cita o caso da cianita, cuja direção de alongamento pode ser riscada com uma faca (dureza próxima a 5), enquanto sua seção basal necessita de algo com dureza maior para ser riscada.

Com base nessa afirmação é possível estabelecer relações com as texturas e as estruturas das rochas, uma vez que o posicionamento do mineral em relação à superfície irá definir o quanto o mesmo (e, por consequência, a rocha) resistirá ao desgaste e como irá afetar o consumo das ferramentas abrasivas.

Em rochas deformadas como gnaisses (migmatitos), por exemplo, a orientação do corte em relação ao posicionamento dos minerais pode implicar, em uma chapa de rocha a ser polida, em bandas com maiores resistências (quartzo e feldspato) e bandas com menores resistências (micáceas) ao desgaste abrasivo (Figura 7).



Fonte: Autores.

**Figura 7.** Ilustração, com exagero vertical, do desnível que pode ser gerado pelo desgaste abrasivo em minerais com diferentes durezas e orientações em relação à superfície a ser acabada em um gnaisse.

As discontinuidades presentes nas rochas a serem polidas, tais como fraturas, veios, diques, falhas, bandamentos composicionais, estruturas de fluxo, bandamentos tectônicos e dobras, podem representar zonas com maior ou menor resistência à abrasão em função da dureza, do grau de fraturamento, da orientação, da tenacidade e da forma dos minerais.

## DUREZA RELATIVA

Diferenças de dureza entre os minerais podem implicar maior ou menor resistência da rocha à abrasão. Rochas com bandamento tectônico como os gnaisses, por exemplo, possuem bandas quartzo-feldspáticas e bandas micáceas com consequentes diferenças de dureza (quartzo e feldspato 6 - 7 na escala Mohs e micas 2-3) que proporcionarão diferentes resistências ao desgaste (Vide Figura 7). Esta propriedade pode ser medida em um microdurômetro com indentador Knoop ou Vickers. Haja vista que tanto a dureza Knoop, quanto a dureza Vickers são ensaios de dureza de micro-impressão na superfície avaliada, quanto maior a impressão produzida, menor a dureza da rocha.

Quitete e Kahn (2002) mostram com base em estudos anteriores que a dureza Knoop (*Hardness Knoop* – HK) pode ser expressa como a média das 40 medidas ( $HK_{média}$ ) obtidas a partir da impressão causada por uma ponta de diamante (indentador) - ou como valores intermediários obtidos em diagrama de valores individuais em ordem crescente:  $HK_{25}$  (25% do diagrama),  $HK_{50}$  (metade do diagrama) e  $HK_{75}$  (75% do diagrama). Mostram ainda que esses valores podem refletir, por exemplo, a influência dos minerais mais duros da rocha na abrasividade que a mesma apresenta ( $HK_{75}$ ) ou funcionar como indicador de desgaste por abrasão mostrando que minerais com menor dureza se desgastariam de forma efetiva ao passo que minerais mais duros seriam removidos por escarificação ( $HK_{25}$ ) ou como um valor de aproximado da dureza média da rocha ( $HK_{50}$ ).

## GRAU DE ALTERAÇÃO

As rochas expostas à ação integrada dos componentes químicos da atmosfera, às variações de temperatura, à atuação química e mecânica exercida pelos microrganismos têm seus componentes desintegrados e/ou decompostos, segundo o fenômeno denominado intemperismo, que consiste em um conjunto de processos, por meio dos quais as rochas se desintegram e se decompõem na superfície da crosta.

A alteração intempérica se inicia em rochas submetidas a condições ambientais diferentes daquelas onde se formaram. Silva (2009) mostra que, de modo geral, as causas que determinam o intemperismo pertencem a duas grandes categorias que normalmente operam em conjunto: a primeira agrupa as causas ditas externas (processos físicos ligados às variações de temperatura e umidade); a segunda compreende as causas ditas internas, inerentes à natureza do material que é intemperizado, como por exemplo, àqueles relacionados aos fatores geológicos mencionados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Principais agentes e mecanismos de alteração das rochas.

Físico-mecânicos	Mecânicos	Geológicos	Biológicos
Temperatura, radiação solar, umidade relativa do ar; pressão (latitude, altitude, grau de confinamento)	Fraturamento, lascamento, deslocamento de blocos e fragmentos finos (variações diárias ou sazonais de temperatura)	Mineralogia, textura, granulacão, cristalinidade, grau de reatividade do mineral frente aos demais agentes (taxa de dissolução), dureza, porosidade e permeabilidade	Ação mecânica de microrganismos e plantas superiores; desenvolvimento de microrganismos (metabolismo orgânico)
Gases componentes atmosféricos	Ação eólica (correntes de ventos)		Ação química dos restos de organismos (produtos de decomposição orgânica, e. g. fezes de pombos)
Hidrosfera (água, pH de soluções aquosas superficiais)	Ação hidráulica (pingos de chuva e concentração de drenagem superficial em locais restritos)		Antropogênico (atividade humana)

Fonte: Modificado de Silva (2009).

Tais fatores, ligados às características intrínsecas das rochas, determinam sua alterabilidade. A alterabilidade de rochas define-se pela capacidade que a rocha possui em se alterar ao longo do tempo “humano” onde as reações ocorrem concomitantemente ao uso. Diferente da alteração intempérica, onde o tempo que se considera é o geológico (AIRES-

BARROS, 1991, 2001). Este autor descreve que a alteração ou grau de alteração de uma rocha que está exposta às ações intempéricas (meteóricas), depende fundamentalmente de fatores intrínsecos à sua natureza e das características, intensidade e tempo de atuação dos fatores extrínsecos. Silva (2009) acrescenta que as características inerentes à rocha podem ser profundamente modificadas desde as operações de extração do material nas pedreiras até seu beneficiamento nas marmorarias.

O intemperismo químico age de forma diferente em cada tipo de mineral. Para ilustrar os efeitos que tais alterações podem causar no processo de polimento, tomando como base uma rocha com composição granítica, lembramos que minerais ferromagnesianos (biotita *e.g.*) tendem à oxidação que, por sua vez, danifica suas estruturas fazendo com que fiquem mais friáveis que minerais como o quartzo e os feldspatos.

Os diferentes estágios de alteração, para estes tipos de minerais quando em uma mesma rocha, dependendo de suas dispersões, definirão resistências diferentes à abrasão (dureza relativa) e podem, inclusive, potencializar o desgaste das ferramentas abrasivas por intermédio do aumento do grau de abrasividade da rocha.

## GRAU DE ABRASIVIDADE

As relações de contato, os graus de alteração dos minerais, suas durezas e tenacidades, em algumas combinações, podem implicar maior ou menor resistência ao desgaste.

A abrasividade da rocha é uma função da quantidade e do tamanho médio dos grãos de quartzo e outros minerais abrasivos na rocha e da cimentação da mesma. O conteúdo

em quartzo proporciona uma medida conveniente da abrasividade da rocha para uma ampla gama de tipos de rocha. Entretanto, é fundamental investigar vários tipos de minerais presentes nas rochas, seus conteúdos e influências nas taxas de consumo das ferramentas abrasivas (YARALI *et al.*, 2008).

Existem vários métodos para identificar a abrasividade da rocha e, entre eles, um ensaio comumente utilizado para quantificar essa propriedade é o Índice Cerchar de Abrasividade (CAI).

Antes de definir e implementar máquinas de escavação em minas ou obras de engenharia como túneis, por exemplo, é fundamental que sejam determinadas as propriedades físicas e mecânicas das rochas para que seja estimado o consumo das ferramentas abrasivas e, obviamente a resistência oferecida pelos diferentes tipos de rocha ao desgaste.

Er & Tugrul (2016) ao relacionar, por regressão, CAI e as propriedades físico-mecânicas de diferentes rochas graníticas encontraram uma forte correlação entre o valor CAI, o conteúdo de quartzo e o tamanho dos grãos de quartzo nas rochas graníticas. Além disso, constataram que o CAI aumentou à medida que as resistências à compressão uniaxial e à tração indireta das rochas estudadas aumentaram e que a rugosidade da superfície, a ondulação e número de picos nas rochas graníticas levam a um aumento do CAI.

Logo, é possível notar que a rugosidade da superfície antes do polimento deve ser considerada na avaliação da eficiência do processo.

### 3.3 | Máquinas e Abrasivos

#### MÁQUINAS

Atualmente o setor industrial conta, para o polimento de diversas variedades litológicas, com politrizes semiautomáticas e automáticas. Silveira *et al.* (2014b) dão uma noção de quando surgiram e como são constituídos estes equipamentos e seus componentes.

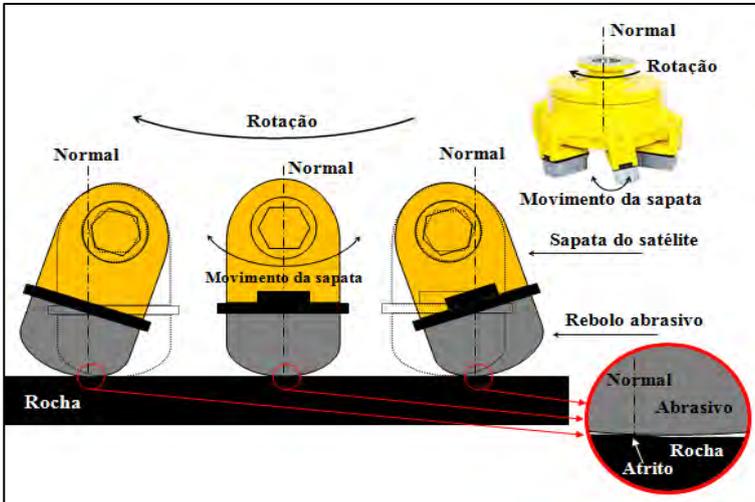
**Politrizes semiautomáticas:** surgiram em meados dos anos de 1970 apresentando ponte móvel com bancada fixa. São constituídos por um conjunto moto-redutor que aciona um cabeçote de polimento, suportado por uma ponte, que se desloca sobre trilhos, obtendo-se assim uma variedade de movimentos simultâneos sobre a superfície a ser polida, semelhante ao aplicado pelo operador na politriz manual (restrita às pequenas marmorarias e cada vez mais em desuso) e ainda podendo-se imprimir uma pressão de trabalho uniforme, constante e mais elevada.

**Politrizes automáticas:** surgiram no final da década de 1970 apresentando um chassi de ferro fundido ou aço que assenta uma bancada ou mesa perfeitamente plana, sobre a qual corre uma esteira de borracha que transporta as chapas a serem polidas. Sobre esta esteira e disposta longitudinalmente a ela, é montada uma trave que sustenta os conjuntos moto-redutor e cabeçote e realiza um movimento transversal sobre a mesa.

A conjugação do movimento da esteira que conduz as chapas, com o movimento de rotação dos cabeçotes e o movimento transversal da trave, proporciona todos os movimentos necessários à ação dos abrasivos no processo de polimento. Os abrasivos são colocados nos cabeçotes em sequência, do

grão maior para o menor, no sentido de movimentação das placas, de modo que ao sair no final da esteira o material esteja polido. O processo de polimento de rochas ornamentais e para revestimento se dá, principalmente, com o uso de dois dispositivos: satélites e pratos.

**Satélites:** nos satélites, são acoplados os rebolos abrasivos (de quatro a oito abrasivos, sendo seis a quantidade de uso comum). Os satélites possuem braços ou sapatas onde os rebolos abrasivos são acoplados e que realizam movimentos pendulares (Figura 8) que, devido a forma convexa do abrasivo, permite que o mesmo fique com uma porção linear em contato com a superfície da rocha a ser polida (SILVEIRA *et al.*, 2014b).

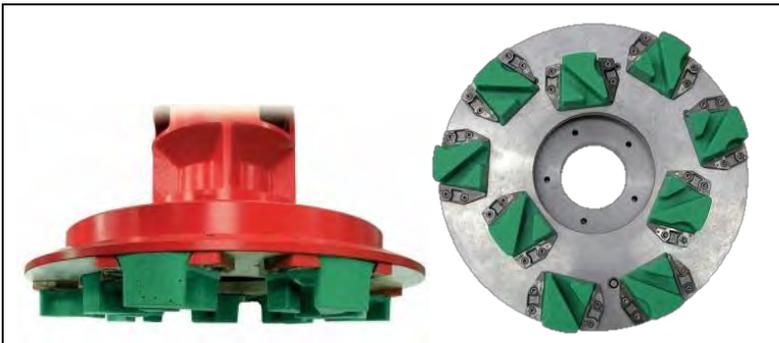


Fonte: Autores.

**Figura 8.** A dinâmica da movimentação das sapatas no satélite, durante o desgaste abrasivo a dois corpos de rochas, com o uso de abrasivos do tipo setor.

O movimento vertical realizado pelo conjunto (satélite + abrasivos) impõe cargas às superfícies rochosas, a rotação faz com que os rebolos abrasivos girem provocando o desbaste e a movimentação transversal permite que toda a área da chapa de rocha a ser polida seja contemplada pela passagem do rebolo abrasivo.

**Pratos:** para o polimento de rochas carbonáticas o dispositivo utilizado no processo não é o mesmo utilizado para polir rochas silicáticas, em função da menor dureza que esses tipos litológicos apresentam quando comparados às rochas silicáticas. O dispositivo utilizado para este fim é o prato (Figura 9), diferenciado do satélite principalmente por não apresentar o movimento tangencial dos rebolos e pela utilização dos rebolos do tipo Frankfurt, que possuem geometria e composição específicas para processar o beneficiamento dessas rochas (SILVEIRA *et al.*, 2014b).



Fonte: Breton (2016).

**Figura 9.** Vistas frontal e inferior de um prato utilizado para polimento de rochas carbonáticas com abrasivos do tipo Frankfurt acoplados.

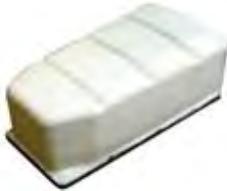
## ABRASIVOS

Segundo Silveira *et al.* (2014b), os abrasivos para polimento de rochas ornamentais são divididos, basicamente, em dois grupos: abrasivos magnesianos e abrasivos diamantados. Entretanto, há ainda os abrasivos de lustro, em que os ligantes (em geral, resinas epóxi) e elementos abrasivos (micronizados), ou seja, seus constituintes são mantidos sob sigilo industrial.

Para o polimento de rochas graníticas utilizam-se os abrasivos do tipo setor ou tijolo e, para polir rochas carbonáticas, os abrasivos no formato Frankfurt (Tabelas 3, 4 e 5).

**Abrasivos magnesianos:** usam como ligante o óxido de magnésio (MgO) e como elemento abrasivo o carbeto de silício (SiC). Estes abrasivos (Tabela 3) são fabricados em todas as granulometrias necessárias ao beneficiamento de chapas.

**Tabela 3.** Abrasivos magnesianos para o polimento de rocha.

Para rochas graníticas	Para rochas carbonáticas
01 	02 

Fonte: 01 e 02 Alicante (2016).

**Abrasivos diamantados:** compostos por diamante, como elemento de corte, envolvido por resina epoxídica ou por liga metálica, estes abrasivos (Tabela 4) são os que representam a maior evolução tecnológica dos últimos anos referente a polimento de rocha, pois relacionados ao seus usos estão o aumento da produtividade e da qualidade final das superfícies acabadas, melhor qualidade da água reciclada, diminuição no consumo de energia elétrica, menor pressão de trabalho, redução do tempo morto, entre outras vantagens.

**Tabela 4.** Abrasivos diamantados para o polimento de rocha.

Diamantados metálicos		Diamantados resinóides	
01	02	03	04
			

Fonte: 01 - Máxima (2016); 02, 03 e 04 Alicante (2016).

**Legenda:** 01 e 03 para polimento de rochas silicáticas; 02 e 04 para polimento de rochas carbonáticas.

**Abrasivos de lustro:** embora sua exata composição seja mantida sob sigilo industrial, sua função no processo de polimento é finalizar o fechamento da superfície com um acabamento “mais fino”, ou seja, diminuir ao máximo a rugosidade da superfície acabada correspondendo, geralmente, à etapa final do polimento. Na tabela 5 é possível visualizar alguns formatos para estes abrasivos comercializados.

**Tabela 5. Ilustração dos abrasivos de lustro**

Para dar lustro a granitos	Para dar lustro a mármore
<p data-bbox="344 695 366 715">01</p> 	<p data-bbox="724 695 745 715">02</p> 

Fonte: 01 - Nebrax (2016); 02 - Alicante (2016).

#### **4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS**

É possível notar que o processo de polimento de rochas ornamentais, abordado neste trabalho, apresenta uma gama considerável de variáveis que interagem entre si e constroem um sistema tribológico no qual os principais atores são a rocha, a máquina de polir e o rebole abrasivo. Este trabalho é o primeiro de um grupo de publicações referentes a esse tema, que visa dar uma visão holística deste processo industrial, considerando procedimentos de controle de qualidade, principais avanços tecnológicos e sustentabilidade. No tocante à inovação tecnológica o CETEM tem tido uma participação maciça ao longo de toda a cadeia produtiva de rochas ornamentais. Sua contribuição vem sendo mais efetiva no que tange o desenvolvimento de produtos ou processos ecoeficientes, com pedidos de privilégio de patente além de publicações em revistas e congressos que tratam do tema.

## **5 | AGRADECIMENTOS**

O autor Thiago Motta Bolonini, bolsista do Programa de Capacitação Institucional do CETEM, agradece ao CNPq a bolsa concedida, referente ao processo nº 313016/2015-1.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES-BARROS, L. Alteração e alterabilidade de rochas. Imprensa Nacional, Casa da Moeda, Lisboa, 1991.
- AIRES-BARROS, L. As rochas dos monumentos portugueses. Tipologias e patologias. Ministério da Cultura. Instituto Português do Patrimônio Arquitetônico. Lisboa, vol. 2, 535 p., 2001.
- 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.
- 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, C. S. Mapa de mecanismos de desgaste de compósitos diamantados de matriz metálica sinterizados. Tese de doutorado. Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Rio de Janeiro, 169p., 2014.
- COIMBRA FILHO, C. G. Relação entre processo de corte e qualidade de superfícies serradas de granitos ornamentais. Dissertação de Mestrado, EESC-USP, 168p., 2006.

- CRÓSTA, A. P.; SANTOS, A. R. CHOUDHURI, A.; NEVES, B. B. B.; ALVARENGA, C. J. S.; SCHOBENHAUS, C.; CARNEIRO, C. D.; DIAS-BRITO, D.; GUIMARÃES, E. M.; DANNI, J. C. M.; SILVA, J. G. R.; ARAUJO FILHO, J. O.; WINGE, M.; BLUM, M. L. B.; SANTOS, M. D.; PIMENTEL, M. M.; BOTELHO, N. F.; BOGGIANI, P. C.; D'ÁVILA, R. S. F. Glossário Geológico Ilustrado, CPRM- Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>. Acesso em: 13 de junho de 2016.
- ER, S.; TUGRUL, A. Correlation of physico-mechanical properties of granitic rocks with Cerchar Abrasivity Index in Turkey. *Measurements*, 22p., 2016.
- ERDOGAN, M. Measurements of polished rock surface brightness by image analysis method. *Engineering Geology*, n. 57, p. 65-72, 2000.
- ERICHSEN. M. Ensaio de Superfícies. Brilho. Disponível em: <http://www.erichsen.de/ensaio-de-superficies/brilho>. Consultado em: 10 de março de 2015.
- HIBBARD, M. J. Physical attributes of rocks. In: *Petrography to petrogenesis*. 308 p., 1995.
- KASCHNER, D. Tecnologias para beneficiamento. In: *II Encontro do Centro-Oeste Sobre Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais, Goiânia, Brasil*. 1996.
- KRANZ, R. L. Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*, n. 100, p. 449- 480, 1983.
- MCGRAW-HILL. *Dictionary of geology and mineralogy*, 2nd Edition, 420 p., 2003.
- NEVES, M. C. Estudo experimental do polimento de diferentes “granitos” e as relações com a mineralogia. *Dissertação de Mestrado, EESC-USP*, 115p., 2010.

- PIRATELLI, A. Rugosidade Superficial. 3º Seminário de Metrologia. Universidade Federal de Uberlândia. 16 a 18 de maio. 2011. Disponível em: <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/metrologia/?op=i>. Acesso em: 10 de outubro de 2014.
- POUGH, F. H. A field guide to rocks and minerals. 682 p., 1996.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H. Para entender a terra. 4ª Edição, 656 p. 2006.
- QUITETE, E. B.; KAHN, H. Dureza Knoop em rochas para revestimento: correlação com desgaste abrasivo. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/handle/cetem/1438>. Acesso em: 14 de junho de 2016.
- RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A. B.; SILVEIRA, L. L. L Granite sawing in multiblade gansaws: a tribological approach. In: XXXII International Geological Congress, Firenze, Italy. 2004.
- RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E.; SILVEIRA, L. L. L. Quantificação da textura superficial de chapas de granitos serrados em teares multilâminas. In: I Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, Guarapari – ES, 2005.
- SIAL, A. N.; MCREATH, I. Petrologia Ígnea. Os fundamentos e as ferramentas de estudo. 162 p., 1984.
- SILVA, J. A. Caracterização geológica e tecnológica de unidades gnáissicas e graníticas do sudoeste de Mato Grosso para fins de exploração como rochas ornamentais e para revestimento. Rio Claro, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista. 160 p. 2009.
- SILVEIRA, L. L. L. Polimento de rochas ornamentais: um enfoque tribológico ao processo. Livro, Editora Pós-Escrito, 203p, Curitiba-Paraná. 2008.

- SILVEIRA, L. L. L.; CAMARGO, J. L.; DORIGO, W.; ARTUR, A. C. Importância da velocidade de corte na otimização da etapa de polimento de rochas ornamentais. *Holos*, Ano 30, vol. 3, Edição Especial – XXV ENTMME/ VII MSHNT, 220-226 p., 2014a.
- SILVEIRA, L. L. L.; VIDAL, F. W. H.; SOUZA, J. C. Beneficiamento de rochas ornamentais. In: *Tecnologia de Rochas Ornamentais. Pesquisa, Lavra e beneficiamento*. CETEM, MCTI, Rio de Janeiro, 678 p., 2014b.
- STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. *Engineering Tribology*, Amsterdam, Elsevier. 1993.
- TUGRUL, A.; ZARIF, I. H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, n. 51, p. 303-317, 1999.
- 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.
- YARALI, O.; YASAR, E.; BACAK, G.; RANJITH, P. G. A study of rock abrasivity and tool wear in Coal Measures Rocks. *International Journal of Coal Geology*, vol. 74, 53-66 p., 2008.
- ZUM-GAHR, K. H. *Microstructure and wear of materials*. Institute of Materials Technology. University of Siegen. Federal Republic of Germany. 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 2015, 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-17 - Beneficiamento do sienito de Tanguá-RJ para produção de fertilizante alternativo de potássio.** Adão Benvindo da Luz, Luiz Carlos Bertolino, José Mario Coelho e Ronald Sousa Armando, 2013.

**SRMI-16 - Alterações causadas em rochas ornamentais pelo efeito do ácido úrico e da ureia presentes na urina.** Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Núria Fernández Castro, Joedy Patrícia Cruz Queiróz e Vanessa Machado Daniel, 2011.

**SRMI-15 - O potencial dos agrominerais alternativos na região Nordeste do Brasil.** Marcelo Soares Bezerra, 2010.

## **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 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)

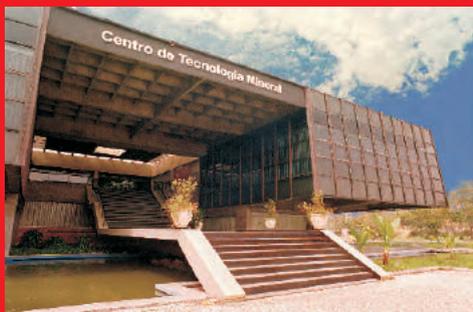
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **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 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 38 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.